

DEKOMPOSITION DES STRAHLUNGSFELDES EINES  
MEDIZINISCHEN ELEKTRONENLINEARBESCHLEUNIGERS  
ZUR ERMITTLUNG DER  
STRAHLUNGSFELDKOMPONENTEN UND DEREN ANTEIL  
AN DER DOSIS AUSSERHALB GEOMETRISCHER  
FELDGRENZEN ANHAND VON  
MONTE-CARLO-SIMULATIONEN MIT DEM CODE  
MCNP6

Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Dr. rer. med.

an der Medizinischen Fakultät der Universität Leipzig

eingereicht von: Dipl.-Phys. Christian Grachtrup  
geboren am 18.03.1977 in Warendorf

angefertigt am: Universitätsklinikum Leipzig AöR  
Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie

Betreuer: Prof. Dr. med. Thomas Kuhnt  
Ko-Betreuer: Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Wolf

Beschluss über die Verleihung des Doktorgrades vom: 22.11.2022

*Für meine Familie*

---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Konformale Strahlentherapie . . . . .	1
1.2	Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen . . . . .	2
1.3	Strahleninduzierte Krebserkrankungen . . . . .	3
1.3.1	Zweitkrebserkrankungen . . . . .	4
1.4	Studienlage mit Bezug auf die vorliegende Arbeit . . . . .	6
1.5	Offene Fragestellungen . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>13</b>
3.1	Medizinischer Elektronenlinearbeschleuniger . . . . .	13
3.2	Die Monte-Carlo-Methode in der Strahlenphysik . . . . .	16
3.3	Der Monte-Carlo-Code MCNP6 . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Materialien und Methoden</b>	<b>21</b>
4.1	Generelles Vorgehen . . . . .	21
4.2	Modellbildung . . . . .	22
4.2.1	Strahlerkopf . . . . .	22
4.2.2	Elektronenstrahlungsquelle . . . . .	25
4.2.3	Dosisverteilungen des realen Beschleunigers . . . . .	27
4.2.4	Wasserphantom . . . . .	27
4.3	Dosisbestimmung . . . . .	28
4.4	Generierung der Strahlungsfeldkomponenten . . . . .	29
4.4.1	Targetsystem . . . . .	30
4.4.2	Primärblende . . . . .	30
4.4.3	Ausgleichsfilter . . . . .	30
4.4.4	Winkelanalysescheibe . . . . .	31
4.4.5	Blockblende . . . . .	32
4.4.6	Lamellenblende . . . . .	35
4.4.7	Wasserphantom . . . . .	36
4.5	Untersuchung des Einflusses ausgewählter Parameter auf die Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen . . . . .	38
4.5.1	Feldgröße . . . . .	38
4.5.2	Wassertiefe . . . . .	38
4.5.3	Hauptebene . . . . .	38
4.5.4	Ausgleichsfilter . . . . .	38

4.6	Durchführung der Monte-Carlo-Simulationen . . . . .	39
4.6.1	Simulationsparameter . . . . .	39
4.6.2	Varianzreduktionsverfahren . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>41</b>
5.1	Elektronenstrahlungsquelle . . . . .	42
5.2	Strahlungsfeldkomponenten Targetsystem . . . . .	48
5.2.1	Einfluss der Hauptebene . . . . .	49
5.2.2	Einfluss der Feldgröße . . . . .	49
5.2.3	Einfluss der Wassertiefe . . . . .	49
5.2.4	Einfluss des Ausgleichsfilters . . . . .	50
5.2.5	Zwischenzusammenfassung . . . . .	50
5.3	Strahlungsfeldkomponente Primärblende . . . . .	51
5.3.1	Einfluss der Hauptebene . . . . .	52
5.3.2	Einfluss der Feldgröße . . . . .	52
5.3.3	Einfluss der Wassertiefe . . . . .	52
5.3.4	Einfluss des Ausgleichsfilters . . . . .	52
5.3.5	Zwischenzusammenfassung . . . . .	52
5.4	Strahlungsfeldkomponente Ausgleichsfilter . . . . .	53
5.5	Strahlungsfeldkomponenten Winkelanalysescheibe . . . . .	60
5.5.1	Einfluss der Feldgröße . . . . .	60
5.5.2	Einfluss der Wassertiefe . . . . .	61
5.5.3	Einfluss des Ausgleichsfilters . . . . .	61
5.5.4	Zwischenzusammenfassung . . . . .	62
5.6	Strahlungsfeldkomponenten Blockblende . . . . .	66
5.6.1	Hauptebene Cross-Plane . . . . .	66
	Einfluss der Feldgröße . . . . .	67
	Einfluss der Wassertiefe . . . . .	67
	Einfluss des Ausgleichsfilters . . . . .	67
	Strahlungsfeldkomponenten der wirksamen Kanten . . . . .	68
5.6.2	Hauptebene In-Plane . . . . .	68
	Einfluss der Feldgröße . . . . .	69
	Einfluss der Wassertiefe . . . . .	69
	Einfluss des Ausgleichsfilters . . . . .	69
	Strahlungsfeldkomponenten der wirksamen Kanten . . . . .	70
5.6.3	Zwischenzusammenfassung . . . . .	71
5.7	Strahlungsfeldkomponenten Lamellenblende . . . . .	84
5.7.1	Hauptebene In-Plane . . . . .	84
5.7.2	Hauptebene Cross-Plane . . . . .	85
	Einfluss der Feldgröße . . . . .	85
	Einfluss der Wassertiefe . . . . .	85
	Einfluss des Ausgleichsfilters . . . . .	85
	Strahlungsfeldkomponenten der wirksamen Kanten . . . . .	85
5.7.3	Zwischenzusammenfassung . . . . .	86

---

5.8	Strahlungsfeldkomponenten Eintrittsfläche Wasserphantom . . . . .	100
5.8.1	Einfluss der Feldgröße . . . . .	104
5.8.2	Einfluss der Wassertiefe . . . . .	104
5.8.3	Einfluss des Ausgleichsfilters . . . . .	105
5.8.4	Zwischenzusammenfassung . . . . .	106
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>123</b>
6.1	Diskussion der Methoden . . . . .	123
6.2	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	125
6.2.1	Targetsystem . . . . .	125
6.2.2	Primärblende . . . . .	126
6.2.3	Winkelanalysescheibe . . . . .	126
6.2.4	Blockblende / Lamellenblende . . . . .	128
6.2.5	Eintrittsfläche Wasserphantom . . . . .	130
6.3	Ausblick . . . . .	131
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung der Arbeit</b>	<b>133</b>
	<b>Literatur</b>	<b>139</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>151</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>165</b>
	<b>Quellcodeverzeichnis</b>	<b>167</b>
	<b>Anhang</b>	<b>169</b>
<b>A</b>	<b>Ausgewählte Quellcodes</b>	<b>169</b>
A.1	Vakuum für Elektronenstrahlquelle . . . . .	169
A.2	Elektronenstrahlquelle . . . . .	169
A.3	Elektronenstrahl-Austrittsfenster . . . . .	169
A.4	Targetsystem . . . . .	170
A.5	Primärblende . . . . .	171
A.6	Ausgleichsfilter . . . . .	172
A.7	Dosismonitorsystem . . . . .	173
A.8	Spiegel . . . . .	173
A.9	Wasserphantom . . . . .	174
A.10	Blockblende . . . . .	174
A.11	Lamellenblende . . . . .	175
A.12	Definition der Materialien . . . . .	177
A.13	Varianzreduktion . . . . .	177
A.14	Abschneideenergien . . . . .	178
A.15	Elektronentransportalgorithmus . . . . .	178

A.16	Strahlenquelle . . . . .	178
A.17	Abbruchkriterium . . . . .	179
A.18	Ergebnisermittlung . . . . .	179
<b>B</b>	<b>Ausgewählte Befehle von MCNP6</b>	<b>181</b>
B.1	Flächen . . . . .	181
B.2	Zellen . . . . .	181
B.3	Materialien . . . . .	181
B.4	Strahlenquellen . . . . .	182
B.5	Ergebnisermittlung . . . . .	182
B.5.1	Markierung von Strahlungsteilchen . . . . .	182
<b>C</b>	<b>Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse</b>	<b>185</b>
C.1	Betriebsweise mit Ausgleichsfilter . . . . .	186
C.1.1	Feldgröße 20 cm × 20 cm . . . . .	186
C.1.2	Feldgröße 10 cm × 10 cm . . . . .	188
C.1.3	Feldgröße 5 cm × 5 cm . . . . .	190
C.2	Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter . . . . .	192
C.2.1	Feldgröße 20 cm × 20 cm . . . . .	192
C.2.2	Feldgröße 10 cm × 10 cm . . . . .	194
C.2.3	Feldgröße 5 cm × 5 cm . . . . .	196
	<b>Publikationen</b>	<b>199</b>
	<b>Erklärung über die eigenständige Abfassung der Arbeit</b>	<b>201</b>
	<b>Curriculum Vitae</b>	<b>203</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>205</b>

## Abkürzungsverzeichnis

Bezeichnung	Beschreibung
3D-CRT	3 Dimensional-Conformal Radio Therapy, engl. für 3-dimensionale konformale Strahlentherapie
ALARA	As Low As Reasonably Achievable, engl. für „so niedrig, wie vernünftigerweise zu erreichen“, Gebot zur Optimierung der Strahlenanwendung [Sie59]
ICRP	International Commission on Radiological Protection, engl. für Internationale Strahlenschutzkommission
IGRT	Image Guided Radiation Therapy, engl. für bildgeführte Strahlentherapie
IMAT	Intensity Modulated Arc Therapy, engl. für intensitätsmodulierte Rotationsbestrahlung
IMRT	Intensity Modulated Radiation Therapy, engl. für intensitätsmodulierte Strahlentherapie
L.-Satz	Lamellensatz
MCNP6	Monte-Carlo-N-Particle-Code6
MLC	Multileaf-Collimator, engl. für Lamellenblende
Norm.	Normierung
rel. Dosis	relative Dosis
Strl.-Feld	Strahlenfeld
Strl.-feldachse	Strahlenfeldachse
VMAT	Volumetric Intensity Modulated Arc Therapy, engl. für Volumetrisch modulierte Rotationsbestrahlung

Symbolverzeichnis

Bezeichnung	Beschreibung
CF	Cell Flagging, die Markierung eines Photons nach Passage durch eine Zelle
CP	Hauptebene Cross-Plane
$E_{El}$	Mittlere Elektronenenergie der Strahlenquelle
F	Fläche
FF	Flattening-Filter, Betriebsweise des Linearbeschleunigers mit Ausgleichsfilter
FFF	Flattening-Filter-Free, Betriebsweise des Linearbeschleunigers ohne Ausgleichsfilter
FG	Feldgröße
HE	Hauptebene
IP	Hauptebene In-Plane
OfD	Out-of-field-Dose, Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen im Wasserphantom
$OfD_{WT;FG}^{HE;BW;SFK}$	Dosis in einem Voxel außerhalb geometrischer Feldgrenzen in der Hauptebene HE, der Betriebsweise BW bezüglich des Ausgleichsfilters, der Wassertiefe WT, der Feldgröße FG und der Strahlungsfeldkomponente SFK
$\overline{OfD}_{WT;FG}^{HE;BW;SFK}$	Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen in der Hauptebene HE, der Betriebsweise bezüglich des Ausgleichsfilters BW, der Wassertiefe WT, der Feldgröße FG und der Strahlungsfeldkomponente SFK
$OfDD_{WT;FG}^{HE;BW;SFK}$	Dosisverteilung außerhalb geometrischer Feldgrenzen in der Hauptebene HE, der Betriebsweise bezüglich des Ausgleichsfilters BW, der Wassertiefe WT, der Feldgröße FG und der Strahlungsfeldkomponente SFK
SF	Surface Flagging, die Markierung eines Photons nach Passage durch eine Fläche
SFK	Strahlungsfeldkomponente
Z	Zelle



## Glossar

### **Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen**

Dosis in einem Voxel, das sich außerhalb der geometrischen Feldgrenzen im Wasserphantom befindet.

### **Feld-Mittellinie**

Schnittlinie zwischen einer Hauptebene und einer Feldebene [DIN 6814-8-00].

### **Feldebene**

Ebene senkrecht zum Zentralstrahl in anzugebendem Abstand vom Fokus [DIN 6814-8-00].

### **Strahlenfeld**

Von Strahlung erfüllter räumlicher Bereich, der innerhalb der vom Target ausgehenden, die wirksamen Kanten des Blendensystems schneidenden geometrischen Strahlen liegt, auch geometrisches Strahlenfeld genannt (in Anlehnung an [DIN 6814-8-00]).

### **Strahlenfeldachse**

Geometrischer Strahl, der vom Target ausgehend durch die geometrische Mitte der Strahlenfeldfläche verläuft (in Anlehnung an [DIN 6814-8-00]).

### **Strahlungsfeld**

Räumliche Verteilung von Strahlung im Vakuum oder in Materie [DIN 6814-8-00]

### **Strahlungsfeldkomponente**

Eine Strahlungsfeldkomponente beinhaltet Photonen, die durch eine Zelle oder Fläche mit Hilfe der in MCNP6 implementierten Funktionen „`cell flagging`“ bzw. „`surface flagging`“ markiert wurden. Die Bezeichnung einer Strahlungsfeldkomponente erfolgt nach dem Namen des markierenden Objektes. Beispiel: Photonen erhalten eine Markierung durch die Zelle Nr. 30 (Ausgleichsfilter). Die Bezeichnung lautet damit: „Strahlungsfeldkomponente des Ausgleichsfilters“ oder auch „Strahlungsfeldkomponente der Zelle Nr. 30“.

### **Wirksame Kanten des Blendensystems**

Kanten des Blendensystems, welche die Gesamtheit der vom Target ausgehenden und das Blendensystem nicht tangierenden geometrischen Strahlen umschließt (in Anlehnung an [DIN 6814-8-00]).

### **Zentralachse**

Strahlenfeldachse regulärer Strahlenfelder (in Anlehnung an [DIN 6814-8-00]).



# KAPITEL 1

---

## Einführung

---

### Inhaltsübersicht

1.1	Konformale Strahlentherapie . . . . .	1
1.2	Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen . . . . .	2
1.3	Strahleninduzierte Krebserkrankungen . . . . .	3
1.3.1	Zweitkrebserkrankungen . . . . .	4
1.4	Studienlage mit Bezug auf die vorliegende Arbeit . . . . .	6
1.5	Offene Fragestellungen . . . . .	8

### 1.1 Konformale Strahlentherapie

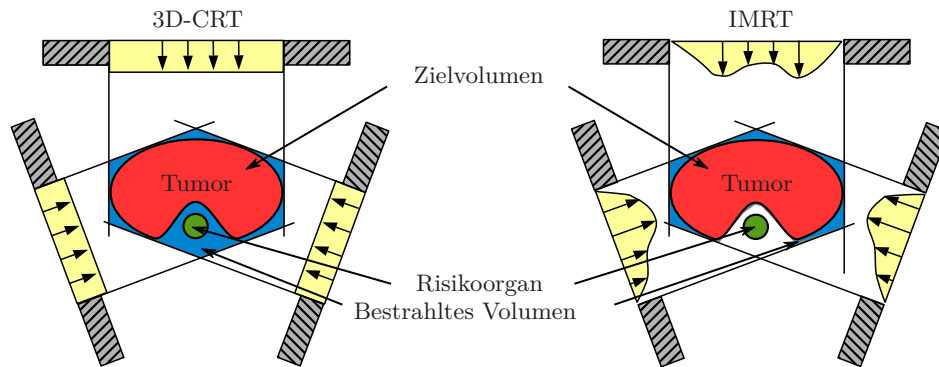
Das Ziel der Therapie mit ionisierender Strahlung ist die Applikation einer ausreichend hohen Strahlendosis zur Vernichtung aller Zellen eines malignen Tumors. Im Allgemeinen ist dies eine diffizile Aufgabe, da Tumore oftmals von Organen umgeben sind, die eine hohe Strahlensensibilität aufweisen. Diese sogenannten Risikoorgane sind bei der Strahlentherapie bestmöglich zu schützen. Die Einführung der konformalen Bestrahlungstechnik ist ein wichtiger Schritt zur Erreichung des Ziels gewesen. Das Prinzip hierbei ist die Formung eines Hochdosisvolumens, das konform mit dem Zielvolumen ist [Tak65]. Es wird grundsätzlich zwischen zwei Techniken zur Dosis-Konformierung unterschieden [May07; Pod05; Sch06]:

Bei der dreidimensionalen konformalen Strahlentherapie (3D-CRT), die auch Vielfelder-technik genannt wird, erfolgt die Anpassung der Dosisverteilung im Zielvolumen durch Strahlenfelder mit homogener Fluenz, die aus unterschiedlichen Richtungen in das Zielvolumen einwirken (Abb. 1.1 S. 2). Die homogene Fluenz der Felder führt hierbei zu einer konvexen Dosisverteilung. Die Lamellenblende (MLC) des medizinischen Elektronenlinearbeschleunigers ermöglicht die präzise Anpassung an die Kontur des Zielvolumens [May07; Pod05; Sch06].

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Dosisverteilung im Zielvolumen zusätzlich durch eine Fluenzmodulation zu konformieren. Das Verfahren ist unter dem Namen intensitätsmodulierte Strahlentherapie (IMRT) bekannt. Die Dosis-Konformierung bezieht sich bei diesem Verfahren nicht ausschließlich auf die geometrische Feldbegrenzung. Durch die Zerlegung eines Strahlenfeldes in einzelne kleinere Subfelder, deren jeweils homogene Fluenz unabhängig voneinander variiert werden kann, gelingt die Formung von konkaven Dosisverteilungen und somit die besondere Schonung von Risikoorganen (Abb. 1.1 S. 2).

In Abhängigkeit davon, ob die Bestrahlung erst bei in Position gebrachten Lamellen durchgeführt wird oder die Position der Lamellen kontinuierlich während der Bestrahlung

geändert wird, spricht man von statischer bzw. dynamischer IMRT. Rotiert die Strahlenquelle außerdem um den Patienten, während das Strahlenfeld moduliert wird, heißt das Verfahren **V**olumetric intensity **M**odulated **A**rc **T**herapy (VMAT) oder auch **I**ntensity **M**odulated **A**rc **T**herapy (IMAT) [May07; Pod05; Sch06].

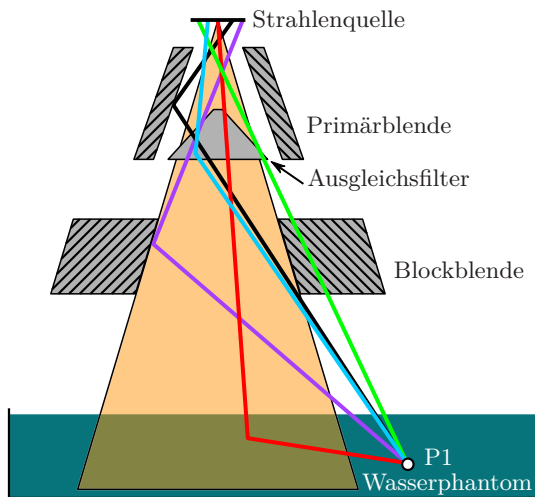


**Abbildung 1.1:** Gegenüberstellung der Dosisverteilungen der dreidimensionalen konformalen Strahlentherapie (links) und der intensitätsmodulierten Strahlentherapie (rechts). Strahlenfelder homogener Fluenz führen grundsätzlich zu einer konvexen Dosisverteilung. Befindet sich ein Risikoorgan in der Einbuchtung eines konkav geformten Tumors, erhält dieses zwangsläufig die gleiche Dosis wie der Tumor. Bei der IMRT wird die Fluenz jedes Strahlenfeldes derart angepasst, dass der Tumor eine höhere Fluenz erhält als die Felder, die das Risikoorgan passieren. Die Kombination ausreichend vieler Einzelfelder liefert dann die optimierte Dosisverteilung [Bor06a]. Die Abbildung wurde aus T. BORTFELD u. a. [Bor06a] nachskizziert.

## 1.2 Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen

Die Bestrahlung eines Patienten ist unvermeidbar mit einer Dosis außerhalb des Therapiestrahls, d. h. mit einer Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen, verbunden [Kas83; Kry17; Kry05; Ref06; She85; Van93], die gesundheitsschädigende Wirkung für den Menschen haben kann (Abschnitt 1.3 S. 3). Grund für das Auftreten der Dosis sind einerseits Wechselwirkungsprozesse der Photonen bei der Passage vom Entstehungsort, dem Target, im medizinischen Elektronenlinearbeschleuniger bis in das Zielvolumen im Patienten. Die Photonen werden an den verschiedenen Baugruppen des Linearbeschleunigers, insbesondere den Blenden, und, sofern vorhanden, dem Ausgleichsfilter sowie im Patienten selbst inelastisch gestreut (zur Compton-Streuung bspw. [Kri09]). Durch den Streuprozess ändert das Photon seine Energie und Flugrichtung. Es kann somit an einen Ort außerhalb der geometrischen Feldgrenzen im Patienten gelangen, wo es seine Energie deponiert und somit eine Dosis erzeugt (Abb. 1.2 S. 3). Ein weiterer Grund für das Auftreten der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen ist durch die sogenannte Durchlassstrahlung gegeben. Photonen des Strahlungsfeldes treten in diesem Fall nicht mit den Blenden zur Formung des geometrischen Strahlenfeldes in Wechselwirkung. Sie passieren diese ungehindert und können somit außerhalb des Zielvolumens auf den Patienten treffen und eine Dosis erzeugen (Abb. 1.2 S. 3). Der relative Anteil der Komponenten an der Dosis außerhalb der Feldgrenzen hängt von verschiedenen Parametern ab. Insbesondere sind dies der Aufbau des Beschleunigers, die Photonenenergie, die Feldgröße, die Tiefe im bestrahlten Medium

(Patient) und die Distanz von der Strahlenfeldachse [Kry10]. Im Allgemeinen überwiegt in der Nähe des geometrischen Strahlenfeldes die Streuung des Mediums, während weiter außerhalb die Durchlassstrahlung dominiert [Kas83; Kry10].



**Abbildung 1.2:** Schematische, nicht maßstabsgerechte Darstellung zur Entstehung der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen. Das geometrische Strahlenfeld ist orange dargestellt. Ausgewählte, mögliche Trajektorien von Photonen, die eine Dosis außerhalb der Feldgrenzen erzeugen, sind als farbige bzw. schwarze Linien dargestellt. Grün: Durchlassstrahlung durch Blockblende, Violett: Streuung an der wirksamen Kante der Blockblende, Schwarz: Streuung in der Primärblende, Blau: Streuung im Ausgleichsfilter, Rot: Streuung im Wasserphantom. Der betrachtete Punkt P1 steht dabei stellvertretend für einen beliebigen Punkt im Patienten außerhalb der geometrischen Feldgrenzen. Auf die Darstellung der Lamellenblende wurde aus Gründen der Übersicht verzichtet.

Die außerhalb der geometrischen Feldgrenzen auftretende Dosis findet bei der Planung der Bestrahlung für den Patienten im Allgemeinen keine Berücksichtigung, was insbesondere daran liegt, dass selbst moderne Bestrahlungsplanungssysteme große Ungenauigkeiten in Bezug auf deren Berechnung aufweisen [Far19; How10; Hua13; Joo11; Kry17; Sán20; Shi19]. Dies gilt sowohl für die dreidimensionale konformale Strahlentherapie [How10; Joo11; Shi19], als auch für die IMRT [Hua13]. Die meisten Studien kamen zu dem Ergebnis, dass die von den Bestrahlungsplanungssystemen berechnete Dosis im Vergleich zur Messung zu klein war. Zudem vergrößerte sich die Differenz mit wachsender Distanz zur Feldgrenze. In Bezug auf die gemessene Dosis betrug die Abweichung der berechneten mittleren Dosis  $-40\%$  bis  $-50\%$  [How10; Hua13]. Begründet wurde dies im Nahfeld mit der fehlenden Streuung an der Blende und bei größeren Distanzen mit einer Unterschätzung aller Beiträge zur Dosis außerhalb der Feldgrenzen [Hua13]. Für die Berechnung der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen sind daher alternative Methoden erforderlich.

### 1.3 Strahleninduzierte Krebserkrankungen

Ionisierende Strahlung kann gesundheitsschädigende Wirkung für den Menschen haben. Sie ist ein gut dokumentierter Risikofaktor für die Induktion von Krebserkrankungen [Pre07; Pre03] und deshalb seit vielen Jahren von der Weltgesundheitsorganisation, WHO, als krebserregend anerkannt [Eff08; El 09]. Darüber hinaus kann ionisierende Strahlung insbesondere Herzkrankheiten [Han93; Iva06; Kre06; Pre03] und Katarakte [Ain09; Bla10; Cho08; Cuc01; Ham93; Jon07; Mer72; Nak06; Ner07; Not66; Osm11; Raf05; Wil97; Wor07] verursachen.

Die Erkenntnisse zur Wirkung ionisierender Strahlung auf den Menschen stammen aus epidemiologischen Untersuchungen von Personengruppen, die aus unterschiedlichen Gründen einer Strahlenexposition ausgesetzt waren. Diesbezüglich von größter Relevanz

war die Untersuchung an den Überlebenden der Atombombenabwürfe auf Hiroshima und Nagasaki [Eff08; Paw08]. Weitere Informationen wurden aus Untersuchungen an Personengruppen gewonnen, die durch ihre berufliche Tätigkeit, als Patient oder als Betroffene von Atombombentests oder dem Reaktorunfall in Tschernobyl einer Strahlenexposition ausgesetzt waren [Eff08].

Bei der Strahleninduktion von Leukämie und soliden malignen Tumoren handelt es sich um einen stochastischen Effekt [Her06]. Die Erkrankung tritt damit erst Jahre oder Jahrzehnte nach der Strahleneinwirkung auf. Überdies ist es nicht möglich, eine strahlenbedingte Leukämie- oder Krebserkrankung von einer spontanen zu unterscheiden [All05]. Strahlenbedingte Leukämie- oder Krebserkrankungen können daher nur über statistische Verfahren nach einem ausreichend langen Beobachtungszeitraum ermittelt werden, etwa durch den Vergleich von zwei hinreichend großen Personengruppen, wovon eine strahlenexponiert wurde und in der Folge eine auffällige Häufigkeit an Erkrankungen auftritt.

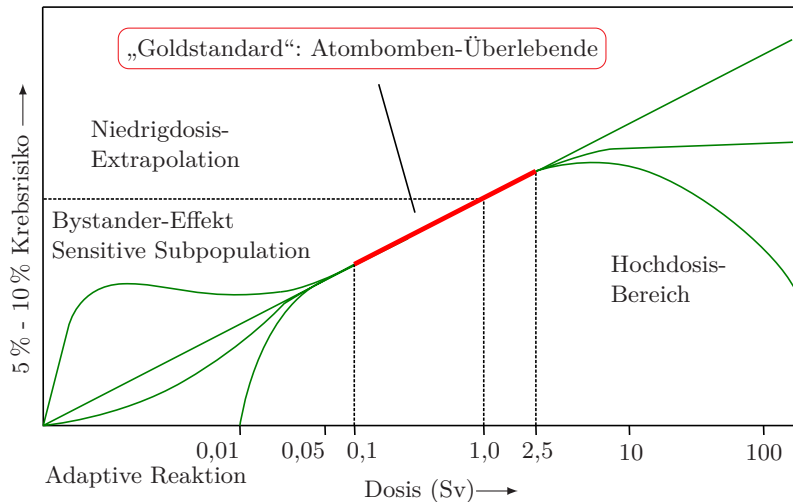
Die Abbildung 1.3 S. 5 zeigt die Dosis-Wirkungs-Beziehung für strahleninduzierte Krebserkrankungen [Hal06; New11]. Von 0,1 Sv bis 2,5 Sv ist ein linearer Zusammenhang erkennbar, der sich auf die Daten der Überlebenden der Atombombenabwürfe stützt. Für Dosiswerte kleiner als 0,1 Sv liegen keine statistisch gesicherten Erkenntnisse vor, was mit der vergleichsweise kleinen Wahrscheinlichkeit für eine strahleninduzierte Krebserkrankung zusammenhängt. Die internationale Strahlenschutzkommission, ICRP, empfiehlt für diesen Dosisbereich eine lineare Extrapolation (Linear-no-threshold (LNT)-Modell) [Mon08]. Hinsichtlich des Bystander-Effektes oder der Existenz strahlungsempfindlicher Subpopulationen unterschätzt das LNT-Modell möglicherweise das Krebs-Risiko [Mot04]. Andererseits würde eine adaptive Reaktion der Zellen auf eine Überschätzung des Risikos durch das LNT-Modell hindeuten [Bur10]. Die Wirkung niedriger Dosen auf den Menschen ist weiterhin Gegenstand der Forschung und in Diskussion [Bre06; Mul09; Tub09; Wak12]. Ebenfalls unsicher ist die Extrapolation bei hohen Dosen. Das Krebsrisiko könnte aufgrund der Zelltötung abnehmen, wie in der Childhood Cancer Survivor Study für das Schilddrüsenkarzinom als Sekundärneoplasie vorgeschlagen [Arm10], linear bleiben, wie es für das zentrale Nervensystem erscheint [Arm10], oder ein Plateau bilden, wie bei Studien zur Zweitkrebserkrankung in der Lunge und der Brust nach Strahlentherapie des Hodgkin-Lymphoms beobachtet [Sac05].

### 1.3.1 Zweitkrebserkrankungen

Die großen technischen Entwicklungen der vergangenen Jahrzehnte [Ber04; Buc05; Lic95], insbesondere die Einführung der IMRT, der VMAT und der IGRT<sup>1</sup> [Ver07], die heute, gemeinsam angewendet, als „State of the Art“ im Bereich der Photonen-Strahlentherapie gelten [Ver07], haben die Möglichkeit zur Applikation hoher Strahlendosen im Zielvolumen bei bestmöglicher Schonung von gesundem Gewebe und Risikoorganen erheblich verbes-

---

1 Die bildgeführte Strahlentherapie (Image Guided Radiotherapy) ermöglicht eine deutlich genauere Erfassung der Position des Tumors sowie dessen Bewegung bei der Bestrahlung. Demzufolge kann der im Planungs-Zielvolumen (Planing Target Volume - PTV) einbezogene Sicherheitssaum zur Berücksichtigung von räumlichen Lageveränderungen deutlich verkleinert werden [Ver07]. Angrenzende Organe erhalten eine kleinere Dosis, die Dosis im PTV kann zur Erhöhung der Tumorkontrolle erhöht werden.



**Abbildung 1.3:** Dosis-Wirkungs-Beziehung für strahleninduzierte Krebserkrankungen übernommen aus ERIC J. HALL [Hal06] und NEWHAUSER u. a. [New11]. Daten der Überlebenden der Atombombenabwürfe sind der „Goldstandard“ (0,1 Sv bis 2,5 Sv). Erhebliche Unsicherheiten bestehen bei kleineren und größeren Dosen [Hal06; New11].

sert [Bor06b; Web03]. Diese Verbesserung der Dosis-Konformierung bezieht sich jedoch auf die Dosis innerhalb der geometrischen Feldgrenzen. Die außerhalb der Feldgrenzen auftretende Dosis blieb dabei ohne Berücksichtigung [Kry17]. So wird durch die IMRT das mit einer hohen Dosis bestrahlte Volumen („Bestrahltes Volumen“ in Abb. 1.1 S. 2) im Vergleich zur 3D-CRT verkleinert. Dies geht jedoch mit einer Erhöhung der Anzahl kleinerer Felder aus verschiedenen Winkeln einher, weshalb wiederum ein größeres Volumen von gesundem Gewebe bzw. Organen bestrahlt wird. Außerdem erhöht sich die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen bedingt durch Durchlass- bzw. Streustrahlung aus dem Beschleunigerkopf [Fol97; Hal03; Hal06; How06; Kry05], da sich, zum Erreichen der erforderlichen Dosis im Zielvolumen, bei der IMRT im Vergleich zur 3D-CRT die Anzahl der Monitoreinheiten etwa verdoppelt bis verdreifacht [New11]. Der Zugewinn an Konformität durch die IMRT erhöht somit die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen [Hal03]. Mit Bezug auf das LNT Modell [Mot04] ergibt sich damit eine Erhöhung des Risikos für eine Zweitkrebserkrankung. NEWHAUSER u. a. [New11] gehen von einer Verdopplung aus.

Die Fortschritte in der Krebsbehandlung im Allgemeinen und insbesondere in der pädiatrischen Tumorthherapie haben in den letzten Jahrzehnten zu einem Anstieg in der Überlebenszeit geführt. In den USA überlebten vor 10 Jahren etwa 80 % der krebserkrankten Kinder 5 Jahre oder länger, verglichen mit 30 % im Jahr 1960 [New11; Smi10].

Die Erhöhung der Dosis außerhalb der Feldgrenzen durch die Nutzung der IMRT und das hiermit ansteigende Zweitkrebsrisiko sowie der Anstieg in der Überlebenszeit nach Krebserkrankungen zeigen die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen mit dem Ziel, die Dosis außerhalb der Feldgrenzen im Sinne des ALARA-Prinzips [Sie59] zu reduzieren. Das ALARA-Prinzip fordert, die Dosis so niedrig zu halten, wie dies vernünftigerweise zu erreichen ist.

## 1.4 Studienlage mit Bezug auf die vorliegende Arbeit

Die außerhalb der geometrischen Feldgrenzen auftretende Dosis wurde bisher durch analytische Modelle [Gie01; Hau16; Jag15; Olo03; Ref06; Sán15; Sch17; Tad13], Dosismessungen in Phantomen [Cas08; Cho10; Cov16; Fol97; How06; Huq02; Kas83; Kra11; Lon14; Maj17; She97; She85; Ste99; Van97; Van93; Wie09; Wie08; Wij19; Yoo17; Zha21] und Monte-Carlo-Simulationen [Alm12; Bed09; Bed08; Cho12; Han09; Hua13; Joo11; Kry09; Kry07; Kry06; Kry10; Tit06] bestimmt sowie der Einfluss von Parametern, wie beispielsweise die Bauweise des Beschleunigerkopfes, die Feldgröße, die Distanz zur Strahlenfeldachse oder die Betriebsweise hinsichtlich des Ausgleichsfilters, untersucht. Überdies wurden ausgewählte Bestrahlungspläne bei unterschiedlichen Bestrahlungstechniken bzgl. der Dosis außerhalb der Strahlenfelder verglichen. Der Großteil der Studien hat dabei die Änderung der Dosis in Abhängigkeit des betreffenden Parameters betrachtet, ohne hierfür die Gründe genauer zu analysieren.

Detaillierte Untersuchungen haben insbesondere CHANEY u. a. [Cha94], TITT u. a. [Tit06], WIEZOREK u. a. [Wie08], CHOFOR u. a. [Cho10], KRY u. a. [Kry10] und KRAGL u. a. [Kra11] durchgeführt.

CHANEY u. a. [Cha94] untersuchten anhand von Monte-Carlo-Simulationen mit dem Code EGS4 die im Strahlerkopf eines Siemens Linearbeschleunigers erzeugte Streustrahlung bei einem 6 MV Strahlenfeld. Das Ziel der Studie war die Identifizierung von Streukörpern sowie deren relative Beiträge am Strahlenfeld. Das Modell beinhaltete das Elektronenaustrittsfenster, das Targetsystem, den Ausgleichsfilter, das Dosismonitorsystem, die Primärblende, die Block- und Lamellenblende sowie die Raumluft und eine Strahlenquelle, die monoenergetische 6 MeV Elektronen emittierte. Zur Reduzierung der Rechenzeit wurden einige Vereinfachungen am Modell vorgenommen. So wurden insbesondere das Target, der Ausgleichsfilter, die Primärblende, die Block- und Lamellenblende vereinfacht modelliert. Die Autoren stellten fest, dass, in Abhängigkeit der Feldgröße, 3 % bis 9 % der Fluenz im Nutzstrahl von Streukörpern ausgingen. Die größten Anteile stammten dabei aus der Primärblende, dem Ausgleichsfilter und dem Strahl-Stopper im Targetsystem. Sie gaben an, dass die Block- und Lamellenblende als Quelle für Streustrahlung vernachlässigt werden können.

TITT u. a. [Tit06] studierten die Eigenschaften eines Linearbeschleunigers vom Typ Varian 2100 in den Betriebsweisen mit und ohne Ausgleichsfilter anhand von Monte-Carlo-Simulationen mit den Codes BEAMnrc und MCNPX. Sie stellten fest, dass die Entfernung des Ausgleichsfilters die Dosisleistung auf der Zentralachse um mindestens einen Faktor 2 erhöht. Sie schlussfolgerten daraus, dass die Strahlzeit um etwa diesen Faktor reduziert werden könnte und damit, aufgrund entsprechend reduzierter Streu- und Durchlassstrahlung, eine Reduktion der Dosis außerhalb der Feldgrenzen auf die Hälfte verbunden ist. Weiterhin berichteten sie von einer signifikanten Reduktion der Dosis außerhalb der Feldgrenzen bei kleinen Feldern in der Nähe zur Feldgrenze sowie einem schnelleren Dosisabfall mit wachsender Distanz zur Strahlenfeldachse im Vergleich zum Betrieb mit Ausgleichsfilter. Sie erklärten diese Beobachtungen mit einem geänderten Photonenspektrum durch das Fehlen des Ausgleichsfilters.

WIEZOREK u. a. [Wie08] haben an einem Siemens Linearbeschleuniger (6 MV, 15 MV)



Photonen- und Neutronen-Dosismessungen im Abstand von 29 cm von der Strahlenfeldachse in verschiedenen Tiefen in der Hauptebene In-Plane in einem Plexiglasphantom durchgeführt. Der Streuanteil im Phantom durch den Nutzstrahl wurde bestimmt, indem der direkt exponierte Teil des Phantoms entfernt wurde. Es wurde die Dosis außerhalb des Feldes bei künstlichen IMRT-Feldern mit offenen Feldern verglichen, wobei die IMRT-Fluenzen mit MLC-Step&Shoot-Technik, mit Zinn+Wachs-Kompensatoren und mit bleihaltigen MCP96-Kompensatoren erzeugt wurden. Im Vergleich mit dem offenen Feld stiegen die Photonenkomponenten bei den IMRT-Feldern in Abhängigkeit der Photonenenergie und der Tiefe an. Der Anstieg fiel bei Nutzung der Kompensatoren verglichen mit der MLC-Step&Shoot-Technik höher aus. Weiterhin zeigten die Ergebnisse, dass ungefähr 50 % bis 70 % der Photonenkomponenten und 100 % der Neutronenkomponenten aus dem Beschleunigerkopf stammten.

CHOFOR u. a. [Cho10] haben die Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen an einem Siemens Primus Linearbeschleuniger mit Ausgleichsfilter durch Messungen in einem wasseräquivalenten Festkörperphantom bei 6 MV und 15 MV bestimmt. Durch angepasste Versuchsaufbauten konnten die Dosisanteile durch Streuung im Phantom, die Durchlassstrahlung der Block- bzw. Lamellenblende sowie die Extrafokalstrahlung bestimmt werden. Sie fanden heraus, dass die Feldgröße einen großen Einfluss auf die Dosis außerhalb der Feldgrenzen hatte und sich die „vermeidbare Dosis“, die durch Methoden der zusätzlichen Abschirmung innerhalb oder unterhalb des Strahlenkopfes eliminiert werden konnte, mit dem Abstand zur Strahlenfeldachse nur leicht änderte. Die Extrafokalstrahlung hatte einen großen Anteil an der Dosis außerhalb der Feldgrenzen, die möglicherweise durch den Betrieb ohne Ausgleichsfilter reduziert werden könnte, so die Autoren.

CHOFOR u. a. [Cho12] erstellten nach eigener Angabe ein detailliertes Modell eines Siemens Primus Beschleunigers für den 6 MV und 15 MV Betrieb mit dem Code BEAMnrc. Die Lamellenblende wurde dabei zur Vereinfachung des Modells aus einem Block nachgestellt, so dass die zwischen den Lamellen passierende Durchlassstrahlung, die „Interleaf-Leakage“, keine Berücksichtigung fand. Stattdessen wurden zuvor generierte Messwerte in der Publikation genutzt. Ziel der Veröffentlichung war u.a. die Beurteilung der Streustrahlung im Beschleunigerkopf und im bestrahlten Phantom. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass die Streuung im Phantom den Hauptanteil an der Dosis außerhalb der Feldgrenzen in der Nähe zum geometrischen Strahlenfeld beitrug, während in größerer Entfernung die Durchlassstrahlung dominierte. Die durch die Streustrahlung im Beschleunigerkopf bedingte Dosis außerhalb der Feldgrenzen wurde nicht quantifiziert.

KRY u. a. [Kry10] erstellten mit MCNPX ein Monte-Carlo-Modell eines Varian 2100 Linearbeschleunigers (Photonenstrahlung, 6 MV und 18 MV) einschließlich Wasserphantom und untersuchten den Einfluss des Ausgleichsfilters auf die Dosis außerhalb der Feldgrenzen. Sie stellten fest, dass die Entfernung des Ausgleichsfilters die Streuung an der Blende und die Durchlassstrahlung reduzierte, während sich die Streuung im Phantom (Patienten) erhöhte. Folglich war, so die Autoren, die Dosis außerhalb des geometrischen Feldes mit der Entfernung des Ausgleichsfilters bei kleineren Feldern, bei größeren Entfernungen vom geometrischen Feld und bei stärker modulierten Behandlungsfeldern niedriger, aber bei größeren, weniger modulierten Feldern und an Orten, die näher am geometrischen Strahlenfeld lagen, höher.

KRAGL u. a. [Kra11] haben den Einfluss des Ausgleichsfilters auf die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen bei extrakranieller Stereotaxie und IMRT messtechnisch an einem Elekta Precise Linearbeschleuniger bestimmt. Bei dem Betrieb ohne Ausgleichsfilter war die durchlassstrahlungsbedingte Dosis außerhalb der Feldgrenzen um 52 % bei 6 MV und 62 % bei 10 MV reduziert. Bei allen Plänen zeigte sich zudem mit zunehmendem Abstand vom Rand des Bestrahlungsfeldes ein Anstieg des relativen Unterschiedes zwischen der Dosis von konventionellen und ausgleichsfilterfreien Strahlen. Sie schlussfolgerten, dass die Anwendung ausgleichsfilterfreier Strahlen im Rahmen moderner Bestrahlungstechniken zu einer Verringerung der Dosis außerhalb der Feldgrenzen führen würde.

### 1.5 Offene Fragestellungen

Vorgenannte Veröffentlichungen befassen sich unter verschiedenen Gesichtspunkten mit der Dosis außerhalb des Therapiestrahls. Sie betrachten dabei stets ausgewählte Teilaspekte. Eine Studie, die die Ausbreitung des Strahlungsfeldes in Bezug auf die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen umfassend untersucht, d. h. detailliert vom Entstehungsort, dem Target, bis zum Ort der Dosisdeposition im Phantom bzw. Patienten, dabei die Bauelemente des Beschleunigerkopfes und deren Einfluss auf die Dosis außerhalb der Feldgrenzen individuell betrachtet und überdies noch Einflussfaktoren, wie Feldgröße, Hauptebene, Tiefe im bestrahlten Medium berücksichtigt, konnte nicht gefunden werden. Die genaue Kenntnis über die Entwicklung des Strahlungsfeldes durch den Beschleunigerkopf, vom Beschleunigerkopf auf das bestrahlte Medium und schließlich innerhalb des bestrahlten Mediums sowie dessen Zusammensetzung und die Untersuchung von Einflussfaktoren ist für eine umfassende Charakterisierung der Dosis außerhalb der Feldgrenzen erforderlich, von wissenschaftlichem Interesse und eine Grundvoraussetzung für die Identifizierung von Möglichkeiten zur Reduktion der Dosis außerhalb der Feldgrenzen.

Die Untersuchung des Targetsystems, bestehend aus dem Target selbst sowie angrenzenden Kupfer-, Stahl- und Graphitkomponenten (Abb. 4.1 S. 23), ist im Hinblick auf die Bestimmung der Austrittsorte der emittierten Photonen und deren Beiträge an der Dosis außerhalb der Feldgrenzen zur Erkennung von vermeidbarer Durchlassstrahlung erforderlich. In der Literatur finden sich hierzu keinerlei Hinweise.

Der Einfluss der strahlformenden Bauelemente, dies sind die verschiedenen Blenden und der Ausgleichsfilter, ist von besonderem Interesse. Anstatt, wie bisher in der Literatur üblich, unspezifisch von „head scatter“ oder „head leakage“ zu reden, ist eine umfassendere, individuelle Betrachtung jedes Bauelements in Bezug auf die Dosis außerhalb der Feldgrenzen notwendig.

Ein wichtiger Grund für das Auftreten der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in der Nähe zum Therapiestrahls ist die Streuung von Photonen des geometrischen Strahlenfeldes im Phantom bzw. im Patienten. Unklar ist dabei der Zusammenhang zwischen dem Emissionswinkel der Photonen zur Strahlenfeldachse und die Höhe der verursachten Dosis außerhalb der Feldgrenzen. Diesbezügliche Untersuchungen ermöglichen insbesondere Erkenntnisse über die Auswirkung des Ausgleichsfilter, was das Streuverhalten des bestrahlten Volumens betrifft. In der Literatur finden sich hierzu keine Angaben.

Im Sinne einer möglichen Reduzierung der Dosis außerhalb der Feldgrenzen bzw. einer Berücksichtigung von strahlensensiblen Organen ist außerdem die örtliche Verteilung und

die Zusammensetzung des Strahlungsfeldes, das außerhalb der Feldgrenzen auf das Phantom bzw. den Patienten trifft, von Interesse.

Das Gesamtsystem, bestehend aus Beschleunigerkopf und zu bestrahlendem Medium, muss für die Durchführung der Untersuchungen äquivalent zur realen Bestrahlungssituation sein, da Änderungen, wie beispielsweise die zusätzliche Einbringung von Abschirmungen, immer auch weitere Effekte (Streuung) zur Folge haben können. Experimentelle Studien sind aus diesem Grund prinzipbedingt in der Aussagekraft begrenzt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist somit eine detailliertere Untersuchung zur Entstehung und Zusammensetzung der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen als dies bisher in den vorgenannten Veröffentlichungen dokumentiert ist. Sie soll mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen die in den vorhergehenden Absätzen aufgeworfenen Fragestellungen beantworten und damit ein umfassenderes Gesamtbild liefern.

Vorzugsweise erfolgt die Untersuchung dabei aus wissenschaftlichem Interesse zur Gewinnung von Erkenntnissen, wie das Thema der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen zum Schutz der Patienten zukünftig besser berücksichtigt werden kann. In Abhängigkeit des Erkenntnisgewinns können die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit eine Grundlage für die Einsparung von Dosis außerhalb der Feldgrenzen bei der praktischen Bestrahlungsplanung sein. Die Ergebnisse könnten jedoch ebenso die Basis für die Erstellung eines analytischen Modells zur Beschreibung der Dosis außerhalb der Feldgrenzen mit hinreichender Genauigkeit sein.



# KAPITEL 2

---

## Aufgabenstellung

---

Ausgehend von den in der Einleitung beschriebenen Fragestellungen ergeben sich folgende, konkrete Aufgaben für die vorliegende Arbeit:

**Aufgabe 1:** Findung eines zur Bearbeitung der Aufgabenstellung geeigneten Monte-Carlo-Codes.

Erstellung eines virtuellen Modells eines Siemens Primus Elektronenlinearbeschleunigers für den Photonenbetrieb bei einer nominellen Elektronenenergie von 6 MeV mit besonderer Berücksichtigung der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen.

Hinreichende Validierung des Modells anhand von Messdaten des realen Vorbildes der Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie des Universitätsklinikums Leipzig (UKL).

**Aufgabe 2:** Untersuchung des Targetsystems hinsichtlich vermeidbarer Strahlungsfeldanteile, die eine Dosis außerhalb der Feldgrenzen zur Folge haben, sowie ggf. die Ermittlung der Abhängigkeit von der Feldgröße, der Hauptebene, des Ausgleichsfilters und der Tiefe im bestrahlten Medium.

**Aufgabe 3:** Untersuchung des Einflusses der Primär-, Block- und Lamellenblende auf die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen bei jeweils individueller Betrachtung der Blendenblöcke bzw. Lamellensätze in Abhängigkeit von der Feldgröße, der Hauptebene, der Tiefe im bestrahlten Medium sowie dem Ausgleichsfilter.

**Aufgabe 4:** Untersuchung zur örtlichen Verteilung und Zusammensetzung des eine Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen erzeugenden Strahlungsfeldes in Abhängigkeit von der Feldgröße, der Hauptebene, der Tiefe im bestrahlten Medium sowie dem Ausgleichsfilter, das außerhalb der geometrischen Feldgrenzen auf das bestrahlte Medium trifft.

**Aufgabe 5:** Untersuchung des geometrischen Strahlenfeldes hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen dem Emissionswinkel der Photonen aus dem Target relativ zur Strahlenfeldachse und deren Einfluss auf die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in Abhängigkeit von der Feldgröße, der Hauptebene, der Tiefe im bestrahlten Medium sowie dem Ausgleichsfilter.



# KAPITEL 3

---

## Grundlagen

---

### Inhaltsübersicht

3.1	Medizinischer Elektronenlinearbeschleuniger . . . . .	13
3.2	Die Monte-Carlo-Methode in der Strahlenphysik . . . . .	16
3.3	Der Monte-Carlo-Code MCNP6 . . . . .	17

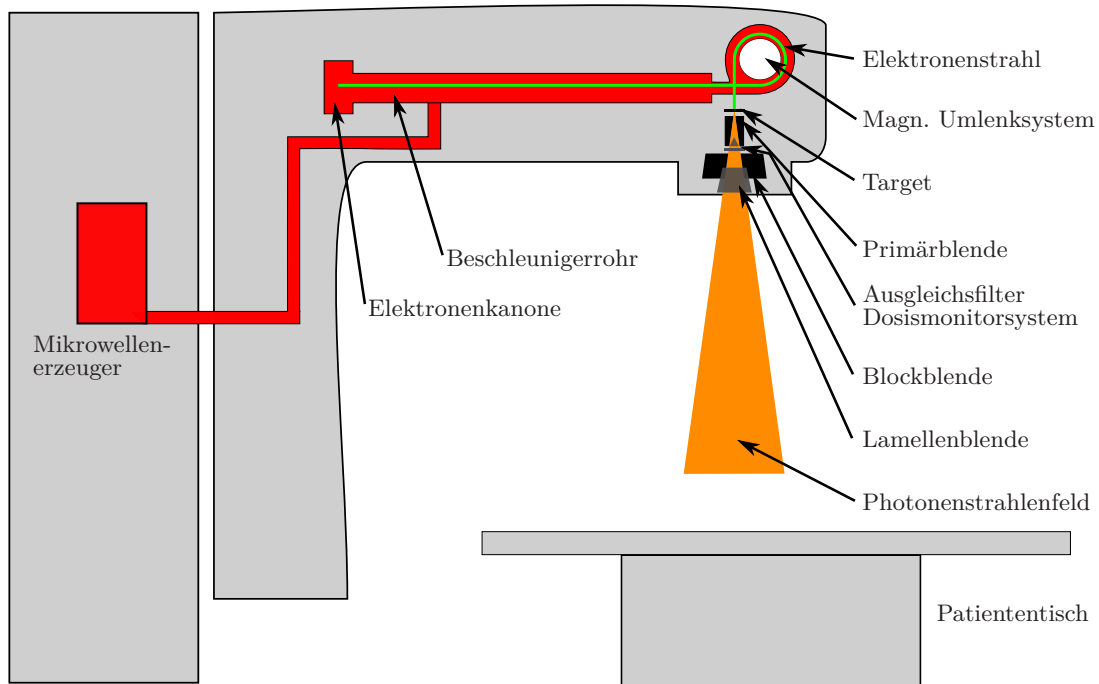
### 3.1 Medizinischer Elektronenlinearbeschleuniger

Die Aufgabe eines medizinischen Elektronenlinearbeschleunigers ist die Bereitstellung hochenergetischer Elektronen- bzw. Photonenstrahlung zur perkutanen Strahlentherapie am Menschen. Neben den strahlerzeugenden Elementen sind hierzu zusätzlich strahlformende Baugruppen erforderlich, die eine individuelle Anpassung des Strahlungsfeldes an die Erfordernisse am Patienten erlauben und zusätzlich eine maximale Schonung der nicht zu bestrahlenden Areale gewährleisten (Abb. 3.1 S. 14).

Die in der Elektronenkanone durch Glühemission bereitgestellten Elektronen erfahren im Beschleunigerrohr durch ein im Mikrowellenerzeuger (Klystron) generiertes hochfrequentes elektrisches Feld, das eine stehende Welle ausbildet, eine beschleunigende Kraft (Abb. 3.1 S. 14).

Das Beschleunigerrohr des in dieser Arbeit nachgebildeten Beschleunigers ist konstruktionsbedingt parallel zur Patiententischebene ausgerichtet. Die Umleitung des Strahls in Richtung des Patiententisches erfolgt über ein achromatisches, magnetisches Umlenkensystem, dessen Funktionsweise auf der Lorentzkraft beruht. Die Elektronen erfahren dabei eine Richtungsänderung um  $270^\circ$  und verlassen das System als paralleles Strahlenbündel (Abb. 3.1 S. 14) [Del03; Kri05].

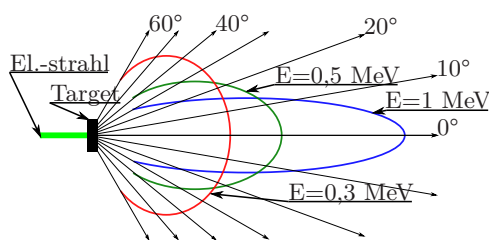
Nach der Passage des Austrittsfensters trifft der Elektronenstrahl auf das Target, in dem die Teilchen ihre Energie durch Stoß- und Strahlungsbremung abbauen (Abb. 3.1 S. 14) [Kri09]. Die Energiereduktion erfolgt bei der Stoßbremsung durch Ionisations- und Anregungsprozesse und resultiert in der Erwärmung des Targets. Bei der Strahlungsbremung erfahren die Elektronen eine Beschleunigung im Coulombfeld der Atomkerne und emittieren dabei ultraharte Photonenstrahlung, die auch Bremsstrahlung genannt wird. Die Ordnungszahl des Absorbers geht dabei quadratisch in das Strahlungsbremsvermögen ein [Kri09]. Das Target des in dieser Arbeit nachgebildeten Siemens Primus Beschleunigers ist aus Wolfram gefertigt. Obwohl das Element eine relativ hohe Ordnungszahl  $Z$  von 74 hat, beträgt das Verhältnis von Strahlungs- zu Stoßbremsvermögen bei einer Elektronenenergie von 6 MeV lediglich  $S_{rad}/S_{col} \approx Z \cdot E/800 \approx 0,6$  [Kri09]. Der Prozess der Bremsstrahlungs-



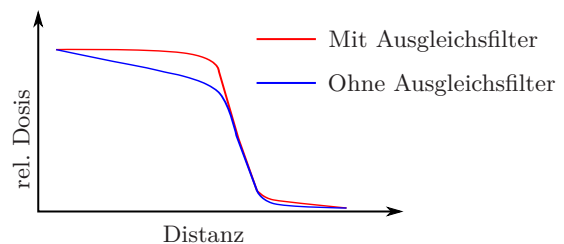
**Abbildung 3.1:** Schematischer Aufbau eines medizinischen Elektronenlinearbeschleunigers mit Bezug auf die relevanten Komponenten zur Strahlerzeugung und -formung in Anlehnung an [Del03](Y-Z Schnitt).

erzeugung ist ineffizient – eine Tatsache, die sich insbesondere auch bei der Durchführung von Monte-Carlo-Simulationen bemerkbar macht.

Die Emission der Bremsstrahlung erfolgt anisotrop und ist eine Funktion der Elektronenenergie (Abb. 3.2) [Kri09]. Bei hohen Energien, wie in medizinisch genutzten Elektronen-Linearbeschleunigern, zeigt sich ein ausgeprägtes Intensitätsmaximum in Einstrahlrichtung der Elektronen [Kri09].



**Abbildung 3.2:** Winkelverteilung von Bremsstrahlungsphotonen als Funktion der Elektronenenergie  $E$  an einem dicken Wolframtarget. Mit steigender Energie verschieben sich die Intensitätsmaxima zunehmend in die Einstrahlrichtung der Elektronen [Kri09].



**Abbildung 3.3:** Schematische Darstellung von Dosishalbprofilen mit und ohne Ausgleichsfilter im Strahlengang in 10 cm Wassertiefe. Ohne Ausgleichsfilter ist die Dosis auf der Zentralachse etwa um den Faktor 2 größer [Tit06].



Das Photonenstrahlungsfeld wird durch die Primärblende eingegrenzt. Sie ist die erste Blende nach dem Target, hat eine feste Apertur und ist fokussiert (Abb. 3.1 S. 14) [Del03; Kri05].

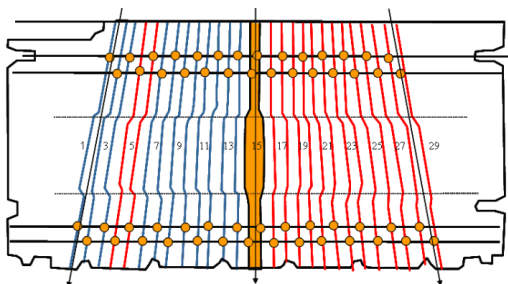
Das Strahlungsfeld trifft im weiteren Verlauf bei der Passage durch den Strahlerkopf auf den Ausgleichsfilter (Abb. 3.1 S. 14). Er verändert das Feld derart, dass sich eine flache Dosisquerverteilung in 10 cm Wassertiefe ergibt (Abb. 3.3). Ausgleichsfilter härten das Strahlungsfeld sowohl innerhalb als auch außerhalb des Strahlenfeldes erheblich auf und reduzieren dessen Intensität [Ver03, S. 120].

Medizinische Elektronenlinearbeschleuniger können auch ohne Ausgleichsfilter betrieben werden. Der Vorteil hierbei liegt in der höheren Dosisleistung und der damit einhergehenden kürzeren Bestrahlungszeit bei gleicher Dosis [Tit06]. Der Ausgleichsfilter beeinflusst die Höhe der Dosis außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes (bspw. [Kry10]).

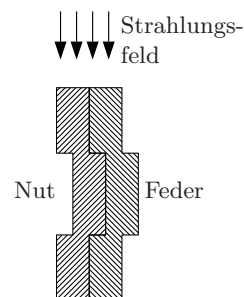
Direkt unterhalb des Ausgleichsfilters ist das Dosismonitorsystem installiert (Abb. 3.1 S. 14) [Del03; Kri05]. Zwei voneinander unabhängige Ionisationskammern messen ein dosisproportionales Signal. Der nachfolgende Spiegel ermöglicht in Kombination mit einer Lampe, die sich in gleicher Distanz zum Objekt befindet wie das Target, die sichtbare Projektion des Strahlenfeldes [Del03; Kri05].

Die fokusnahe Blockblende des in dieser Arbeit simulierten Linearbeschleunigers, dem Siemens Primus Mid Energy, verfügt über eine verstellbare Apertur und besteht aus zwei Blendenblöcken [Del03; Sie12]. Sie ist eine fokussierte Blende [Del03; Sie12]. Das heißt, dass die dem Zentralstrahl zugekehrten Flächen so ausgerichtet sind, dass bei jeder Apertur die das Strahlenfeld begrenzenden Strahlen die Flächen tangieren [DIN 6814-8-00].

Die Lamellenblende des simulierten Gerätes setzt sich aus zwei Sätzen von je 29 Lamellen zusammen und ist doppeltfokussiert (Abb. 3.4 S. 15) [Sie12, S. 95, 96]. Zusätzlich zur einfachen Fokussierung, die durch Bewegung der Lamellen auf einem Kreisbogen realisiert wird, ist jede einzelne Lamelle entsprechend der Strahldivergenz abgewinkelt (Abb. 3.4 S. 15) [Sie12, S. 97]. Ein Nachteil der Lamellenblende mit Blick auf die Dosis außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes ist die höhere Durchlaßstrahlung aufgrund der erhöhten Durchlässigkeit zwischen aneinander angrenzenden Lamellen [Huq02; Kim01]. Zu dessen Reduzierung setzt Siemens bei diesem Gerät das Nut-und-Feder Design ein (Abb. 3.4 und 3.5 S. 15) [Sie12, S. 98].



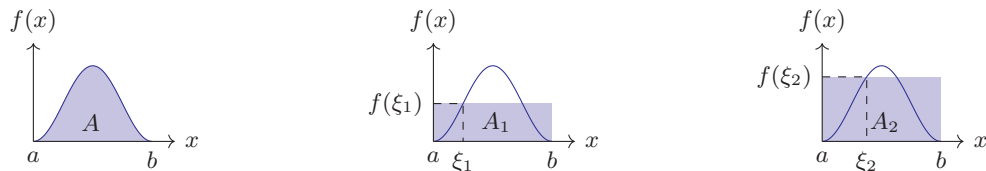
**Abbildung 3.4:** Schematische Schnittdarstellung (Y-Z Ansicht) der Lamellenblende des simulierten Siemens Linearbeschleunigers [Sie12, S. 99].



**Abbildung 3.5:** Schematische, vereinfachte Schnittdarstellung (Y-Z Ansicht) zur Verdeutlichung des Nut- und Federdesigns.

### 3.2 Die Monte-Carlo-Methode in der Strahlenphysik

Die Monte-Carlo-Methode ist ein numerisches Verfahren zur Lösung von Gleichungen oder zur Berechnung von Integralen [Hen13]. Im Gegensatz zu anderen bekannten numerischen Verfahren, wie beispielsweise die Methode der Intervallhalbierung, wird die Lösung durch die Nutzung von Zufallszahlen konstruiert (Abb. 3.6 S. 16). Voraussetzung für die An-

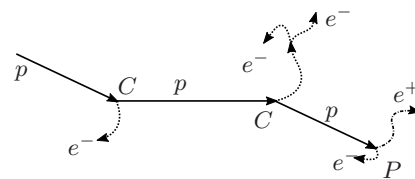


**Abbildung 3.6:** Beispiel zur numerischen Integration mit der Monte-Carlo-Methode. Mit  $\xi_i$  als Zufallszahl auf dem Intervall  $[a, b]$  ist eine erste Annäherung gegeben durch  $A_1 = (b - a)f(\xi_1)$ , eine Zweite durch  $\tilde{A}_2 = \frac{1}{2} \{(b - a)f(\xi_2) + A_1\}$ . Nach  $N$  Iterationen mit  $N$  Zufallszahlen ergibt sich das genäherte Ergebnis aus  $A_N = \frac{b-a}{N} \sum_{i=1}^N f(\xi_i) \approx A = \int_a^b f(x) dx$  (analog nach [Hen13]).

wendung der Monte-Carlo-Methode ist, dass sich die Fragestellung in ein stochastisches Modell umformulieren lässt [Car75; Hen13]. Das Ergebnis entspricht dem Mittelwert der Stichproben aus der betreffenden Wahrscheinlichkeitsverteilung. Der Mittelwert der Stichproben konvergiert gegen den tatsächlichen Wert, sofern dieser existiert, wenn ausreichend viele Stichproben vorhanden sind. Dies folgt aus dem Gesetz der großen Zahlen und ist die Basis der Monte-Carlo-Methode [Car75; Hen13; X-503].

In der Strahlenphysik ermöglicht dieses Verfahren die Berechnung der erforderlichen Größen zur Beschreibung des Teilchentransportes. Die Wege der Strahlungsteilchen können unter Berücksichtigung der physikalischen Gesetze in einzelnen Schritten vom Entstehungsort bis zur Absorption oder Vernichtung simuliert werden (Abb. 3.7 S. 16) [Hen13; X-503].

**Abbildung 3.7:** Die Abbildung zeigt beispielhaft die Teilchenhistorie eines Photons. Durch den Comptoneffekt ( $C$ ) und die Paarbildung ( $P$ ) werden sekundäre Photonen ( $p$ ), Elektronen ( $e^-$ ) und ein Positron ( $e^+$ ) erzeugt [Hen13; X-503].



Die Monte-Carlo-Methode gilt als die leistungsfähigste Methode hinsichtlich der Modellierung des Strahlungstransportes im Bereich der Strahlentherapie [Ver03]. Für die Durchführung von Monte-Carlo-Simulationen gibt es verschiedene Monte-Carlo-Codes. EGS (*Electron Gamma Shower*) [Kaw16] und hierauf basierende Entwicklungen, PENELoPE (*Penetration and ENergy LOss of Positrons and Electrons*) [Age19], ITS (*Integrated TIGER Series of Coupled Electron/Photon Monte Carlo Transport Codes System*) [Hal92], MCNP (Monte Carlo N-Particle Code) [Goo13a] und GEANT (GEometry ANd Tracking) [Ago03] sind nur einige bekannte Beispiele. In dieser Arbeit wurde der MCNP-Code verwendet, weil er neben Photonen und Elektronen insbesondere auch den Transport von Neutronen, dessen Nutzung in Folgearbeiten geplant ist, ermöglicht.

### 3.3 Der Monte-Carlo-Code MCNP6

#### Einführung

MCNP6 ist ein vom Los Alamos National Laboratory, USA, entwickelter Vielzweck Monte-Carlo-Strahlungstransport-Code. Die in dieser Arbeit verwendete Version 1.0 wurde im Mai 2013 [Goo13a, S. 4] veröffentlicht und kann neben Photonen, Elektronen, Positronen und Neutronen den Transport von 29 weiteren Teilchenarten über einen großen Energiebereich simulieren. Der Code ist damit insbesondere für die Bearbeitung der vorliegenden Aufgabenstellung geeignet.

Grundlage für die Durchführung einer Simulation ist die Erstellung einer sogenannten Input-Datei. Sie enthält Informationen über die Geometrie des zu simulierenden Problems, die Materialien, den Ort und die Eigenschaften der Strahlenquelle, die gesuchte Antwort und die Varianzreduktionsverfahren [Goo13b, S. 1–6]. In der Terminologie von MCNP bezeichnet das Wort „Card“, im weiteren „Karte“ genannt, eine einzelne Zeile in der Input-Datei. Einen Überblick über ausgewählte, für diese Arbeit relevante Befehle finden sich in Anhang B S. 181.

Elementare Bausteine zur Erzeugung der geometrischen Strukturen sind die Zellen, die wiederum durch Verknüpfung von Flächen zu generieren sind. Der gesamte Raum ist vollständig und eindeutig, d.h. ohne Überlappung und Aussparung, in Zellen einzuteilen. Jeder Zelle ist insbesondere ein Material, das vorab durch entsprechende Kombination von Elementen zu kreieren ist, zuzuordnen (gesamter Absatz [Goo13a]).

Das Ziel einer Simulation ist die Ermittlung physikalischer Größen zur Beantwortung der Fragestellung. Hierfür enthält MCNP6, analog zur realen Situation, Messgeräte, genannt Tallies. Sie ermöglichen z. B. die Bestimmung des Teilchenflusses durch eine Fläche oder der Energiedeposition in einer Zelle (gesamter Absatz [Goo13b; X-503]).

Aufgrund der begrenzten Rechenleistung der eingesetzten PC und der überaus anspruchsvollen Fragestellung ist der Einsatz von Varianzreduktionsverfahren in dieser Arbeit unabdingbar. Bei gleichem relativem Fehler der gesuchten Größe reduzieren sie die Rechenzeit in einem erheblichen Maße (gesamter Absatz [X-503]).

#### Teilchentransport

Die Physik des Teilchentransportes ist die Basis einer Monte-Carlo-Simulation. Der Transport von Photonen unterscheidet sich dabei grundlegend von dem der Elektronen. Wechselwirkungen von Photonen treten bei der Passage durch die Materie relativ selten auf – größtenteils bewegen sie sich ungestört fort, weshalb sie schwer abzuschirmen sind. Bei dem Photonentransport wird jede einzelne Interaktion simuliert [Hen13; X-503].

#### Photonentransport

Die Simulation des Transportes eines Photons beginnt mit der Ermittlung der Distanz  $l$  bis zur ersten Wechselwirkung. Sie wird anhand des direkten Sampling-Verfahrens ermittelt. Die Methode wird genutzt, wenn die inverse kumulierte Wahrscheinlichkeitsfunktion  $P(l)$  leicht berechenbar ist. Sofern dies nicht der Fall ist, ist die Nutzung der indirekten Methode erforderlich. Die kumulierte Wahrscheinlichkeit  $P(l)$  einer Wechselwirkung des Photons bei

der Passage der Distanz  $l$  ergibt sich aus:

$$P(l) = \int_0^l p(\tilde{l}) d\tilde{l} = \int_0^l e^{-\Sigma_t \tilde{l}} d\tilde{l} = 1 - e^{-\Sigma_t l} \quad (3.1)$$

Hierbei ist  $\Sigma_t$  der totale makroskopische Wechselwirkungsquerschnitt und  $p(\tilde{l}) d\tilde{l}$  gibt die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung am Ort  $l$  in der infinitesimal dünnen Schicht  $d\tilde{l}$  an.  $P(l)$  nimmt als kumulierte Wahrscheinlichkeit Werte auf dem Intervall  $[0, 1]$  an. Durch Bildung der Umkehrfunktion erhält man:

$$l = -\frac{1}{\Sigma_t} \cdot \ln(1 - P) \quad (3.2)$$

Mit einem Zufallszahlengenerator, der gleichmäßig verteilte Zufallszahlen  $\eta$  im Intervall  $[0, 1]$  ausgibt, kann nun die erste Stichprobe zur Ermittlung der Distanz  $l$  generiert werden.

In einem nächsten Schritt ist die Art der Wechselwirkung, ebenfalls durch Zufallsprozess, festzulegen. Im Energiebereich der Strahlentherapie sind die vier häufigsten Wechselwirkungen der Photoeffekt, die Raleigh Streuung, die Compton Streuung und die Paarproduktion. Entsprechend ergibt sich für den linearen Schwächungskoeffizienten  $\mu(E)$ :

$$\mu(E) = \mu_{tot}(E) = \mu_A(E) + \mu_R(E) + \mu_C(E) + \mu_P(E) \quad (3.3)$$

Das Intervall  $[0,1]$  wird in vier Teile gesplittet:

- $P_0, P_1$  : Photoeffekt
- $P_1, P_2$  : Raleigh Streuung
- $P_2, P_3$  : Compton Streuung
- $P_3, P_4$  : Paarproduktion

mit

$$P_0 = 0, P_1 = P_0 + \frac{\mu_A}{\mu_{tot}}, P_2 = P_1 + \frac{\mu_R}{\mu_{tot}}, P_3 = P_2 + \frac{\mu_C}{\mu_{tot}}, P_4 = 1 \quad (3.4)$$

Die Art der Wechselwirkung wird nun durch eine zweite Zufallszahl innerhalb des Intervalls  $[0,1]$  festgelegt. Im Weiteren erfolgt die Festlegung der Parameter sekundärer Teilchen. Der Vorgang geht so lange weiter, bis die Teilchengeschichte des primären Photons vollständig simuliert ist. Er bricht ab, wenn die geometrischen Grenzen des Modells erreicht sind oder eine vordefinierte Teilchenenergie unterschritten wird (Abschnitt Photonentransport [Hen13]).

### Elektronentransport

Die Ausbreitung von Elektronen ist geprägt durch die langreichweitige Coulomb-Kraft, die eine Vielzahl von kleinen Wechselwirkungen zur Folge hat. Beispielsweise hat ein Photon,

das seine Energie von 0,5 MeV auf 0,0625 MeV bei der Passage durch Aluminium reduziert, weniger als 10 Wechselwirkungen - ein Elektron unter gleichen Bedingungen etwa  $10^5$  [X-503]. Die Nachstellung jeder einzelnen Interaktion hätte einen immensen Rechenaufwand zur Folge und ist damit nicht praktikabel. Es wurde deshalb ein Näherungsverfahren mit dem Namen „Condensed-History-Technik“ von Martin J. Berger eingeführt, das eine größere Anzahl von Elektronenwechselwirkungen zu einem Schritt zusammenfasst [Fip01; X-503]. Berger und Stephen M. Seltzer entwickelten daraus die ETRAN Serie von Elektron / Photon Transportcodes. Der ETRAN Code ist die Basis der „Integrated TIGER Series“, eines anwenderfreundlichen Vielzweck Elektron / Photon Transportcode. MCNP nutzt im Wesentlichen die Integrated TIGER Series, Version 3.0 [X-503].

#### Varianzreduktionsverfahren

Der Einsatz von Varianzreduktionsverfahren reduziert die Rechenzeit  $T$  einer Simulation und ist insbesondere bei Fragestellungen mit starken Abschirmungen oftmals die einzige Möglichkeit, ein aussagekräftiges Resultat zu erhalten. Das Ergebnis einer Simulation, gegeben als Mittelwert der gesuchten Größe, ist prinzipbedingt immer mit einer statistischen Unsicherheit, quantifiziert durch die Varianz bzw. den relativen Fehler  $R$ , behaftet.  $R$ , definiert als Standardabweichung des Mittelwertes dividiert durch den Mittelwert, ist proportional zu  $1/\sqrt{N}$ , wobei  $N$  die Anzahl der Teilchenhistorien angibt. Die Rechenzeit  $T$  für eine bestimmte Simulation ist offensichtlich proportional zu  $N$ , woraus sich  $R = C/\sqrt{T}$  ergibt, mit  $C$  als positive Konstante. Zur Reduktion von  $R$  kann einerseits die Rechenzeit erhöht werden, was jedoch erkennbar ineffizient wäre. MCNP beinhaltet deshalb Varianzreduktionsverfahren zur Verkleinerung von  $C$  (gesamter Absatz [X-503, S. 1–8]).

Im Gegensatz zu den analogen Monte-Carlo-Verfahren, bei denen der Strahlungstransport der Realität entsprechend simuliert wird, erfolgt bei den nicht-analogen Verfahren, den Varianzreduktionsverfahren, vornehmlich die Simulation von Strahlungsteilchen, die einen größeren Anteil zum Ergebnis beitragen. Eine Wichtung gewährleistet dabei die Übereinstimmung der Resultate mit der analogen Methode. So wird beispielsweise der Beitrag eines Teilchens zum Ergebnis, das einen bestimmten Weg mit einer  $q$  mal höheren Wahrscheinlichkeit als in der Natur durchläuft, mit  $1/q$  gewichtet (gesamter Absatz [X-503, S. 1–8]).

#### Energie-Abschneide-Verfahren

Der Transport des Strahlungsteilchens endet, sofern seine Energie die untere Abschneideenergie unterschreitet. Folglich reduziert sich der Rechenaufwand und die Rechenzeit für die Teilchenhistorie entsprechend [X-503, S. 2–142].

#### Geometrie-Gewichtsverfahren mit russischem Roulette

Bei der Passage der Teilchen in für das Ergebnis relevante Bereiche wird, zur Optimierung der Statistik, deren Anzahl durch Teilung erhöht, während in unwichtigen Bereichen eine Reduktion durch Vernichtung nach dem Zufallsprinzip erfolgt. Die Zunahme an Teilchen dezimiert die Varianz und steigert den Rechenaufwand. Mit der Herabsetzung der Teilchenanzahl hingegen wächst die Varianz an, während der Rechenaufwand sinkt [Hen13; X-503].

Jeder Zelle im Modell ist eine Zahl, genannt Importance  $I$ , zuzuordnen, die für die Wichtigkeit der Zelle bei der Ergebnisermittlung steht. Diese Zahl sollte deshalb umso größer sein, je höher der Einfluss der Zelle auf das Ergebnis ist. Bei dem Übergang eines Teilchens mit Gewicht  $W$  von einer Zelle mit Importance  $I$  in eine Zelle mit höherer Importance  $I'$  vervielfacht sich das Teilchen  $n$  mal und das Gewicht eines jeden Partikels reduziert sich auf  $W/n$  mit  $n = I'/I$  und  $n \geq 2$ , ganzzahlig. Bei dem Wechsel in eine Zelle mit kleinerer Importance  $I''$ ,  $I''/I \leq 1$ , wird das Strahlungsteilchen mit der Wahrscheinlichkeit  $1 - (I''/I)$  vernichtet oder mit der Wahrscheinlichkeit  $I''/I$  und Gewicht  $W \cdot I/I''$  weiter simuliert (gesamter Absatz [X-503, S. 2–143 f.]).

### Ergebnisermittlung

Die Festlegung über die Art der zu ermittelnden Information durch eine Monte-Carlo-Simulation erfolgt mit Hilfe einer Tally Karte. MCNP6 beinhaltet verschiedene Tally-Typen. Innerhalb dieser Arbeit wurde ausschließlich der  $+F6$  Tally verwendet. Er ermittelt die in der interessierenden Zelle durch die Strahlungsteilchen deponierte Energie und dividiert diese durch die Masse der Zelle und der Anzahl der durch die Strahlenquelle emittierten Strahlungsteilchen. Er ist damit ein Maß für die über das Volumen der Zelle gemittelte Dosis pro primärem Elektron (gesamter Absatz [Goo13b; X-503]).

Mit dem Ergebnis einer Simulation wird außerdem der relative Fehler  $R = S_{\bar{X}}/\bar{X}$  angegeben. Hierbei ist  $\bar{X}$  das Ergebnis der Simulation gegeben als Mittelwert der gesuchten Größe und  $S_{\bar{X}}$  die Standardabweichung des Mittelwertes. Sofern  $R < 0,1$  ist, gilt das Ergebnis als verlässlich (gesamter Absatz [X-503, S. 2–116]).

Der Funktionsumfang einer Tally Karte kann durch Implementierung zusätzlicher Karten erweitert werden. Relevant innerhalb dieser Arbeit waren insbesondere die Karten zur Markierung von Strahlungsteilchen bei der Passage von festgelegten Zellen oder Flächen (Cell- bzw. Surface Flagging). Eine Tally Karte gibt dann neben der Gesamtdosis der untersuchten Zelle zusätzlich die Dosis in der Zelle durch die markierten Strahlungsteilchen aus. Eine Einschränkung hierbei ist, dass Flächen bzw. Zellen ausschließlich über die ODER-Verknüpfung kombiniert werden können. Das heißt, bei der Untersuchung von bspw. zwei Flächen innerhalb einer Karte ist nur bekannt, dass das dosiserzeugende Strahlungsteilchen die erste oder die zweite oder beide Flächen passiert hat. Eine genauere Differenzierung ist nicht möglich (gesamter Absatz [Goo13b; X-503]).

# KAPITEL 4

---

## Materialien und Methoden

---

### Inhaltsübersicht

4.1	Generelles Vorgehen . . . . .	21
4.2	Modellbildung . . . . .	22
4.2.1	Strahlerkopf . . . . .	22
4.2.2	Elektronenstrahlungsquelle . . . . .	25
4.2.3	Dosisverteilungen des realen Beschleunigers . . . . .	27
4.2.4	Wasserphantom . . . . .	27
4.3	Dosisbestimmung . . . . .	28
4.4	Generierung der Strahlungsfeldkomponenten . . . . .	29
4.4.1	Targetsystem . . . . .	30
4.4.2	Primärblende . . . . .	30
4.4.3	Ausgleichsfilter . . . . .	30
4.4.4	Winkelanalysescheibe . . . . .	31
4.4.5	Blockblende . . . . .	32
4.4.6	Lamellenblende . . . . .	35
4.4.7	Wasserphantom . . . . .	36
4.5	Untersuchung des Einflusses ausgewählter Parameter auf die Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen . . . . .	38
4.5.1	Feldgröße . . . . .	38
4.5.2	Wassertiefe . . . . .	38
4.5.3	Hauptebene . . . . .	38
4.5.4	Ausgleichsfilter . . . . .	38
4.6	Durchführung der Monte-Carlo-Simulationen . . . . .	39
4.6.1	Simulationsparameter . . . . .	39
4.6.2	Varianzreduktionsverfahren . . . . .	40

### 4.1 Generelles Vorgehen

Die Grundlage für die Ermittlung der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit war der erfolgreiche Aufbau eines virtuellen Modells eines Elektronenlinearbeschleunigers mit dem Monte-Carlo-Code MCNP6, das die Dosisverteilung sowohl innerhalb als auch außerhalb der geometrischen Feldgrenzen des Strahlenfeldes der Realität entsprechend mit ausreichender Genauigkeit wiedergab. Ausgangspunkt für die geometrische Nachbildung waren einerseits präzise Herstellerangaben bzgl. Abmessungen und Materialien der Baugruppen und Elemente und andererseits selbst durchgeführte Messungen an ausgewählten Einzelteilen. Die

Bestimmung der relevanten Parameter zur Nachbildung der Elektronenstrahlungsquelle erfolgte hingegen indirekt mit Hilfe von am realen Vorbild gemessenen Dosisverteilungen. Zur Prüfung der Qualität des Modells wurde eine Validierung mit Bezug auf die Dosisverteilungen innerhalb und außerhalb der geometrischen Feldgrenzen des Strahlenfeldes durchgeführt. Das Photonen-Strahlungsfeld wurde sukzessive vom Target bis in das Wasserphantom in Strahlungsfeldkomponenten zerlegt und deren jeweiliger Anteil an den interessierenden Dosisverteilungen ermittelt. Eine Strahlungsfeldkomponente beinhaltet dabei Photonen, die zuvor durch eine definierte Zelle oder Fläche markiert wurden. Hierzu wurden entweder bereits durch das Modell vorhandene Zellen bzw. Flächen genutzt oder zusätzliche implementiert.

Es wurden Dosis-Halbprofile in beiden Hauptebenen des Beschleunigers von drei quadratischen Feldgrößen in zwei Wassertiefen simuliert und deren Zusammensetzung in Bezug auf die Dosisanteile der Strahlungsfeldkomponenten untersucht. Auch wenn das ultimative Ziel die Quantifizierung der Dosis außerhalb der Feldgrenzen bei der klinischen Bestrahlungsplanung ist, ist die Betrachtung quadratischer Felder sinnvoll, da hieraus grundlegende Schlussfolgerungen abgeleitet werden können. Aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren würde die Betrachtung individuell angefertigter Bestrahlungspläne die Bewertung zugrunde liegender Mechanismen eher verhindern.

Der Einfluss des Ausgleichsfilters wurde ermittelt, indem alle Simulationen zusätzlich ohne im Strahlengang befindlichen Filter durchgeführt wurden. Insgesamt wurden somit in dieser Arbeit 24 Feldkonstellationen simuliert und systematisch untersucht.

## 4.2 Modellbildung

### 4.2.1 Strahlerkopf

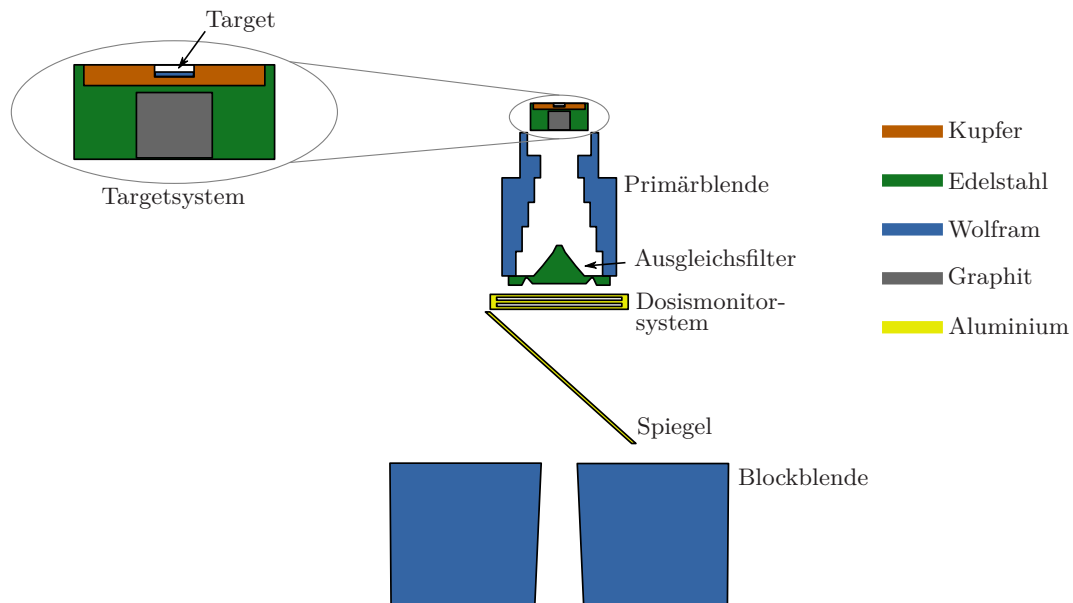
Vom Elektronenlinearbeschleuniger der Firma Siemens vom Typ Primus Mid Energy wurden die strahlerzeugenden und strahlformenden Einzelteile sowie Baugruppen des Strahlerkopfes nachgebildet (Abb. 4.1 S. 23, Abb. 4.2 S. 23).

Alle Baugruppen bzw. Elemente wurden vollständig neu aufgebaut, indem die betreffenden Flächen erstellt, die Zellen durch Kombination der Flächen generiert und den Zellen die zuvor kreierten Materialien zugeordnet wurden. Eine Übersicht zeigt Tabelle 4.1 S. 24.

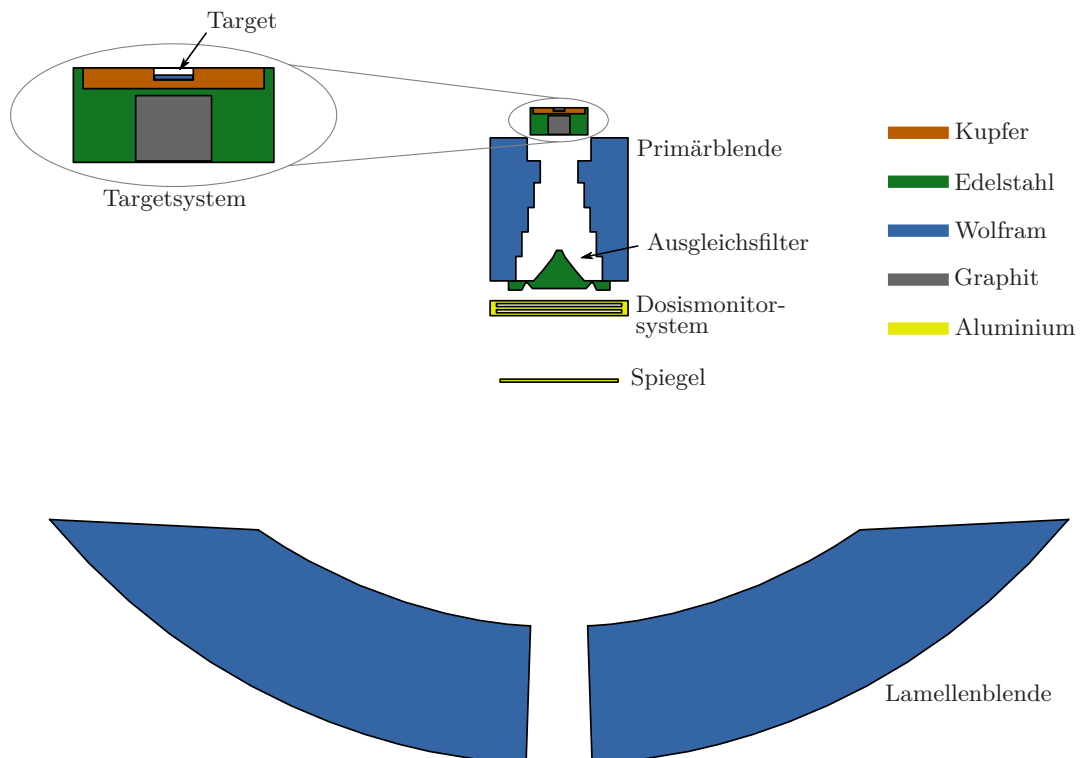
Innerhalb dieser Arbeit wurde ein einheitliches Koordinatensystem genutzt. Die Hauptebene Cross-Plane [DIN 6814-8-00] wurde hierbei durch die X- und Z-Achse aufgespannt, die Hauptebene In-Plane [DIN 6814-8-00] durch die Y- und Z-Achse. Der Koordinatenursprung befand sich im Zentrum des Targets. In der vorliegenden Arbeit wurden drei quadratische, symmetrisch zum Zentralstrahl eingeblendete Strahlenfelder betrachtet. Die Strahlenfeldachse [DIN 6814-8-00], die bei regulären Feldern auch Zentralachse genannt wird, entsprach damit der Z-Achse. Die Begriffe Strahlenfeldachse, Zentralachse und Z-Achse werden dementsprechend synonym benutzt.

Bei der Modellierung der Primärblende wurde die äußere geometrische Form, der Realität entsprechend, eckig und nicht, wie vom Hersteller angegeben, rund implementiert (Abb. 4.1 S. 23, Abb. 4.2 S. 23). Die Verjüngung in Y-Richtung im oberen Teil der Primärblende wurde ebenfalls berücksichtigt (Abb. 4.1 S. 23). Wie sich in den Ergebnissen zeigen wird, hat die äußere Form der Primärblende jedoch keinen Einfluss auf die Dosis außerhalb der





**Abbildung 4.1:** Maßstabsgerechter Y-Z Schnitt des modellierten Strahlerkopfes auf der Zentralachse ( $X=0$  cm). Die Materialien sind farblich hinterlegt. Detailliertere Information hierzu finden sich in Tab. 4.1 S. 24.



**Abbildung 4.2:** Maßstabsgerechter X-Z Schnitt des modellierten Strahlerkopfes auf der Zentralachse ( $Y=0$  cm). Die Materialien sind farblich hinterlegt. Detailliertere Information hierzu finden sich in Tab. 4.1 S. 24.

**Tabelle 4.1:** Bei der Modellbildung des Strahlerkopfes berücksichtigte Einzelteile bzw. Baugruppen des Strahlerkopfes sowie Angaben zu deren Materialien, Geometrie und Quellcode.

Baugruppe, Element	Material	Geometrie	Quellcode
Vakuum für Elektronenstrahlungsquelle	-	-	Anhang A.1 S. 169
Elektronenstrahl-Austrittsfenster	Titan und Wasser	gemäß Herstellerangaben	Anhang A.3 S. 169
Targetsystem	Wolfram (Dichte gemäß Herstellerangaben), Kupfer, Edelstahl (Zusammensetzung und Dichte gemäß Herstellerangaben), Graphit	gemäß Herstellerangaben	Anhang A.4 S. 170
Primärblende	Wolfram (Dichte gemäß Herstellerangaben)	innere Form und Abmessungen gemäß Herstellerangaben, äußere Form und Abmessungen gemäß eigener Messungen	Anhang A.5 S. 171
Ausgleichsfilter	Edelstahl (Zusammensetzung und Dichte gemäß Herstellerangaben)	gemäß Herstellerangaben	Anhang A.6 S. 172
Dosismonitorsystem	Aluminium (Zusammensetzung und Dichte gemäß Herstellerangaben)	gemäß Herstellerangaben	Anhang A.7 S. 173
Spiegel	Aluminium (Zusammensetzung und Dichte gemäß Herstellerangaben) und Glas	gemäß Herstellerangaben	Anhang A.8 S. 173
Blockblende	Wolfram (Dichte gemäß Herstellerangaben)	gemäß Herstellerangaben	Anhang A.10 S. 174
Lamellenblende	Wolfram (Dichte gemäß Herstellerangaben)	gemäß Herstellerangaben und eigener Messungen (Nut- und Feder-Design, Laufrollenführung, Distanz zwischen den Lamellen)	Anhang A.11 S. 175

geometrischen Feldgrenzen.

Ziel dieser Arbeit ist unter anderem die Untersuchung des Einflusses des Ausgleichsfilters auf die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen. Hierzu wurden alle untersuchten Feldkonstellationen sowohl mit als auch ohne im Strahlengang befindlichen Ausgleichsfilter durchgeführt. Andere Parameter, wie beispielsweise die Elektronenenergie, wurden dabei bewusst nicht verändert, um ausschließlich durch den Ausgleichsfilter verursachte Änderungen sichtbar zu machen. Technisch realisiert wurden die Simulationen ohne Ausgleichsfilter durch die MCNP6-Funktion `void`. Der Ausgleichsfilter hat dann kein Material und keine Dichte mehr, die Strahlungsteilchen treten bei der Passage nicht in Wechselwirkung. Jedoch kann die Zelle weiterhin für die Markierung der Photonen (Abschnitt 4.4, S. 29) und somit zur Auswertung genutzt werden.

Der Nachbau der Lamellenblende gestaltete sich wegen der komplexen Geometrie der einzelnen Lamellen extrem aufwendig. Dies ergab sich einerseits durch das Nut- und Feder-Design (Abb. 4.4, S. 26) sowie der Kugellaufbahnen (Abb. 4.3(a), S. 25), andererseits durch den doppelt fokussierten Aufbau der Blende (Abb. 4.2 S. 23, Abb. 4.4 S. 26). Die Abwinkelung jeder einzelnen Lamelle entsprechend der Strahldivergenz hatte zur Folge, dass jede einzelne Lamelle individuell vollständig aufzubauen war. So ergaben sich alleine

für die Nachbildung der Lamellenblende etwa 800 Zeilen Programmier-Code (A.11 S. 175). Die einzelnen Lamellen wurden derart implementiert, dass deren Position zur Formung des Strahlenfeldes individuell über eine Drehmatrix leicht steuerbar war.

An ausgebauten Lamellen eines baugleichen Beschleunigers der Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie des UKL wurde das Nut- und Feder-Design mit einem Messschieber ausgemessen und schließlich präzise im Modell abgebildet (Abb. 4.4, S. 26).

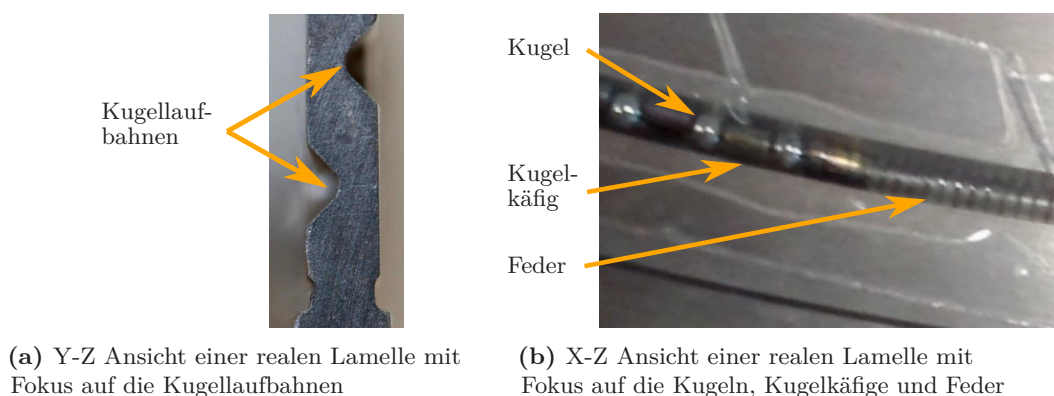
Die im Original zueinander versetzt und V-förmig ausgeführten Kugellaufbahnen (Abb. 4.3(a) S. 25) wurden aus programmiertechnischen Gründen rechteckig und auf gleicher Höhe modelliert (Abb. 4.4, S. 26). Auf die Nachbildung der Kugeln, der Kugelkäfige und der Federn (Abb. 4.3(b) S. 25) wurde verzichtet. Die im Rahmen dieser Arbeit erfolgreich durchgeführte Validierung des Modells zeigt, dass vorgenannte Bauelemente verzichtbar waren.

Die Distanzen zwischen den Lamellen wurden am realen Vorbild mittels einer Fühlerlehre gemessen und zu etwa 0,1 mm bestimmt (Abb. 4.4, S. 26). Die Spaltmaße waren zwischen den verschiedenen Lamellen in etwa gleich und wurden entsprechend in das Modell übernommen. Einen Querschnitt durch einen vollständigen Lamellensatz zeigt die Abb. 4.4, S. 26.

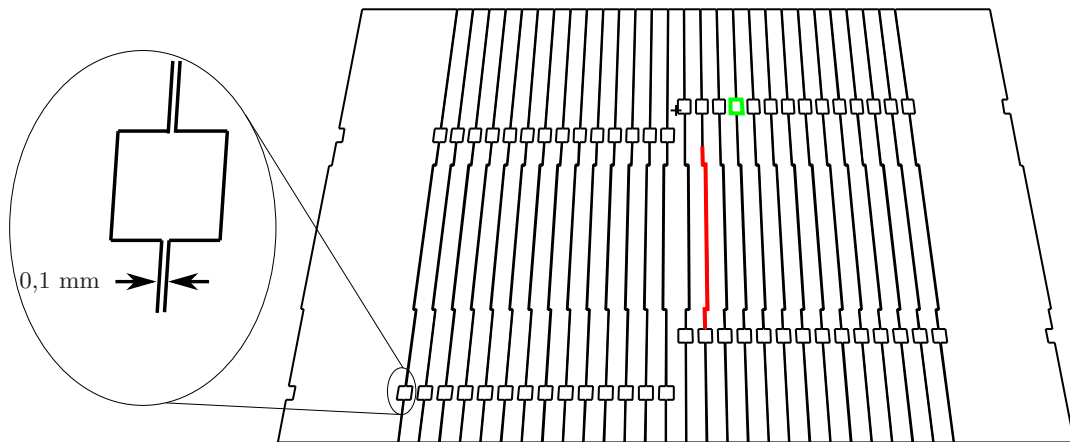
#### 4.2.2 Elektronenstrahlungsquelle

Die strahlerzeugenden und strahlformenden Komponenten des virtuellen Beschleunigers wurden, was die geometrischen Abmessungen, die Materialien und deren Dichte betrifft, einerseits nach Angaben des Herstellers und andererseits, wie bereits beschrieben, durch eigene Messungen detailliert nachgebildet.

Bestimmte Parameter, wie die mittlere Energie der Elektronen oder der Durchmesser des Elektronenstrahls, haben einen signifikanten Einfluss auf die Dosisverteilungen, sind jedoch nicht bekannt oder direkt zugänglich und fallen von Beschleuniger zu Beschleuniger individuell unterschiedlich aus. Sie können deshalb nur indirekt aus den gemessenen Dosisverteilungen bestimmt werden. Die Parameter wurden ermittelt, indem in strukturierter Art und Weise durch die Versuch-und-Fehler-Methode die simulierten Dosisverteilungen möglichst gut mit den gemessenen Verteilungen zur Überdeckung gebracht wurden. Das Vorgehen orientierte sich dabei an vorhandenen Veröffentlichungen [Alj06; Bed09; Lin01;



**Abbildung 4.3:** Detailaufnahmen einer Lamelle des realen Beschleunigers



**Abbildung 4.4:** Maßstabgerechter Y-Z Schnitt eines Satzes der modellierten Lamellenblende. Der Schnitt wurde mit Hilfe des „Geometry Plotter“, einer Funktion des MCNP6-Codes zur Visualisierung der in der Input-Datei programmierten Zellen, erzeugt. Zusätzlich wurde auf der linken Seite ein vergrößerter Ausschnitt zur Verdeutlichung der Distanz zwischen aneinandergrenzenden Lamellen eingefügt. Gut erkennbar ist die Ausrichtung der einzelnen Lamellen entsprechend der Strahldivergenz sowie das Nut- und Feder-Design (rot markiert) und die Kugellaufbahnen (grün markiert).

Pen04; Ser06; Ver03]. Für alle Simulationen wurde, wie vom Hersteller angegeben, ein gaußverteiltes Energiespektrum der Elektronen mit einer Halbwertsbreite von 14 % gewählt [Wol15]. Weiterhin ist der Elektronenstrahl laut Hersteller kreisförmig und hat einen Durchmesser von 2 mm in Höhe des Targets. Dieser Wert wurde als Startwert für den oben genannten iterativen Prozess gewählt.

#### Anpassung der mittleren Elektronenenergie an das reale Vorbild

Zur Anpassung der mittleren Elektronenenergie  $E_{EI}$  wurde zunächst die Tiefendosisverteilung bei einer Feldgröße von  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ , einem Strahldurchmesser von 2 mm in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter simuliert. Bei einer kleinen Feldgröße war zu erwarten, dass sich Änderungen in der Energie, aufgrund des kleineren Streuanteils im Wasserphantom, klarer in der Tiefendosisverteilung abbilden als bei größeren Feldabmessungen. Der Einfluss des Durchmessers des Elektronenstrahls wurde generell als klein auf die Tiefendosisverteilung angenommen. In Abhängigkeit davon, ob der abfallende Teil der simulierten Tiefendosisverteilung verglichen mit der gemessenen (Abschnitt 4.2.3, S. 27) zu steil oder zu flach ausgefallen ist, wurde die Elektronenenergie entsprechend erhöht bzw. erniedrigt. Der Vorgang wurde iterativ so lange fortgesetzt, bis die Kurven eine möglichst gute Überdeckung aufwiesen. Sowohl die simulierten als auch die gemessenen Dosiswerte der Verteilungen wurden hierzu auf den Wert in 10 cm Wassertiefe normiert und die Abweichungen der einzelnen simulierten Dosiswerte zu den gemessenen gegen den Ort aufgetragen.

#### Anpassung des Durchmessers des Elektronenstrahls an das reale Vorbild

Der Strahldurchmesser hat einen Einfluss auf die Höhe der Dosis an der Feldgrenze und die Breite des Halbschattens. Dies zeigt sich umso deutlicher, je größer die Feldgröße ist.

Zur Anpassung des Durchmessers wurde daher die in dieser Arbeit größte verwendete Feldgröße von  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  genutzt. Bei einem Strahldurchmesser von  $x=2\text{ mm}$  und  $y=2\text{ mm}$  (Herstellerangabe) wurde unter Verwendung der zuvor ermittelten mittleren Energie die Übereinstimmung der simulierten Dosishalbprofile in beiden Hauptebenen mit den Gemessenen (Abschnitt 4.2.3, S. 27) in einer Wassertiefe von  $10\text{ cm}$  und der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter geprüft. Die Strahldurchmesser wurden in einem nächsten Schritt systematisch so lange verändert, bis die Übereinstimmung bzgl. der Dosis an der Feldgrenze und des Halbschattens optimiert waren [Lin01]. Hierzu wurden, wie bei der Anpassung der Elektronenenergie, die simulierten und die gemessenen Dosiswerte der Verteilungen jeweils auf den Wert in  $10\text{ cm}$  Wassertiefe auf der Strahlenfeldachse normiert und die Abweichungen der einzelnen simulierten Dosiswerte gegenüber den gemessenen gegen den Ort aufgetragen.

#### Validierung der gefundenen Quellenparameter für kleinere Feldgrößen

Mit der ermittelten mittleren Elektronenenergie und der elektronischen Brennfleckgröße wurden Dosishalbprofile für die Feldgrößen  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  und  $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$  in einer Wassertiefe von  $10\text{ cm}$  und der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter simuliert und deren Abweichung zu den gemessenen Profilen (Abschnitt 4.2.3, S. 27) ermittelt.

#### 4.2.3 Dosisverteilungen des realen Beschleunigers

Für die Validierung des virtuellen Modells erforderliche Dosisverteilungen des realen Beschleunigers wurden von der Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie des UKL zur Verfügung gestellt. Generiert wurden diese an einem Elektronen-Linearbeschleuniger der Firma Siemens vom Typ Primus Mid Energy in Verbindung mit einem Wasserphantom der Firma PTW, Kantenlänge  $0,5\text{ m}$ , und einer Ionisationskammer vom Typ Semiflex Chamber (31002) der Firma PTW, mit einem Messvolumen von  $0,125\text{ cm}^3$ .

#### 4.2.4 Wasserphantom

Zur Generierung der interessierenden Dosisverteilungen war neben dem Beschleuniger selbst zusätzlich die Modellierung eines Wasserphantoms erforderlich. Der aus Wasser bestehende Kubus wurde mit einer Kantenlänge von  $50\text{ cm}$  zentrisch zur Zentralachse in einem Fokus-Oberflächen-Abstand von  $90\text{ cm}$  implementiert. Die Bestimmung der Energiedosis zu interessierenden Punkten im Wasserphantom erfolgte anhand zusätzlich eingebauter Zellen, die mit einer Tally-Karte (Abschnitt 3.3 S. 20) ausgewertet wurden. Diese Dosis-Zellen bestanden dabei ebenfalls aus Wasser.

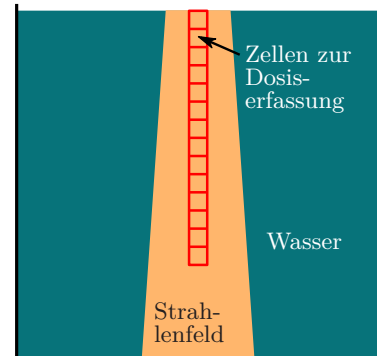
#### Voxelkonstellation bei der Simulation von Tiefendosiskurven

Es wurden kubische Dosis-Zellen mit einer Kantenlänge von  $0,5\text{ cm}$  entlang der Zentralachse bis zu einer Wassertiefe von  $30,25\text{ cm}$  angeordnet. Die Zellen haben dementsprechend ein Volumen von  $0,125\text{ cm}^3$  welches dem Messvolumen der Ionisationskammer entsprach, mit dem die Kurven am realen Beschleuniger aufgenommen wurde (Abb. 4.5 S. 28).

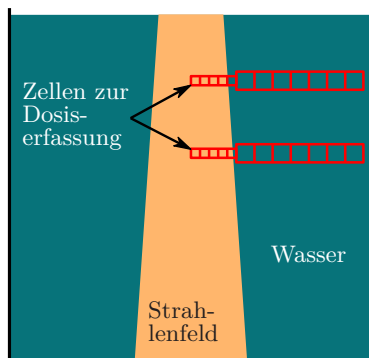
#### Voxelkonstellation bei der Simulation von Dosishalbprofilen

Innerhalb der geometrischen Feldgrenzen wurden kubische Dosis-Zellen mit einer Kantenlänge von  $0,5\text{ cm}$  eingebaut. Im Sinne einer Effizienzsteigerung bei der Durchführung

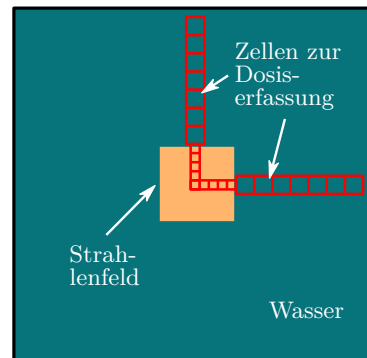
**Abbildung 4.5:** X-Z Schnitt des modellierten Wasserphantoms auf der Zentralachse ( $Y=0$  cm) zur Generierung der Tiefendosisverteilung. Die aus Wasser bestehenden Zellen zur Dosiserfassung sind in rot, das geometrische Strahlenfeld in orange eingezeichnet. Der Y-Z Schnitt ist identisch. Die Skizze ist nicht maßstabsgerecht. Die Zellen zur Dosiserfassung sind zur besseren Visualisierung im Vergleich zum Wasserphantom deutlich größer dargestellt.



der Simulationen mussten die Zellen außerhalb des Feldes erheblich vergrößert werden (Abb. 4.6 S. 28). Die Ausdehnungen der Zellen betragen entlang der X-Achse (Cross-Plane) in X-Richtung 2 cm, in Y-Richtung 0,5 cm und in Z-Richtung 2 cm, woraus sich ein Volumen von  $2\text{ cm}^3$  ergab. Die Abmessungen der Zellen in Y-Richtung (In-Plane) wurden analog gewählt. Die implementierten Dosis-Zellen ermöglichten eine Untersuchung der Dosisverteilung auf den Feld-Mittellinien von der Strahlenfeldachse bis zu einer Distanz von 20 cm (Dosishalbprofile) in Wassertiefen von 10 cm und 20 cm.



(a) X-Z Schnitt des modellierten Wasserphantoms auf der Zentralachse ( $Y=0$  cm)



(b) X-Y Schnitt des modellierten Wasserphantoms in 10 cm Wassertiefe

**Abbildung 4.6:** X-Z bzw. X-Y Schnitt des modellierten Wasserphantoms zur Generierung der Dosiserfassung in 10 cm bzw. 20 cm Wassertiefe. Die aus Wasser bestehenden Zellen zur Dosiserfassung sind in rot, das geometrische Strahlenfeld in orange eingezeichnet. Der Y-Z Schnitt ist identisch zum X-Z Schnitt. Die Skizzen sind nicht maßstabsgerecht. Die Zellen zur Dosiserfassung sind zur besseren Visualisierung im Vergleich zum Wasserphantom deutlich größer dargestellt.

### 4.3 Dosisbestimmung

Die Bestimmung der Dosis innerhalb der im Wasserphantom implementierten Dosis-Zellen erfolgte mit Hilfe des +F6 Tallies (Abschnitt 3.3 S. 20). Das auf diese Art ermittelte Ergebnis steht für die mittlere Dosis in der Dosis-Zelle pro aus der Strahlungsquelle emittiertem Elektron.

Anhand eines konkreten Beispiels (Quellcode 4.1 S. 29) soll die Funktionsweise erläutert

werden. Der +F6 Tally hat die Nummer 206. Die letzte Ziffer legt den Typ des Tallies fest. Es wird die gesamte Dosis in der Zelle Nr. 70 abgefragt. Die zweite Zeile gibt an, dass zusätzlich zur Gesamt-Dosis in der Zelle Nr. 70, diejenige Dosis ausgegeben wird, die von Photonen erzeugt wird, die zuvor die Zelle Nr. 20 passiert haben (cf = Cell Flagging). Entsprechend gibt die dritte Zeile diejenige Dosis aus, die von Photonen erzeugt wurde, die zuvor die Fläche Nr. 9 durchquert haben (sf = Surface Flagging).

```

1 +f206 70
2 cf206 20
3 sf206 9

```

**Quellcode 4.1:** Quellcode zur Ergebnisermittlung

Es wurden für alle betrachteten Feldkonstellationen (Abschnitt 4.5 S. 38) Dosishalbprofile in Cross- und In-Plane simuliert. Für jede Dosis-Zelle des Profils wurde die durch das gesamte Strahlungsfeld erzeugte Dosis sowie die Dosis durch markierte Photonen (Strahlungsfeldkomponenten, Abschnitt 4.4 S. 29) bestimmt und auf die Dosis der Strahlenfeldachse, verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld, in betreffender Wassertiefe normiert.

Zusätzlich wurden mittlere normierte Dosen außerhalb der geometrischen Feldgrenzen,  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;SFK}}$ , für eine gegebenen Hauptebene HE, die Betriebsweise hinsichtlich des Ausgleichsfilters BW, die Wassertiefe WT, die Feldgröße FG und die Strahlungsfeldkomponente SFK bestimmt. Eine Übersicht über die zur Mittelung herangezogenen Dosiswerte zeigt Tabelle 4.2 S. 29.

**Tabelle 4.2:** Übersicht über die Distanzen zur Strahlenfeldachse  $D_M$ , deren zugehörige Dosiswerte für die Ermittlung der mittleren Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen,  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;SFK}}$ , herangezogen wurden. Außerdem sind die geometrischen Feldgrenzen angegeben.

Feldgröße	Distanz zur Strahlenfeldachse			
	Wassertiefe 10 cm		Wassertiefe 20 cm	
	geom. Feldgrenze	$D_M$	geom. Feldgrenze	$D_M$
5 cm × 5 cm	2,5 cm	3,5 cm ... 16 cm	2,75 cm	3,5 cm ... 16 cm
10 cm × 10 cm	5 cm	6 cm ... 20 cm	5,5 cm	6 cm ... 20 cm
20 cm × 20 cm	10 cm	11 cm ... 20 cm	11 cm	12 cm ... 20 cm

#### 4.4 Generierung der Strahlungsfeldkomponenten

Wesentlich für die Umsetzung der Aufgaben der vorliegenden Arbeit war die Dekomposition des Strahlungsfeldes, die durch die Generierung von Strahlungsfeldkomponenten erreicht wurde. Das Strahlungsfeld wurde in einzelne Komponenten zerlegt. Eine Strahlungsfeldkomponente beinhaltet dabei Photonen, die bei der Passage durch eine zuvor festgelegte Zelle oder Fläche markiert wurden. Hierdurch war es möglich, die räumliche Ausbreitung des Strahlungsfeldes indirekt nachzuvollziehen.

Die Bezeichnung einer Strahlungsfeldkomponente richtete sich nach dem Namen des markierenden Objektes. Erhalten die Photonen beispielsweise eine Markierung durch die Zellen Nr. 30, so lautet die Bezeichnung „Strahlungsfeldkomponente der Zelle Nr. 30“.

Die für die Dekomposition des Strahlungsfeldes des Elektronenlinearbeschleunigers erforderlichen Zellen bzw. Flächen waren entweder bereits durch das Modell des Strahlerkopfes (Abb. 4.2 S. 23) selbst vorhanden oder es wurden zusätzliche Zellen implementiert, die jedoch keinen Einfluss auf das Strahlungsfeld hatten.

Im weiteren Verlauf der vorliegenden Schrift ist die Unterscheidung der Begrifflichkeiten „Strahlungsfeld“ und „Strahlenfeld“ (auch „geometrisches Strahlenfeld“) von besonderer Relevanz. Auch wenn die Begriffe bereits im Glossar definiert wurden, soll der Unterschied nochmals kurz erläutert werden: Unter dem Strahlungsfeld wird in dieser Arbeit die Verteilung von Strahlung im Raum allgemein ohne Einschränkung verstanden. Das Photonen-Strahlungsfeld breitet sich vom Target in den Raum hinein aus. Das geometrische Strahlenfeld ist ein Teil des Strahlungsfeldes. Es ist genau derjenige Teil, der sich vom Target innerhalb des räumlichen Bereichs, den die Blenden begrenzen, in den Raum entlang der Strahlenfeldachse ausbreitet. Das geometrische Strahlenfeld ist damit eine Komponente des Strahlungsfeldes.

### 4.4.1 Targetsystem

Bei der Passage des Targetsystems wurden Photonen markiert, wenn sie die Fläche Nr. 8 oder die Fläche Nr. 9 durchquert haben (Abb. 4.7, S. 31). Es wurden somit zwei Strahlungsfeldkomponenten generiert.

Der beabsichtigte Informationsgewinn war die Quantifizierung der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen verursacht durch Photonen, die das Targetsystem nicht, wie vorgesehen, über das Strahlaustrittsfenster (Fläche Nr. 8) passiert haben, sondern über dessen Einfassung, die Fläche Nr. 9. Insbesondere bestand die Möglichkeit, die Entwicklung der OfD beider Strahlungsfeldkomponenten mit wachsender Distanz zur Strahlenfeldachse zu untersuchen.

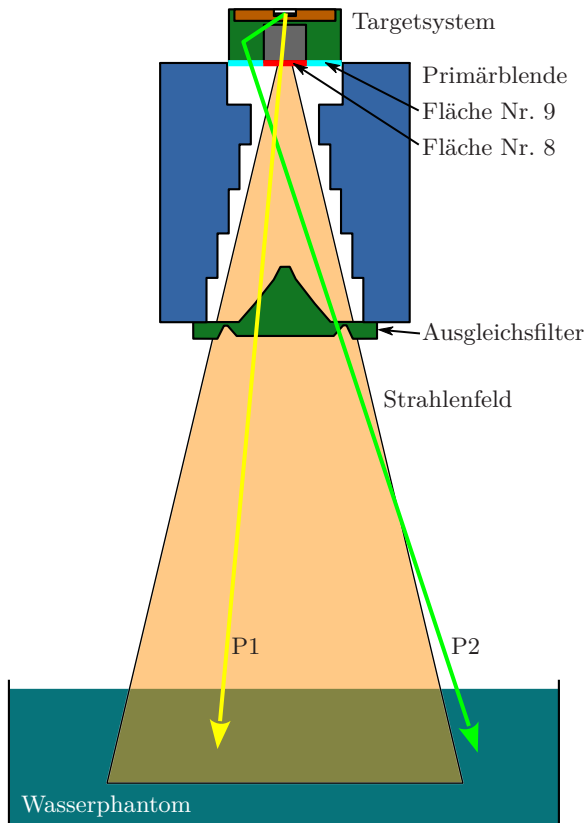
### 4.4.2 Primärblende

An der Primärblende wurden Photonen markiert, wenn diese die Zelle Nr. 20 passiert haben (Abb. 4.8, S. 32). Es konnte dabei nicht unterschieden werden, ob das Photon die Zelle ungestört passiert hat oder ob es gestreut wurde. Die Cell-Flagging Funktion des MCNP6 Codes bietet diesbezüglich keine Funktion. Denkbar wären im ersten Fall beispielsweise Photonen, die das Targetsystem über die Fläche Nr. 9 verlassen haben und in der Folge den obersten „Zahn“ der Primärblende ohne Streuung passieren (Photon P2 in Abb. 4.8, S. 32). Photonen waren dann durch die Primärblende markiert, obwohl die Blende nicht der Grund für den Beitrag des Photons an der Dosis außerhalb der Feldgrenzen ist, sondern das Targetsystem – eine Gegebenheit, die bei der Auswertung der Ergebnisse zu berücksichtigen war. Der Ort des Eintritts und des Austritts aus der Zelle der Primärblende konnte nicht genauer bestimmt werden. Ziel der Implementierung dieser Strahlungsfeldkomponente war die Quantifizierung der OfD von die Zelle der Primärblende passierenden Photonen insgesamt sowie die Entwicklung der OfD mit wachsender Distanz zur Strahlenfeldachse.

### 4.4.3 Ausgleichsfilter

Am Ausgleichsfilter wurden Photonen, analog zur Primärblende, markiert, wenn diese die Zelle Nr. 30 passiert haben (Abb. 4.9, S. 33). Eine Unterscheidung zwischen einer alleinigen





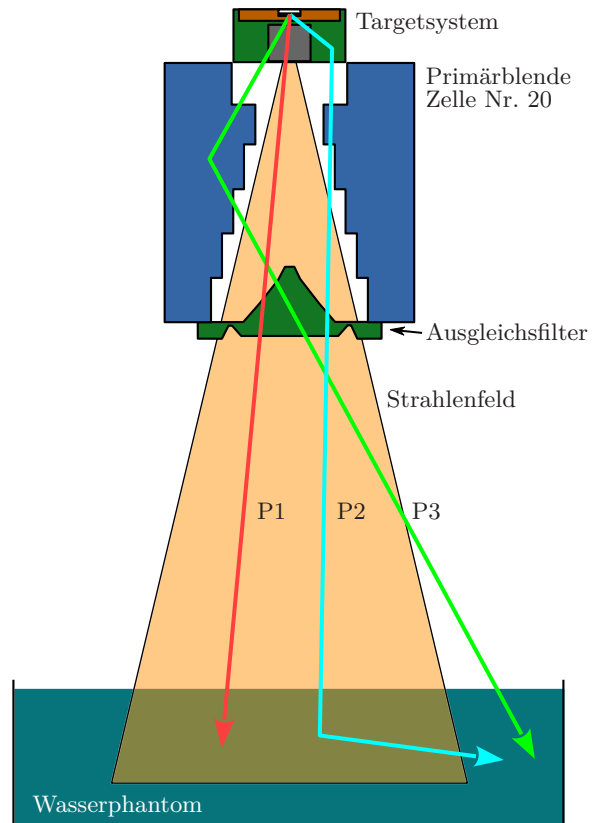
**Abbildung 4.7:** X-Z Schnitt ausgewählter Baugruppen des Beschleunigerkopfes und des Wasserphantoms auf der Strahlenfeldachse ( $Y=0\text{ cm}$ ) zur Veranschaulichung der Markierung von Photonen durch das **Targetsystem** (nicht maßstabsgerecht). Die Markierung der Photonen erfolgt bei der Passage der Flächen Nr. 8 (rot) und Nr. 9 (blau) und soll an zwei Beispielen erläutert werden: Das Photon P2, dessen Trajektorie durch einen grünen Pfeil dargestellt wird, verlässt das Targetsystem nach einem Streuprozess über die Fläche Nr. 9 und erhält hierbei eine Markierung durch die Fläche Nr. 9. Das Photon P1 (gelber Pfeil) wird durch Fläche Nr. 8 markiert. Die Lamellenblende, der Spiegel und das Dosismonitorsystem wurden aus Gründen der Übersicht nicht eingezeichnet.

Passage der Photonen durch den Ausgleichsfilter oder der Streuung war, wie bei der Primärblende, nicht möglich. Im Falle der Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter erfolgte die Markierung ebenso durch die Zelle, da sich diese weiterhin im Strahlengang befand, jedoch die Wechselwirkungen zwischen Photonen und Ausgleichsfilter „ausgeschaltet“ wurden. Ziel der Erzeugung dieser Strahlungsfeldkomponente war die Feststellung, inwieweit Photonen, die nicht den Ausgleichsfilter passieren (Photon P3 Abb. 4.9, S. 33), zur Dosis außerhalb der Feldgrenzen beitragen, die Quantifizierung der hierdurch erzeugten OfD und die Entwicklung der OfD mit wachsender Distanz zur Strahlenfeldachse.

#### 4.4.4 Winkelanalysescheibe

Die im realen Beschleuniger nicht vorhandene Winkelanalysescheibe wurde unmittelbar unterhalb des Ausgleichsfilters implementiert (Abb. 4.10 S. 34) und dient der Zerlegung des geometrischen Strahlenfeldes in konzentrische Komponenten, dessen Zentrum die Strahlenfeldachse ist. Die Winkelanalysescheibe hat sich aus konzentrischen, aneinander angrenzenden Hohlzylindern sehr kleiner Höhe (1 mm) zusammengesetzt (Abb. 4.10 S. 34). Die Wanddicken der Zylinder sind dabei gerade so bemessen, dass, aus Sicht des Brennflecks, jeweils ein Winkelbereich von  $1^\circ$  zur Strahlenfeldachse überdeckt wurde. Jede Wand eines Hohlzylinders wurde als photonenmarkierendes Element (Zelle) definiert. Die Anordnung von insgesamt 22 Zellen überdeckte somit einen Winkelbereich von  $0^\circ$  bis  $22^\circ$  zur Strahlenfeldachse. Die derartige Zerlegung des geometrischen Strahlenfeldes gestattete

**Abbildung 4.8:** X-Z Schnitt ausgewählter Baugruppen des Beschleunigerkopfes und des Wasserphantoms auf der Strahlenfeldachse ( $Y=0\text{ cm}$ ) zur Veranschaulichung der Markierung von Photonen durch die **Primärblende** (nicht maßstabgerecht). Die Markierung der Photonen erfolgt ausschließlich bei der Passage der aus einer einzigen Zelle bestehenden Primärblende (Zelle Nr. 20, blau dargestellt) und soll an drei Beispielen erläutert werden: Das Photon P1, dessen Trajektorie durch einen roten Pfeil dargestellt wird, erhält keine Markierung, da es die Zelle der Primärblende nicht passiert. Die Photonen P2 (hellblauer Pfeil) und P3 (grüner Pfeil) erhalten eine Markierung. Die Lamellenblende, der Spiegel und das Dosismonitorsystem wurden aus Gründen der Übersicht nicht eingezeichnet.

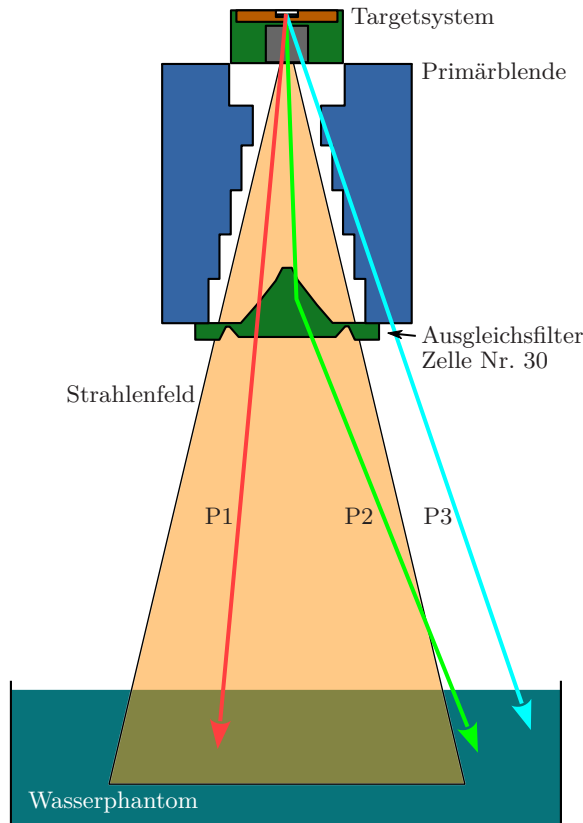


die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen dem Emissionswinkel der Photonen aus dem Targetsystem (bzw. ggf. aus dem Ausgleichsfilter) und deren Einfluss auf die Höhe der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen.

Wie bereits beschrieben (Abschnitt 3.1, S. 13), hat der Ausgleichsfilter insbesondere einen Einfluss auf das Spektrum der Photonen im geometrischen Strahlenfeld. Es ist daher zu untersuchen, inwiefern sich diese Änderung auf die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen auswirkt. Die Winkelanalysescheibe ermöglichte diesbezüglich einen detaillierten Einblick. So konnte beispielsweise der Anteil an der Dosis außerhalb der Feldgrenzen durch Photonen, die in einem Winkelbereich von  $0^\circ$  bis  $1^\circ$  zur Strahlenfeldachse emittiert wurden, in den Betriebsweisen mit und ohne im Strahlengang befindlichen Ausgleichsfilter bestimmt werden. Aufgrund der Emissionscharakteristik der Photonen aus dem Target hinsichtlich Intensität und Energie und der Form des Ausgleichsfilters (abnehmende Materialdicke weiter außerhalb) ist eine Winkelabhängigkeit zur Strahlenfeldachse zu erwarten, die mit Hilfe der Winkelanalysescheibe untersucht werden konnte.

#### 4.4.5 Blockblende

Die Blockblende wurde aus zwei Zellen, den einzelnen Blendenblöcken, modelliert. Eine Markierung von Photonen alleine durch die einzelnen Blendenblöcke hätte einen sehr begrenzten Informationsgewinn zur Folge gehabt. Es hätte lediglich die Dosis durch Photonen ermittelt werden können, die einen Blendenblock passiert haben. Um genauere Informationen bzgl.



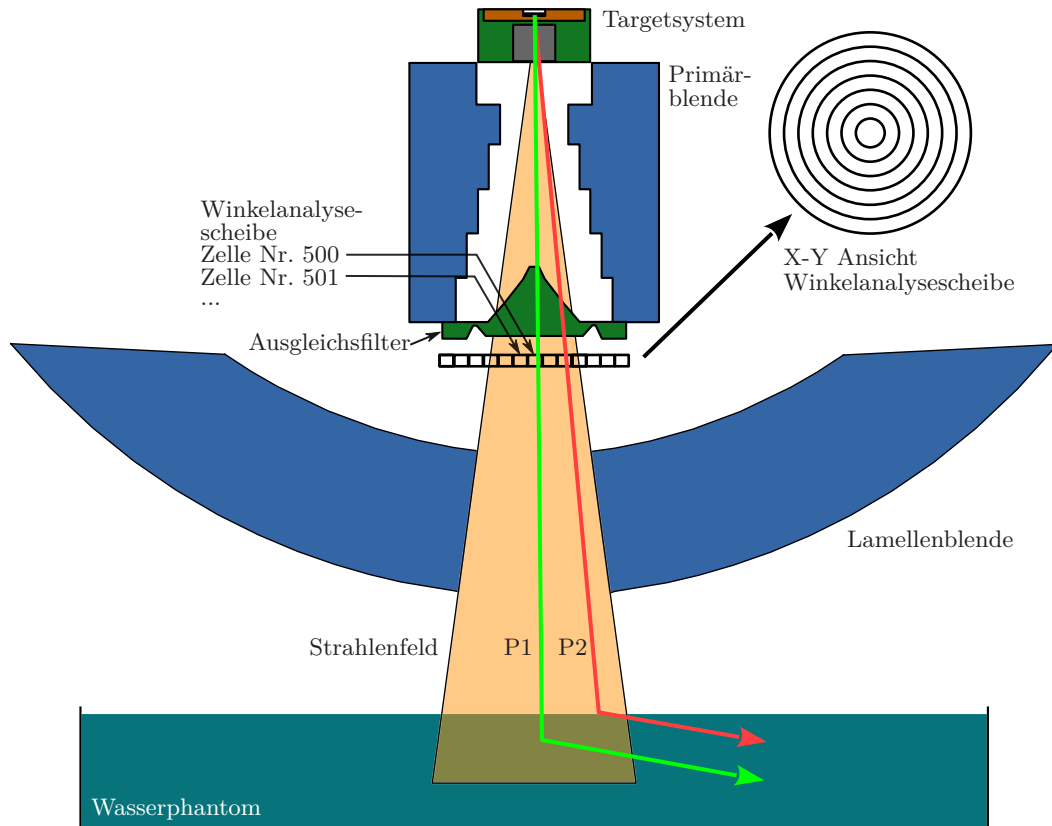
**Abbildung 4.9:** X-Z Schnitt ausgewählter Baugruppen des Beschleunigerkopfes und des Wasserphantoms auf der Strahlungsfeldachse ( $Y=0\text{ cm}$ ) zur Veranschaulichung der Markierung von Photonen durch den **Ausgleichsfilter** (nicht maßstabsgerecht). Die Markierung der Photonen erfolgt ausschließlich bei der Passage des aus einer einzigen Zelle bestehenden Ausgleichsfilters (Zelle Nr. 30, grün dargestellt) und soll an drei Beispielen erläutert werden: Die Photonen P1 und P2, dessen Trajektorien durch einen roten bzw. grünen Pfeil dargestellt werden, erhalten eine Markierung, da sie die Zelle des Ausgleichsfilters passieren. Das Photon P3 (hellblauer Pfeil) erhält keine Markierung. Die Lamellenblende, der Spiegel und das Dosismonitorsystem wurden aus Gründen der Übersicht nicht eingezeichnet.

der Passage von Photonen durch einen Block zu erhalten, wurden zusätzliche Zellen zur Markierung von Photonen implementiert. Eine Übersicht zeigt die Abbildung 4.11 auf Seite 35. Sowohl die fokusnahe Eintrittsseite als auch die fokusferne Austrittsseite des Strahlungsfeldes der Blockblende wurden einschließlich des geometrischen Strahlungsfeldes vollständig mit photonenmarkierenden Zellen überdeckt. Die Zellen hatten in X-Richtung eine Ausdehnung, die derjenigen der Blockblende entsprach. Hierdurch konnte sichergestellt werden, dass das gesamte in die Blockblende ein- und austretende Strahlungsfeld erfasst wurde.

Zusätzlich wurden die wirksamen Kanten der einzelnen Blöcke, dies sind die Flächen Nr. 203 und Nr. 253 (Abb. 4.11, S. 35) als photonenmarkierende Elemente genutzt.

Die separate Betrachtung der Strahlungseintritts- und -austrittsseite der Blockblende gestattete die Erfassung möglicher Ausbreitungsrichtungsänderungen des Strahlungsfeldes durch Streuprozesse während der Passage durch die Blockblende. Denkbar wäre beispielsweise, dass Photonen die Zelle Nr. 602, die Fläche Nr. 203 und schließlich die Zelle Nr. 604 passieren (Photon P2 in Abb. 4.11, S. 35).

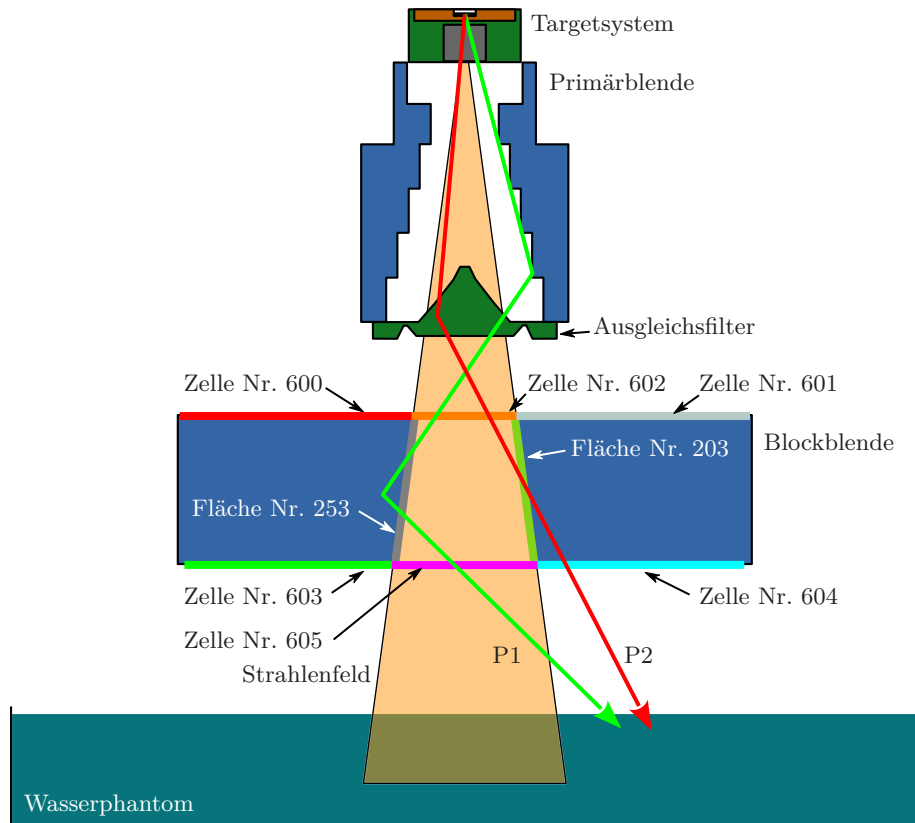
Photonen wurden durch die Fläche Nr. 203 bzw. Nr. 253 markiert, wenn diese die Fläche mindestens einmal durchquert hatten. Denkbare Trajektorien für die Markierung waren beispielsweise die Passage der Zelle Nr. 602, der Fläche Nr. 203 und der Zelle Nr. 604 (Photon P2 in Abb. 4.11, S. 35) oder die Passage der Zelle Nr. 602, der Fläche Nr. 253 und



**Abbildung 4.10:** X-Z Schnitt ausgewählter Baugruppen des Beschleunigerkopfes und des Wasserphantoms auf der Strahlenfeldachse ( $Y=0\text{ cm}$ ) zur Veranschaulichung der Markierung von Photonen durch die **Winkelanalysescheibe** (nicht maßstabsgerecht). Die Markierung der Photonen erfolgt ausschließlich bei der Passage betreffender Zellen der Winkelanalysescheibe und soll an zwei Beispielen erläutert werden: Das Photon P1, dessen Trajektorie durch einen grünen Pfeil dargestellt wird, erhält eine Markierung durch die Zelle Nr. 500. Das Photon P2 (rote Trajektorie) erhält eine Markierung durch die Zelle Nr. 502. Der Spiegel und das Dosismonitorsystem wurden aus Gründen der Übersicht nicht eingezeichnet.

durch Streuprozess des Photons im Blendenblock erneut Fläche Nr. 253 sowie im Anschluss die Zelle Nr. 605 (Photon P1 in Abb. 4.11, S. 35).

In diesem Zusammenhang soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass eine UND-Verknüpfung bei der Markierung von Photonen nicht möglich war. Dem Ergebnis einer Simulation konnte nicht entnommen werden, ob ein Photon etwa die Trajektorie des Photons P2 in Abb. 4.11 durchlaufen hatte. Es konnte ausschließlich ermittelt werden, wie hoch die Dosis durch Photonen in einer ausgewählten Zelle zur Dosiserfassung im Wasserphantom war, die eine markierende Zelle oder Fläche passiert hatten - unabhängig davon, welche markierenden Elemente zuvor oder nachfolgend passiert wurden. In Bezug auf das Photon P2 in Abb. 4.11, S. 35 heißt dies beispielsweise: die durch das gesamte Strahlungsfeld erzeugte relative Dosis in einer Zelle zur Dosiserfassung im Wasserphantom (Abb. 4.6 S. 28) beträgt 5%; die in der betrachteten Zelle erzeugte relative Dosis durch



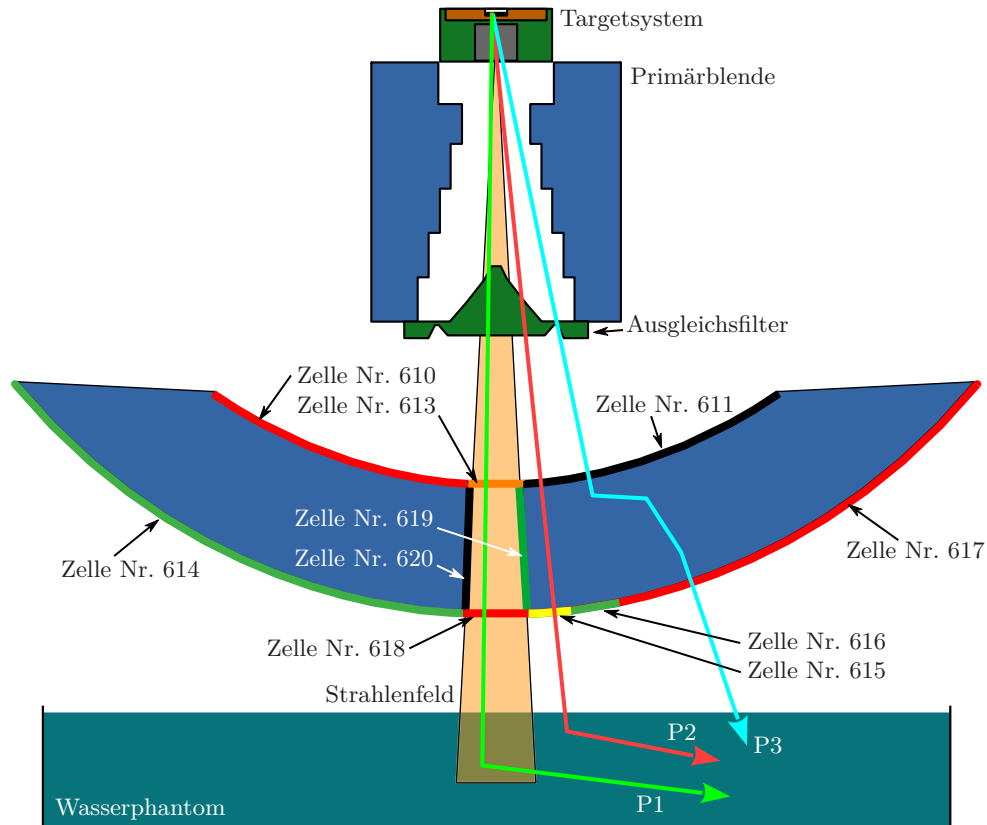
**Abbildung 4.11:** Y-Z Schnitt ausgewählter Baugruppen des Beschleunigerkopfes und des Wasserphantoms auf der Strahlenfeldachse ( $X=0\text{ cm}$ ) zur Veranschaulichung der Markierung von Photonen an der **Blockblende** (nicht maßstabsgerecht). Die Markierung der Photonen erfolgt ausschließlich bei der Passage betreffender Zellen bzw. Flächen und soll an zwei Beispielen erläutert werden: Das Photon P1, dessen Trajektorie durch einen grünen Pfeil dargestellt wird, erhält eine Markierung durch die Zelle Nr. 602, die Fläche Nr. 253 und die Zelle Nr. 605. Das Photon P2 (rote Trajektorie) erhält eine Markierung durch die Zelle Nr. 602, die Fläche Nr. 203 und die Zelle Nr. 604. Der Spiegel und das Dosismonitorsystem wurden aus Gründen der Übersicht nicht eingezeichnet.

markierte Photonen der Fläche Nr. 203 beträgt 1%, die relative Dosis durch markierte Photonen der Zelle Nr. 605 beträgt 4%, die durch Zelle Nr. 604 1%. Es konnte nicht bestimmt werden, ob das durch Fläche Nr. 203 markierte Photon im Anschluss die Zelle Nr. 605 oder Nr. 604 passiert hat.

#### 4.4.6 Lamellenblende

Die Ausführungen zur Blockblende sind entsprechend auf die Lamellenblende übertragbar (Abb. 4.12, S. 36). Eine Ausnahme betrifft die photonenmarkierende Zelle an der Austrittsseite eines Lamellensatzes. Diese wurde zur Lokalisation der Austrittsseite der Photonen, die eine Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen erzeugten, dreifach unterteilt (Zellen Nr. 615, Nr. 616 und Nr. 617 in Abb. 4.12, S. 36). Die Unterteilung diente

der Feststellung, inwieweit äußere Bereiche des Lamellensatzes zur OfD, beispielsweise durch Vielfachstreuprozesse, beitragen.

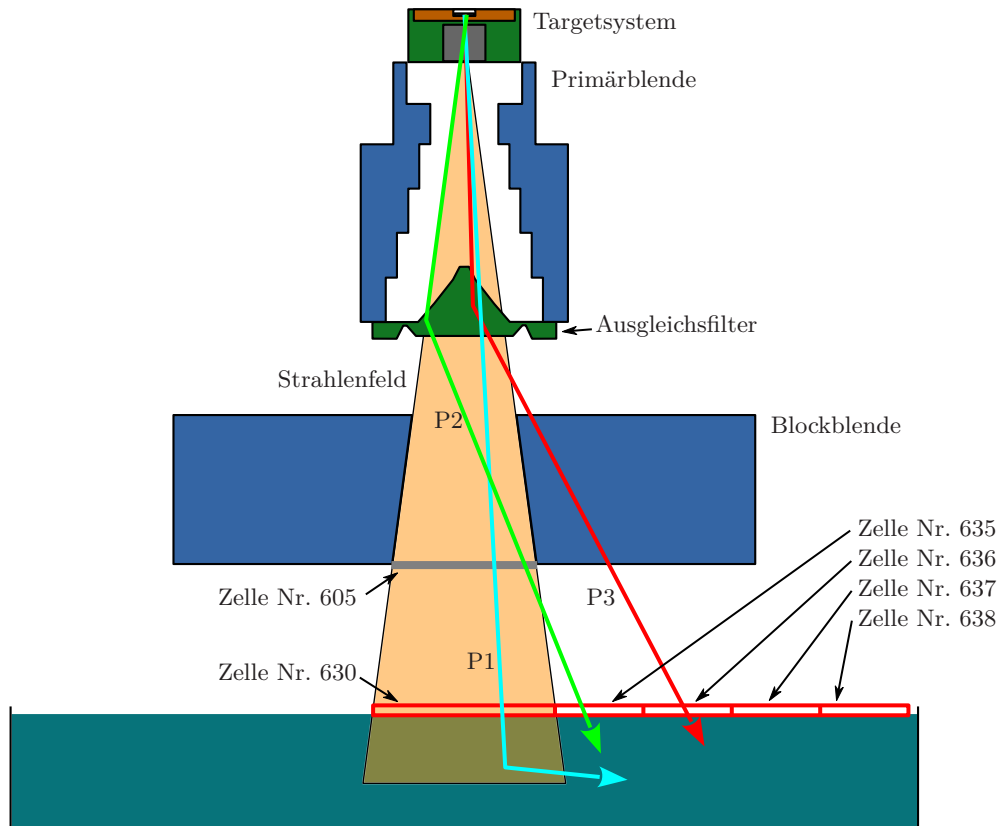


**Abbildung 4.12:** X-Z Schnitt ausgewählter Baugruppen des Beschleunigerkopfes und des Wasserphantoms auf der Strahlenfeldachse ( $Y=0$  cm) zur Veranschaulichung der Markierung von Photonen an der **Lamellenblende** (nicht maßstabsgerecht). Die Markierung der Photonen erfolgt ausschließlich bei der Passage betreffender Zellen und soll an drei Beispielen erläutert werden: Das Photon P1, dessen Trajektorie durch einen grünen Pfeil dargestellt wird, erhält eine Markierung durch die Zellen Nr. 613 und 618, das Photon P2 (rote Trajektorie) durch die Zellen Nr. 611 und Nr. 615. Das Photon P3 (blaue Trajektorie) wird durch die Zelle Nr. 611 und nach einem Mehrfach-Streuprozess durch die Zelle Nr. 617 markiert. Der Spiegel und das Dosismonitorsystem wurden aus Gründen der Übersicht nicht eingezeichnet.

#### 4.4.7 Wasserphantom

Die Implementierung von Zellen unmittelbar oberhalb des Wasserphantoms (Abb. 4.13, S. 37, Abb. 4.14, S. 38) ermöglichte die Bestimmung der Eintrittsorte von Photonen, die eine Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen zur Folge hatten.

Durch die Zelle Nr. 630 wurden alle Photonen markiert, die innerhalb der geometrischen Feldgrenzen auf das Wasserphantom getroffen sind. So konnte die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen durch Photonen bestimmt werden, die innerhalb der geometrischen Feldgrenzen auf das Wasserphantom getroffen sind und anschließend über Streuprozesse im Wasserphantom eine Dosis außerhalb der Feldgrenzen verursacht haben.

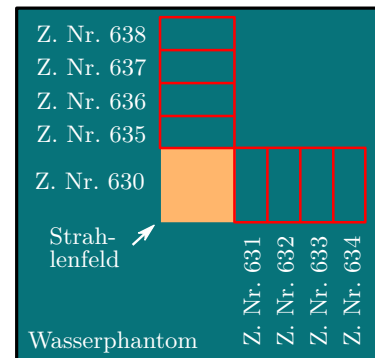


**Abbildung 4.13:** Y-Z Schnitt ausgewählter Baugruppen des Beschleunigerkopfes und des Wasserphantoms auf der Strahlenfeldachse ( $X=0\text{ cm}$ ) zur Veranschaulichung der Markierung von Photonen durch unmittelbar oberhalb des **Wasserphantoms** positionierte Zellen (nicht maßstabsgerecht). Der X-Z Schnitt ist bezüglich der Größe und der Anzahl der markierenden Zellen identisch (Abb. 4.14, S. 38). Die Markierung der Photonen erfolgt ausschließlich bei der Passage betreffender Zellen und soll an drei Beispielen erläutert werden: Das Photon P1, dessen Trajektorie durch einen blauen Pfeil dargestellt wird, erhält eine Markierung durch die Zelle Nr. 630, das Photon P2 (grüne Trajektorie) durch die Zelle Nr. 635, das Photon P3 (rote Trajektorie) durch die Zelle Nr. 636. Der Spiegel und das Dosismonitorsystem wurden aus Gründen der Übersicht nicht eingezeichnet.

Neben den zuvor genannten Photonen, die innerhalb der Feldgrenzen auf das Wasserphantom trafen, bestand die Möglichkeit, dass Photonen den Strahlerkopf innerhalb der geometrischen Feldgrenzen verließen, aber außerhalb der Feldgrenzen auf das Phantom trafen (Photon P2 in Abb. 4.13, S. 37). Dieser Anteil an der Dosis außerhalb der Feldgrenzen konnte durch Vergleich der Dosis von Photonen, markiert durch Zelle Nr. 605 und Nr. 630, bestimmt werden.

Mit Hilfe der angrenzenden Zellen (Cross-Plane: Nr. 631 bis Nr. 634 und In-Plane: Nr. 635 bis Nr. 638) wurden Strahlungsfeldkomponenten generiert, die den Anteil des Strahlungsfeldes erfassten, der außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes auf das Wasserphantom traf (Photon P2 in Abb. 4.13, S. 37). Die Größe der Zellen wurde in X bzw. Y Richtung

an die jeweilige Feldgröße angepasst. Die Anzahl der Zellen außerhalb des geometrischen Feldes war für alle simulierten Feldgrößen gleich. Es wurden die Abmessungen derart angepasst, dass der Bereich von der geometrischen Feldgrenze bis kurz vor der Wand des Wasserphantoms überdeckt war. Die Größe der Zellen in X- bzw. Y-Richtung war von untergeordneter Relevanz. Ziel war die grobe Lokalisation der Eintrittsorte der Photonen für die Erfassung der Entwicklung mit der Distanz zum geometrischen Strahlenfeld. Die Ausdehnung in Z-Richtung betrug 1 mm.



**Abbildung 4.14:** X-Y Schnitt an der Strahleintrittsfläche des Wasserphantoms zur Veranschaulichung der Markierung von Photonen durch unmittelbar oberhalb des Wasserphantoms positionierte Zellen.

#### 4.5 Untersuchung des Einflusses ausgewählter Parameter auf die Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss von vier Parametern, dies waren die Feldgröße, die Wassertiefe, die Hauptebene und die Betriebsweise in Abhängigkeit der Präsenz des Ausgleichsfilters, auf die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen untersucht. In der Summe wurden somit 24 Feldkonstellationen simuliert.

##### 4.5.1 Feldgröße

Ein Einfluss der Feldgröße auf die OfD ist aus der Literatur wohlbekannt. Zur Untersuchung und Quantifizierung der Änderungen wurden insgesamt drei Feldgrößen mit den Abmessungen  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ,  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  und  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  simuliert.

##### 4.5.2 Wassertiefe

Die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen wurde für alle drei Feldgrößen in 10 cm und 20 cm Wassertiefe untersucht.

##### 4.5.3 Hauptebene

Für alle betrachteten Feldgrößen und Wassertiefen wurden beide Hauptebenen des Beschleunigers betrachtet. Ein Einfluss der Hauptebene war einerseits aufgrund der unterschiedlichen geometrischen Gegebenheiten - die differierende Distanz der Block- bzw. Lamellenblende zum Target - zu erwarten, andererseits wegen der erhöhten Durchlassstrahlung zwischen den einzelnen Lamellen der Lamellenblende (interleaf leakage).

##### 4.5.4 Ausgleichsfilter

Alle Konstellationen aus Feldgröße, Wassertiefe und Hauptebene wurden in der Betriebsweise mit und ohne Ausgleichsfilter untersucht und insbesondere quantifiziert.



## 4.6 Durchführung der Monte-Carlo-Simulationen

Alle in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen wurden auf einem Rechnerverbund bestehend aus vier Personal-Computern mit Windows 7 Betriebssystem und i7 Prozessoren ausgeführt. Die Software MPICH2 [mpi], eine frei erhältliche Implementierung des Message Passing Interface (MPI), ermöglichte dabei die parallele Berechnung auf dem Rechnerverbund.

Die Anzahl der Teilchenhistorien in einer Simulation wurde derart gewählt, dass der relative Fehler des Ergebnisses mindestens kleiner als 10 % war, um die erforderliche Verlässlichkeit des Ergebnisses zu erreichen (Abschnitt 3.3 S. 20). In Ausnahmefällen waren größere Fehler, in der Regel dann, wenn die Dosiswerte sehr klein waren, unvermeidbar. Für die Anpassung der Elektronenstrahlenquelle des virtuellen Beschleunigers an den Realen war, was die Elektronenenergie und den Strahldurchmesser betrifft, ein relativer Fehler von etwa 2 % erforderlich, damit die Kurven „glatt“ genug waren und Unterschiede deutlich erkennbar wurden.

### 4.6.1 Simulationsparameter

MCNP verfügt über eine große Anzahl von Parametern, die insbesondere den Strahlungstransport, die möglichen physikalischen Wechselwirkungen und die Dosisermittlung betreffen. Die in diesem Zusammenhang relevantesten Karten bzw. deren Parameter werden nachfolgend kurz vorgestellt.

*Mode* Mit der Mode-Karte wird die Art der Strahlungsteilchen, die bei einer Simulation transportiert werden, bestimmt. Für alle durchgeführten Simulationen wurden hier Photonen und Elektronen gewählt, so dass keinerlei Näherungsverfahren - wie beispielsweise die „Dicke-Target-Näherung“ oder in Verbindung mit einem Tally die „Kerma-Näherung“ - Verwendung fanden.

*Phys* Die Phys-Karten gestatten die Einstellung teilchenphysikalischer Eigenschaften der Photonen und Elektronen. Eine Übersicht, einschließlich der in dieser Arbeit verwendeten Parameter, zeigen die Tabellen 4.3, S. 39 und 4.4, S. 40. Insbesondere waren die Erzeugung von Sekundärelektronen durch Photonen und die Erzeugung von Photonen durch Elektronen eingeschaltet. Bezüglich der Bremsstrahlungserzeugung durch Elektronen gab es keine Einschränkungen hinsichtlich der Winkelverteilung. Die Anzahl der erzeugten Bremsstrahlungsphotonen durch ein Elektron war nicht höher als in der Realität.

**Tabelle 4.3:** Übersicht über die in dieser Arbeit verwendeten Simulationsparameter in Bezug auf Photonen

Parameter	Beschreibung	Einstellung
emcpf	Legt die obere Grenzenergie der Photonen fest	100 MeV
ides	Steuert die Erzeugung von Elektronen durch Photonen	eingeschaltet
nocoh	Steuert die Erzeugung kohärenter Streuung	eingeschaltet
ispn	Steuert photoneninduzierte Kernreaktionen	eingeschaltet
nodop	Steuert die Photonen-Doppler-Verbreiterung	eingeschaltet

**Tabelle 4.4:** Übersicht über die in dieser Arbeit verwendeten Simulationsparameter in Bezug auf Elektronen

Parameter	Beschreibung	Einstellung
emax	Legt die obere Grenzenergie der Elektronen fest	100 MeV
ides	Steuert die Erzeugung von Elektronen durch Photonen	eingeschaltet
iphot	Steuert die Erzeugung von Photonen durch Elektronen	eingeschaltet
ibad	Steuert die Winkelverteilung der Bremsstrahlung	vollständige Simulation, keine Näherung
istrg	Steuert das Elektron-„straggling“	vollständige Simulation, keine Näherung
bnum	Steuert die Erzeugung von Bremsstrahlungs-Photonen	analog, wie in der Natur
xnum	Steuert die Erzeugung elektroneninduzierter Photonenerzeugung	analog, wie in der Natur

#### 4.6.2 Varianzreduktionsverfahren

Die unteren Abschneideenergien (Abschnitt 3.3, S. 19) wurden für Photonen auf 10 keV und für Elektronen auf 50 keV festgelegt.

Das Geometrie-Gewichtsverfahren mit russischem Roulette (Abschnitt 3.3, S. 19) wurde sowohl für die Photonen als auch für die Elektronen genutzt. Relevante Zellen waren dabei insbesondere

- das Target (dies wurde entlang der Strahlenfeldachse zur Vervielfachung der Strahlungsteilchen mehrfach in Zellen unterteilt)
- die Primärblende
- der Ausgleichsfilter (in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter)
- die Blendenblöcke der Blockblende
- die Lamellen der Lamellenblende
- das Wasserphantom (an der Eintrittsfläche)
- zusätzliche Zellen innerhalb des Wasserphantoms im geometrischen Strahlenfeld, insbesondere bei den Simulationen der Tiefendosiskurve
- zusätzliche Zellen innerhalb des Wasserphantoms außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes zur Verbesserung der Statistik bei der Dosismittlung außerhalb des Feldes
- und die Zellen zur Dosismittlung innerhalb des Wasserphantoms.

Die konkreten Werte der jeweiligen Importance (Abschnitt 3.3, S. 19) können dem Quellcode (Anhang A.13, S. 177) entnommen werden.

# KAPITEL 5

---

## Ergebnisse

---

### Inhaltsübersicht

5.1	Elektronenstrahlungsquelle . . . . .	42
5.2	Strahlungsfeldkomponenten Targetsystem . . . . .	48
5.2.1	Einfluss der Hauptebene . . . . .	49
5.2.2	Einfluss der Feldgröße . . . . .	49
5.2.3	Einfluss der Wassertiefe . . . . .	49
5.2.4	Einfluss des Ausgleichsfilters . . . . .	50
5.2.5	Zwischenzusammenfassung . . . . .	50
5.3	Strahlungsfeldkomponente Primärblende . . . . .	51
5.3.1	Einfluss der Hauptebene . . . . .	52
5.3.2	Einfluss der Feldgröße . . . . .	52
5.3.3	Einfluss der Wassertiefe . . . . .	52
5.3.4	Einfluss des Ausgleichsfilters . . . . .	52
5.3.5	Zwischenzusammenfassung . . . . .	52
5.4	Strahlungsfeldkomponente Ausgleichsfilter . . . . .	53
5.5	Strahlungsfeldkomponenten Winkelanalysescheibe . . . . .	60
5.5.1	Einfluss der Feldgröße . . . . .	60
5.5.2	Einfluss der Wassertiefe . . . . .	61
5.5.3	Einfluss des Ausgleichsfilters . . . . .	61
5.5.4	Zwischenzusammenfassung . . . . .	62
5.6	Strahlungsfeldkomponenten Blockblende . . . . .	66
5.6.1	Hauptebene Cross-Plane . . . . .	66
5.6.2	Hauptebene In-Plane . . . . .	68
5.6.3	Zwischenzusammenfassung . . . . .	71
5.7	Strahlungsfeldkomponenten Lamellenblende . . . . .	84
5.7.1	Hauptebene In-Plane . . . . .	84
5.7.2	Hauptebene Cross-Plane . . . . .	85
5.7.3	Zwischenzusammenfassung . . . . .	86
5.8	Strahlungsfeldkomponenten Eintrittsfläche Wasserphantom . . . . .	100
5.8.1	Einfluss der Feldgröße . . . . .	104
5.8.2	Einfluss der Wassertiefe . . . . .	104
5.8.3	Einfluss des Ausgleichsfilters . . . . .	105
5.8.4	Zwischenzusammenfassung . . . . .	106

## 5.1 Elektronenstrahlungsquelle

### Anpassung der mittleren Elektronenenergie an das reale Vorbild

Die Anpassung der mittleren Elektronenenergie  $E_{\text{El.}}$  an das reale Vorbild erfolgte auf die in Abschnitt 4.2.2, S. 26 beschriebene Art und Weise. Die beste Übereinstimmung der simulierten Tiefendosiskurve mit der Messung ergab sich bei einer mittleren Elektronenenergie von  $E_{\text{El.}}=6,33$  MeV, wie dem unteren Teil der Abbildung 5.1 S. 43, der die Abweichung der einzelnen simulierten Dosiswerte zu den Gemessenen zeigt, entnommen werden kann. Die Kurve ist insgesamt leicht parallel nach unten verschoben, was jedoch auf die Normierung auf einen einzelnen Punkt zurückzuführen ist. Bei einer mittleren Elektronenenergie von  $E_{\text{El.}}=6,3$  MeV zeigte sich mit wachsender Tiefe ein zu steiler, bei  $E_{\text{El.}}=6,35$  MeV ein zu flacher Abfall, was auf eine zu niedrige bzw. zu hohe mittlere Elektronenenergie hindeutet.

Die Abweichung der einzelnen simulierten Dosiswerte zu den Gemessenen wurde gemäß Gleichung 5.1 berechnet.

$$\Delta = \frac{\mathcal{D} - D}{D} \cdot 100 \quad (5.1)$$

Hierbei ist  $\Delta$  die Abweichung in Prozent,  $D$  die gemessene, relative Energiedosis und  $\mathcal{D}$  die simulierte, relative Energiedosis mit Normierung in 10 cm Wassertiefe.

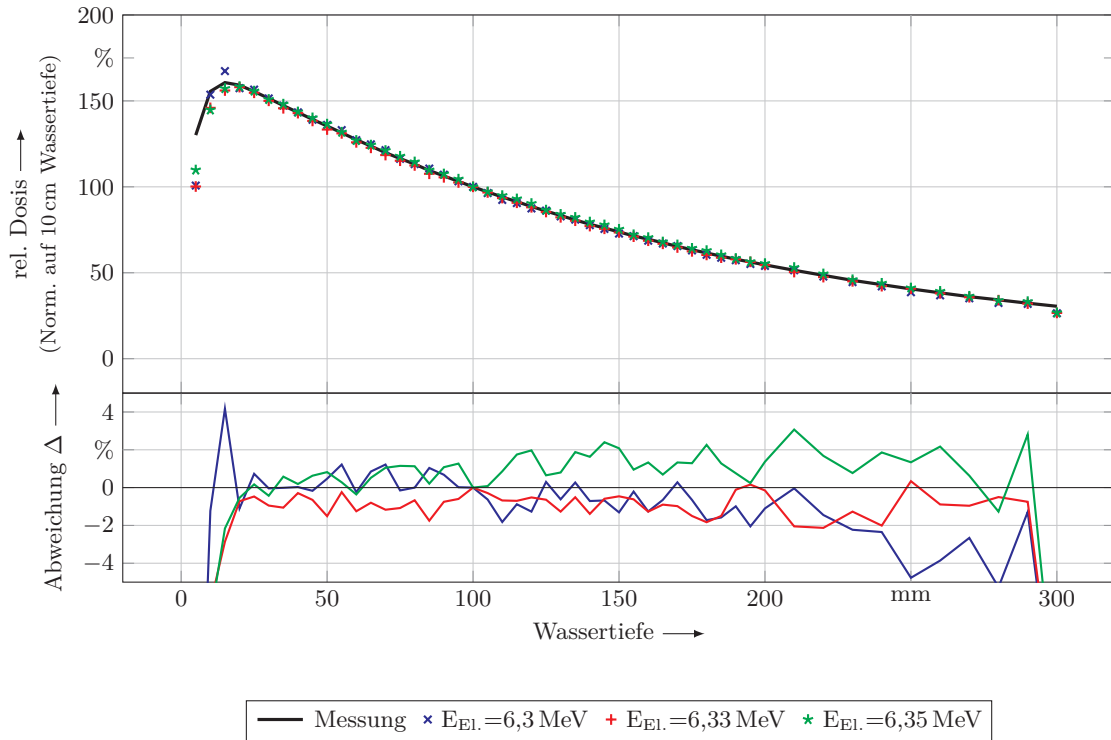
### Anpassung des Elektronenstrahldurchmessers an das reale Vorbild

Die Anpassung des Elektronenstrahldurchmessers an das reale Vorbild erfolgte auf die in Abschnitt 4.2.2 S. 26 beschriebene Methode. Bei einem kreisförmigen Strahlquerschnitt mit einem Durchmesser von 2,0 mm (Herstellerangaben) ergaben sich sowohl im Dosisplateau als auch im Halbschatten in beiden Hauptebenen größere systematische Abweichungen von den realen Dosishalbprofilen (Abb. 5.2 S. 45), weshalb eine Optimierung des Strahldurchmessers erforderlich war. Die Abweichung der einzelnen simulierten Dosiswerte zu den Gemessenen wurde dabei, wie bei der Anpassung der Tiefendosisverteilung, durch Gleichung 5.1 S. 42 bestimmt.

Es wurde zunächst der Durchmesser in X-Richtung (Cross-Plane) in 0,2 mm Schritten von 1,4 mm bis 2,4 mm verändert, während der Durchmesser in Y-Richtung (In-Plane) konstant gehalten wurde. Wie den Abbildungen 5.2 S. 45 und 5.3 S. 46 entnommen werden kann, wirkt sich eine Änderung des Strahldurchmessers in X-Richtung auf die Dosisverteilungen beider Hauptebenen aus.

Bei einem Strahldurchmesser von  $d_x=2,2$  mm und  $d_y=2,0$  mm weisen die simulierten Dosiswerte im Dosisplateau in beiden Hauptebenen im Vergleich zu den Verteilungen mit anderen Strahldurchmessern  $d_x$  die kleinsten Abweichungen  $\Delta$  (Gleichung 5.1 S. 42) zu den Gemessenen auf. Die Abweichungen  $\Delta$  betragen dabei wenige Prozent (Abb. 5.2 S. 45 und 5.3 S. 46).

Im Bereich der sehr steilen Dosisgradienten im Halbschatten finden sich einzelne Dosiswerte mit einer größeren Abweichung zur Messung, die jedoch für die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit keinen wesentlichen Einfluss haben sollten. Relevant für die Arbeit ist die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen. Hier zeigt sich unter Berücksichtigung der mit wachsender Distanz zur Strahlenfeldachse stark abfallenden Dosis und der be-



**Abbildung 5.1:** Gemessene und simulierte relative **Tiefendosiskurven** auf der Strahlenfeldachse bei unterschiedlichen mittleren Elektronenenergien  $E_{\text{El.}}$ . Die Normierung erfolgte auf den Dosiswert in 10 cm Wassertiefe. Der untere Teil zeigt die Abweichung der simulierten von den gemessenen Werten.

grenzten Rechenleistung insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung. In Cross-Plane ist die Abweichung  $\Delta$  für alle simulierten Punkte außerhalb der geometrischen Feldgrenzen kleiner als 10%. In In-Plane gilt dies, mit Ausnahme von zwei Ausreißern ( $\Delta < 15\%$ ) ebenfalls.

Im Hinblick auf den mit der Durchführung der Monte-Carlo-Simulationen einhergehenden hohen Zeitaufwand und die für die vorliegende Arbeit ausreichende Qualität wurde auf die Variation des Elektronenstrahldurchmessers in Y-Richtung verzichtet.

Alle Simulationen dieser Arbeit wurden daher mit einem Elektronenstrahldurchmesser von  $d_x=2,2$  mm und  $d_y=2,0$  mm durchgeführt.

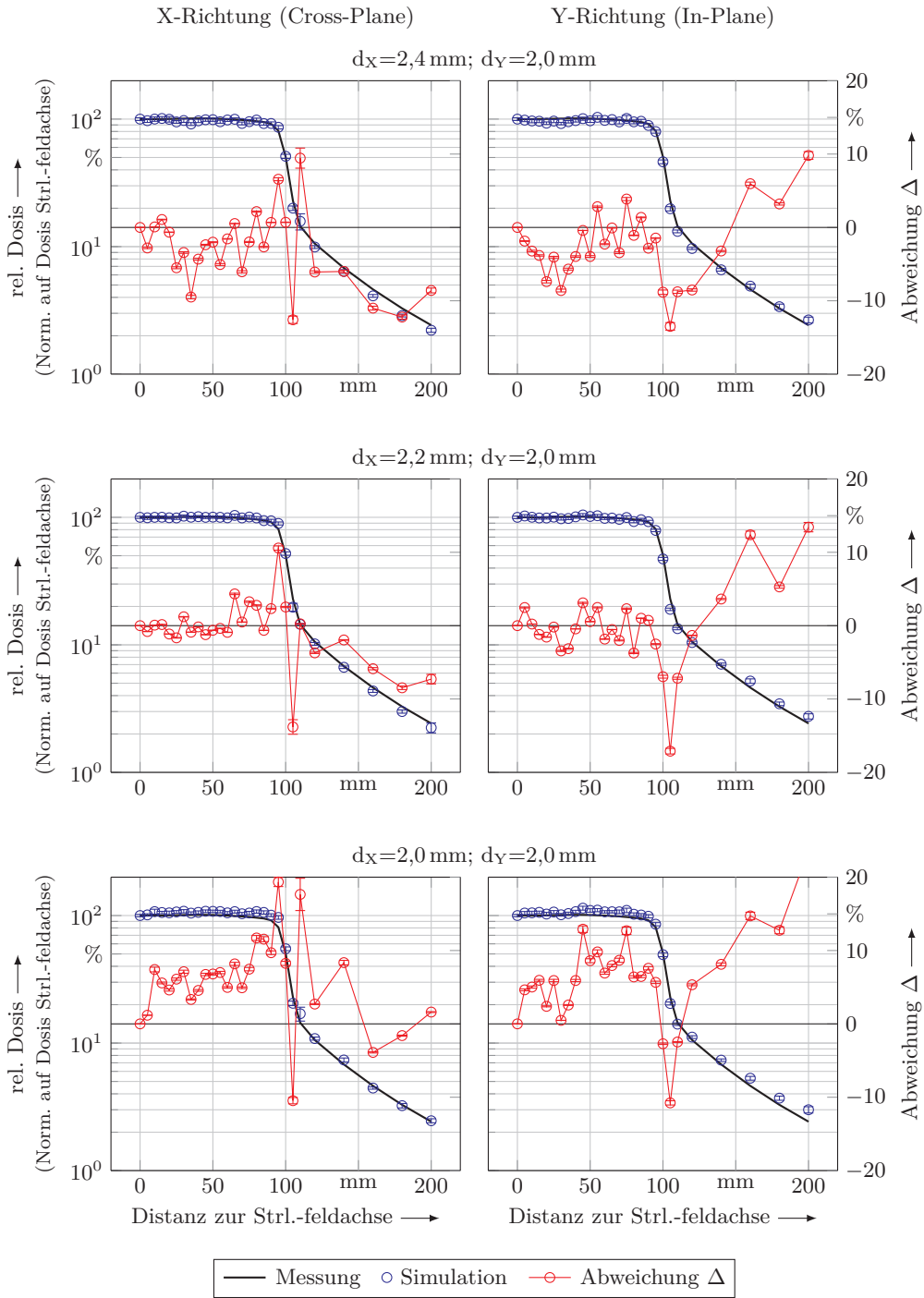
#### Validierung der gefundenen Quellenparameter für kleinere Feldgrößen

Mit der zuvor ermittelten mittleren Elektronenenergie von  $E_{\text{El.}}=6,33$  MeV und dem Elektronenstrahldurchmesser von  $d_x=2,2$  mm und  $d_y=2,0$  mm war zu prüfen, ob die gefundenen Werte auch für kleinere Feldgrößen zu akzeptablen Übereinstimmungen mit den gemessenen Halbprofilen führen.

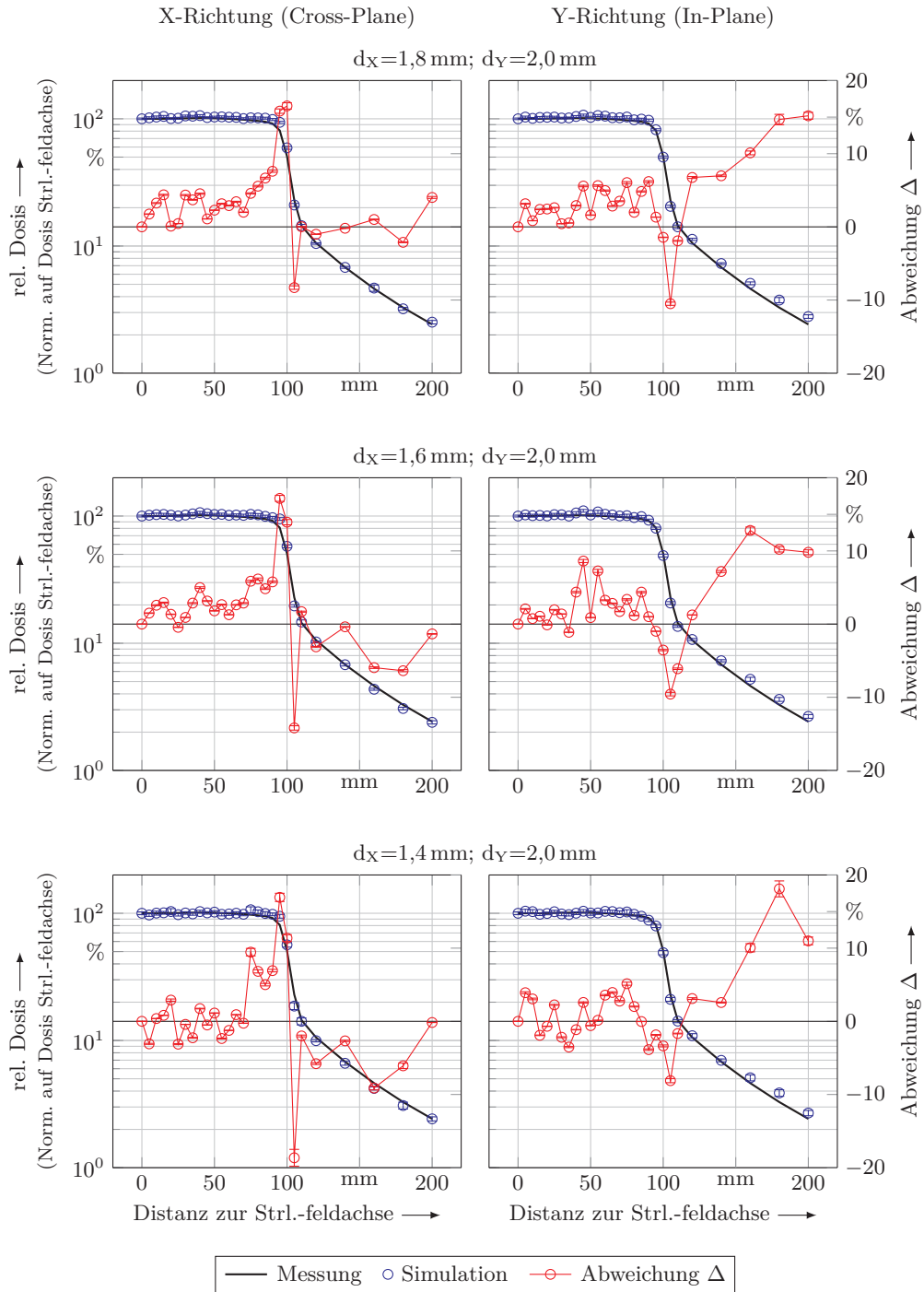
Bei einer Feldgröße von  $10 \times 10$  cm<sup>2</sup> zeigte sich für die außerhalb der geometrischen Feldgrenzen liegenden Dosiswerte mit einer Abweichung von  $\Delta < 10\%$  eine sehr gute Übereinstimmung zur Messung. Eine Ausnahme bildet der Dosiswert in einer Entfernung

von 20 cm zur Strahlenfeldachse in der Hauptebene In-Plane. Aus nicht nachvollziehbaren Gründen wich dieser Wert deutlich vom Messwert ab (Abb. 5.4 S. 47).

Bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  zeigte sich für die außerhalb der geometrischen Feldgrenzen liegenden Dosiswerte mit einer Abweichung von  $\Delta < 10 \%$  ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung zur Messung. Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen waren für die beiden von der Strahlenfeldachse entferntesten Punkte (18 cm und 20 cm) in beiden Hauptebenen unzuverlässig und konnten daher für die Arbeit nicht genutzt werden (Abb. 5.5 S. 47).

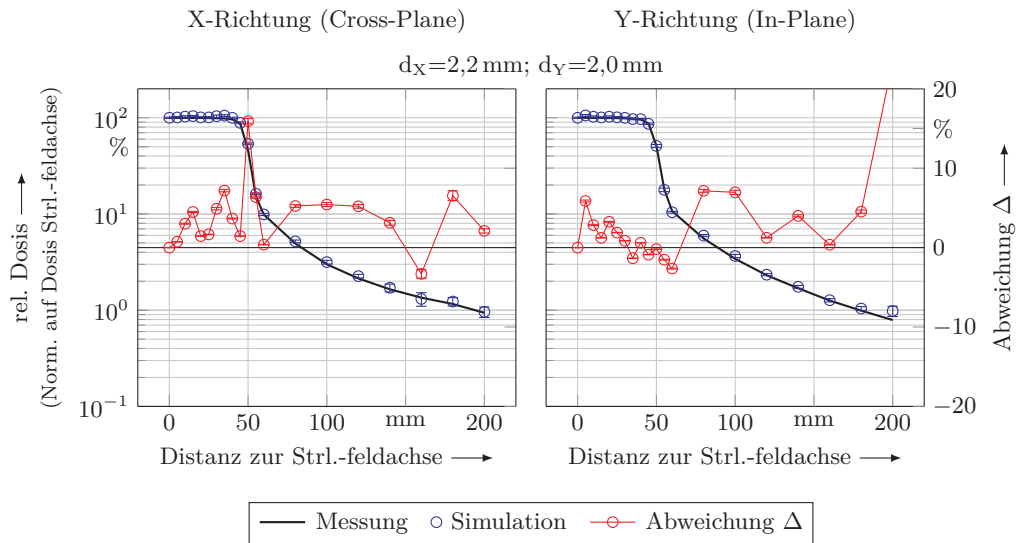


**Abbildung 5.2:** Simulierte Dosishalbprofile beider Hauptebenen in Abhängigkeit vom **Elektronenstrahldurchmesser** in X-Richtung ( $d_x=2,4\text{ mm}$ ,  $d_x=2,2\text{ mm}$ ,  $d_x=2,0\text{ mm}$ ) und konstantem Durchmesser in Y-Richtung ( $d_y=2,0\text{ mm}$ ) bei einer Feldgröße von  $20 \times 20\text{ cm}^2$ . Zusätzlich sind die Abweichungen zur Messung sowie die gemessenen Halbprofile selbst ersichtlich.

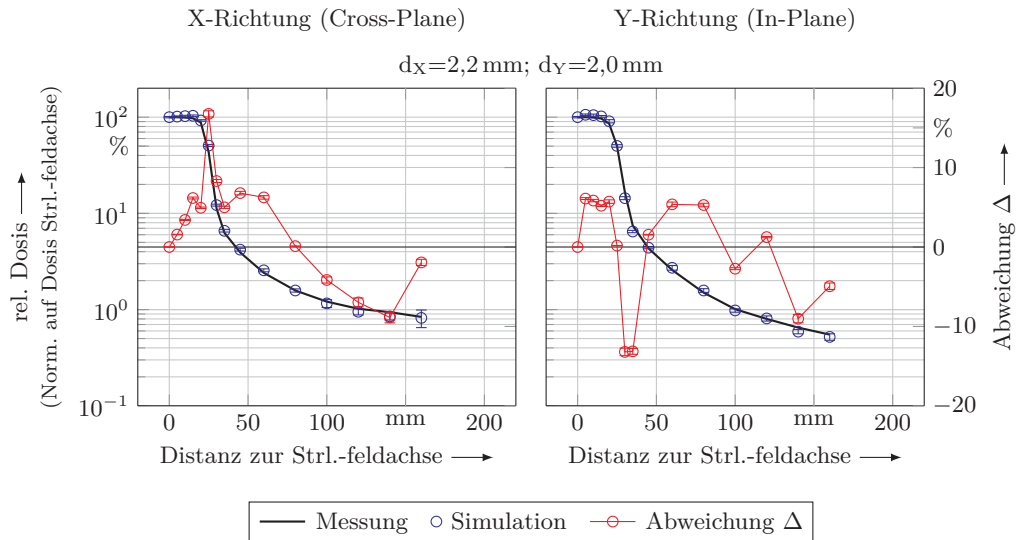


**Abbildung 5.3:** Simulierte Dosishalbprofile beider Hauptebenen in Abhängigkeit vom **Elektronenstrahldurchmesser** in X-Richtung ( $d_x=1,8\text{ mm}$ ,  $d_x=1,6\text{ mm}$ ,  $d_x=1,4\text{ mm}$ ) und konstantem Durchmesser in Y-Richtung ( $d_y=2,0\text{ mm}$ ) bei einer Feldgröße von  $20 \times 20\text{ cm}^2$ . Zusätzlich sind die Abweichungen zur Messung sowie die gemessenen Halbprofile selbst ersichtlich.





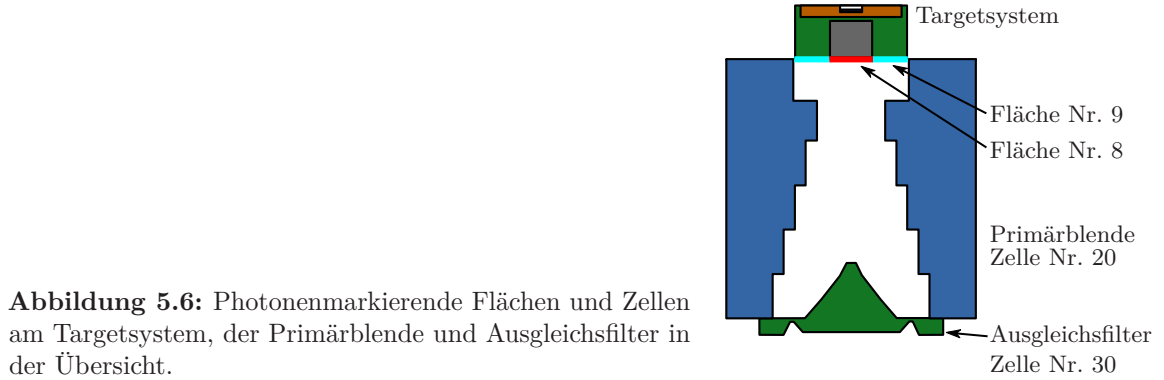
**Abbildung 5.4:** Simulierte Dosishalbprofile beider Hauptebenen bei einer mittleren Elektronenenergie von  $E_{\text{El.}}=6,33 \text{ MeV}$  und einem Elektronenstrahldurchmesser von  $d_x=2,2 \text{ mm}$  bzw.  $d_y=2,0 \text{ mm}$  zur Validierung der ermittelten Elektronenstrahlungsquellenparameter bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Zusätzlich sind die Abweichungen zur Messung sowie die gemessenen Halbprofile selbst ersichtlich.



**Abbildung 5.5:** Simulierte Dosishalbprofile beider Hauptebenen bei einer mittleren Elektronenenergie von  $E_{\text{El.}}=6,33 \text{ MeV}$  und einem Elektronenstrahldurchmesser von  $d_x=2,2 \text{ mm}$  bzw.  $d_y=2,0 \text{ mm}$  zur Validierung der ermittelten Elektronenstrahlungsquellenparameter bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Zusätzlich sind die Abweichungen zur Messung sowie die gemessenen Halbprofile selbst ersichtlich.

## 5.2 Strahlungsfeldkomponenten Targetsystem

Im Targetsystem wurden die Photonen bei der Passage der Fläche Nr. 8 und Nr. 9 markiert, um deren Anteil an der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen separat zu erfassen.



**Abbildung 5.6:** Photonenmarkierende Flächen und Zellen am Targetsystem, der Primärblende und Ausgleichsfilter in der Übersicht.

Die durch die beiden Strahlungsfeldkomponenten erzeugten mittleren Dosen außerhalb der geometrischen Feldgrenzen summieren sich für alle betrachteten Feldkonstellationen zur entsprechenden Dosis des Strahlungsfeldes – worunter das gesamte Strahlungsfeld ohne die Bildung von Strahlungsfeldkomponenten zu verstehen ist – auf. Dies zeigt einerseits, dass das gesamte interessierende Strahlungsfeld durch die generierten Strahlungsfeldkomponenten erfasst wurde, und außerdem die korrekte Implementierung der Photonenmarkierung in der Inputdatei.

Es gilt für eine gegebene Hauptebene HE, die Betriebsweise BW bezüglich der Existenz des Ausgleichsfilter im Strahlengang, die Wassertiefe WT und die Feldgröße FG (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f., Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}} \approx \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;F:8}} + \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;F:9}} \quad (5.2)$$

In Abhängigkeit von der konkreten Feldkonstellation nimmt die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;F:8}}$  Werte zwischen 92 % und 97 % in Bezug auf die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}}$  an (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.). Die Dosisverteilungen  $\text{OfDD}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;F:8}}$  und  $\text{OfDD}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}}$  sind in allen simulierten Feldkonstellationen nahezu identisch (Abb. 5.9 bis 5.11 S. 54 ff. (Linien ---, ---)). Maßgeblich für die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}}$  ist dementsprechend die Strahlungsfeldkomponente, die das Targetsystem bestimmungsgemäß über die Austrittsfläche verlässt.

Photonen, die das Targetsystem über die Einfassung der Austrittsfläche passieren, haben in allen simulierten Feldkonstellationen nur eine im Vergleich zur betreffenden  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}}$  kleine  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;F:9}}$  bei allen Distanzen zur Strahlenfeldachse zur Folge (Abb. 5.9 bis 5.11 S. 54 ff. (Linien ---)), was sich entsprechend in der  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;F:9}}$  zeigt (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.).

Die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;F:8}}$ , die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;F:9}}$  und damit auch die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}}$  verringern sich mit wachsendem Abstand zur Strahlenfeldachse in allen simulierten Feldkonstellationen (Abb. 5.9 bis 5.11 S. 54 ff. (Linien ---, ---, ---)).

### 5.2.1 Einfluss der Hauptebene

Unterschiede hinsichtlich der Dosis außerhalb der Feldgrenzen zeigen sich zwischen den beiden Hauptebenen in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter bei der größten und mittelgroßen simulierten Feldgröße, was die Strahlungsfeldkomponente der Fläche Nr. 8 betrifft. Die Dosis ist in In-Plane größer als in Cross-Plane (Abb. 5.12 S. 58).

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};20 \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{CP;FF;F:8}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};20 \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{IP;FF;F:8}} \quad (5.3)$$

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};10 \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{CP;FF;F:8}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};10 \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{IP;FF;F:8}} \quad (5.4)$$

Bei der kleinsten simulierten Feldgröße in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter sowie bei allen simulierten Feldgrößen in der Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter sind Unterschiede zwischen den Hauptebenen, sofern vorhanden, klein (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.). Gleiches gilt für die Strahlungsfeldkomponente der Fläche Nr. 9 (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.).

### 5.2.2 Einfluss der Feldgröße

Für alle simulierten Feldkonstellationen zeigt sich ein deutlicher Anstieg der durch das gesamte Strahlungsfeld erzeugten mittleren Dosis außerhalb der Feldgrenzen mit der Feldgröße (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.). Verursacht wird die Erhöhung vornehmlich durch die Strahlungsfeldkomponente der Fläche Nr. 8 (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};5 \times 5 \text{ cm}^2}^{\text{HE;BW;F:8}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};10 \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{HE;BW;F:8}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};20 \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{HE;BW;F:8}} \quad (5.5)$$

Die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{HE;BW;F:9}}$  steigt, bis auf zwei Einzelfälle (Konstellation: FF, mittlere FG, In-Plane, kleine Wassertiefe und Konstellation: FFF, mittlere FG, Cross-Plane, kleine Wassertiefe), mit wachsender Feldgröße an, verdoppelt sich stellenweise, bleibt aber insgesamt vergleichsweise klein (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.).

### 5.2.3 Einfluss der Wassertiefe

Analog zum Einfluss der Feldgröße gilt, dass für alle simulierten Feldkonstellationen die durch das gesamte Strahlungsfeld erzeugte mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in 20 cm Wassertiefe deutlich im Vergleich zu 10 cm Wassertiefe ansteigt (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.). Verursacht wird die Erhöhung vornehmlich durch die Strahlungsfeldkomponente der Fläche Nr. 8 (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.):

$$\overline{\text{OfD}}_{10 \text{ cm};\text{FG}}^{\text{HE;BW;F:8}} < \overline{\text{OfD}}_{20 \text{ cm};\text{FG}}^{\text{HE;BW;F:8}} \quad (5.6)$$

Im Vergleich zur  $\overline{\text{OfD}}_{10 \text{ cm};\text{FG}}^{\text{HE;BW;F:8}}$  ist die  $\overline{\text{OfD}}_{20 \text{ cm};\text{FG}}^{\text{HE;BW;F:8}}$  in allen simulierten Feldkonstellationen über die gesamte untersuchte Distanz erhöht (Abb. 5.9 bis 5.11 S. 54 ff. (Linien ---)).

Die  $\overline{\text{OfD}}_{20 \text{ cm};10 \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{HE;BW;F:9}}$  ist in der Betriebsweise mit und ohne Ausgleichsfilter in beiden Hauptebenen im Vergleich  $\overline{\text{OfD}}_{10 \text{ cm};10 \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{HE;BW;F:9}}$  gering bzw. in einem Fall (FF, Cross-Plane) nicht erhöht. Bei kleiner und großer simulierter Feldgröße sind generell keine systematischen Änderungen in Bezug auf den Wechsel der Wassertiefe ersichtlich (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.).

Visuell geschätzt ist die Abnahme der  $\overline{\text{OfD}}_{20\text{ cm};\text{FG}}^{\text{HE};\text{BW};\text{F};9}$  mit wachsender Distanz zur Strahlenfeldachse kleiner im Vergleich zur  $\overline{\text{OfD}}_{10\text{ cm};\text{FG}}^{\text{HE};\text{BW};\text{F};9}$  (Abb. 5.9 bis 5.11 S. 54 ff. (Linien ---)).

#### 5.2.4 Einfluss des Ausgleichsfilters

Für alle simulierten Feldkonstellationen zeigen die Ergebnisse, dass die durch das gesamte Strahlungsfeld erzeugte mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter ansteigt (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.). Verursacht wird dieser Anstieg vornehmlich durch Strahlungsfeldkomponente der Fläche Nr. 8 (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{HE};\text{FFF};\text{F};8} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{HE};\text{FF};\text{F};8} \quad (5.7)$$

Den Dosisverteilungen kann entnommen werden, dass die  $\overline{\text{OfD}}_{10\text{ cm};\text{FG}}^{\text{HE};\text{FF};\text{F};8}$  bei jeder Distanz zur Strahlenfeldachse für alle simulierten Feldgrößen und beide Hauptebenen größer als die  $\overline{\text{OfD}}_{10\text{ cm};\text{FG}}^{\text{HE};\text{FFF};\text{F};8}$  ist (Abb. 5.9 bis 5.11 S. 54 ff. (Linien ---)). In 20 cm Wassertiefe bestätigt sich dieses nur für die größte simulierte Feldgröße. Für die mittelgroße und kleine Feldgröße sind die Verteilungen nahezu identisch (Abb. 5.9 bis 5.11 S. 54 ff. (Linien ---)).

Die Auswirkungen des Ausgleichsfilters auf die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{HE};\text{BW};\text{F};9}$  sind vergleichsweise klein (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.). Der Ausgleichsfilter verursacht bei kleiner und mittlerer simulierter Feldgröße vornehmlich in der Hauptebene In-Plane sowie bei der größten simulierten Feldgröße in beiden Hauptebenen einen geringen Anstieg im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.).

Die Dosisverteilungen zeigen, dass die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{HE};\text{FF};\text{F};9}$  über die gesamte untersuchte Distanz bei allen simulierten Konstellationen immer größer als die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{HE};\text{FFF};\text{F};9}$  ist bzw. in Ausnahmefällen gleich groß ist (Abb. 5.9 bis 5.11 S. 54 ff. (Linien ---)).

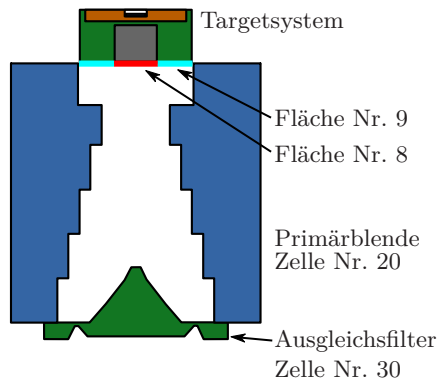
#### 5.2.5 Zwischenzusammenfassung

- In Abhängigkeit der Feldkonstellation werden 92 % bis 97 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{HE};\text{BW};\text{gesamt}}$ ) von Photonen erzeugt, die das Targetsystem bestimmungsgemäß über die Austrittsfläche (Fläche Nr. 8) verlassen.
- Die mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen, die durch Photonen verursacht wird, die das Targetsystem über die vorgesehene Austrittsfläche (Fläche Nr. 8) verlassen ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{HE};\text{BW};\text{F};8}$ ),
  - steigt mit der Feldgröße an,
  - steigt mit der Wassertiefe an,
  - steigt in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter an,
  - ist in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter in In-Plane größer als in Cross-Plane (Ausnahme: kleinste simulierte Feldgröße) und
  - ist in der Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter unabhängig von der Hauptebene.

- Die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen, die durch Photonen verursacht wird, die das Targetsystem über die vorgesehene Austrittsfläche verlassen ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;F:8}}$ ), verringert sich mit wachsendem Abstand zur Strahlenfeldachse.
- In Abhängigkeit der konkreten Feldkonstellation werden 3 % bis 8 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}}$ ) von Photonen erzeugt, die das Targetsystem über die hierfür nicht vorgesehene Einfassung der Austrittsfläche (Fläche Nr. 9) verlassen.
- Die mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen, die durch Photonen verursacht wird, die das Targetsystem über die hierfür nicht vorgesehene Einfassung der Austrittsfläche verlassen ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;F:9}}$ ),
  - steigt, bis auf zwei Einzelfälle (Konstellation: FF, mittlere FG, In-Plane, kleine Wassertiefe WT und Konstellation: FFF, mittlere FG, Cross-Plane, kleine Wassertiefe) mit der Feldgröße an
  - ist unabhängig von der Wassertiefe, eine Ausnahme zeigt sich bei mittelgroßer Feldgröße
  - steigt in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter gering an bzw. bleibt gleich und
  - zeigt in Bezug auf die Hauptebene allenfalls nur eine geringe Abhängigkeit
- Die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen, die durch Photonen verursacht wird, die das Targetsystem über die hierfür nicht vorgesehene Einfassung der Austrittsfläche verlassen ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;F:9}}$ ), verringert sich mit wachsendem Abstand zur Strahlenfeldachse.

### 5.3 Strahlungsfeldkomponente Primärblende

An der Primärblende wurden Photonen markiert, wenn diese die Zelle Nr. 20 passiert haben. Die durch die Strahlungsfeldkomponente der Primärblende verursachte mittlere Dosis



**Abbildung 5.7:** Photonenmarkierende Flächen und Zellen am Targetsystem, der Primärblende und Ausgleichsfilter in der Übersicht.

außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:20}}$ ) ist in Abhängigkeit der betrachteten Feldkonstellation mit 3 % bis 11 % in Bezug auf die die betreffende  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}}$  generell klein (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.).

In allen simulierten Feldkonstellationen verringert sich die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:20}}$  mit wachsender Distanz zur Strahlenfeldachse (Abb. 5.9 bis 5.11 S. 54 ff. (Linien ---)).

Die Dosisverteilungen  $\text{OfDD}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:20}}$  und  $\text{OfDD}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;F:9}}$  zeigen Ähnlichkeiten hinsichtlich der Kurvenform und der Höhe der Dosis (Abb. 5.9 bis 5.11 S. 54 ff. (Linien ---, ---)). Es ist naheliegend, dass vornehmlich Photonen, die das Targetsystem über die Fläche Nr. 9 verlassen, die Primärblende passieren. Dieser Punkt wird in der Diskussion genauer erläutert (S. 126).

Die in zahlreichen Feldkonstellationen beobachtbare leichte Erhöhung der  $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:20}}$  gegenüber der  $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;F:9}}$  erklärt sich durch Photonen, die die Fläche Nr. 8 passiert und in der Folge die Primärblende passiert haben.

### 5.3.1 Einfluss der Hauptebene

Unterschiede hinsichtlich der  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:20}}$  zwischen den Hauptebenen sind, sofern vorhanden, klein. Eine systematische Abhängigkeit der  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:20}}$  von der Hauptebene ist nicht erkennbar (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.).

### 5.3.2 Einfluss der Feldgröße

In Bezug auf die drei simulierten Feldgrößen steigt  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:20}}$  mit wachsender Feldgröße für alle betrachteten Feldkonstellationen, abgesehen von einer Ausnahme (Konstellation: FFF, kleine Wassertiefe, Cross-Plane, mittelgroße FG), gering an (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;5}\times\text{5 cm}^2}^{\text{HE;BW;Z:20}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;10}\times\text{10 cm}^2}^{\text{HE;BW;Z:20}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;20}\times\text{20 cm}^2}^{\text{HE;BW;Z:20}} \quad (5.8)$$

### 5.3.3 Einfluss der Wassertiefe

Mit Blick auf die simulierten Feldkonstellationen zeigt sich generell keine systematische Änderung der  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:20}}$  mit der Änderung der Wassertiefe (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.).

Wie die  $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;F:9}}$ , fällt die  $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;FZ:20}}$  visuell geschätzt in 20 cm Wassertiefe mit der Distanz zur Strahlenfeldachse weniger stark ab als in 10 cm Wassertiefe (Abb. 5.9 bis 5.11 S. 54 ff. (Linien ---)).

### 5.3.4 Einfluss des Ausgleichsfilters

Im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter erhöht die Präsenz des Ausgleichsfilters die Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen, die durch die Strahlungsfeldkomponente der Primärblende verursacht wird, bei allen simulierten Feldkonstellationen gering (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;FFF;Z:20}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;FF;Z:20}} \quad (5.9)$$

Die Dosisverteilungen zeigen, dass, für eine ausgewählte Feldkonstellation, die  $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;FF;Z:20}}$  bei jeder Distanz zur Strahlenfeldachse größer ist als die  $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;FFF;Z:20}}$ . Dies gilt für alle simulierten Feldkonstellationen (Abb. 5.9 bis 5.11 S. 54 f. (Linien ---)).

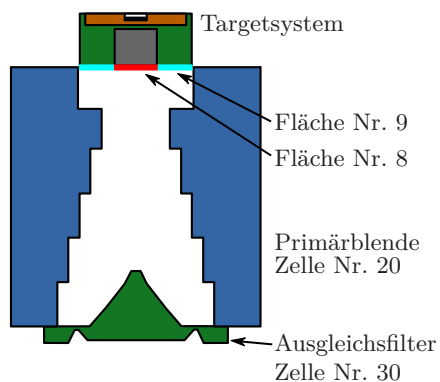
### 5.3.5 Zwischenzusammenfassung

- In Abhängigkeit der Feldkonstellation werden 3% bis 11% der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}}$ ) von Photonen erzeugt, die die Zelle der Primärblende passiert haben.

- Die mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen, die durch Photonen verursacht wird, die die Primärblende passiert haben ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:20}}$ ),
  - steigt mit der Feldgröße gering an (Ausnahme: FFF, kleine Wassertiefe, Cross-Plane, mittelgroße FG),
  - zeigt in Bezug auf die Wassertiefe keine systematische Abhängigkeit,
  - steigt in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter an und
  - zeigt in Bezug auf die Hauptebene keine systematische Abhängigkeit.
- Die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen, die durch Photonen verursacht wird, die die Primärblende passiert haben ( $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:20}}$ ), verringern sich mit wachsendem Abstand zur Strahlenfeldachse.

#### 5.4 Strahlungsfeldkomponente Ausgleichsfilter

Am Ausgleichsfilter wurden Photonen, analog zur Primärblende, markiert, wenn diese die Zelle Nr. 30 passiert haben. Für alle simulierten Feldkonstellationen zeigt sich, dass das

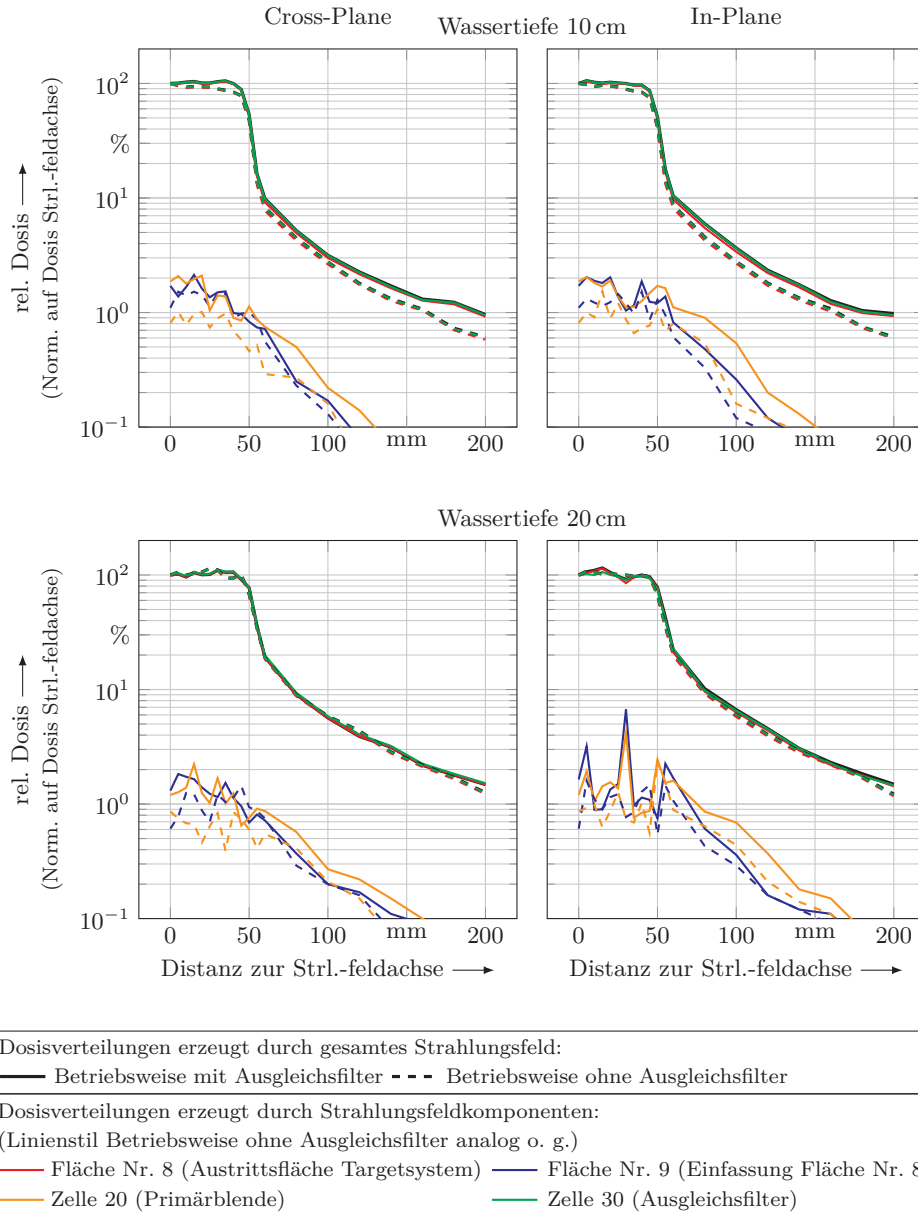


**Abbildung 5.8:** Photonenmarkierende Flächen und Zellen am Targetsystem, der Primärblende und Ausgleichsfilter in der Übersicht.

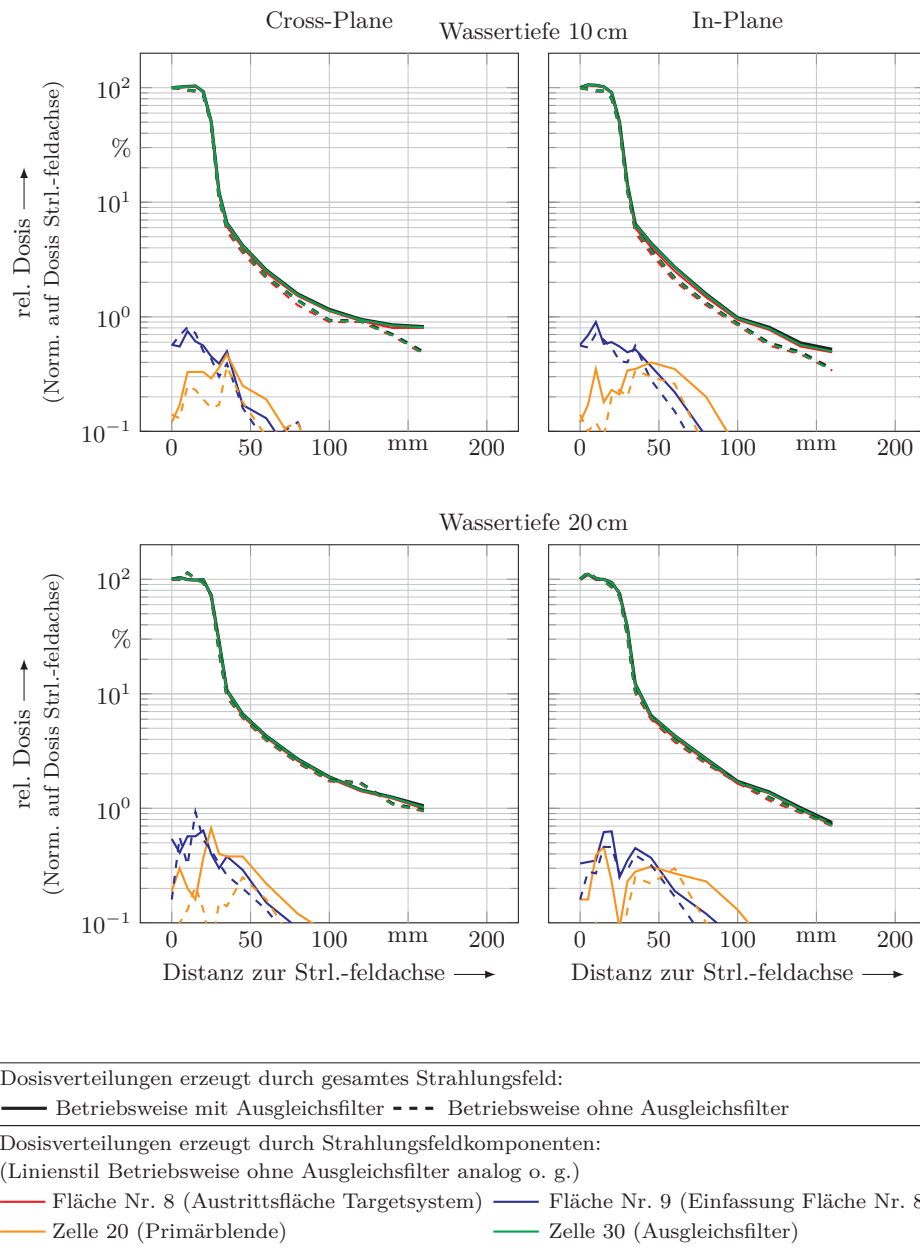
gesamte Strahlungsfeld, das eine Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen erzeugt, den Ausgleichsfilter bzw. dessen Hülle, im Falle der Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter, passiert (Abb. 5.12, 5.13 S. 58 f., Abb. 5.9 bis 5.11 S. 54 ff. (Linien ---, ---)).





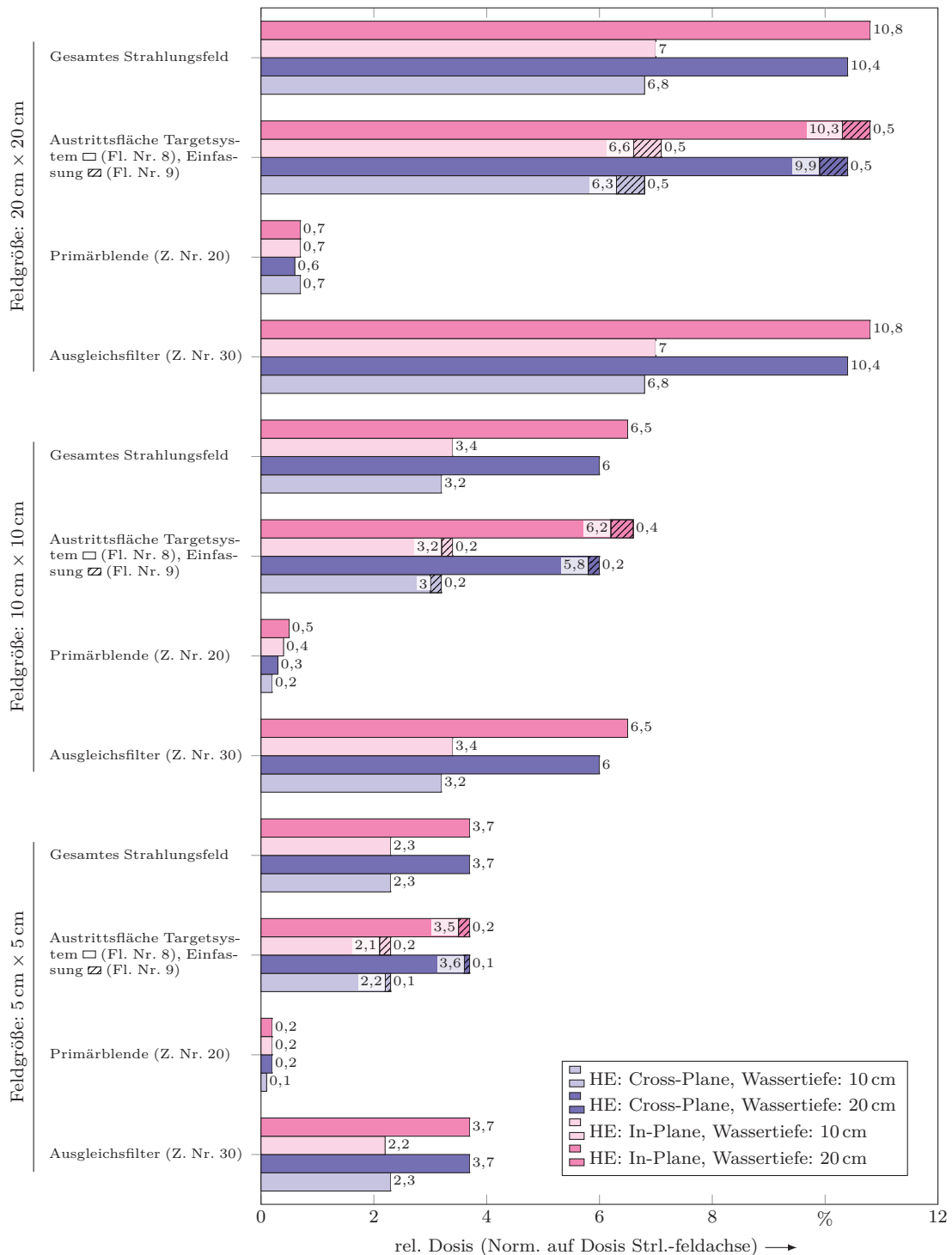


**Abbildung 5.10:** Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von im **Targetsystem**, in der **Primärblende** und im **Ausgleichsfilter**, bzw. dessen Hülle in der Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter, generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



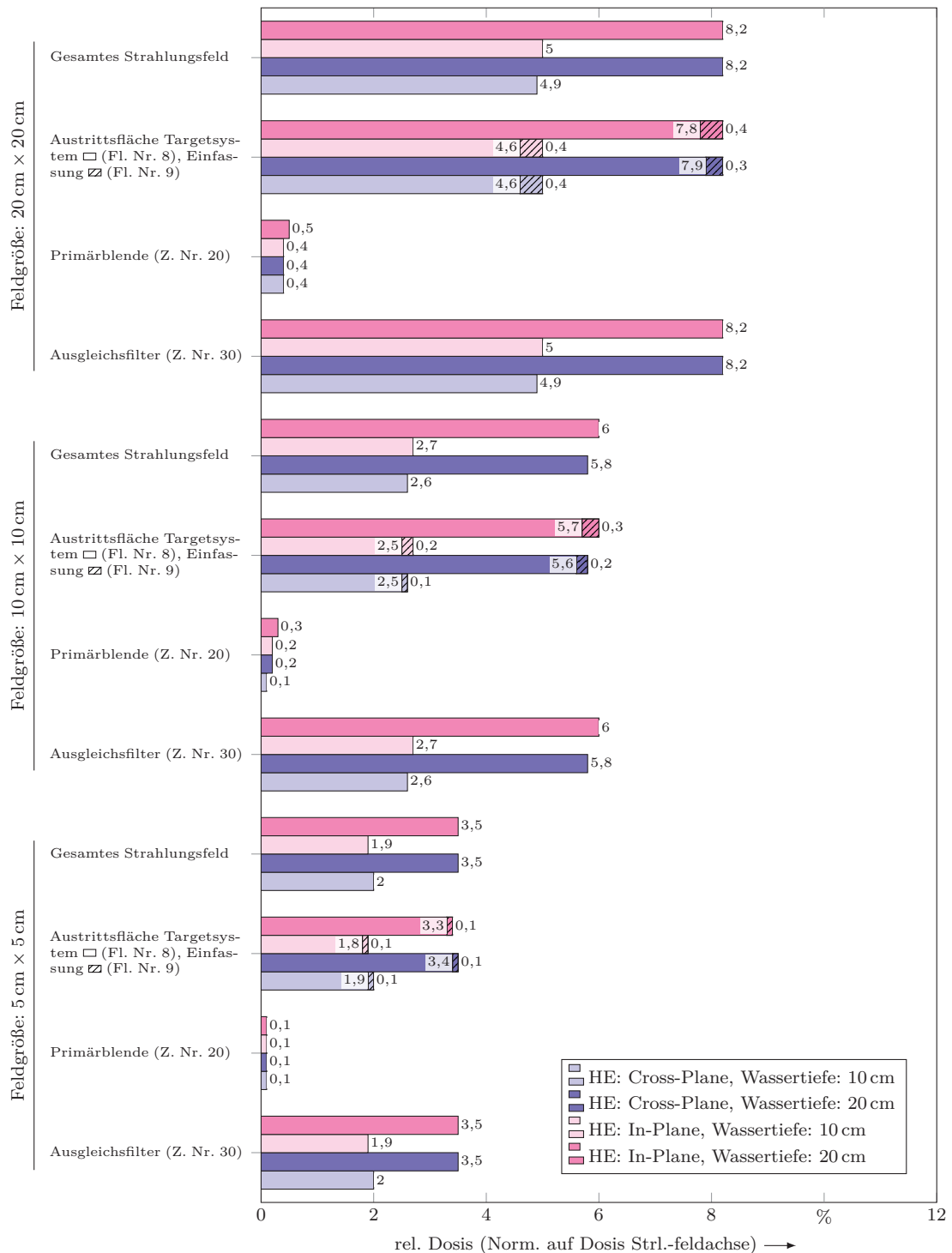
**Abbildung 5.11:** Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von im **Targetsystem**, in der **Primärblende** und im **Ausgleichsfilter**, bzw. dessen Hülle in der Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter, generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm





**Abbildung 5.12:** Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{OfD}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld sowie im **Target**, in der **Primärblende** und im **Ausgleichsfilter** generierte Strahlungsfeldkomponenten in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** für alle simulierten Feldkonstellationen.

## 5.4 Strahlungsfeldkomponente Ausgleichsfilter

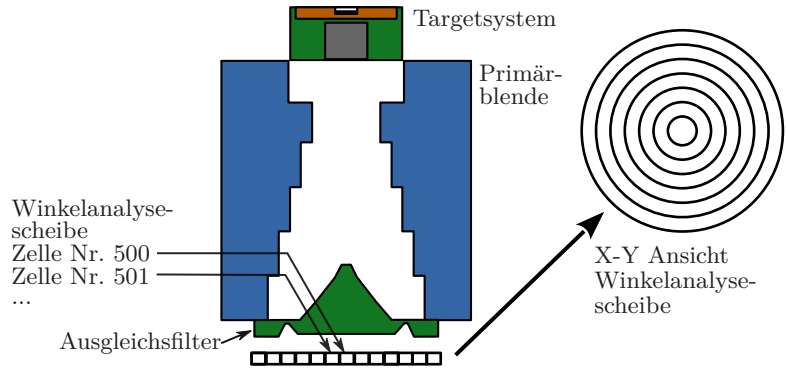


**Abbildung 5.13:** Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{OfD}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld sowie im **Target**, in der **Primärblende** und **in der Hülle des Ausgleichsfilters** generierte Strahlungsfeldkomponenten in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** für alle simulierten Feldkonstellationen.

## 5.5 Strahlungsfeldkomponenten Winkelanalysescheibe

An der Winkelanalysescheibe wurden Photonen markiert, wenn diese die Zellen Nr. 500 bis Nr. 521 passiert haben. Innerhalb dieser Arbeit wurden jedoch ausschließlich die Zellen Nr. 500 bis Nr. 506 verwendet.

**Abbildung 5.14:** Photonenmarkierende Zellen der Winkelanalysescheibe. Zelle Nr. 500: Winkelbereich von  $0^\circ$  bis  $1^\circ$  um die Strahlenfeldachse, Zelle Nr. 501: Winkelbereich von  $1^\circ$  bis  $2^\circ$  um die Strahlenfeldachse, u.s.w.



Die Winkelanalysescheibe zerlegte das aus dem Ausgleichsfilter, bzw. dessen Hülle im Falle der Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter, austretende Strahlungsfeld in konzentrische Komponenten, dessen Zentrum die Strahlenfeldachse war. Eine Strahlungsfeldkomponente überdeckte, bezogen auf die Strahlenfeldachse, einen Winkelbereich von  $1^\circ$ .

Strahlungsfeldkomponenten, die vom Fokus (Target) in die Feldebene projiziert auf der Feld-Mittellinie innerhalb der geometrischen Feldgrenzen liegen, haben mit wachsendem Abstand zur Strahlenfeldachse eine rapide ansteigende mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in allen simulierten Feldkonstellationen zur Folge. Es gilt für für die Betriebsweise mit und ohne Ausgleichsfilter bei einer gegebenen Hauptebene HE und einer Wassertiefe WT (Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.):

$$\text{FG } 20 \times 20 \text{ cm}^2: \overline{\text{OfD}}_{\text{WT}; 20 \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{HE}; \text{BW}; \text{Z}; 500} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT}; 20 \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{HE}; \text{BW}; \text{Z}; 501} \cdots < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT}; 20 \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{HE}; \text{BW}; \text{Z}; 505} \quad (5.10)$$

$$\text{FG } 10 \times 10 \text{ cm}^2: \overline{\text{OfD}}_{\text{WT}; 10 \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{HE}; \text{BW}; \text{Z}; 500} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT}; 10 \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{HE}; \text{BW}; \text{Z}; 501} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT}; 10 \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{HE}; \text{BW}; \text{Z}; 502} \quad (5.11)$$

$$\text{FG } 5 \times 5 \text{ cm}^2: \overline{\text{OfD}}_{\text{WT}; 5 \times 5 \text{ cm}^2}^{\text{HE}; \text{BW}; \text{Z}; 500} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT}; 5 \times 5 \text{ cm}^2}^{\text{HE}; \text{BW}; \text{Z}; 501} \quad (5.12)$$

Der Zusammenhang zwischen dem Emissionswinkel der Photonen zur Strahlenfeldachse und der zugehörigen  $\overline{\text{OfD}}$  der betreffenden Strahlungsfeldkomponente ist nichtlinear. Mit ansteigendem Emissionswinkel (ansteigende Zellennummer) ist der Dosiszuwachs bezogen auf einen Winkelelement von  $1^\circ$  größer als in einem linearen Zusammenhang.

### 5.5.1 Einfluss der Feldgröße

Durch die Veränderung der Feldgröße variiert die Anzahl der Strahlungsfeldkomponenten der Winkelanalysescheibe, die sich im geometrischen Strahlenfeld befinden (Abb. 5.15 bis 5.17 S. 63 ff.). Jede Komponente liefert einen Beitrag zur mittleren Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen in der betreffenden Hauptebene. Infolgedessen wächst diese bei gegebener Feldkonstellation mit wachsender Feldgröße.

### 5.5.2 Einfluss der Wassertiefe

In 20 cm Wassertiefe ist die mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen aller Strahlungsfeldkomponenten, die sich bei einer gegebenen Feldkonstellation im geometrischen Feld befinden, im Vergleich zu 10 cm Wassertiefe deutlich erhöht.

Die Erhöhung der  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}}$  in größerer Wassertiefe bei einer gegebenen Feldkonstellation geht daher sowohl von den inneren als auch von den äußeren Strahlungsfeldkomponenten innerhalb des geometrischen Strahlenfeldes aus (Abb. 5.15 bis 5.17 S. 63 ff., Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.).

### 5.5.3 Einfluss des Ausgleichsfilters

Die Wirkung des Ausgleichsfilters auf die Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen verursacht durch Strahlungsfeldkomponenten, die sich im geometrischen Strahlenfeld befinden, fällt, in Abhängigkeit von deren Abstand zur Strahlenfeldachse und der Feldgröße, unterschiedlich aus.

Bei mittelgroßer und kleinster simulierter Feldgröße bewirkt der Ausgleichsfilter eine sichtbare Abnahme der  $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:500}}$  und  $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:501}}$  über die gesamte untersuchte Distanz in beiden Hauptebenen und Wassertiefen im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter (Abb. 5.16, 5.17 S. 64 f. (Linien ---, ---)), die sich auch in den Mittelwerten zeigt (Tab. C.2, C.6 S. 188 f.):

$$\text{FG } 10 \times 10 \text{ cm}^2: \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;10} \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FF;Z:500}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;10} \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FFF;Z:500}} \quad (5.13)$$

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;10} \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FF;Z:501}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;10} \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FFF;Z:501}} \quad (5.14)$$

$$\text{FG } 5 \times 5 \text{ cm}^2: \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;5} \times 5 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FF;Z:500}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;5} \times 5 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FFF;Z:501}} \quad (5.15)$$

Bei der größten simulierten Feldgröße ist diese Abnahme nicht eindeutig erkennbar. Hier zeigt sich jedoch ein Anstieg der  $\text{OfD}_{\text{WT;20} \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{HE;BW;Z:502}}$  bis  $\text{OfD}_{\text{WT;20} \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{HE;BW;Z:505}}$  in beiden Hauptebenen und Wassertiefen über die gesamte untersuchte Distanz im Vergleich zum Betrieb ohne Ausgleichsfilter (Abb. 5.15 S. 63 (Linien ---, ---, ---, ---, ---) bzgl. der Mittelwerte (Tab. C.1 S. 186 und Tab. C.4 S. 192)):

$$\text{FG } 20 \times 20 \text{ cm}^2: \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;20} \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FFF;Z:502}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;20} \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FF;Z:502}} \quad (5.16)$$

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;20} \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FFF;Z:503}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;20} \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FF;Z:503}} \quad (5.17)$$

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;20} \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FFF;Z:504}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;20} \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FF;Z:504}} \quad (5.18)$$

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;20} \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FFF;Z:505}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;20} \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FF;Z:505}} \quad (5.19)$$

Der Anstieg ist umso größer, je weiter außerhalb sich die Strahlungsfeldkomponente befindet (je größer die Nummer der Zelle ist).

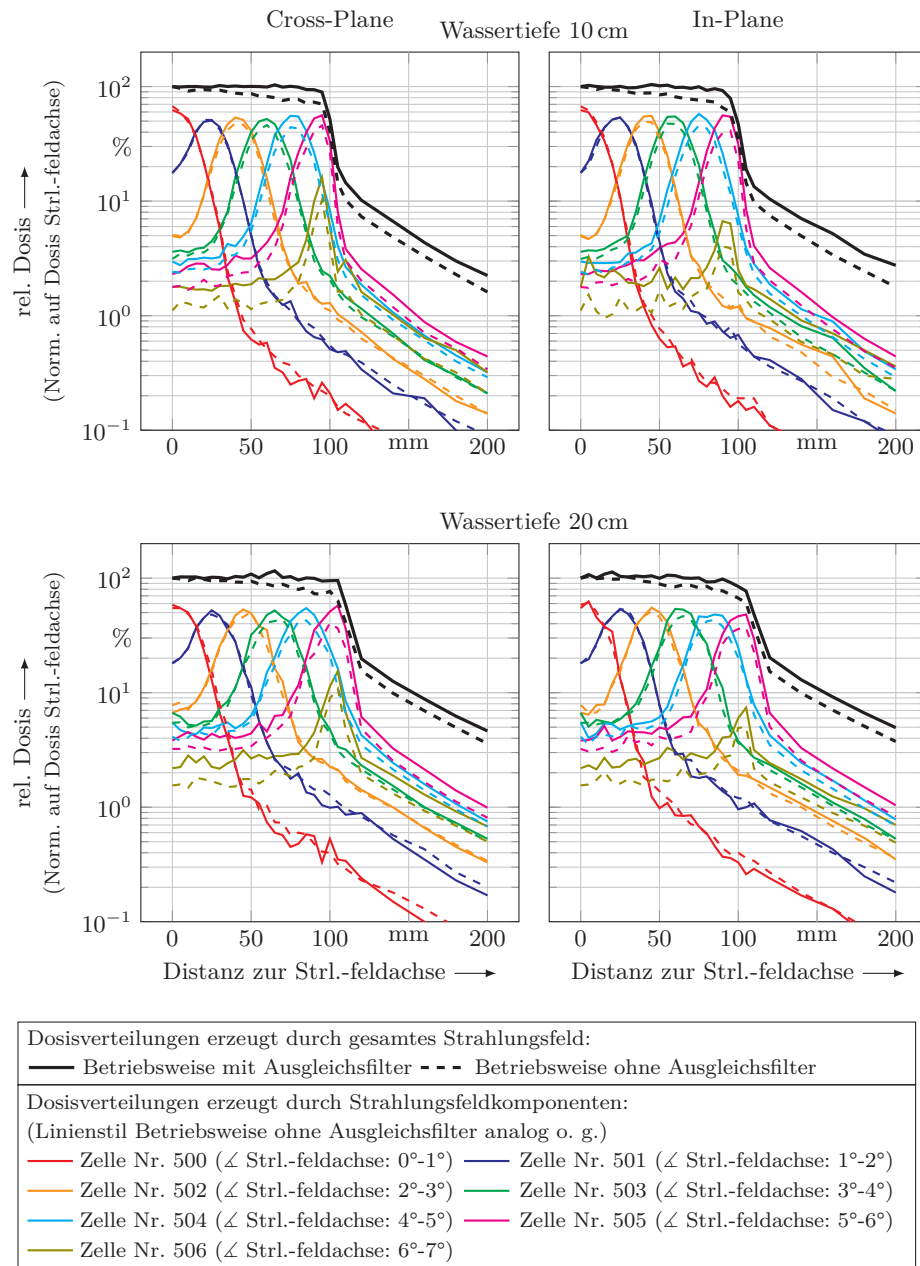
Der Ausgleichsfilter bewirkt aufgrund der höheren Schwächung niederenergetischer Photo-

nen eine Erhöhung der mittleren Energie des aus dem Filter austretenden Strahlungsfeldes (Energieaufhärtung). Bedingt durch die Bauform - abnehmende Materialdicke weiter außerhalb des Zentrums - ist dieser Effekt für Photonen nahe der Strahlenfeldachse (Zellen Nr. 500 und Nr. 501) ausgeprägter. Die Winkelverteilung der gestreuten Photonen bei dem im Wasserphantom dominierenden Comptoneffekt ist, wie bekannt, eine Funktion der Energie der ursprünglichen Photonen (bspw. [Kri09]). Mit steigender Energie der ursprünglichen Photonen sinkt die Anzahl der seitlich gestreuten Photonen in der betrachteten Wassertiefe. In der Folge reduziert sich die Dosis außerhalb der Feldgrenzen der Strahlungsfeldkomponenten der Zellen Nr. 500 und Nr. 501. Die Erhöhung der  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:502}}$  bis  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:505}}$  im Vergleich zum Betrieb ohne Ausgleichsfilter bei größter simulierter Feldgröße ergibt sich insbesondere als Folge der höheren Dosis der betreffenden Strahlungsfeldkomponenten innerhalb des geometrischen Strahlenfeldes (Abb. 5.15 S. 63 f.). Bei Betrachtung einer einzelnen Komponente, beispielsweise der Zelle Nr. 505 (Linien ---), ist ersichtlich, dass die Dosisverteilungen mit und ohne Ausgleichsfilter nahezu parallel verlaufen. Die Dosis der Komponente ohne Ausgleichsfilter (Linie ---) ist jedoch innerhalb der geometrischen Feldgrenzen kleiner, womit sich der Streuanteil und folglich auch die durch diese Komponente bedingte OfD reduziert.

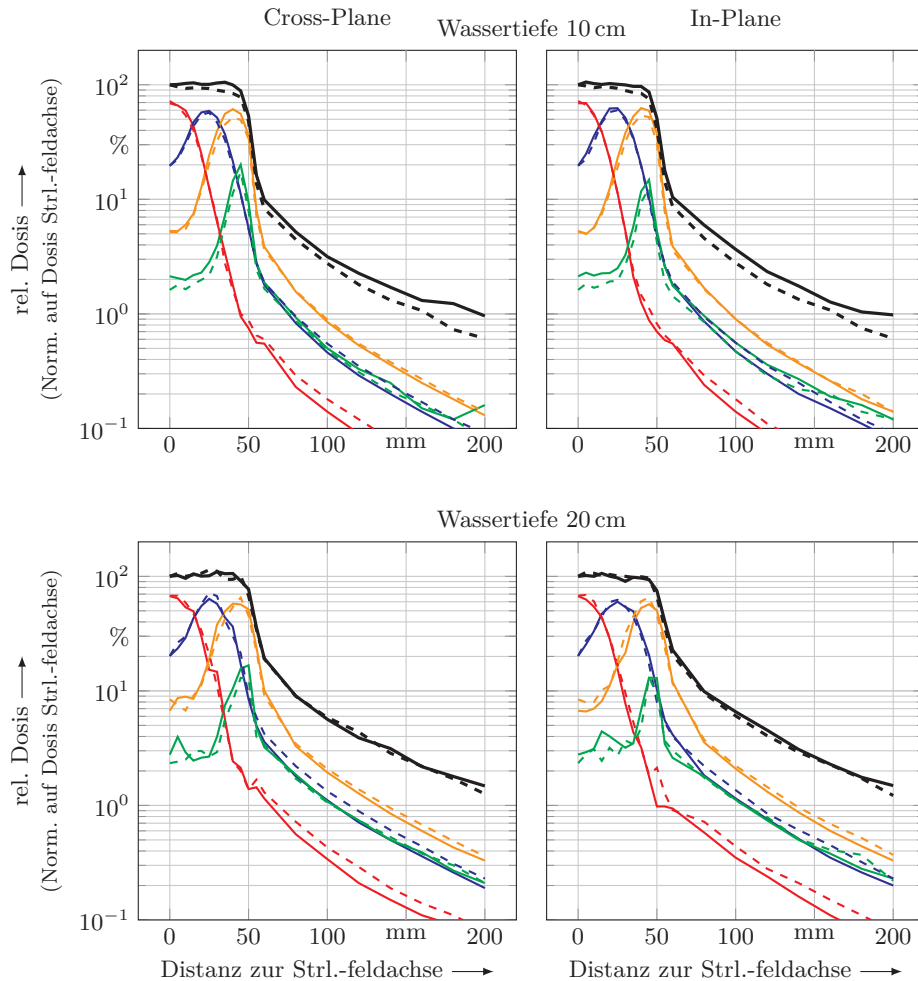
#### 5.5.4 Zwischenzusammenfassung

- In Bezug auf das geometrische Strahlenfeld zeigen die Ergebnisse, dass
  - mit wachsendem Emissionswinkel der Photonen zur Strahlenfeldachse aus dem Target deren Beitrag zur Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}}$ ) deutlich ansteigt,
  - sich die Dosen außerhalb der geometrischen Feldgrenzen der Photonen jedes Emissionswinkels ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:500}}$ ,  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:501}}$  u.s.w.) mit der Wassertiefe erhöhen und
  - sich die Dosen außerhalb der geometrischen Feldgrenzen der Strahlungsfeldkomponenten ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:500}}$ ,  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:501}}$  u.s.w.) mit wachsendem Abstand zur Strahlenfeldachse verringern.
- Zu den Auswirkungen des Ausgleichsfilters:
  - Bei mittlerer und kleinster simulierter Feldgröße bewirkt der Ausgleichsfilter eine Reduktion der Dosis außerhalb der Feldgrenzen von Photonen, die das Target unter einem kleinen Emissionswinkel (von 0° bis 2° zur Strahlenfeldachse) verlassen, im Vergleich zum Betrieb ohne Ausgleichsfilter.
  - Bei größter simulierter Feldgröße bewirkt der Ausgleichsfilter einen Anstieg der Dosis außerhalb der Feldgrenzen von Photonen, die das Target unter einem größeren Emissionswinkel (von 2° bis 6° zur Strahlenfeldachse) verlassen, im Vergleich zum Betrieb ohne Ausgleichsfilter.



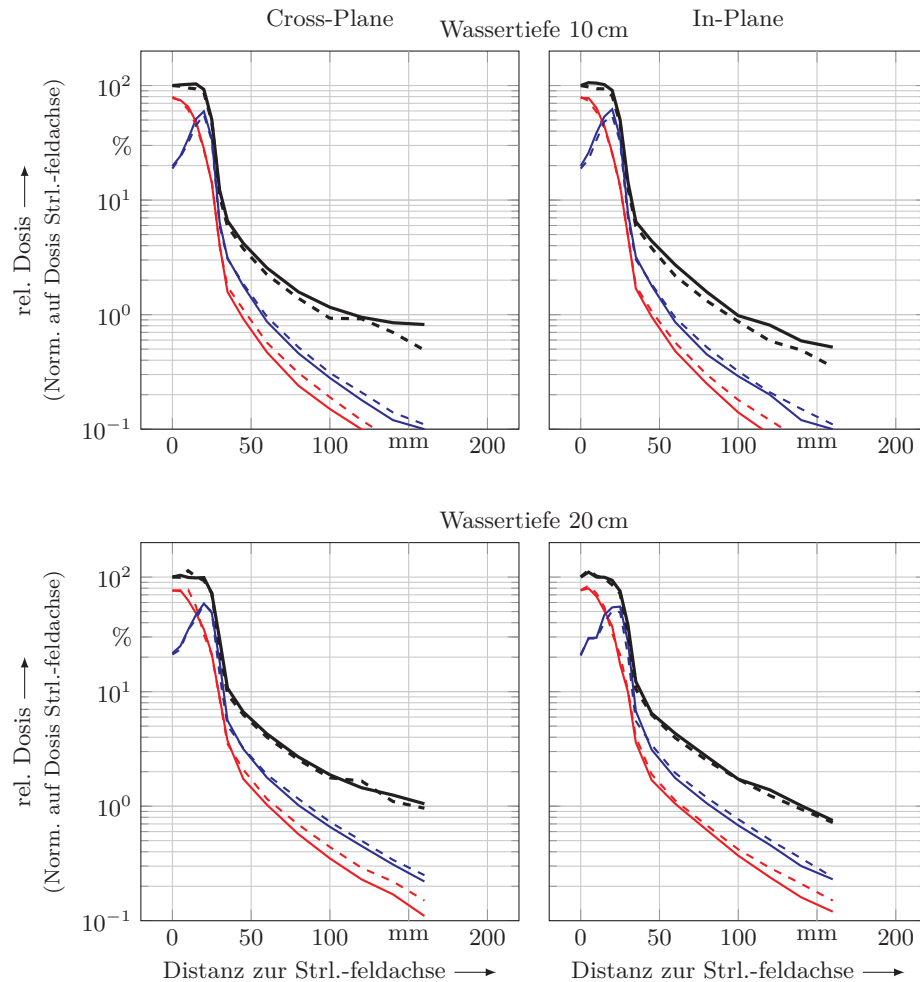


**Abbildung 5.15:** Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Winkelanalysescheibe** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise mit Ausgleichsfilter	- - - Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten: (Linienstil Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter analog o. g.)	
— Zelle Nr. 500 ( $\angle$ Strl.-feldachse: $0^\circ$ - $1^\circ$ )	— Zelle Nr. 501 ( $\angle$ Strl.-feldachse: $1^\circ$ - $2^\circ$ )
— Zelle Nr. 502 ( $\angle$ Strl.-feldachse: $2^\circ$ - $3^\circ$ )	— Zelle Nr. 503 ( $\angle$ Strl.-feldachse: $3^\circ$ - $4^\circ$ )

**Abbildung 5.16:** Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Winkelanalysescheibe** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm

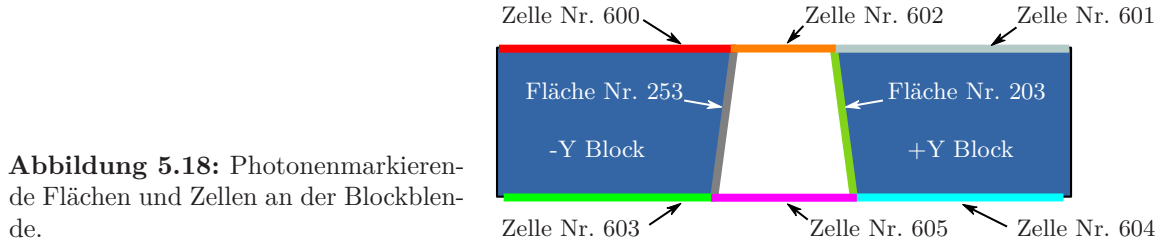


Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise mit Ausgleichsfilter	- - - Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten: (Linienstil Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter analog o. g.)	
— Zelle Nr. 500 ( $\angle$ Strl.-feldachse: $0^\circ$ - $1^\circ$ )	— Zelle Nr. 501 ( $\angle$ Strl.-feldachse: $1^\circ$ - $2^\circ$ )

**Abbildung 5.17:** Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Winkelanalysescheibe** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm

## 5.6 Strahlungsfeldkomponenten Blockblende

An der Blockblende wurden die Photonen bei der Passage der in der folgenden Abbildung hervorgehobenen Flächen und Zellen markiert, um deren Anteil an der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen zu erfassen.



**Abbildung 5.18:** Photonenmarkierende Flächen und Zellen an der Blockblende.

Die so markierten Photonen erzeugten in beiden Hauptebenen eine Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen im Wasserphantom. Sowohl für die Eintritts- als auch für die Austrittsflächen zeigt sich, dass sich die durch die drei Strahlungsfeldkomponenten erzeugten mittleren Dosen außerhalb der geometrischen Feldgrenzen für alle betrachteten Feldkonstellationen zur entsprechenden Dosis des Strahlungsfeldes – worunter das gesamte Strahlungsfeld ohne die Bildung von Strahlungsfeldkomponenten zu verstehen ist – aufsummieren. Es gilt für eine gegebene Hauptebene HE, die Betriebsweise BW bezüglich der Existenz des Ausgleichsfilters im Strahlengang, die Wassertiefe WT und die Feldgröße FG (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f., Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}} \approx \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:600}} + \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:601}} + \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:602}} \quad (5.20)$$

Und analog für die Austrittsflächen:

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}} \approx \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:603}} + \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:604}} + \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:605}} \quad (5.21)$$

Das gesamte eine Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen erzeugende Strahlungsfeld wird demnach bei allen simulierten Feldkonstellationen durch die markierenden Elemente an der Ein- bzw. Austrittsseite der Blockblende erfasst.

### 5.6.1 Hauptebene Cross-Plane

In Abhängigkeit von der konkreten Feldkonstellation nehmen die Terme  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:602}}$  und  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:605}}$  der Gleichungen 5.20 und 5.21 Werte zwischen 95 % bis 99 % in Bezug auf die betreffende  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;gesamt}}$  an (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.). Die Dosisverteilungen,  $\text{OfDD}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:602}}$ ,  $\text{OfDD}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:605}}$  und  $\text{OfDD}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}}$  sind für eine gegebene Feldkonstellation nahezu identisch (Abb. 5.19 bis 5.24 S. 73 ff. (Linien  $\equiv$ )).

Photonen, die die Blockblende über die Eintrittsflächen der Blöcke passieren, haben in allen simulierten Feldkonstellationen nur eine im Vergleich zur betreffenden  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;gesamt}}$  kleine  $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:600}}$  und  $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:601}}$  bei allen Distanzen zur Strahlenfeldachse zur Folge, was sich entsprechend in den mittleren Dosiswerten  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:600}}$  und  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:601}}$  zeigt (Abb. 5.19 bis 5.24 S. 73 ff. (Linien  $\equiv$ ), Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.).

Photonen, die die Blockblende über die Austrittsflächen der Blöcke passieren, haben in allen simulierten Feldkonstellationen eine verschwindend kleine Dosis außerhalb der

geometrischen Feldgrenzen zur Folge und finden sich daher weder in den Dosisverteilungen noch in den Balkendiagrammen wieder (Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.). Ein Teil der Photonen, die die Eintrittsflächen der Blendenblöcke passieren, verlassen die Blöcke offensichtlich über die wirksame Kante und erzeugen in der Folge eine Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen.

Aufgrund der deutlichen Dominanz der  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:602}}$  und  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:605}}$ , die wiederum in allen simulierten Feldkonstellationen nahezu identische Dosisverteilungen haben, werden die Einflüsse der Feldgröße, der Wassertiefe und des Ausgleichsfilters ausschließlich auf die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:605}}$  betrachtet.

#### Einfluss der Feldgröße

In Bezug auf die drei simulierten Feldgrößen steigt die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:605}}$  mit wachsender Feldgröße deutlich an (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;5}\times\text{5 cm}^2}^{\text{CP;BW;Z:605}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;10}\times\text{10 cm}^2}^{\text{CP;BW;Z:605}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;20}\times\text{20 cm}^2}^{\text{CP;BW;Z:605}} \quad (5.22)$$

Der Zuwachs mit der Feldgröße ist in der Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter generell kleiner als in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter.

#### Einfluss der Wassertiefe

Mit Blick auf die simulierten Feldkonstellationen zeigt sich ein Anstieg der  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:605}}$  mit der Erhöhung der Wassertiefe von 10 cm auf 20 cm Wassertiefe (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{10 cm;FG}}^{\text{CP;BW;Z:605}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{20 cm;FG}}^{\text{CP;BW;Z:605}} \quad (5.23)$$

Im Vergleich zur  $\overline{\text{OfD}}_{\text{10 cm;FG}}^{\text{CP;BW;Z:605}}$  ist die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{20 cm;FG}}^{\text{CP;BW;Z:605}}$  in allen simulierten Feldkonstellationen über die gesamte untersuchte Distanz erhöht ((Abb. 5.19 bis 5.24 S. 73 ff. (Linie —))).

#### Einfluss des Ausgleichsfilters

Im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter erhöht die Präsenz des Ausgleichsfilters die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:605}}$  in 10 cm Wassertiefe:

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{10 cm;FG}}^{\text{CP;FFF;Z:605}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{10 cm;FG}}^{\text{CP;FF;Z:605}} \quad (5.24)$$

Die Erhöhung fällt für die kleine und mittelgroße simulierte Feldgröße gering aus, bei der großen Feldgröße deutlich (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.). Die Dosisverteilungen zeigen, dass die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{10 cm;FG}}^{\text{CP;FF;Z:605}}$  bei jeder Distanz zur Strahlenfeldachse für alle simulierten Feldgrößen größer als die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{10 cm;FG}}^{\text{CP;FFF;Z:605}}$  bzw. gleich groß ist (Abb. 5.25 bis 5.27 S. 79 ff. (Linien ---)).

In 20 cm Wassertiefe zeigt sich bei der größten simulierten Feldgröße ein übereinstimmendes Verhalten zur kleineren Wassertiefe. Bei mittelgroßer und kleinster simulierter Feldgröße sind mögliche Zuwächse gering und aufgrund erhöhter Standardabweichungen nicht eindeutig als solche zu identifizieren (Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.). Die Dosisverteilungen sind nahezu identisch (Abb. 5.26, 5.27 S. 80 ff. (Linien ---)).

### Strahlungsfeldkomponenten der wirksamen Kanten

Photonen, die die wirksamen Kanten der Blockblende durchqueren, etwa durch Streuprozesse innerhalb des geometrischen Feldes oder Photonen, die die Blendenblöcke über die Eintrittsfläche und wirksame Kante passieren, haben in allen simulierten Feldkonstellationen nur eine im Vergleich zur betreffenden  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;gesamt}}$  kleine  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;F:203}}$  bzw.  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;F:253}}$  zur Folge (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.). Im Vergleich zur  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;gesamt}}$  ist die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;F:203}}$  und die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;F:253}}$  in allen simulierten Feldkonstellationen über die gesamte Distanz klein (Abb. 5.19 bis 5.24 S. 73 ff. (Linien  $\color{green}{=}$ )).

#### 5.6.2 Hauptebene In-Plane

Analog zu Cross-Plane wird die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$  durch die Strahlungsfeldkomponenten der Zellen Nr. 602 und 605 in allen simulierten Feldkonstellationen dominiert. In Abhängigkeit der konkreten Feldkonstellation nehmen die Terme  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:602}}$  und  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:605}}$  der Gleichungen 5.20 und 5.21 Werte zwischen 84% bis 97% in Bezug auf die betreffende  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$  an (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.). In der Hauptebene Cross-Plane waren dies zwischen 95% bis 99% (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.). Die Dosisverteilungen  $\overline{\text{OfDD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:602}}$  und  $\overline{\text{OfDD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:605}}$  sind dementsprechend auch nicht, wie in Cross-Plane, identisch zur  $\overline{\text{OfDD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$  (Abb. 5.19 bis 5.24 S. 73 ff. (Linien  $\color{red}{=}$ )). Mit zunehmender Distanz zur Strahlenfeldachse wächst die Differenz zwischen der  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:602}}$  bzw.  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:605}}$  zur  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$  (Abb. 5.19 bis 5.24 S. 73 ff. (Linien  $\color{red}{=}$ )). Aufgrund der nahezu identischen Dosisverteilungen der  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:602}}$  und  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:605}}$  (Abb. 5.19 bis 5.24 S. 73 ff. (Linien  $\color{red}{=}$ )) wird im weiteren Verlauf ausschließlich die Strahlungsfeldkomponente der Zelle Nr. 605 betrachtet.

Im Gegensatz zu Cross-Plane unterscheiden sich die an den beiden Blendenblöcken generierten Strahlungsfeldkomponenten hinsichtlich ihrer Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen erheblich voneinander.

Mit Blick auf den +Y Block zeigt sich, dass die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:601}}$  und die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:604}}$  bei allen simulierten Feldkonstellationen im Vergleich zur  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:605}}$  klein, allerdings ein Vielfaches größer als in Cross-Plane sind (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.). Außerdem ist im Gegensatz zu Cross-Plane die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:604}}$  größer als die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:601}}$  oder gleich groß (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.). Den Dosisverteilungen ist zu entnehmen, dass die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:604}}$ , bis auf Ausnahmefälle, über die untersuchte Distanz zur Strahlenfeldachse größer ist als die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:601}}$  (Abb. 5.19 bis 5.24 S. 73 ff. (Linien  $\color{blue}{=}$ )). Erklären lässt sich dies durch Photonen, die den Blendenblock durch die Eintritts- und Austrittsfläche passieren, und zusätzliche Photonen, die, aus dem geometrischen Strahlenfeld stammend, die wirksame Kante durchqueren und den Block über die Austrittsfläche verlassen.

Die weiter oben beschriebene, mit zunehmender Distanz zur Strahlenfeldachse wachsende Differenz zwischen der  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:605}}$  zur  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}}$  begründet sich durch die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:604}}$ . Die durch die Durchlassstrahlung des +Y Blocks verursachte Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen bleibt mit wachsendem Abstand zur Strahlenfeldachse in allen simulierten Feldkonstellationen relativ konstant (Abb. 5.19 bis 5.24 S. 73 ff. (Linie  $\color{blue}{-}$ )). Sie wird daher umso relevanter, je kleiner der Dosisanteil durch das geometrische Feld mit wachsendem Abstand zur Strahlenfeldachse wird.

Mit Blick auf den -Y Block zeigt sich, dass die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:603}}$  bei allen simulierten Feld-

konstellationen im Vergleich zur  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:605}}$  sehr klein ist (Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.). Sie ist deshalb weder in den Dosisverteilungen (Abb. 5.19 bis 5.24 S. 73 ff. (Linie —)) noch in den Balkendiagrammen (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.) zu finden.

Die deutlichen Unterschiede hinsichtlich der Durchlassstrahlung zwischen den beiden Blendenblöcken erklären sich durch die Positionierung der Zellen zur Dosismessung unterhalb des +Y Blocks. Die Zellen zur Dosismessung befinden sich auf der selben Seite der Hauptebene wie der +Y Block (Abschnitt 4.2.4, S. 27).

#### Einfluss der Feldgröße

In Bezug auf die drei simulierten Feldgrößen steigt die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:605}}$  mit wachsender Feldgröße deutlich an (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;5}\times\text{5 cm}^2}^{\text{IP;BW;Z:605}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;10}\times\text{10 cm}^2}^{\text{IP;BW;Z:605}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;20}\times\text{20 cm}^2}^{\text{IP;BW;Z:605}} \quad (5.25)$$

Der Zuwachs mit der Feldgröße ist in der Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter generell kleiner als in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter.

Keinen Einfluss hat die Feldgröße auf die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:604}}$  (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.).

#### Einfluss der Wassertiefe

Mit Blick auf die simulierten Feldkonstellationen zeigt sich ein Anstieg der  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:605}}$  mit der Erhöhung der Wassertiefe von 10 cm auf 20 cm Wassertiefe (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.):

$$\overline{\text{OfD}}_{10\text{ cm;FG}}^{\text{IP;BW;Z:605}} < \overline{\text{OfD}}_{20\text{ cm;FG}}^{\text{IP;BW;Z:605}} \quad (5.26)$$

Im Vergleich zur  $\overline{\text{OfD}}_{10\text{ cm;FG}}^{\text{IP;BW;Z:605}}$  ist die  $\overline{\text{OfD}}_{20\text{ cm;FG}}^{\text{IP;BW;Z:605}}$  in allen simulierten Feldkonstellationen über die gesamte untersuchte Distanz erhöht (Abb. 5.19 bis 5.24 S. 73 ff. (Linie —)).

Die  $\overline{\text{OfD}}_{20\text{ cm;FG}}^{\text{IP;BW;Z:604}}$  ist im Vergleich zur  $\overline{\text{OfD}}_{10\text{ cm;FG}}^{\text{IP;BW;Z:604}}$  bei den betrachteten Feldkonstellationen mit einer Ausnahme (Konstellation: FFF, große FG) gering erhöht (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.).

#### Einfluss des Ausgleichsfilters

Im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter erhöht die Präsenz des Ausgleichsfilters die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:605}}$  bei kleiner Feldgröße gering, bei mittlerer moderat und bei großer Feldgröße deutlich (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.).

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;FFF;Z:605}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;FF;Z:605}} \quad (5.27)$$

Die Dosisverteilungen zeigen, dass, für eine ausgewählte Feldkonstellation, die  $\overline{\text{OfD}}_{10\text{ cm;FG}}^{\text{IP;FF;Z:605}}$  bei jeder Distanz zur Strahlenfeldachse größer als die  $\overline{\text{OfD}}_{10\text{ cm;FG}}^{\text{IP;FFF;Z:605}}$  ist. In einer Wassertiefe von 20 cm gilt dies für die größte simulierte Feldgröße, während sich die Dosisverteilungen bei mittlerer und kleiner Feldgröße nahezu überlagern (Abb. 5.25 bis 5.27 S. 79 ff. (Linien ---)).

Die Auswirkungen des Ausgleichsfilters auf die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:604}}$  sind vergleichsweise klein. Der Ausgleichsfilter verursacht einen kleinen Anstieg im Vergleich zur Betriebsweise ohne

Filter (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.).

Den Dosisverteilungen ist zu entnehmen, dass die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;FF;Z:604}}$  über die gesamte untersuchte Distanz bei allen simulierten Feldkonstellationen fast immer größer als die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;FFF;Z:604}}$  ist (Abb. 5.25 bis 5.27 S. 79 ff. (Linien ---)).

#### Strahlungsfeldkomponenten der wirksamen Kanten

Die Strahlungsfeldkomponente der wirksamen Kante des -Y Blocks (Fläche Nr. 253) verursacht bei allen simulierten Feldgrößen und Wassertiefen eine im Vergleich zur betreffenden  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$  geringe  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;F:253}}$ . Im Gegensatz hierzu ist die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;F:203}}$  im Verhältnis zur jeweiligen  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$  groß. In Abhängigkeit von der Feldgröße, der Wassertiefe und der Präsenz des Ausgleichsfilters im Strahlengang stammen etwa 59 % bis 80 % der  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$  von Photonen, die zuvor an der wirksamen Kante des +Y Blendenblocks an der Fläche Nr. 203 markiert wurden. Da die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:604}}$  im Vergleich klein ist, kann geschlossen werden, dass die Photonen an der Fläche gestreut wurden und anschließend die Zelle Nr. 605 passiert haben. Der betreffende Blendenblock mit der Fläche Nr. 203 befindet sich dabei auf der selben Seite der Hauptebene, an der auch die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;F:203}}$  erzeugt wird.

Wie aus den Ergebnissen der Winkelanalysescheibe bekannt ist, fällt die Dosis durch seitlich gestreute Photonen des geometrischen Strahlenfeldes mit dem Abstand zur Strahlungsfeldachse stark ab. Es ist daher davon auszugehen, dass die an der Fläche Nr. 203 gestreuten Photonen, die eine relative große  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;F:203}}$  zur Folge haben, sich auch nach dem Streuprozess weiterhin in unmittelbarer Nähe zur geometrischen Feldgrenze, nahezu parallel zu dieser, fortbewegen. Die Dosisverteilung der Strahlungsfeldkomponente Nr. 203 bestätigt diese Vermutung, weil sich das Dosismaximum der Verteilung bei den betrachteten Feldkonstellationen immer innerhalb des geometrischen Feldes in der Nähe zur Feldgrenze befindet (Abb. 5.19 bis 5.24 S. 73 ff. (Linie —)). Ein kleiner Streuwinkel hat eine kleine Energieänderung der gestreuten Photonen zur Folge (bspw. [Kri09]):

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} \cdot (1 - \cos \phi)} \quad (5.28)$$

Hierbei ist  $E_\gamma$  die Energie des Photons vor dem Stoß,  $E'_\gamma$  die Energie des gestreuten Photons,  $\phi$  der Streuwinkel des Photons und  $m_0 c^2 = 0,511 \text{ MeV}$ . Bei Annahme einer mittleren Photonenenergie im geometrischen Feld von  $E_\gamma = 1,75 \text{ MeV}$  und einem Streuwinkel von  $\phi = 2^\circ$  ist der Energieverlust mit einem Verhältnis von  $E'_\gamma/E_\gamma = 0,997$  sehr gering.

Mit dem Streuvorgang ist demnach weder eine relevante Energie- noch Richtungsänderung der Photonen verbunden. Die Höhe der  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;F:203}}$  begründet sich folglich am ehesten mit der örtlichen Nähe der Photonen zur geometrischen Feldgrenze.

*Einfluss der Feldgröße* In Bezug auf die drei simulierten Feldgrößen steigt die mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen, die durch die Strahlungsfeldkomponente der Fläche Nr. 203 verursacht wird, mit wachsender Feldgröße deutlich an (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;5} \times 5 \text{ cm}^2}^{\text{IP;BW;F:203}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;10} \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{IP;BW;F:203}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;20} \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{IP;BW;F:203}} \quad (5.29)$$



Die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;F:253}}$  bleibt mit der Änderung der Feldgröße nahezu konstant auf sehr kleinem Niveau im Vergleich zur betreffenden  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$  (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.).

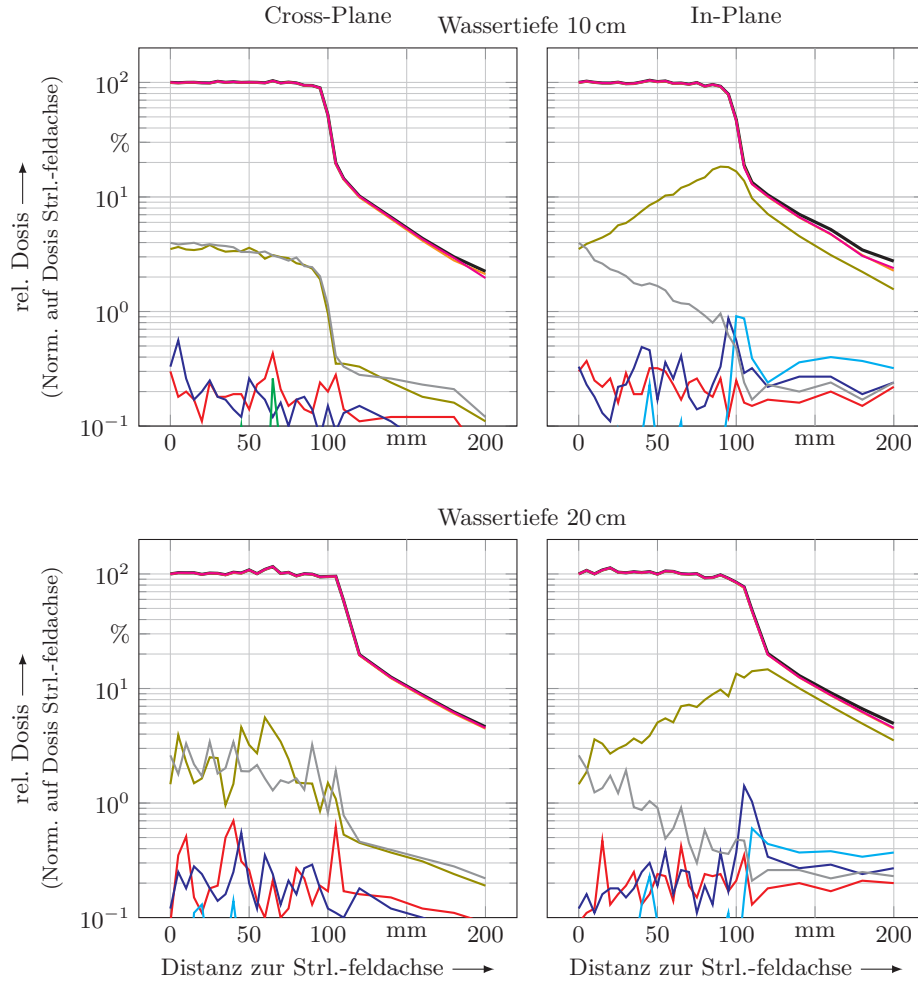
*Einfluss der Wassertiefe* Unabhängig von der Feldgröße und der Präsenz des Ausgleichsfilters ist die  $\overline{\text{OfD}}_{20\text{ cm;FG}}^{\text{IP;BW;F:253}}$  in Einzelfällen geringfügig größer als die  $\overline{\text{OfD}}_{10\text{ cm;FG}}^{\text{IP;BW;F:253}}$ , die  $\overline{\text{OfD}}_{20\text{ cm;FG}}^{\text{IP;BW;F:203}}$  in allen Fällen deutlich größer als die  $\overline{\text{OfD}}_{10\text{ cm;FG}}^{\text{IP;BW;F:203}}$  (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.).

*Einfluss des Ausgleichsfilters* In beiden simulierten Wassertiefen ist die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;20}\times\text{20 cm}^2}^{\text{IP;FF;F:203}}$  im Vergleich zur  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;20}\times\text{20 cm}^2}^{\text{IP;FFF;F:203}}$  moderat erhöht. Bei mittlerer und kleinster simulierter Feldgröße sind keine nennenswerten Änderungen durch den Ausgleichsfiler erkennbar (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.). Die Präsenz des Ausgleichsfilters hat auf die mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen, die durch die Strahlungsfeldkomponente der Fläche Nr. 253 erzeugt wird, nahezu keinen Einfluss, im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfiler (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f.).

### 5.6.3 Zwischenzusammenfassung

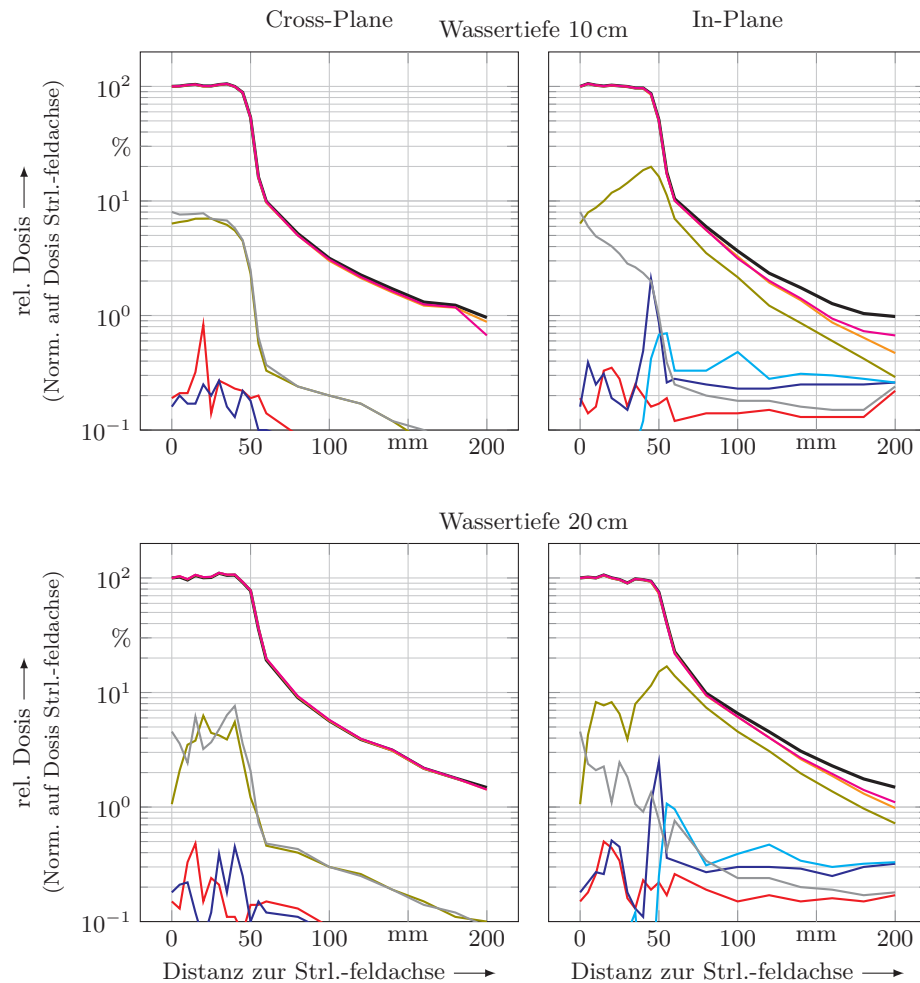
- Zur Dosis außerhalb der Feldgrenzen in der Hauptebene Cross-Plane
  - In Abhängigkeit der Feldkonstellation werden 95 % bis 99 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in der Hauptebene Cross-Plane ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;gesamt}}$ ) von Photonen erzeugt, die die Blockblende innerhalb der geometrischen Feldgrenzen (Zelle Nr. 605) passiert haben.
  - Bis zu 11 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in der Hauptebene Cross-Plane ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;gesamt}}$ ) stammen von Photonen, die zuvor an den wirksamen Kanten der Blockblende gestreut wurden.
- Zur Dosis außerhalb der Feldgrenzen in der Hauptebene In-Plane
  - In Abhängigkeit der Feldkonstellation werden 84 % bis 97 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in der Hauptebene In-Plane ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$ ) von Photonen erzeugt, die die Blockblende innerhalb der geometrischen Feldgrenzen (Zelle Nr. 605) passiert haben.
  - Die mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in der Hauptebene In-Plane, die durch Photonen verursacht wurde, die die Blockblende innerhalb der geometrischen Feldgrenzen passiert haben ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:605}}$ )
    - \* steigt mit der Feldgröße an,
    - \* steigt mit der Wassertiefe an und
    - \* steigt in der Betriebsweise mit Ausgleichsfiler im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfiler an.
  - Die Durchlassstrahlung eines Blendenblocks erzeugt ausschließlich auf der Seite der Hauptebene eine Dosis außerhalb der Feldgrenzen, auf der sich der Blendenblock befindet ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:604}}$ ). In Abhängigkeit der Feldkonstellation werden 2 % bis 14 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in

- der Hauptebene In-Plane ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$ ) von der Durchlassstrahlung erzeugt. In Bezug auf den Abstand zur Strahlenfeldachse ist die Dosis relativ konstant.
- Die mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in der Hauptebene In-Plane, die durch die Durchlassstrahlung des Blendenblocks erzeugt wird, der sich auf der Seite der Hauptebene befindet, auf der die Dosis erzeugt wird ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:604}}$ )
    - \* ändert sich nicht mit der Feldgröße,
    - \* steigt mit der Wassertiefe an (Ausnahme: FFF, große FG, In-Plane) und
    - \* steigt in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter an.
  - Die an der wirksamen Kante eines Blendenblocks gestreuten Photonen erzeugen auf der zum streuenden Blendenblock gegenüberliegenden Seite der Hauptebene eine mit bis zu 7 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in der Hauptebene In-Plane ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$ ) vergleichsweise kleine Dosis.
  - Die an der wirksamen Kante eines Blendenblocks gestreuten Photonen erzeugen auf der Seite der Hauptebene des streuenden Blendenblocks mit 59 % bis 80 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in der Hauptebene In-Plane ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$ ) eine vergleichsweise hohe Dosis außerhalb des Feldes. Die Höhe der OfD ist dabei nicht durch den Streuvorgang bedingt, sondern durch die Nähe der gestreuten Photonen zur Feldgrenze im Wasserphantom.



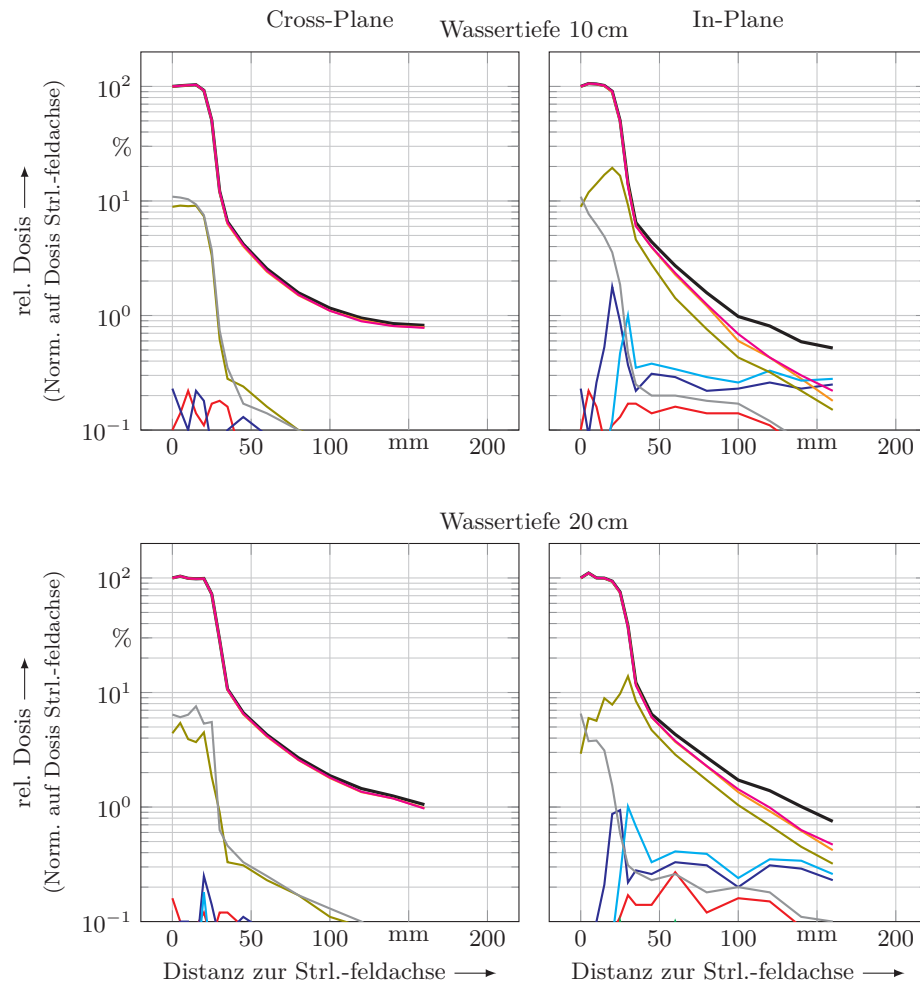
Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise mit Ausgleichsfilter	
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
— Zelle Nr. 600 (Eintrittsfläche -Y Block)	— Zelle Nr. 601 (Eintrittsfläche +Y Block)
— Zelle Nr. 602 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	— Zelle Nr. 603 (Austrittsfläche -Y Block)
— Zelle Nr. 604 (Austrittsfläche +Y Block)	— Zelle Nr. 605 (Austrittsfläche Strl.-Feld)
— Fläche Nr. 203 (wirksame Kante +Y Block)	— Fläche Nr. 253 (wirksame Kante -Y Block)

**Abbildung 5.19:** Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Blockblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



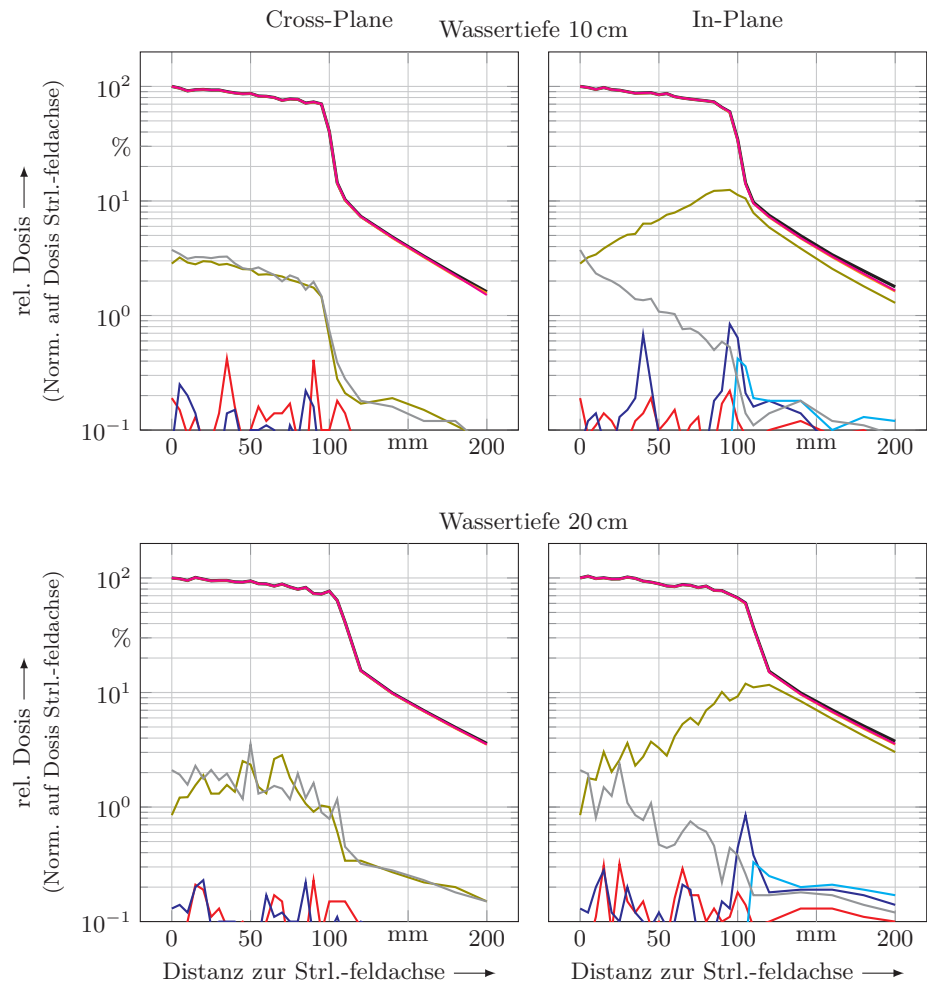
Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise mit Ausgleichsfilter	
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
— Zelle Nr. 600 (Eintrittsfläche -Y Block)	— Zelle Nr. 601 (Eintrittsfläche +Y Block)
— Zelle Nr. 602 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	— Zelle Nr. 603 (Austrittsfläche -Y Block)
— Zelle Nr. 604 (Austrittsfläche +Y Block)	— Zelle Nr. 605 (Austrittsfläche Strl.-Feld)
— Fläche Nr. 203 (wirksame Kante +Y Block)	— Fläche Nr. 253 (wirksame Kante -Y Block)

**Abbildung 5.20:** Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Blockblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



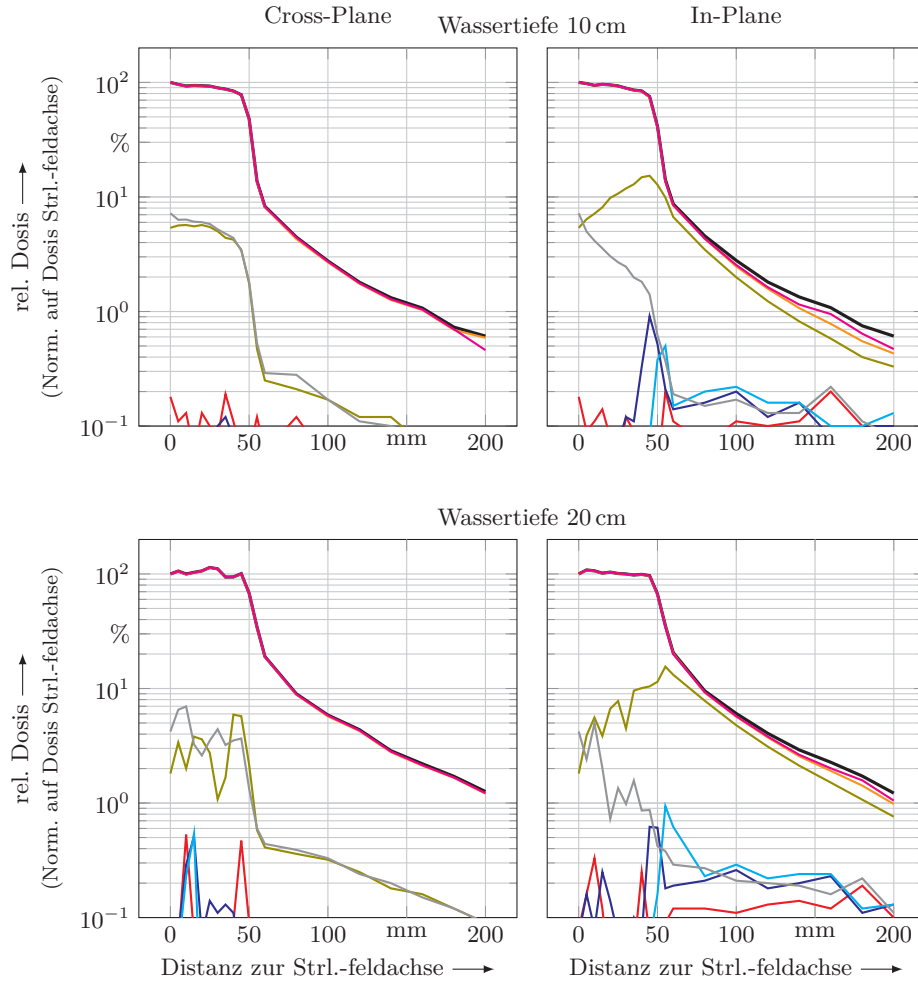
Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise mit Ausgleichsfilter	
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
— Zelle Nr. 600 (Eintrittsfläche -Y Block)	— Zelle Nr. 601 (Eintrittsfläche +Y Block)
— Zelle Nr. 602 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	— Zelle Nr. 603 (Austrittsfläche -Y Block)
— Zelle Nr. 604 (Austrittsfläche +Y Block)	— Zelle Nr. 605 (Austrittsfläche Strl.-Feld)
— Fläche Nr. 203 (wirksame Kante +Y Block)	— Fläche Nr. 253 (wirksame Kante -Y Block)

**Abbildung 5.21:** Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Blockblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



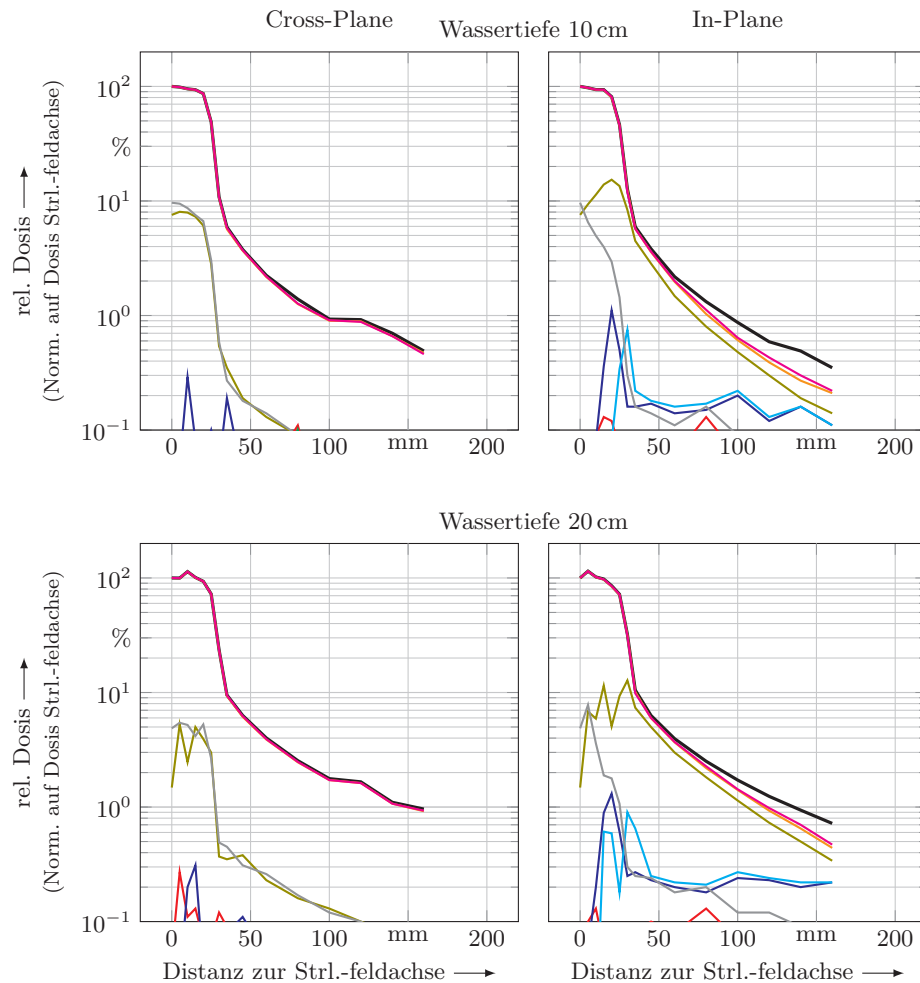
Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter	
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
— Zelle Nr. 600 (Eintrittsfläche -Y Block)	— Zelle Nr. 601 (Eintrittsfläche +Y Block)
— Zelle Nr. 602 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	— Zelle Nr. 603 (Austrittsfläche -Y Block)
— Zelle Nr. 604 (Austrittsfläche +Y Block)	— Zelle Nr. 605 (Austrittsfläche Strl.-Feld)
— Fläche Nr. 203 (wirksame Kante +Y Block)	— Fläche Nr. 253 (wirksame Kante -Y Block)

**Abbildung 5.22:** Dosishalbprofile in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Blockblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter	
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
— Zelle Nr. 600 (Eintrittsfläche -Y Block)	— Zelle Nr. 601 (Eintrittsfläche +Y Block)
— Zelle Nr. 602 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	— Zelle Nr. 603 (Austrittsfläche -Y Block)
— Zelle Nr. 604 (Austrittsfläche +Y Block)	— Zelle Nr. 605 (Austrittsfläche Strl.-Feld)
— Fläche Nr. 203 (wirksame Kante +Y Block)	— Fläche Nr. 253 (wirksame Kante -Y Block)

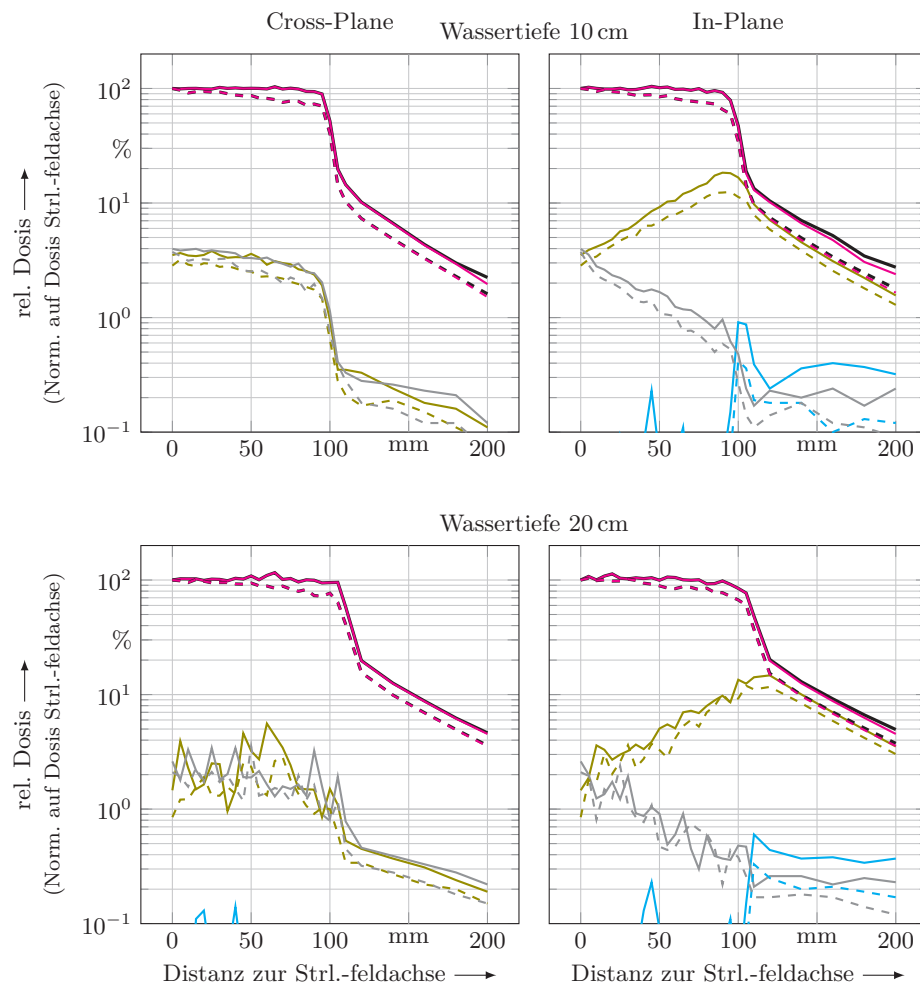
**Abbildung 5.23:** Dosishalbprofile in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Blockblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter	
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
— Zelle Nr. 600 (Eintrittsfläche -Y Block)	— Zelle Nr. 601 (Eintrittsfläche +Y Block)
— Zelle Nr. 602 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	— Zelle Nr. 603 (Austrittsfläche -Y Block)
— Zelle Nr. 604 (Austrittsfläche +Y Block)	— Zelle Nr. 605 (Austrittsfläche Strl.-Feld)
— Fläche Nr. 203 (wirksame Kante +Y Block)	— Fläche Nr. 253 (wirksame Kante -Y Block)

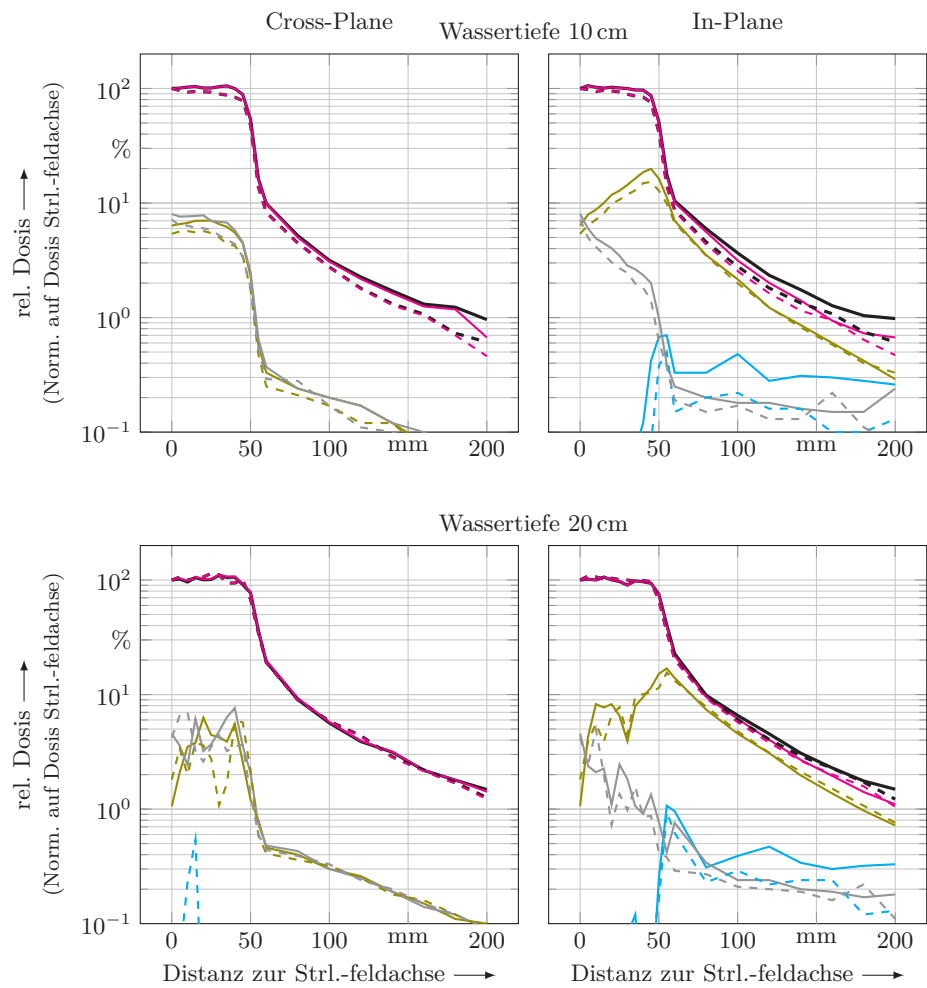
**Abbildung 5.24:** Dosishalbprofile in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Blockblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm





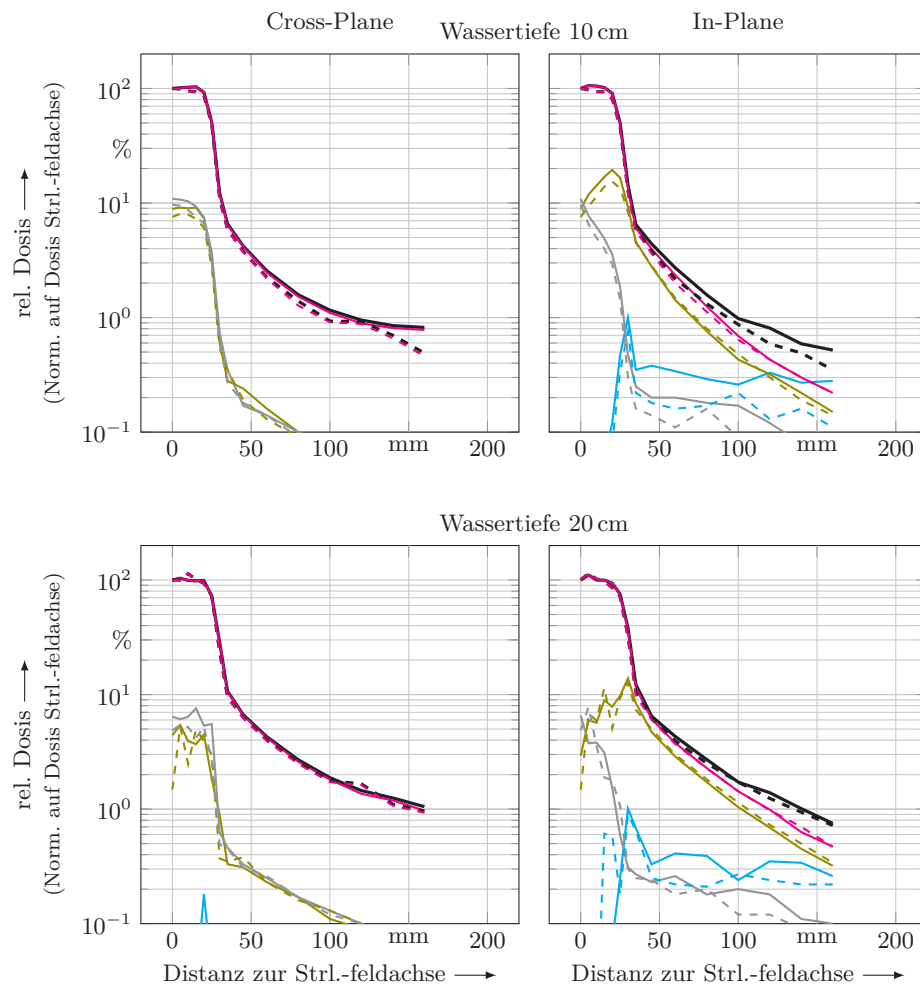
Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise mit Ausgleichsfilter	- - - Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten: (Linienstil Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter analog o. g.)	
— Zelle Nr. 604 (Austrittsfläche +Y Block)	— Zelle Nr. 605 (Austrittsfläche Strl.-Feld)
— Fläche Nr. 203 (wirksame Kante +Y Block)	— Fläche Nr. 253 (wirksame Kante -Y Block)

**Abbildung 5.25:** Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen ausgewählte Halbprofile von in der **Blockblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



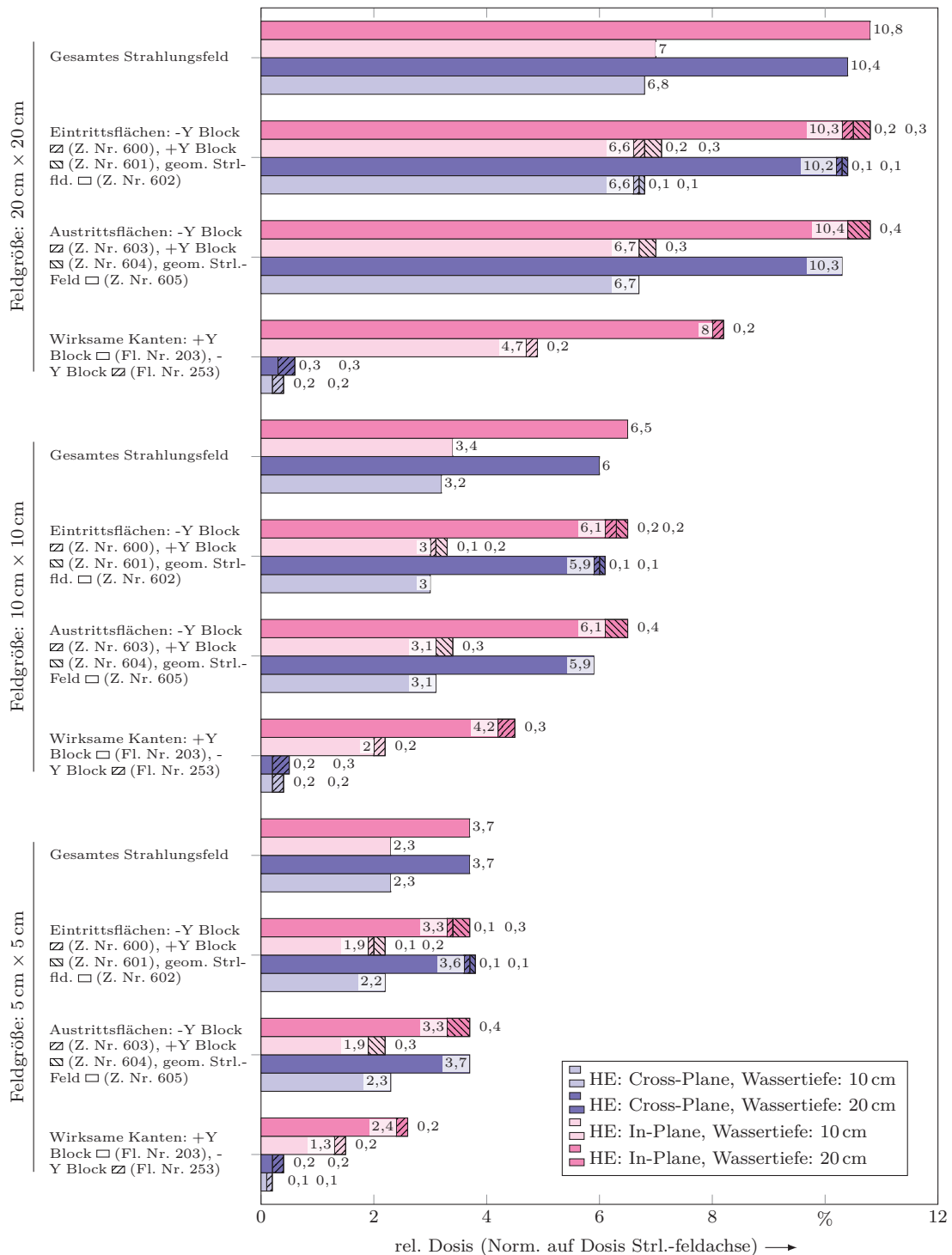
Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise mit Ausgleichsfilter	- - - Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten: (Linienstil Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter analog o. g.)	
— Zelle Nr. 604 (Austrittsfläche +Y Block)	— Zelle Nr. 605 (Austrittsfläche Strl.-Feld)
— Fläche Nr. 203 (wirksame Kante +Y Block)	— Fläche Nr. 253 (wirksame Kante -Y Block)

**Abbildung 5.26:** Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen ausgewählte Halbprofile von in der **Blockblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



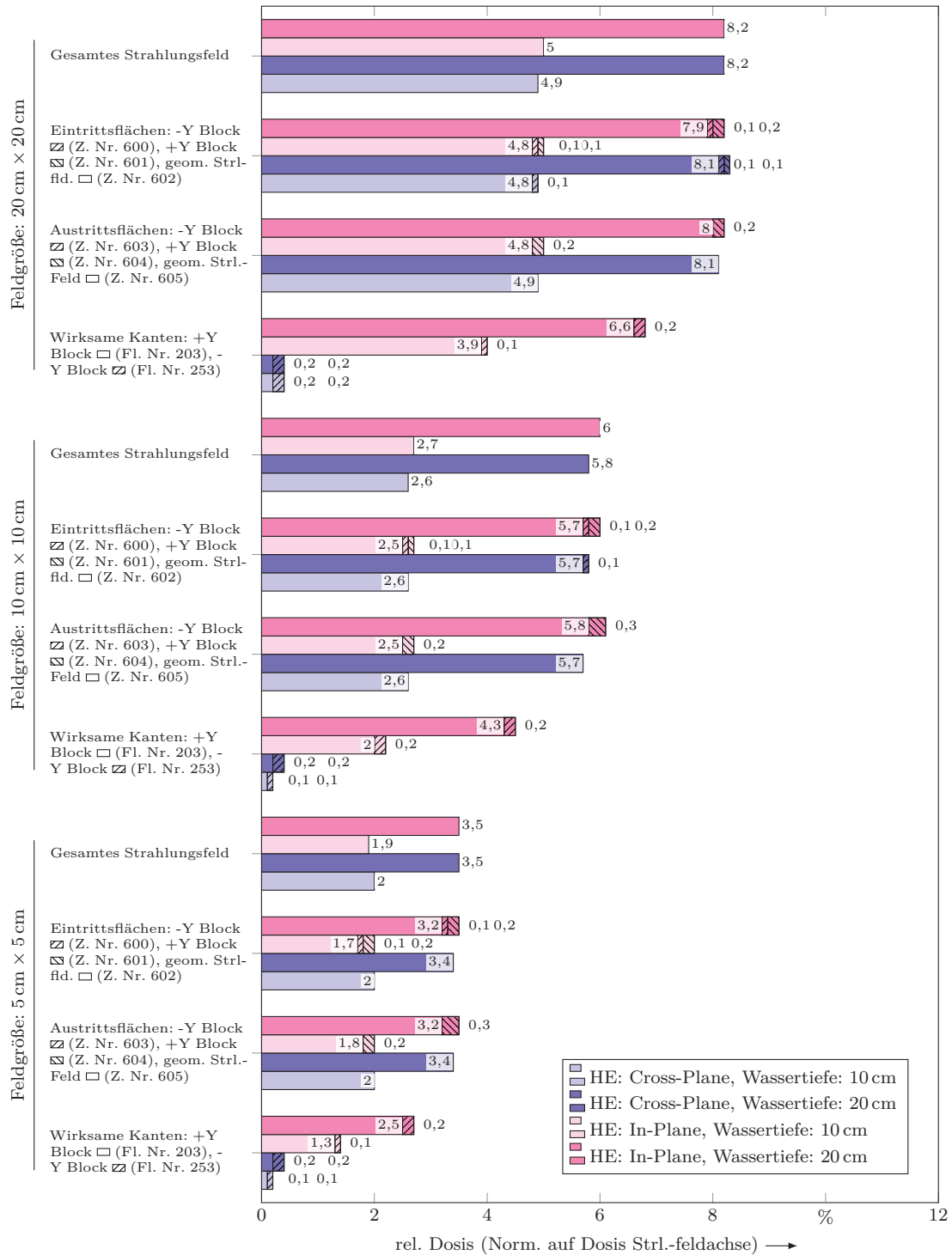
Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise mit Ausgleichsfilter	- - - Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
(Linienstil Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter analog o. g.)	
— Zelle Nr. 604 (Austrittsfläche +Y Block)	— Zelle Nr. 605 (Austrittsfläche Strl.-Feld)
— Fläche Nr. 203 (wirksame Kante +Y Block)	— Fläche Nr. 253 (wirksame Kante -Y Block)

**Abbildung 5.27:** Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen ausgewählte Halbprofile von in der **Blockblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



**Abbildung 5.28:** Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{OfD}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld sowie in der **Blockblende** generierte Strahlungsfeldkomponenten in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** für alle simulierten Feldkonstellationen.

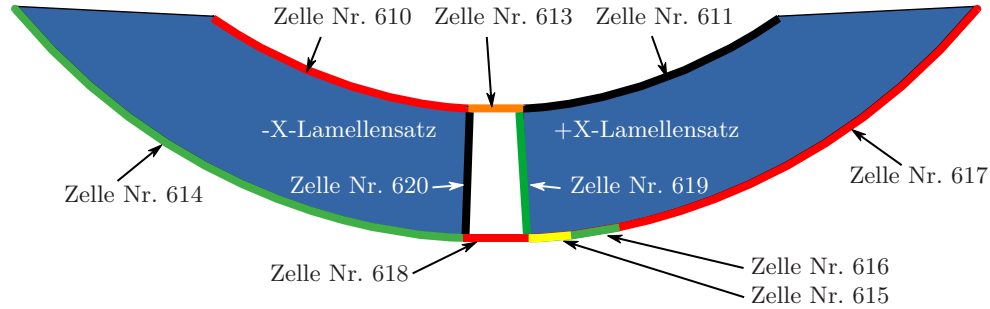
## 5.6 Strahlungsfeldkomponenten Blockblende



**Abbildung 5.29:** Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{OfD}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld sowie in der **Blockblende** generierte Strahlungsfeldkomponenten in der Betriebsweise **ohne Ausgleichfilter** für alle simulierten Feldkonstellationen.

## 5.7 Strahlungsfeldkomponenten Lamellenblende

An der Lamellenblende wurden die Photonen bei der Passage der in der folgenden Abbildung hervorgehobenen Zellen markiert, um deren Anteil an der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen zu erfassen.



**Abbildung 5.30:** Photonenmarkierende Zellen an der Lamellenblende.

Die so markierten Photonen erzeugten, wie bereits bei der Blockblende beobachtet, in beiden Hauptebenen eine Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen im Wasserphantom. Ebenso gilt für eine gegebene Hauptebene HE, die Betriebsweise BW bezüglich der Existenz des Ausgleichsfilters im Strahlengang, die Wassertiefe WT und die Feldgröße FG (Abb. 5.40, 5.41 S. 98 f., Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}} \approx \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:610}} + \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:611}} + \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:613}} \quad (5.30)$$

Und analog für die Austrittsflächen:

$$\begin{aligned} \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}} &\approx \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:614}} + \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:615}} + \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:616}} \\ &\quad + \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:617}} + \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:618}} \end{aligned} \quad (5.31)$$

Das gesamte eine Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen erzeugende Strahlungsfeld wird demnach bei allen simulierten Feldkonstellationen durch die markierenden Elemente an der Ein- bzw. Austrittsseite der Lamellenblende erfasst.

### 5.7.1 Hauptebene In-Plane

In Abhängigkeit von der konkreten Feldkonstellation nehmen die Terme  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:613}}$  und  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:618}}$  der Gleichungen 5.30 und 5.31 Werte zwischen 93 % bis 99 % in Bezug auf die betreffende  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$  an (Abb. 5.40, 5.41 S. 98 f.). Im entsprechenden Fall der Blockblende waren dies zwischen 95 % und 99 %. Die weiteren Ausführungen zur Blockblende für die Hauptebene Cross-Plane können vollständig analog auf die Lamellenblende für die Hauptebene In-Plane übertragen werden. Insbesondere gilt dies auch für den Einfluss der Feldgröße, der Wassertiefe, des Ausgleichsfilters und die Strahlungsfeldkomponenten der wirksamen Kanten (Abb. 5.40, 5.41 S. 98 f., Abb. 5.31 bis 5.36 S. 88 ff., Abb. 5.37 bis 5.39 S. 94 ff.).

### 5.7.2 Hauptebene Cross-Plane

In Abhängigkeit der konkreten Feldkonstellation tragen die Strahlungsfeldkomponenten des geometrischen Strahlenfeldes,  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:613}}$  bzw.  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:618}}$ , 72 % bis 95 % zur  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;gesamt}}$  in der Hauptebene Cross-Plane bei. Der entsprechende Anteil betrug bei der Blockblende 84 % bis 97 % der  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$ . Die Reduktion erklärt sich durch die im Vergleich zur Blockblende höhere Durchlassstrahlung der Lamellenblende.

#### Einfluss der Feldgröße

Analog zur Blockblende steigt die durch die Strahlungsfeldkomponente der Zelle Nr. 618 verursachte mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen mit wachsender Feldgröße deutlich an (Abb. 5.40, 5.41 S. 98 f.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;5}\times\text{5 cm}^2}^{\text{CP;BW;Z:618}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;10}\times\text{10 cm}^2}^{\text{CP;BW;Z:618}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;20}\times\text{20 cm}^2}^{\text{CP;BW;Z:618}} \quad (5.32)$$

Ebenfalls analog zur Blockblende hat die Feldgröße keinen nennenswerten Einfluss auf die durchlassstrahlungsbedingte  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:615}}$ ,  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:616}}$  und  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:617}}$  (Abb. 5.40, 5.41 S. 98 f.).

#### Einfluss der Wassertiefe

Analog zur Blockblende steigt die durch die Strahlungsfeldkomponente der Zelle Nr. 618 verursachte mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen mit der Erhöhung der Wassertiefe (Abb. 5.40, 5.41 S. 98 f.) an:

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{10 cm;FG}}^{\text{CP;BW;Z:618}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{20 cm;FG}}^{\text{CP;BW;Z:618}} \quad (5.33)$$

Die durchlassstrahlungsbedingte  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:615}}$ ,  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:616}}$  und  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:617}}$  ist in höherer Wassertiefe mit einer Ausnahme (Konstellation: FF, kleine FG), in der es keine Änderung gibt, wie bei der Blockblende, gering erhöht (Abb. 5.40, 5.41 S. 98 f.).

#### Einfluss des Ausgleichsfilters

Analog zur Blockblende erhöht die Präsenz des Ausgleichsfilters die Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen, die durch die Strahlungsfeldkomponente der Zelle Nr. 618 erzeugt wird (Abb. 5.40, 5.41 S. 98 f.).

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;FFF;Z:618}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;FF;Z:618}} \quad (5.34)$$

Die Auswirkungen des Ausgleichsfilters auf die mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen, die durch die Durchlassstrahlung des Satzes der Lamellenblende verursacht wird ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:615}}$ ,  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:616}}$  und  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:617}}$ ), ist, wie bei der Blockblende, vergleichsweise klein.

#### Strahlungsfeldkomponenten der wirksamen Kanten

Die Überlegungen bezüglich des Streuwinkels und des Energieverlustes der Photonen durch den Streuprozess an der wirksamen Kante der Blockblende sind entsprechend übertragbar.

*Einfluss der Feldgröße* Analog zur Blockblende steigt die mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen, die durch die Strahlungsfeldkomponente der Zelle Nr. 619 verursacht wird, mit wachsender Feldgröße deutlich an (Abb. 5.40, 5.41 S. 98 f.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};5 \times 5 \text{ cm}^2}^{\text{CP;BW;Z:619}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};10 \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{CP;BW;Z:619}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};20 \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{CP;BW;Z:619}} \quad (5.35)$$

Auch bleibt die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:620}}$  mit der Änderung der Feldgröße nahezu konstant auf sehr kleinem Niveau im Vergleich zur betreffenden  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;gesamt}}$  (Abb. 5.40, 5.41 S. 98 f.).

*Einfluss der Wassertiefe* Unabhängig von der Feldgröße und der Präsenz des Ausgleichsfilters ist in Entsprechung zur Blockblende die  $\overline{\text{OfD}}_{20 \text{ cm;FG}}^{\text{CP;BW;Z:620}}$  in Einzelfällen geringfügig größer als die  $\overline{\text{OfD}}_{10 \text{ cm;FG}}^{\text{CP;BW;Z:620}}$ , die  $\overline{\text{OfD}}_{20 \text{ cm;FG}}^{\text{CP;BW;Z:619}}$  in allen Fällen deutlich größer als die  $\overline{\text{OfD}}_{10 \text{ cm;FG}}^{\text{CP;BW;Z:619}}$  (Abb. 5.40, 5.41 S. 98 f.).

*Einfluss des Ausgleichsfilters* Analog zur Blockblende ist in beiden simulierten Wassertiefen die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};20 \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{CP;FF;Z:619}}$  im Vergleich zur  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};20 \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{CP;FFF;Z:619}}$  moderat erhöht. Bei mittlerer und kleinster simulierter Feldgröße sind keine nennenswerten Änderungen durch den Ausgleichsfiler erkennbar (Abb. 5.40, 5.41 S. 98 f.). Die Präsenz des Ausgleichsfilters hat auf die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:620}}$  nahezu keinen Einfluss, im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfiler (Abb. 5.40, 5.41 S. 98 f.).

### 5.7.3 Zwischenzusammenfassung

- Zur Dosis außerhalb der Feldgrenzen in der Hauptebene In-Plane
  - In Abhängigkeit der Feldkonstellation werden 96 % bis 99 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in der Hauptebene In-Plane ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$ ) von Photonen erzeugt, die die Lamellenblende innerhalb der geometrischen Feldgrenzen (Zelle Nr. 618) passiert haben. Im analogen Fall der Blockblende waren dies zwischen 95 % bis 99 %.
  - Bis zu 12 % der  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$  stammen von Photonen, die zuvor an den wirksamen Kanten der Lamellenblende gestreut wurden. Im analogen Fall der Blockblende waren dies 11 %.
- Zur Dosis außerhalb der Feldgrenzen in der Hauptebene Cross-Plane
  - In Abhängigkeit der Feldkonstellation werden 72 % bis 93 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in der Hauptebene Cross-Plane ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;gesamt}}$ ) von Photonen erzeugt, die die Lamellenblende innerhalb der geometrischen Feldgrenzen (Zelle Nr. 618) passiert haben. Im entsprechenden Fall der Blockblende waren dies 84 % bis 97 %. Der Unterschied ergibt sich durch die höhere Durchlassstrahlung im Fall der Lamellenblende.
  - Die mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in der Hauptebene Cross-Plane, die durch Photonen verursacht wurde, die die Lamellenblende innerhalb der geometrischen Feldgrenzen passiert haben ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:618}}$ )

\* steigt mit der Feldgröße an,

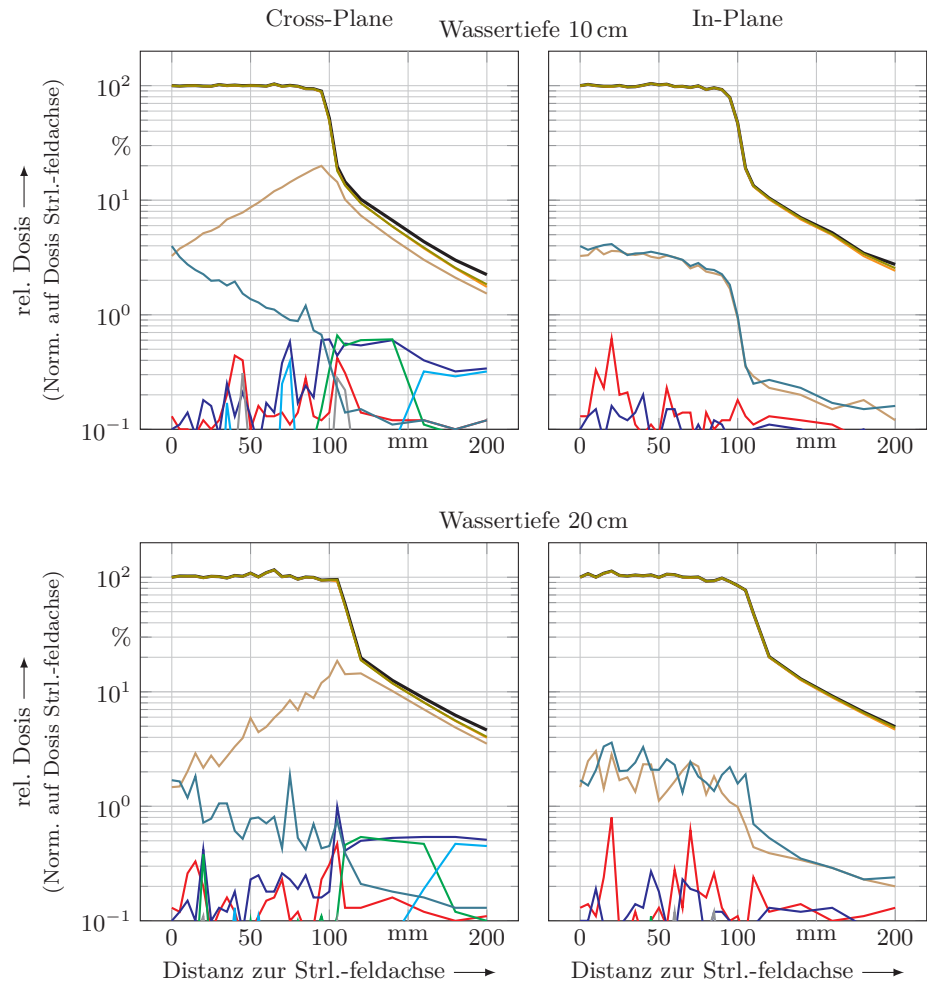


- \* steigt mit der Wassertiefe an und
- \* steigt in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter an

und verhält sich damit vollständig analog zur Blockblende.

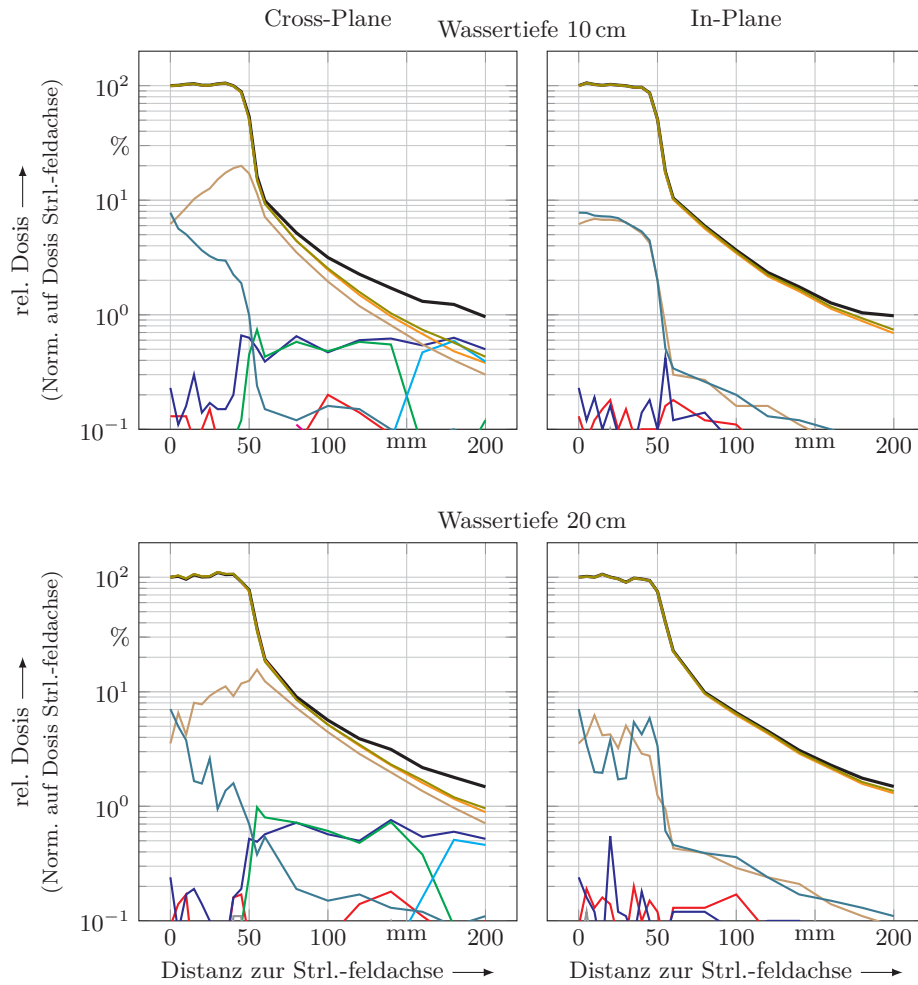
- Die Durchlassstrahlung eines Lamellensatzes erzeugt, wie bei der Blockblende, ausschließlich auf der Seite der Hauptebene eine Dosis außerhalb der Feldgrenzen, auf der sich der Lamellensatz befindet ( $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:615}}$ ,  $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:616}}$ ,  $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:617}}$ ). In Abhängigkeit der Feldkonstellation werden 5 % bis 24 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in der Hauptebene Cross-Plane ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;gesamt}}$ ) von der Durchlassstrahlung erzeugt. In Bezug auf den Abstand zur Strahlenfeldachse ist die Dosis relativ konstant. Im entsprechenden Fall der Blockblende waren dies zwischen 2 % bis 14 %. Im Falle der Lamellenblende ist die Durchlassstrahlung im Vergleich zur Blockblende aufgrund erhöhter Transmission aneinander angrenzender Lamellen erhöht.
- Die mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in der Hauptebene Cross-Plane, die durch die Durchlassstrahlung des Lamellensatzes erzeugt wird, der sich auf der Seite der Hauptebene befindet, auf der die Dosis erzeugt wird ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:615}}$ ,  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:616}}$ ,  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:617}}$ )
  - \* ändert sich geringfügig mit der Feldgröße,
  - \* steigt, bis auf eine Ausnahme (Konstellation: FF, kleine FG), in der es keine Änderung gibt, mit der Wassertiefe an und
  - \* steigt in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter an

und verhält sich damit analog zur Blockblende.
- Die an der wirksamen Kante eines Lamellensatzes gestreuten Photonen erzeugen auf der zum streuenden Lamellensatz gegenüberliegenden Seite der Hauptebene eine mit bis zu 4 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in der Hauptebene Cross-Plane ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;gesamt}}$ ) vergleichsweise kleine Dosis. Im entsprechenden Fall der Blockblende waren dies, bedingt durch die im Vergleich zur Lamellenblende geänderte Geometrie (kleinere Distanz zum Target und damit größere Distanz zum Wasserphantom) bis zu 7 %.
- Die an der wirksamen Kante eines Lamellensatzes gestreuten Photonen erzeugen auf der Seite der Hauptebene des streuenden Lamellensatzes mit 56 % bis 82 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in der Hauptebene Cross-Plane ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;gesamt}}$ ) eine vergleichsweise hohe Dosis außerhalb des Feldes. Diese entspricht derjenigen an der Blockblende.



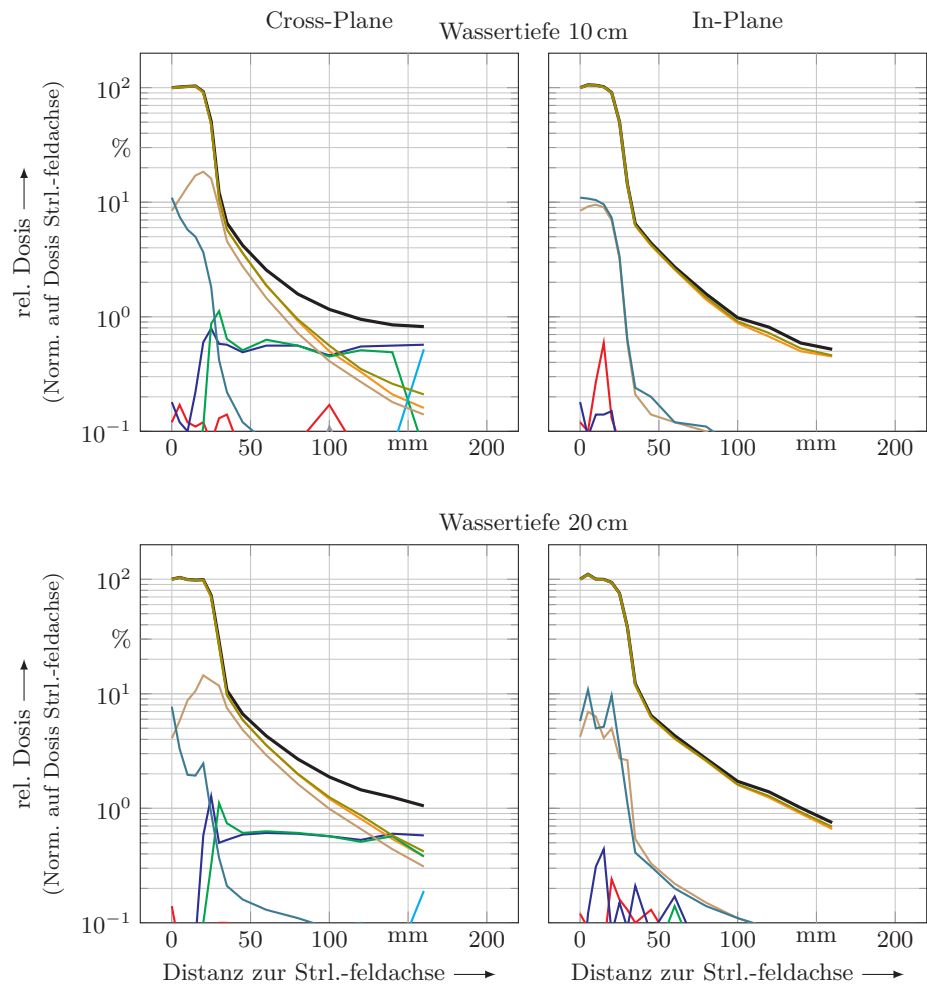
Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise mit Ausgleichsfilter	
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
— Zelle Nr. 610 (Eintrittsfläche -X Satz)	— Zelle Nr. 611 (Eintrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 613 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	— Zelle Nr. 615 (1. Austrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 616 (2. Austrittsfläche +X Satz)	— Zelle Nr. 617 (3. Austrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 618 (Austrittsfläche Strl.-Feld)	— Zelle Nr. 614 (Austrittsfläche -X Satz)
— Zelle Nr. 619 (wirksame Kante +X Satz)	— Zelle Nr. 620 (wirksame Kante -X Satz)

**Abbildung 5.31:** Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Lamellenblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



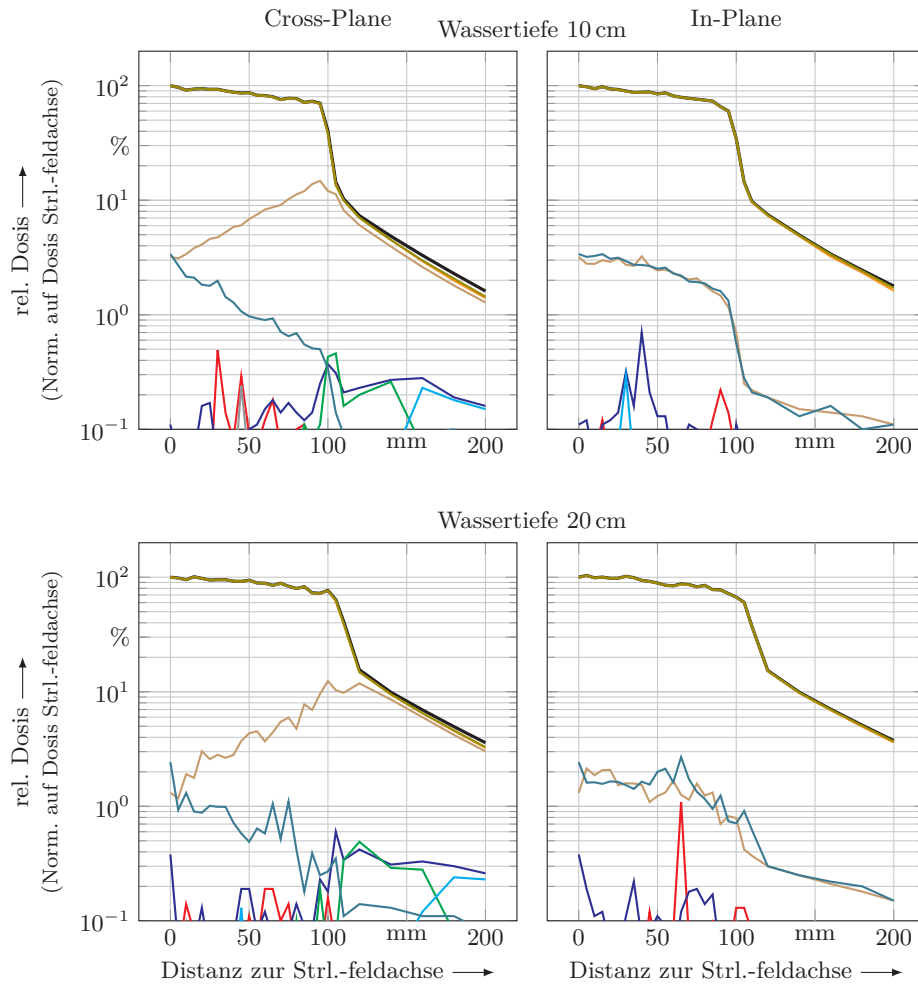
Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise mit Ausgleichsfilter	
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
— Zelle Nr. 610 (Eintrittsfläche -X Satz)	— Zelle Nr. 611 (Eintrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 613 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	— Zelle Nr. 615 (1. Austrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 616 (2. Austrittsfläche +X Satz)	— Zelle Nr. 617 (3. Austrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 618 (Austrittsfläche Strl.-Feld)	— Zelle Nr. 614 (Austrittsfläche -X Satz)
— Zelle Nr. 619 (wirksame Kante +X Satz)	— Zelle Nr. 620 (wirksame Kante -X Satz)

**Abbildung 5.32:** Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Lamellenblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



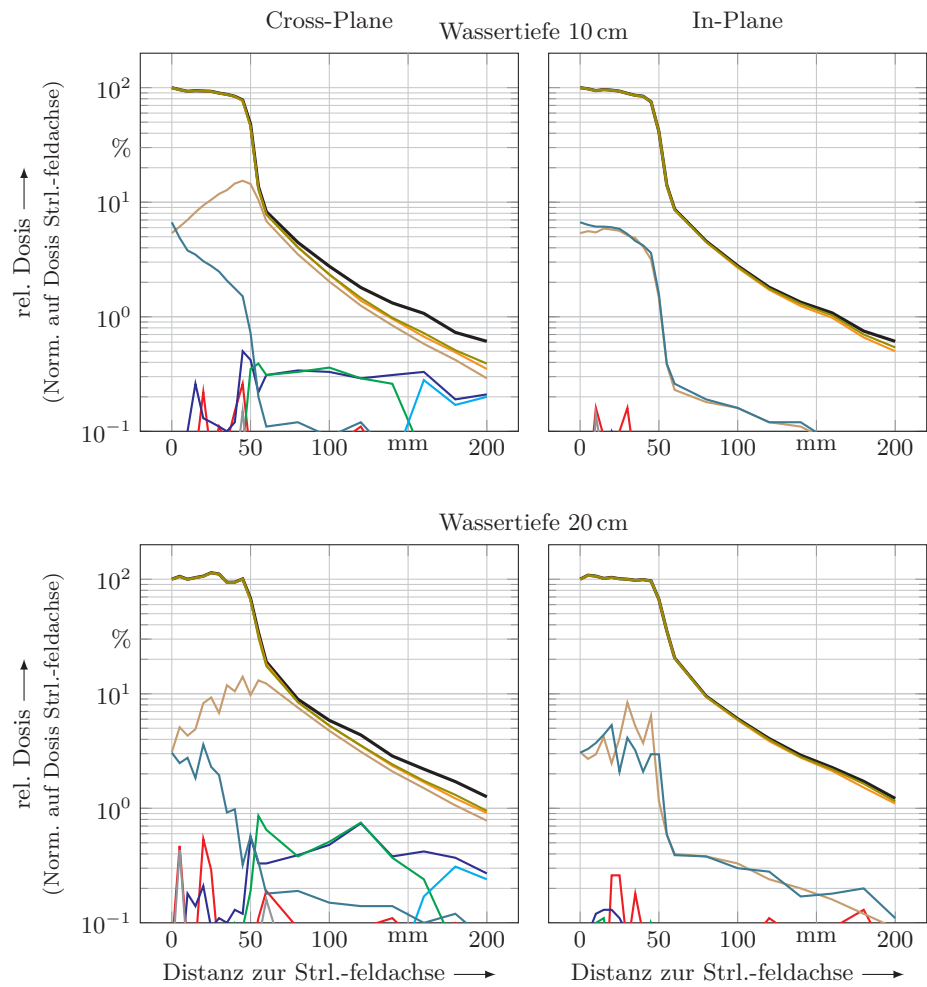
Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise mit Ausgleichsfilter	
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
— Zelle Nr. 610 (Eintrittsfläche -X Satz)	— Zelle Nr. 611 (Eintrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 613 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	— Zelle Nr. 615 (1. Austrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 616 (2. Austrittsfläche +X Satz)	— Zelle Nr. 617 (3. Austrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 618 (Austrittsfläche Strl.-Feld)	— Zelle Nr. 614 (Austrittsfläche -X Satz)
— Zelle Nr. 619 (wirksame Kante +X Satz)	— Zelle Nr. 620 (wirksame Kante -X Satz)

**Abbildung 5.33:** Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Lamellenblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



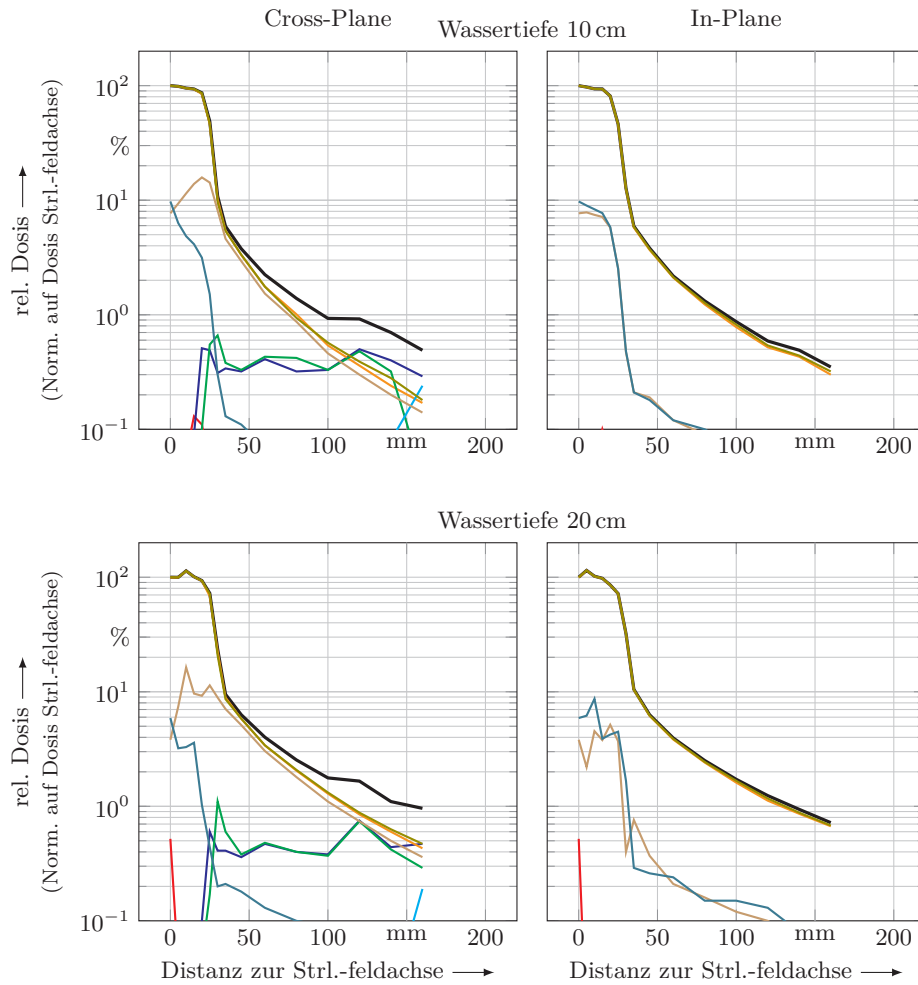
Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter	
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
— Zelle Nr. 610 (Eintrittsfläche -X Satz)	— Zelle Nr. 611 (Eintrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 613 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	— Zelle Nr. 615 (1. Austrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 616 (2. Austrittsfläche +X Satz)	— Zelle Nr. 617 (3. Austrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 618 (Austrittsfläche Strl.-Feld)	— Zelle Nr. 614 (Austrittsfläche -X Satz)
— Zelle Nr. 619 (wirksame Kante +X Satz)	— Zelle Nr. 620 (wirksame Kante -X Satz)

**Abbildung 5.34:** Dosishalbprofile in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von **20×20 cm<sup>2</sup>**. Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Lamellenblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



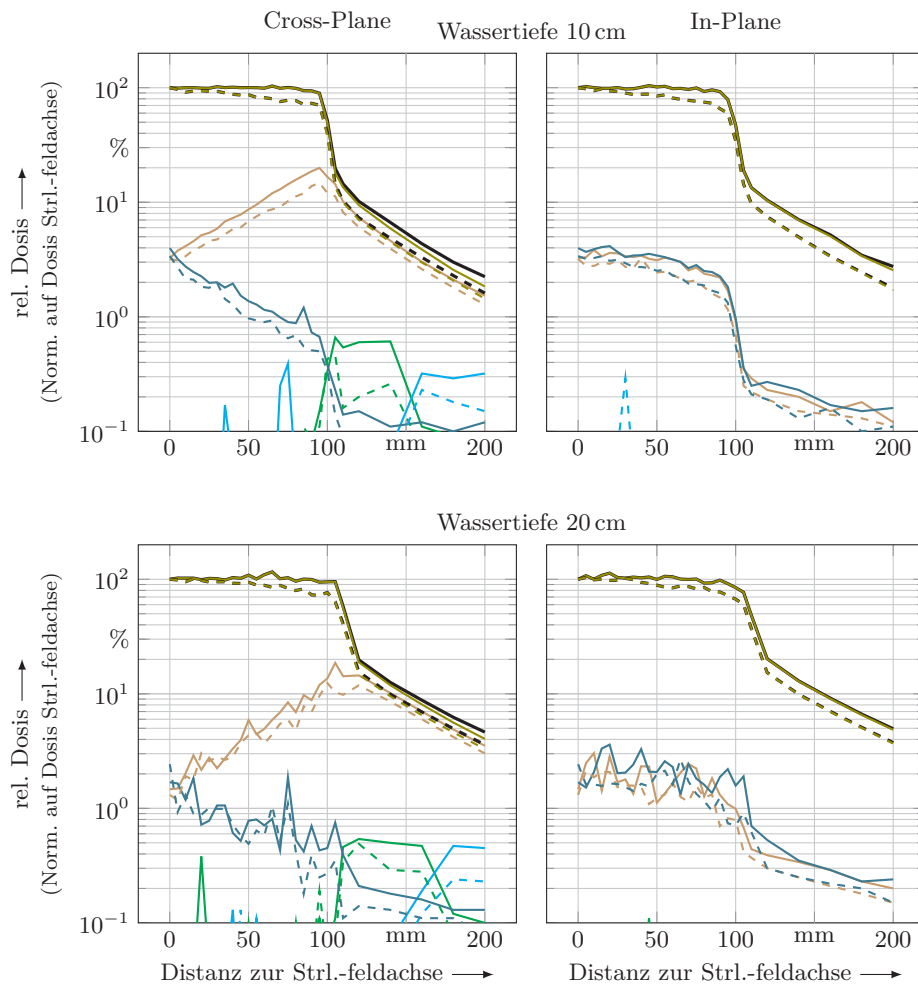
Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter	
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
— Zelle Nr. 610 (Eintrittsfläche -X Satz)	— Zelle Nr. 611 (Eintrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 613 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	— Zelle Nr. 615 (1. Austrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 616 (2. Austrittsfläche +X Satz)	— Zelle Nr. 617 (3. Austrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 618 (Austrittsfläche Strl.-Feld)	— Zelle Nr. 614 (Austrittsfläche -X Satz)
— Zelle Nr. 619 (wirksame Kante +X Satz)	— Zelle Nr. 620 (wirksame Kante -X Satz)

**Abbildung 5.35:** Dosishalbprofile in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Lamellenblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter	
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
— Zelle Nr. 610 (Eintrittsfläche -X Satz)	— Zelle Nr. 611 (Eintrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 613 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	— Zelle Nr. 615 (1. Austrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 616 (2. Austrittsfläche +X Satz)	— Zelle Nr. 617 (3. Austrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 618 (Austrittsfläche Strl.-Feld)	— Zelle Nr. 614 (Austrittsfläche -X Satz)
— Zelle Nr. 619 (wirksame Kante +X Satz)	— Zelle Nr. 620 (wirksame Kante -X Satz)

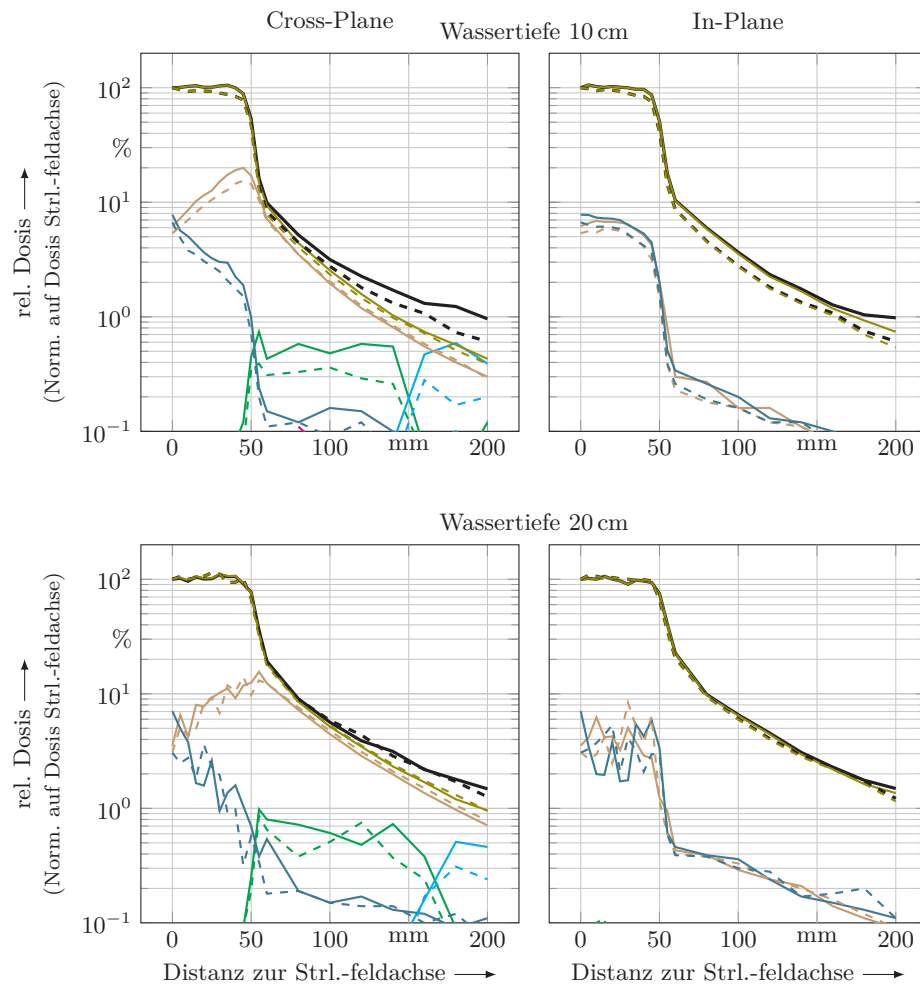
**Abbildung 5.36:** Dosishalbprofile in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Lamellenblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise mit Ausgleichsfilter	- - - Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten: (Linienstil Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter analog o. g.)	
— Zelle Nr. 615 (1. Austrittsfläche +X Satz)	— Zelle Nr. 616 (2. Austrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 617 (3. Austrittsfläche +X Satz)	— Zelle Nr. 618 (Austrittsfläche Strl.-Feld)
— Zelle Nr. 619 (wirksame Kante +X Satz)	— Zelle Nr. 620 (wirksame Kante -X Satz)

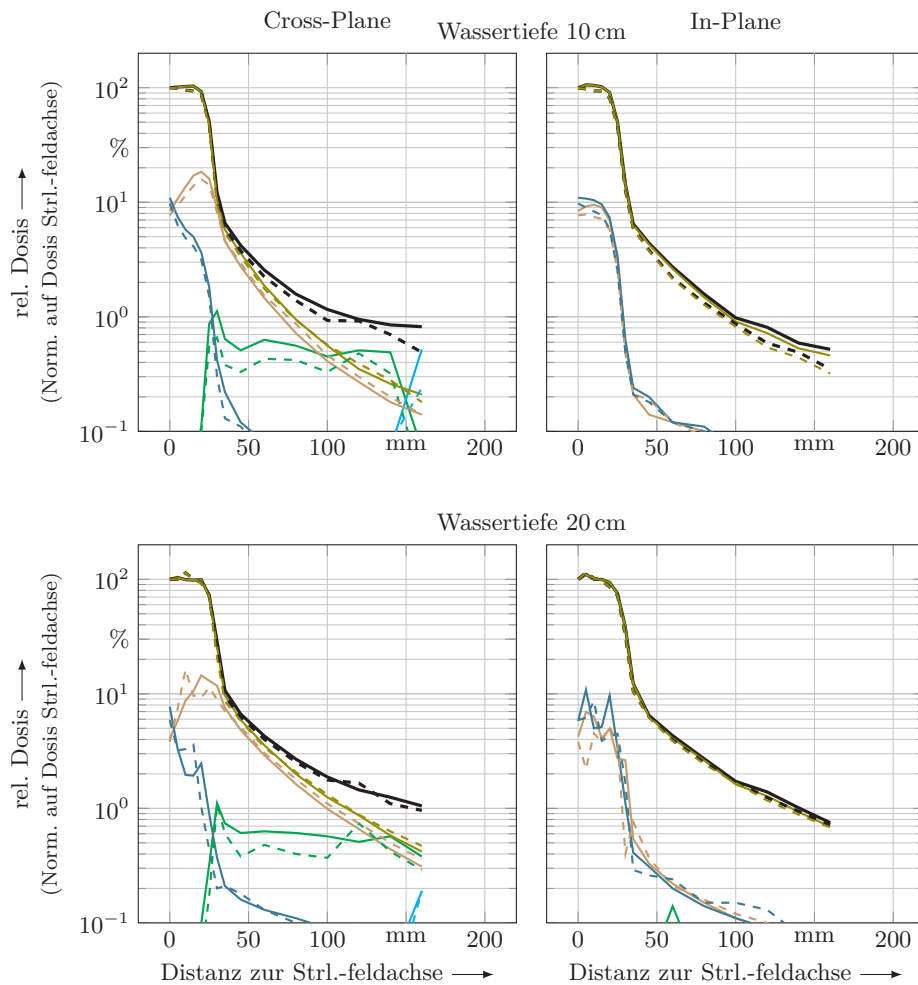
**Abbildung 5.37:** Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen ausgewählte Halbprofile von in der **Lamellenblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm





Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise mit Ausgleichsfilter	- - - Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten: (Linienstil Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter analog o. g.)	
— Zelle Nr. 615 (1. Austrittsfläche +X Satz)	— Zelle Nr. 616 (2. Austrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 617 (3. Austrittsfläche +X Satz)	— Zelle Nr. 618 (Austrittsfläche Strl.-Feld)
— Zelle Nr. 619 (wirksame Kante +X Satz)	— Zelle Nr. 620 (wirksame Kante -X Satz)

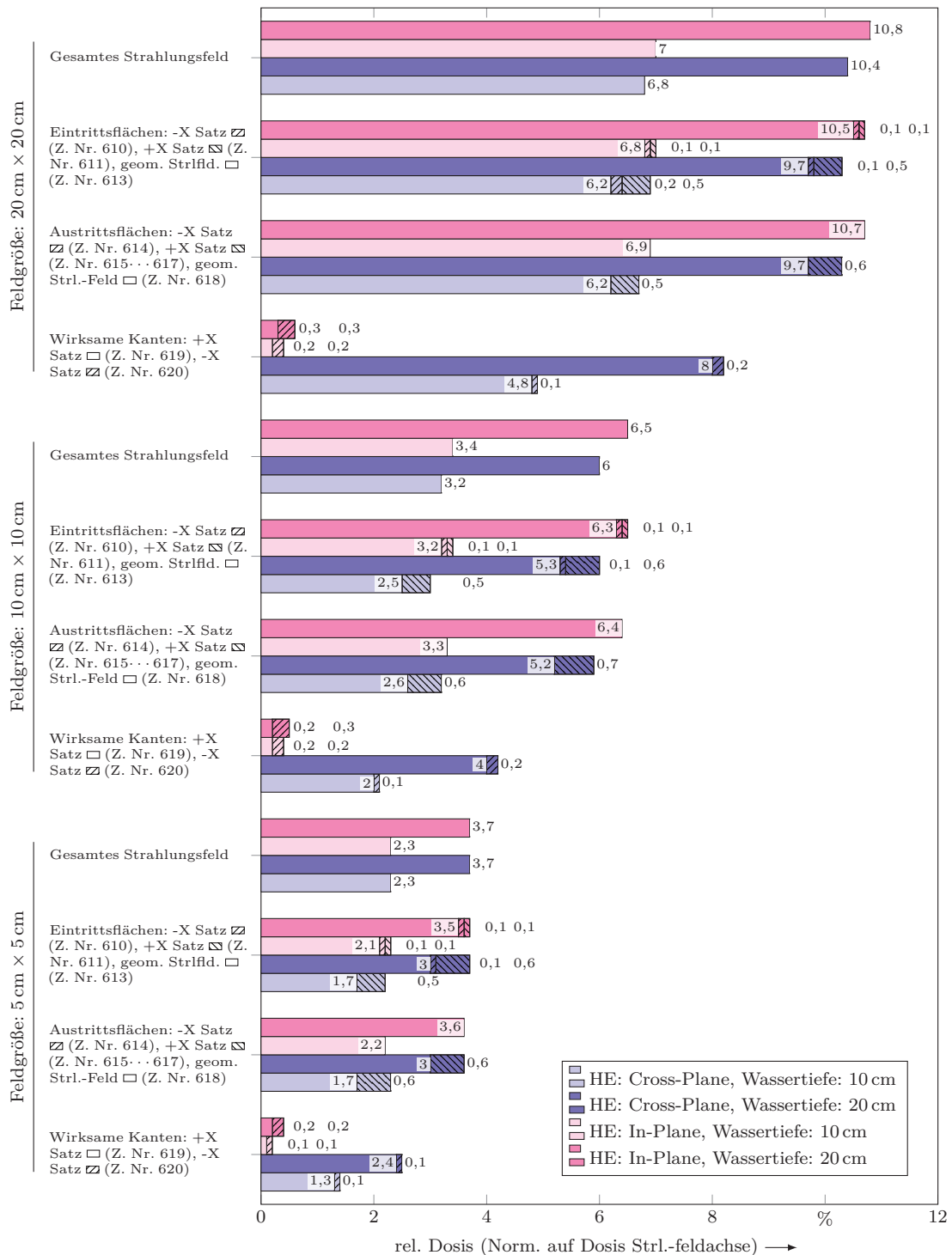
**Abbildung 5.38:** Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen ausgewählte Halbprofile von in der **Lamellenblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise mit Ausgleichsfilter	- - - Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten: (Linienstil Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter analog o. g.)	
— Zelle Nr. 615 (1. Austrittsfläche +X Satz)	— Zelle Nr. 616 (2. Austrittsfläche +X Satz)
— Zelle Nr. 617 (3. Austrittsfläche +X Satz)	— Zelle Nr. 618 (Austrittsfläche Strl.-Feld)
— Zelle Nr. 619 (wirksame Kante +X Satz)	— Zelle Nr. 620 (wirksame Kante -X Satz)

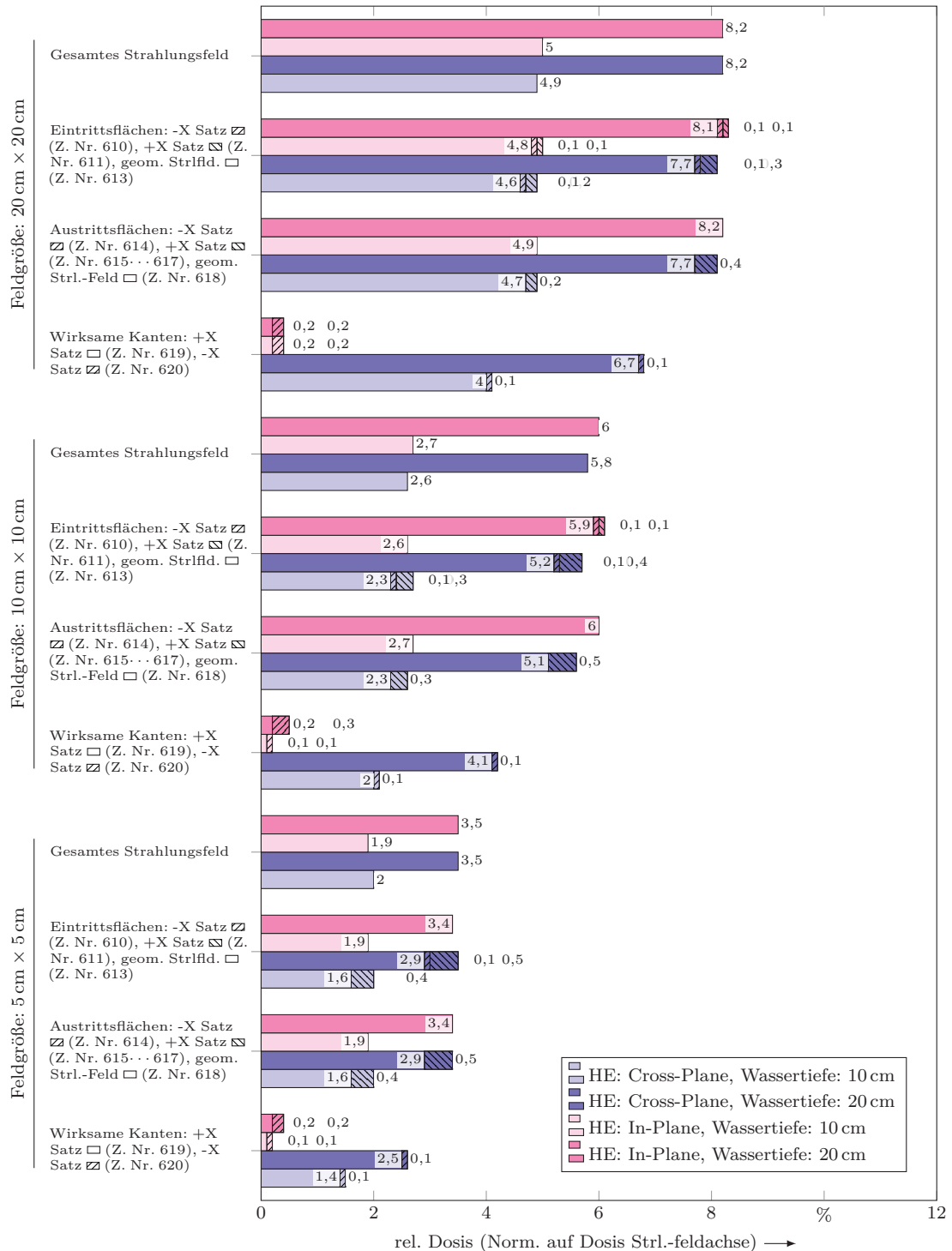
**Abbildung 5.39:** Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen ausgewählte Halbprofile von in der **Lamellenblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm





**Abbildung 5.40:** Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{OFD}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld sowie in der **Lamellenblende** generierte Strahlungsfeldkomponenten in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** für alle simulierten Feldkonstellationen.

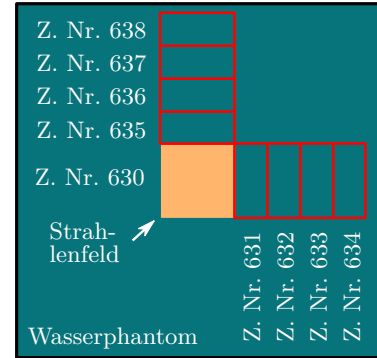
## 5.7 Strahlungsfeldkomponenten Lamellenblende



**Abbildung 5.41:** Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{OFD}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld sowie in der **Lamellenblende** generierte Strahlungsfeldkomponenten in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** für alle simulierten Feldkonstellationen.

## 5.8 Strahlungsfeldkomponenten Eintrittsfläche Wasserphantom

Unmittelbar vor Eintritt des Strahlungsfeldes in das Wasserphantom wurden die Photonen bei der Passage der in der folgenden Abbildung hervorgehobenen Zellen markiert, um deren Anteil an der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen zu erfassen.



**Abbildung 5.42:** Unmittelbar oberhalb des Wasserphantoms positionierte, photonenmarkierende Zellen an der Strahleneintrittsseite (X-Y Schnitt).

Die durch die Zelle Nr. 630 markierten Photonen erzeugen in beiden Hauptebenen eine Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen im Wasserphantom. Photonen, die die Zellen Nr. 631 bis Nr. 634 bzw. Nr. 635 bis Nr. 638 passiert haben, erzeugen ausschließlich in Cross-Plane respektive In-Plane eine Dosis außerhalb des geometrischen Feldes (Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.).

Es gilt für eine gegebene Feldgröße FG, die Hauptebene Cross-Plane CP, die Wassertiefe WT und die Betriebsweise BW hinsichtlich des Ausgleichsfilters (Abb. 5.53, 5.54 S. 118 f., Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{CP};\text{BW};\text{gesamt}} \approx \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{CP};\text{BW};\text{Z:630}} + \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{CP};\text{BW};\text{Z:631...634}} \quad (5.36)$$

mit

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{CP};\text{BW};\text{Z:631...634}} = \sum_{n=631}^{634} \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{CP};\text{BW};\text{Z:n}} \quad (5.37)$$

Für die Hauptebene In-Plane zeigt sich entsprechend:

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{IP};\text{BW};\text{gesamt}} \approx \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{IP};\text{BW};\text{Z:630}} + \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{IP};\text{BW};\text{Z:635...638}} \quad (5.38)$$

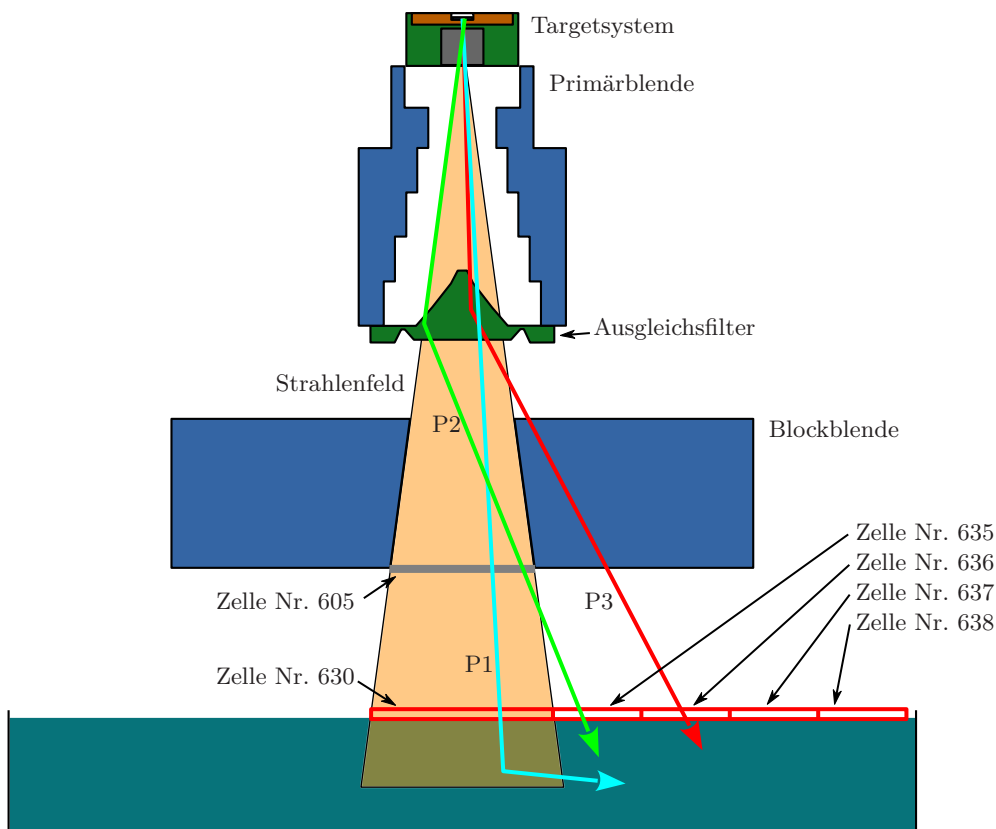
mit

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{IP};\text{BW};\text{Z:635...638}} = \sum_{n=635}^{638} \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{IP};\text{BW};\text{Z:n}} \quad (5.39)$$

Die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};\text{FG}}^{\text{HE};\text{BW};\text{gesamt}}$  ist dabei die durch das gesamte Strahlungsfeld erzeugte mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen ohne die Bildung von Strahlungsfeldkomponenten. Das gesamte, eine Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen erzeugende Strahlungsfeld wird demnach bei allen simulierten Feldkonstellationen durch die markierenden Zellen

oberhalb des Wasserphantoms erfasst.

In Abhängigkeit der konkreten Feldkonstellation nimmt die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:630}}$  (geometrisches Feld) in In-Plane Werte von 53 % bis 83 % und in Cross-Plane von 52 % bis 85 % der betreffenden  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}}$  an (Abb. 5.53, 5.54 S. 118 f., Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.). In Höhe der Block- bzw. Lamellenblende war der Anteil durch Photonen innerhalb der geometrischen Feldgrenzen mit 84 % bis 97 % bzw. 72 % bis 93 % der  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}}$  deutlich größer (Abb. 5.28, 5.29 S. 82 f., Abb. 5.40, 5.41 S. 98 f., Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.). Ein Teil der Photonen, die sich in Höhe der Block- bzw. Lamellenblende noch innerhalb der geometrischen Feldgrenzen befanden, verlassen diese demnach auf dem Weg zum Wasserphantom (beispielhaft für die Hauptebene In-Plane Photon P2 in Abb. 5.43, S. 101, Hauptebene Cross-Plane entsprechend).



**Abbildung 5.43:** Y-Z Schnitt ausgewählter Baugruppen des Beschleunigerkopfes und des Wasserphantoms auf der Strahlenfeldachse ( $X=0\text{ cm}$ ) zur Veranschaulichung der Markierung von Photonen durch unmittelbar oberhalb des **Wasserphantoms** positionierte Zellen (nicht maßstabsgerecht). Das Photon P2 (grüne Trajektorie) befindet sich in Höhe der Blockblende noch innerhalb der geometrischen Feldgrenzen und wird entsprechend durch die Zelle Nr. 605 markiert. Während der Passage verlässt es die Feldgrenzen, trifft schließlich außerhalb der selbigen auf das Wasserphantom und wird durch Zelle Nr. 635 markiert.

Die Dosisverteilungen der Strahlungsfeldkomponenten,  $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:630}}$  und  $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:630}}$ , sind für eine gegebene Feldkonstellation rein visuell betrachtet nahezu identisch (Abb. 5.44

bis 5.49 S. 108 ff. (Linie  $\text{---}$ )). Bei allen betrachteten Feldkonstellationen unterscheiden sich die Werte von  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:630}}$  und  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:630}}$  gering (Abb. 5.53, 5.54 S. 118 f., Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.). In allen Feldkonstellationen fällt die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:630}}$  mit steigender Distanz zur Strahlenfeldachse schneller ab als die durch das gesamte Strahlungsfeld verursachte Dosis  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}}$  (Abb. 5.44 bis 5.49 S. 108 ff. (Linien  $\text{=}$ )).

Das außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes die Eintrittsfläche des Wasserphantoms passierende Strahlungsfeld setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Dies ist einerseits der aus dem geometrischen Strahlenfeld stammende, herausgestreute Strahlungsfeldanteil und andererseits die Durchlassstrahlung der Block- bzw. der Lamellenblende ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:604}}$  und  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:615...617}}$ , Abschnitt 5.7). So ergibt sich für die Hauptebene Cross-Plane:

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:631...634}} \approx \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:630}^*} + \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:615...617}} \quad (5.40)$$

mit

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:615...617}} = \sum_{n=615}^{617} \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:n}} \quad (5.41)$$

sowie für die Hauptebene In-Plane:

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:635...638}} \approx \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:630}^*} + \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:604}} \quad (5.42)$$

Die Terme  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:630}^*}$  und  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:630}^*}$  berücksichtigen jeweils die Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen, deren Ursprung Photonen sind, die den Strahlerkopf innerhalb der geometrischen Feldgrenzen verlassen haben und außerhalb der Feldgrenzen auf das Wasserphantom treffen (beispielhaft für die Hauptebene In-Plane Photon P2 in Abb. 5.43, S. 101, Hauptebene Cross-Plane entsprechend). In Abhängigkeit der konkreten Feldkonstellation nehmen die Terme Werte von etwa 10 % bis 24 % und 13 % bis 34 % der betreffenden  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;gesamt}}$  an (Abb. 5.55, 5.56 S. 120 f. in Verbindung mit Abb. 5.53, 5.54 S. 118 f.). Grund für das Auftreten dieser Dosis sind Streuprozesse im Targetsystem, an der Primärblende, an den wirksamen Kanten der Block- und Lamellenblende sowie ggf. im Ausgleichsfilter. Eine genauere Differenzierung ist nicht möglich, da die Funktion zur Markierung von Photonen keine logische UND-Verknüpfung ermöglicht. Ansonsten wäre beispielsweise die Konstruktion eines Tallies möglich gewesen, das die Dosis von Photonen ausgibt, die beispielsweise an der wirksamen Kante der Blockblende, Fläche Nr. 253, gestreut wurden und zusätzlich die Zelle Nr. 635 (strahlenfeldnächste Eintrittszelle an der Wasseroberfläche) passiert haben.

Für alle simulierten Feldkonstellationen zeigt sich jeweils, dass der aus dem geometrischen Feld herausgestreute Anteil eine größere mittlere Dosis in In-Plane als in Cross-Plane zur Folge hat (Abb. 5.55, 5.56 S. 120 f.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:630}^*} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:630}^*} \quad (5.43)$$

Die Blendenblöcke befinden sich im Vergleich zu den Lamellensätzen näher am Target





bzw. in einem größeren Abstand zur Eintrittsfläche des Wasserphantoms. Photonen des geometrischen Feldes haben daher nach Streuprozessen am Targetsystem, der Primärblende oder am Ausgleichsfilter aus geometrischen Gründen eine höhere Wahrscheinlichkeit, aus dem geometrischen Strahlenfeld herausgestreut zu werden.




Die Zellen außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes – Zellen Nr. 631 bis Nr. 638 – ermöglichen die Bestimmung der Eintrittsorte von Photonen in das Wasserphantom, die eine Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen zur Folge haben. Die Dosis der durch die Zellen generierten Strahlungsfeldkomponenten ist umso kleiner, je größer die Distanz der markierenden Zelle zur Strahlenfeldachse ist (Abb. 5.53, 5.54 S. 118 f., Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:631}} > \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:632}} > \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:633}} > \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:634}} \quad (5.44)$$


$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:635}} > \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:636}} > \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:637}} > \overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:638}} \quad (5.45)$$

Die Werte der  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:634}}$  und  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:638}}$  sind dabei in allen betrachteten Feldkonstellationen verschwindend klein (Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.) und deshalb in den Abbildungen 5.53, 5.54 S. 118 f. und 5.44 bis 5.49 S. 108 ff. nicht ersichtlich.

Die Dosisverteilungen  $\text{OfDD}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:631}}$  und  $\text{OfDD}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:635}}$  zeigen in allen betrachteten Feldkonstellationen eine deutliche Abnahme der Dosis mit wachsender Distanz zur Strahlenfeldachse (Abb. 5.44 bis 5.49 S. 108 ff. (Linien )), die bei den  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:632}}$ ,  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:633}}$  respektive  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:636}}$ ,  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:637}}$ , wesentlich kleiner ausfällt, bzw. bei kleinster simulierter Feldgröße gar nicht mehr sichtbar ist (Abb. 5.44 bis 5.49 S. 108 ff. (Linien )).

Zur Verdeutlichung des Einflusses der Streustrahlung ( $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:630*}}$ ) auf die Dosisverteilungen wurden in den Abbildungen 5.44 bis 5.49 S. 108 ff. zusätzlich die durch die Durchlassstrahlung der Block- bzw. Lamellenblende verursachten Dosisverteilungen ( $\text{OfDD}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:604}}$  und  $\text{OfDD}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:615...617}}$ ) aufgenommen (Linie ). Für eine gegebene Strahlungsfeldkomponente, beispielsweise  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;20x20cm}^2}^{\text{CP;BW;Z:631}}$ , und Distanz zur Strahlenfeldachse ergibt sich die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;20x20cm}^2}^{\text{CP;BW;Z:630*}}$  als vertikale Distanz zwischen den Linien  und  innerhalb der dicken, vertikalen grauen Linien, die die Grenzen der Zelle Nr. 631 in betreffender Wassertiefe kennzeichnen (Abb. 5.44, S. 108).

Die die  $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:630*}}$  verursachende Streustrahlung trifft somit in allen betrachteten Feldkonstellationen hauptsächlich in der Nähe (Zellen Nr. 631 und Nr. 635) zum geometrischen Feld auf das Wasserphantom und erzeugt in diesem Bereich eine Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen. Die  $\text{OfD}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:630*}}$  nimmt mit wachsender Distanz zur Strahlenfeldachse ab (Abb. 5.44 bis 5.49 S. 108 ff.).

Bei den durch die Durchlassstrahlung bedingten  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:604}}$  und  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:615...617}}$  ist dies anders. Die dosisverursachenden Strahlungsfelder treffen offensichtlich gleichmäßig über die Zellen verteilt auf das Wasserphantom und erzeugen eine vergleichsweise konstante Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen (Abb. 5.44 bis 5.49 S. 108 ff. (Linie )).

Das außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes die Eintrittsfläche des Wasserphantoms passierende Strahlungsfeld wird somit in der Nähe zum geometrischen Feld von der Streu-

strahlung und in größerer Distanz von der Durchlassstrahlung dominiert. Letzt genannter Punkt wird insbesondere bei der kleinsten simulierten Feldgröße deutlich (Abb. 5.46 S. 110, Abb. 5.49 S. 113).

Das lokal begrenzte, direkt an der geometrischen Feldgrenze befindliche Dosismaximum – jeweils sichtbar in den Abb. 5.44 bis 5.49 S. 108 ff. – ist Teil des Halbschattens, da die Zellen Nr. 631 und Nr. 635 unmittelbar an das geometrische Feld grenzen.

### 5.8.1 Einfluss der Feldgröße

In Bezug auf die drei simulierten Feldgrößen steigt die mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen, verursacht durch die Strahlungsfeldkomponente der Zelle Nr. 630, mit wachsender Feldgröße deutlich an (Abb. 5.53, 5.54 S. 118 f., Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};5 \times 5 \text{ cm}^2}^{\text{HE;BW;Z:630}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};10 \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{HE;BW;Z:630}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};20 \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{HE;BW;Z:630}} \quad (5.46)$$

Analog zeigt sich für die außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes auftreffenden Strahlungsfeldkomponenten in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter (Abb. 5.53, 5.54 S. 118 f., Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};5 \times 5 \text{ cm}^2}^{\text{CP;FF;Z:631...634}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};10 \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{CP;FF;Z:631...634}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};20 \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{CP;FF;Z:631...634}} \quad (5.47)$$

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};5 \times 5 \text{ cm}^2}^{\text{IP;FF;Z:635...638}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};10 \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{IP;FF;Z:635...638}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};20 \times 20 \text{ cm}^2}^{\text{IP;FF;Z:635...638}} \quad (5.48)$$

Für die Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter ist die Zunahme der Dosis mit wachsender Feldgröße generell nicht so ausgeprägt und in einigen Fällen gar nicht vorhanden (Konstellationen: mittlere FG, FFF, kleine WT, Cross-Plane; große FG, FFF, große WT, Cross- und In-Plane). Den Abbildungen 5.55, 5.56 S. 120 f. kann entnommen werden, dass der Anstieg mit wachsender Feldgröße größtenteils auf die Streustrahlung aus dem geometrischen Strahlenfeld ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:630*}}$ ) zurückzuführen ist. Bei dem Betrieb ohne Ausgleichsfilter ist der Anteil der Streustrahlung und somit auch die Auswirkung bzgl. der Änderung der Feldgröße deutlich kleiner. Bei einem größeren geometrischen Strahlenfeld haben insbesondere am Ausgleichsfilter gestreute Photonen eine höhere Wahrscheinlichkeit, außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes auf das Wasserphantom zu treffen. Der Ausgleichsfilter spielt diesbezüglich eine große Rolle.

### 5.8.2 Einfluss der Wassertiefe

Mit Blick auf die simulierten Feldkonstellationen zeigt sich ein Anstieg der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen, verursacht durch die Strahlungsfeldkomponente der Zelle Nr. 630 (geom. Strahlenfeld), mit der Erhöhung der Wassertiefe von 10 cm auf 20 cm Wassertiefe (Abb. 5.53, 5.54 S. 118 f., Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.):

$$\overline{\text{OfD}}_{10 \text{ cm;FG}}^{\text{HE;BW;Z:630}} < \overline{\text{OfD}}_{20 \text{ cm;FG}}^{\text{HE;BW;Z:630}} \quad (5.49)$$

Im Vergleich zur  $\overline{\text{OfD}}_{10 \text{ cm;FG}}^{\text{HE;BW;Z:630}}$  ist die  $\overline{\text{OfD}}_{20 \text{ cm;FG}}^{\text{IP;BW;Z:630}}$  in allen simulierten Feldkonstellationen über die gesamte untersuchte Distanz erhöht (Abb. 5.44 bis 5.49 S. 108 ff. (Linie —)).

Innerhalb der geometrischen Feldgrenzen auf das Wasserphantom auftreffende Photonen haben demnach in 20 cm Wassertiefe eine höhere Dosis außerhalb der Feldgrenzen zur Folge als in 10 cm Wassertiefe. Durch inelastische Streuprozesse, die Compton-Streuung, verlieren die Photonen Energie bei der Passage durch das Wasser und werden deshalb mit zunehmender Wassertiefe vermehrt seitlich zur ursprünglichen Ausbreitungsrichtung gestreut (zur Winkelverteilung gestreuter Comptonphotonen beispielsweise [Kri09, S. 173]).

Außerhalb der geometrischen Feldgrenzen (Passage durch die Zellen Nr. 631 bis 638) auf das Wasserphantom auftreffende Photonen haben in 20 cm Wassertiefe eine, bis auf eine Ausnahme (Konstellation: FF, Cross-Plane, große FG), gering erhöhte Dosis im Vergleich zu 10 cm Wassertiefe für die betrachteten Feldkonstellationen zur Folge (Abb. 5.53, 5.54 S. 118 f., Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.):

$$\overline{\text{OfD}}_{10\text{ cm};\text{FG}}^{\text{CP;BW;Z:631...634}} < \overline{\text{OfD}}_{20\text{ cm};\text{FG}}^{\text{CP;BW;Z:631...634}} \quad (5.50)$$

$$\overline{\text{OfD}}_{10\text{ cm};\text{FG}}^{\text{IP;BW;Z:635...638}} < \overline{\text{OfD}}_{20\text{ cm};\text{FG}}^{\text{IP;BW;Z:635...638}} \quad (5.51)$$

Maßgeblich für die Erhöhung sind jeweils die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:631}}$  und  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:635}}$  (Abb. 5.53, 5.54 S. 118 f., Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.). Analog zum geometrischen Strahlenfeld ergibt sich die Begründung aus der mit der Wassertiefe zunehmenden seitlichen Streuung der Compton-Photonen. In den Abbildungen Abb. 5.44 bis 5.49 S. 108 ff. wurden zu den Dosisverteilungen in 20 cm Wassertiefe ( $\text{OfDD}_{20\text{ cm};\text{FG}}^{\text{CP;BW;Z:631}}$  — und  $\text{OfDD}_{20\text{ cm};\text{FG}}^{\text{IP;BW;Z:635}}$  —) zusätzlich die Verteilungen aus 10 cm Wassertiefe ( $\text{OfDD}_{10\text{ cm};\text{FG}}^{\text{CP;BW;Z:631}}$  ..... und  $\text{OfDD}_{10\text{ cm};\text{FG}}^{\text{IP;BW;Z:635}}$  ..... ) eingefügt. Unter Berücksichtigung der horizontalen Verschiebung der Kurven zeigt der Vergleich einen sehr ähnlichen Kurvenverlauf innerhalb der betreffenden Zellgrenzen (Zelle Nr. 631 und Nr. 635). Eine Ausnahme bildet der Bereich an der äußeren Zellgrenzen und größere Distanzen zur Strahlenfeldachse. Hier ist die Dosis in 20 cm Wassertiefe größer als in 10 cm Wassertiefe, was für die zunehmende seitliche Streuung durch Compton-Photonen spricht.

### 5.8.3 Einfluss des Ausgleichsfilters

Im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter erhöht die Präsenz des Ausgleichsfilters die mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen, verursacht durch die Strahlungsfeldkomponente der Zelle Nr. 630, bei größter simulierter Feldgröße (Abb. 5.53, 5.54 S. 118 f., Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};20 \times 20\text{ cm}^2}^{\text{HE;FFF;Z:630}} < \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};20 \times 20\text{ cm}^2}^{\text{HE;FF;Z:630}} \quad (5.52)$$

Für eine ausgewählte Feldkonstellation ist die  $\text{OfD}_{\text{WT};20 \times 20\text{ cm}^2}^{\text{HE;FF;Z:630}}$  bei jeder Distanz zur Strahlenfeldachse größer als die  $\text{OfD}_{\text{WT};20 \times 20\text{ cm}^2}^{\text{HE;FFF;Z:630}}$  (Abb. 5.50 S. 114 (Linien ---)).

Bei mittelgroßer und kleinster simulierter Feldgröße reduziert die Präsenz des Ausgleichsfilters die mittlere Dosis bzw. lässt diese in einer Feldkonstellation (mittlere FG, kleine

WT, In-Plane) unverändert (Abb. 5.53, 5.54 S. 118 f., Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff.):

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};10 \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FFF;Z:630}} \geq \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};10 \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FF;Z:630}} \quad (5.53)$$

$$\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};5 \times 5 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FFF;Z:630}} > \overline{\text{OfD}}_{\text{WT};5 \times 5 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FF;Z:630}} \quad (5.54)$$

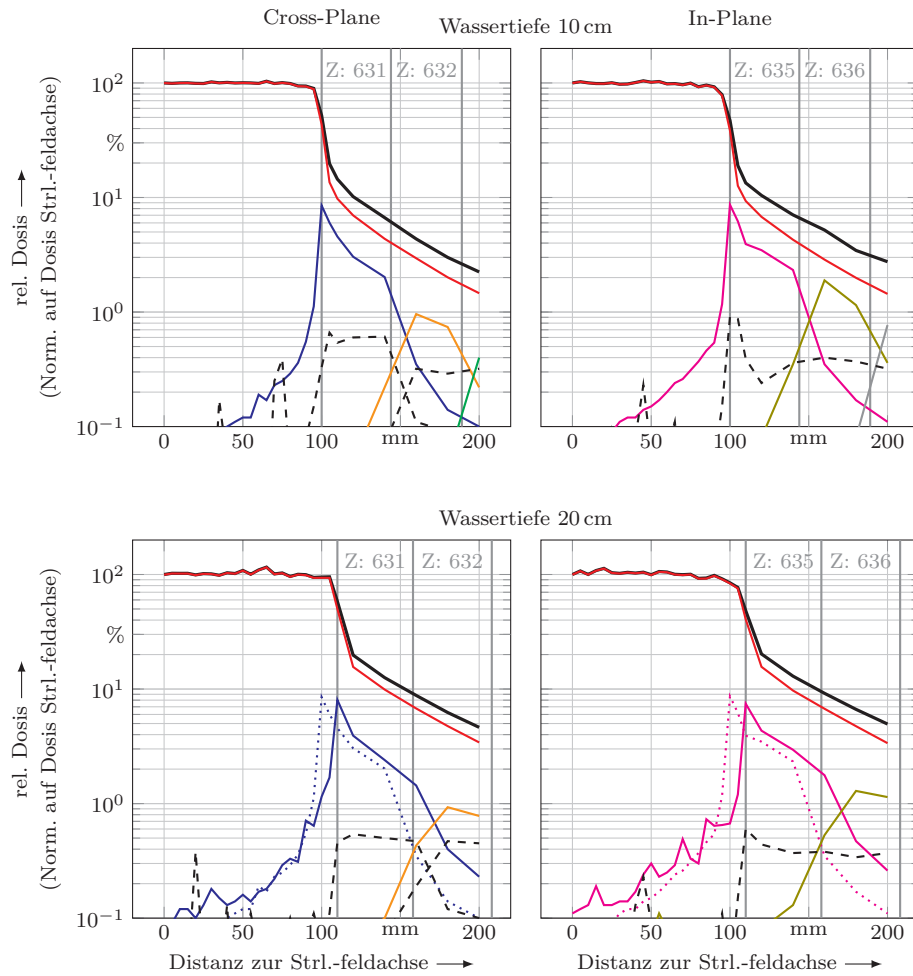
Die Dosisverteilungen zeigen für eine ausgewählte Feldkonstellation, dass die  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};10 \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FFF;Z:630}}$  bzw.  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};5 \times 5 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FFF;Z:630}}$  bei jeder Distanz zur Strahlenfeldachse größer bzw. mindestens gleich groß im Vergleich zur  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};10 \times 10 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FF;Z:630}}$  bzw.  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT};5 \times 5 \text{ cm}^2}^{\text{HE;FF;Z:630}}$  ist (Abb. 5.51, 5.52 S. 115 f. (Linien ---)). Die Begründung zur Änderung der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen durch die Präsenz des Ausgleichsfilters in Bezug auf die Strahlungsfeldkomponente der Zelle Nr. 630 ergibt sich aus den Erläuterungen zu Abschnitt 5.5.3 S. 61.

In Bezug auf die Strahlungsfeldkomponenten der Zellen Nr. 631 bis Nr. 633 und Nr. 635 bis Nr. 637 erhöht der Ausgleichsfilter die betreffenden  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;FFF;Z:631...633}}$  bzw.  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;FFF;Z:635...637}}$  in allen betrachteten Feldkonstellationen. Die Erhöhung fällt mit wachsender Feldgröße umso deutlicher aus und ist insbesondere durch die Streustrahlung ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:630*}}$ ) bedingt (Abb. 5.53, 5.54 S. 118 f., Tab. C.1 bis C.6 S. 186 ff. und zusätzlich Abb. 5.55, 5.56 S. 120 f.). Der Anstieg der Dosis zeigt sich deutlich in den Dosisverteilungen über die gesamte untersuchte Distanz zur Strahlenfeldachse (Abb. 5.50 bis 5.52 S. 114 ff. (Linien ---, ---, ---, ---, ---, ---)).

#### 5.8.4 Zwischenzusammenfassung

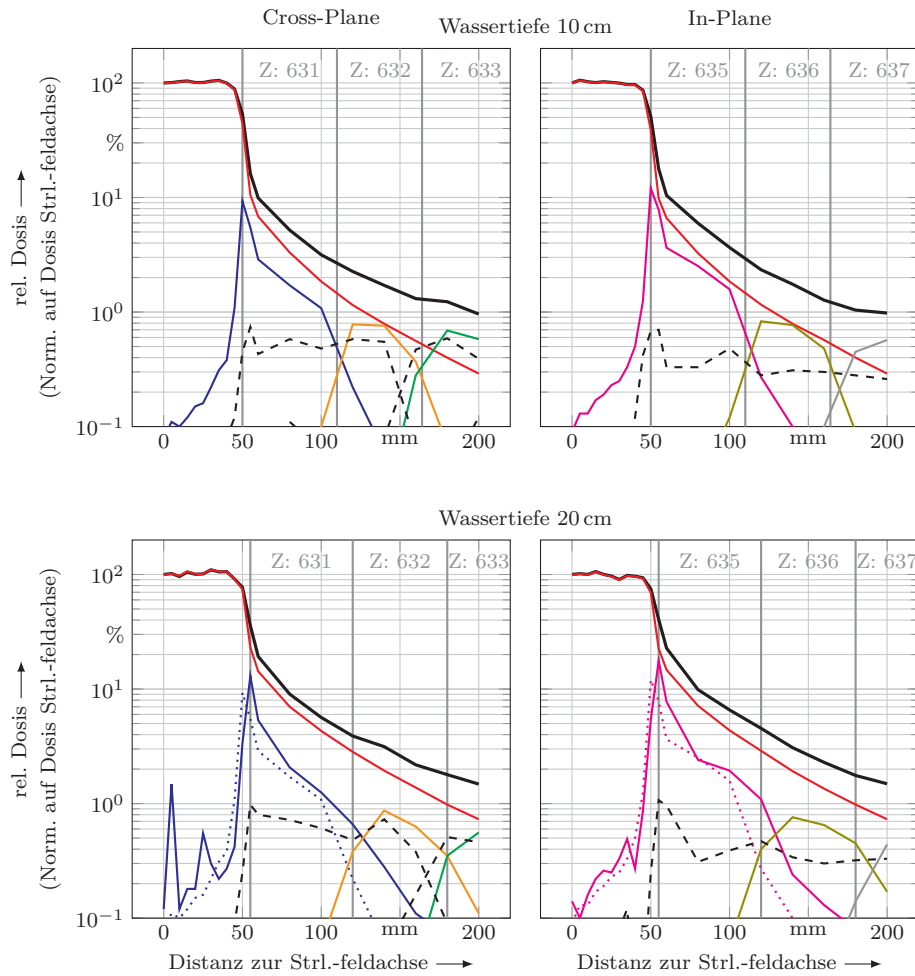
- Zur Dosis außerhalb der Feldgrenzen, die durch Photonen erzeugt wird, die innerhalb der geometrischen Feldgrenzen in das Wasserphantom eintreten ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:630}}$ ):
  - In Abhängigkeit der Feldkonstellation werden in In-Plane 53 % bis 83 % und in Cross-Plane 52 % bis 85 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen durch Photonen erzeugt, die innerhalb der geometrischen Feldgrenzen auf das Wasserphantom getroffen sind ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:630}}$ ).
  - Die mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen, die durch Photonen verursacht wurde, die innerhalb der geometrischen Feldgrenzen auf das Wasserphantom getroffen sind ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:630}}$ )
    - \* steigt mit der Feldgröße an,
    - \* steigt mit der Wassertiefe an,
    - \* steigt bei größter simulierter Feldgröße in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter an und
    - \* schrumpft bei mittelgroßer und kleinster simulierter Feldgröße in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter.
- Zur Dosis außerhalb der Feldgrenzen, die durch Photonen erzeugt wird, die außerhalb der geometrischen Feldgrenzen auf das Wasserphantom getroffen sind ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:635}}$  bis  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:638}}$  und  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:631}}$  bis  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:634}}$ ):

- In Abhängigkeit der Feldkonstellation werden in In-Plane 16 % bis 47 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$ ) und in Cross-Plane 15 % bis 48 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;gesamt}}$ ) durch Photonen erzeugt, die außerhalb der geometrischen Feldgrenzen auf das Wasserphantom getroffen sind.
- Die dosiserzeugenden Photonen entstammen einerseits dem geometrischen Strahlenfeld. Die Photonen befanden sich in Höhe der Block- bzw. Lamellenblende innerhalb der geometrischen Feldgrenzen, trafen jedoch außerhalb dieser auf das Wasserphantom (an Elementen des Beschleunigerkopfes gestreute Strahlung) ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:630*}}$ ). Andererseits handelt es sich um Durchlassstrahlung der Block- bzw. Lamellenblende ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:604}}$ ,  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:615...617}}$ ).
  - \* In Abhängigkeit der konkreten Feldkonstellation werden durch den Streuannteil ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:630*}}$ ) in In-Plane 13 % bis 34 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$ ) und in Cross-Plane 10 % bis 24 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;gesamt}}$ ) erzeugt.
  - \* Die durch die Streustrahlung außerhalb der geometrischen Feldgrenzen erzeugte mittlere Dosis ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:630*}}$ ) ist bei ansonsten gleicher Feldkonstellation in der Hauptebene In-Plane größer als in Cross-Plane.
  - \* Die Streustrahlung ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{HE;BW;Z:630*}}$ ) trifft in allen betrachteten Feldkonstellationen hauptsächlich in der Nähe zum geometrischen Strahlenfeld auf das Phantom und erzeugt in diesem Bereich eine Dosis.
  - \* In Abhängigkeit der Feldkonstellation werden durch die Durchlassstrahlung in In-Plane ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:604}}$ ) zwischen 2 % bis 14 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;gesamt}}$ ) erzeugt. In Bezug auf den Abstand zur Strahlenfeldachse ist die Dosis relativ konstant.
  - \* In Abhängigkeit der Feldkonstellation werden durch die Durchlassstrahlung in Cross-Plane ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:615...617}}$ ) zwischen 5 % bis 24 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;gesamt}}$ ) erzeugt. In Bezug auf den Abstand zur Strahlenfeldachse ist die Dosis relativ konstant.
- Die mittlere Dosis der Photonen, die außerhalb der geometrischen Feldgrenzen auf das Wasserphantom trafen, ist umso kleiner, je größer die Distanz des Eintrittsortes der Photonen zur Strahlenfeldachse ist.
- Die mittlere Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen, die durch Photonen verursacht wird, die außerhalb der geometrischen Feldgrenzen auf das Wasserphantom trafen ( $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{CP;BW;Z:631...634}}$ ,  $\overline{\text{OfD}}_{\text{WT;FG}}^{\text{IP;BW;Z:635...638}}$ )
  - \* steigt mit der Feldgröße an (Ausnahmen: mittlere FG, FFF, kleine WT, Cross-Plane; große FG, FFF, große WT, Cross- und In-Plane),
  - \* steigt mit der Wassertiefe an (Ausnahme: FF, Cross-Plane, große FG) und
  - \* steigt in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter im Vergleich zur Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter an.



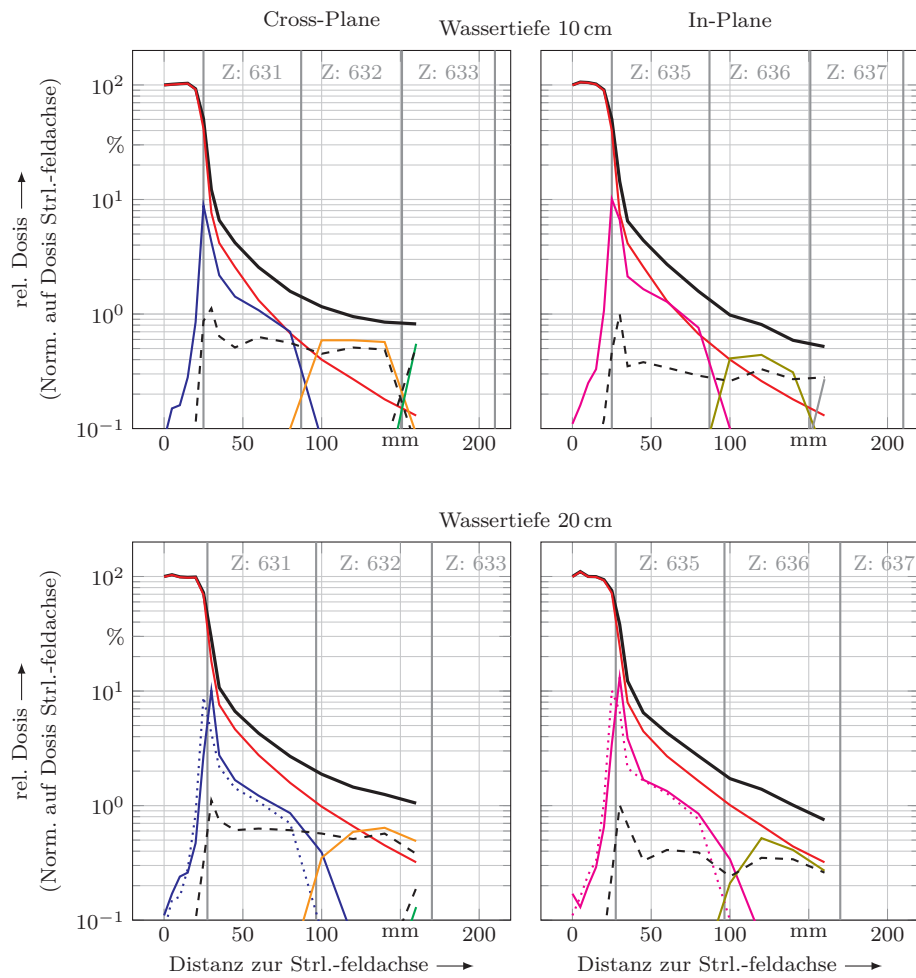
Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld: —	
Dosisverteilungen erzeugt durch Durchlassstrahlung der Block- / Lamellenblende: - - -	
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
— Zelle 630 (Strahlenfeld)	— Zelle 631 (Cross-Plane, Strl.-Feld-nächste)
— Zelle 632 (Cross-Plane)	— Zelle 633 (Cross-Plane, Strl.-Feld-fernste)
— Zelle 635 (In-Plane, Strl.-Feld-nächste)	— Zelle 636 (In-Plane)
— Zelle 637 (In-Plane, Strl.-Feld-fernste)	

**Abbildung 5.44:** Dosishalbprofile in der Betriebsweise mit Ausgleichsfilter bei einer Feldgröße von  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Durchgehende schwarze Linien zeigen Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes, die an der Eintrittsfläche des Wasserphantoms generiert wurden. Punktlinien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes in 10 cm Wassertiefe, sofern diese im Diagramm für 20 cm Wassertiefe eingetragen sind. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld: —	
Dosisverteilungen erzeugt durch Durchlassstrahlung der Block- / Lamellenblende: - - -	
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
— Zelle 630 (Strahlenfeld)	— Zelle 631 (Cross-Plane, Strl.-Feld-nächste)
— Zelle 632 (Cross-Plane)	— Zelle 633 (Cross-Plane, Strl.-Feld-fernste)
— Zelle 635 (In-Plane, Strl.-Feld-nächste)	— Zelle 636 (In-Plane)
— Zelle 637 (In-Plane, Strl.-Feld-fernste)	

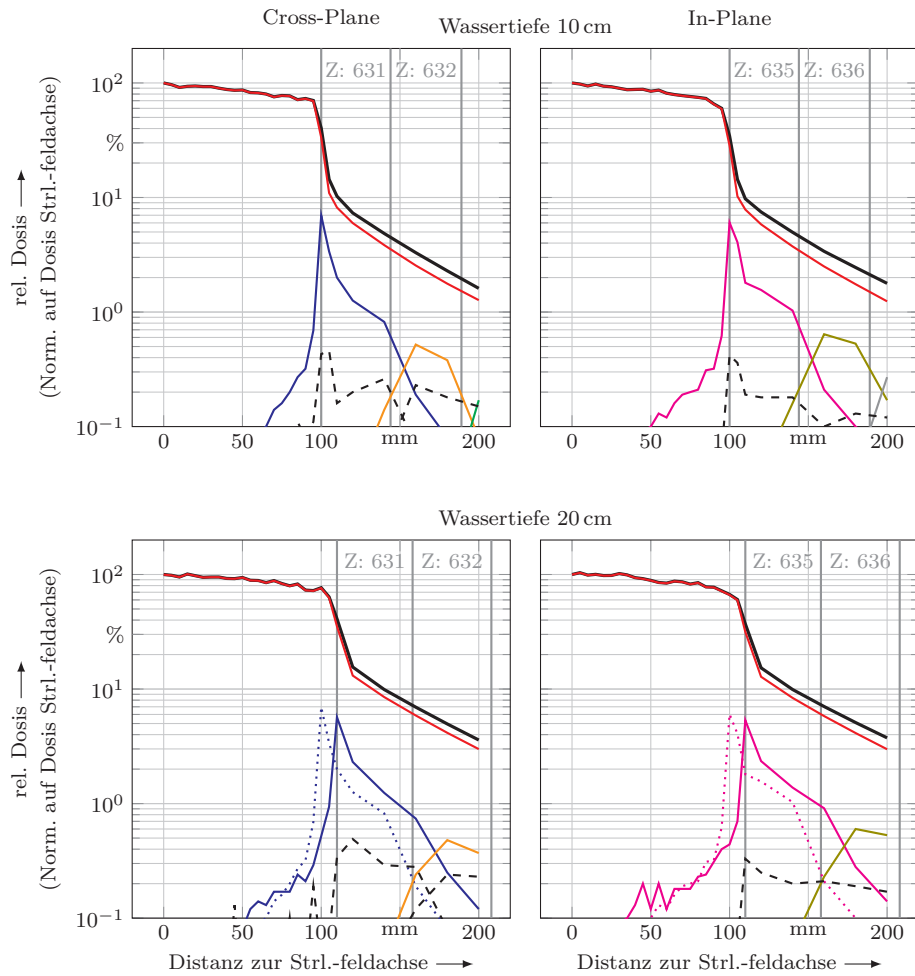
**Abbildung 5.45:** Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Durchgehende schwarze Linien zeigen Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes, die an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generiert wurden. Punktlinien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes in 10 cm Wassertiefe, sofern diese im Diagramm für 20 cm Wassertiefe eingetragen sind. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld: —	
Dosisverteilungen erzeugt durch Durchlassstrahlung der Block- / Lamellenblende: - - -	
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
— Zelle 630 (Strahlenfeld)	— Zelle 631 (Cross-Plane, Strl.-Feld-nächste)
— Zelle 632 (Cross-Plane)	— Zelle 633 (Cross-Plane, Strl.-Feld-fernste)
— Zelle 635 (In-Plane, Strl.-Feld-nächste)	— Zelle 636 (In-Plane)
— Zelle 637 (In-Plane, Strl.-Feld-fernste)	

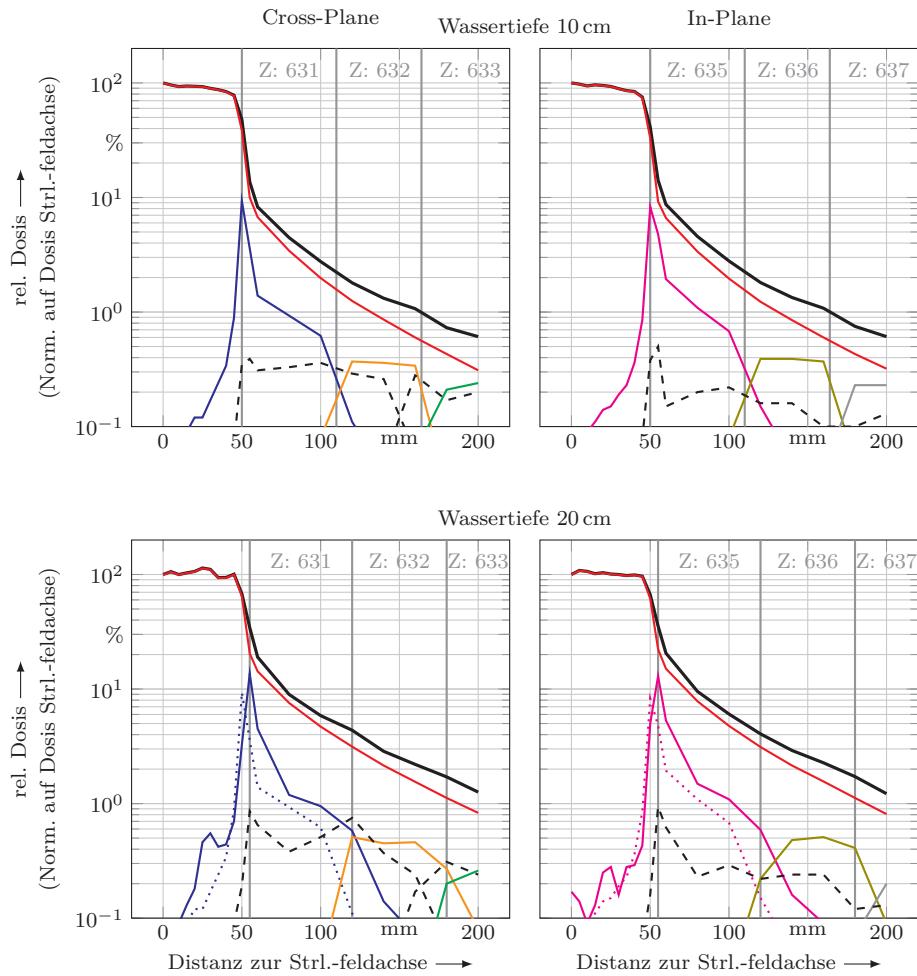
**Abbildung 5.46:** Dosishalbprofile in der Betriebsweise mit **Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Durchgehende schwarze Linien zeigen Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes, die an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generiert wurden. Punktlinien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes in 10 cm Wassertiefe, sofern diese im Diagramm für 20 cm Wassertiefe eingetragen sind. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm





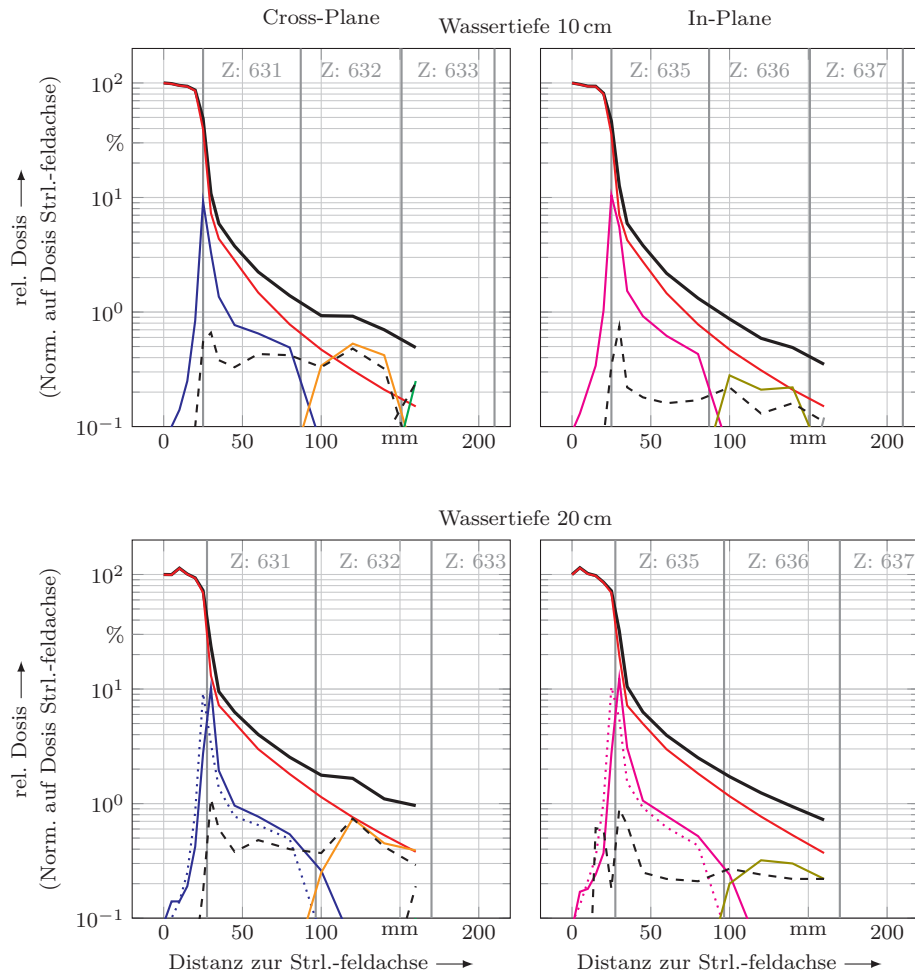
Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld: —	
Dosisverteilungen erzeugt durch Durchlassstrahlung der Block- / Lamellenblende: - - -	
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
— Zelle 630 (Strahlenfeld)	— Zelle 631 (Cross-Plane, Strl.-Feld-nächste)
— Zelle 632 (Cross-Plane)	— Zelle 633 (Cross-Plane, Strl.-Feld-fernste)
— Zelle 635 (In-Plane, Strl.-Feld-nächste)	— Zelle 636 (In-Plane)
— Zelle 637 (In-Plane, Strl.-Feld-fernste)	

**Abbildung 5.47:** Dosishalbprofile in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Durchgehende schwarze Linien zeigen Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes, die an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generiert wurden. Punktlinien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes in 10 cm Wassertiefe, sofern diese im Diagramm für 20 cm Wassertiefe eingetragen sind. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



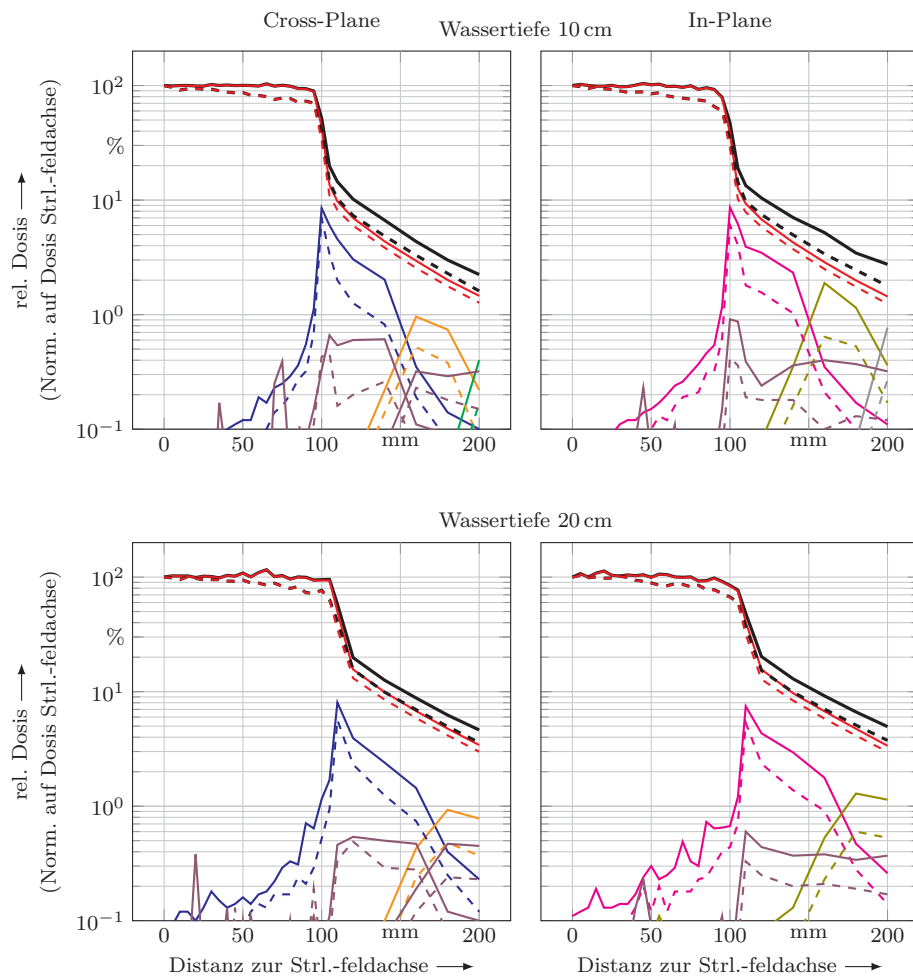
Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld: —	
Dosisverteilungen erzeugt durch Durchlassstrahlung der Block- / Lamellenblende: - - -	
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
— Zelle 630 (Strahlenfeld)	— Zelle 631 (Cross-Plane, Strl.-Feld-nächste)
— Zelle 632 (Cross-Plane)	— Zelle 633 (Cross-Plane, Strl.-Feld-fernste)
— Zelle 635 (In-Plane, Strl.-Feld-nächste)	— Zelle 636 (In-Plane)
— Zelle 637 (In-Plane, Strl.-Feld-fernste)	

**Abbildung 5.48:** Dosishalbprofile in der Betriebsweise **ohne Ausgleichfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Durchgehende schwarze Linien zeigen Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes, die an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generiert wurden. Punktlinien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes in 10 cm Wassertiefe, sofern diese im Diagramm für 20 cm Wassertiefe eingetragen sind. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



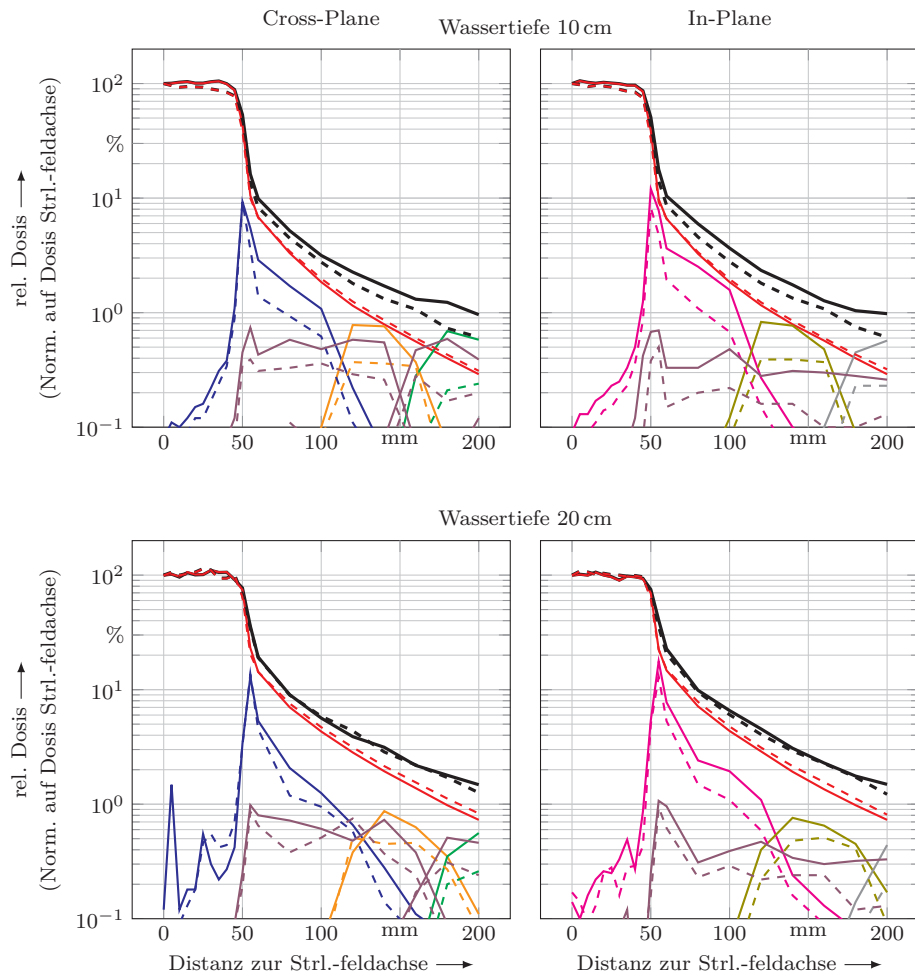
Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld: —	
Dosisverteilungen erzeugt durch Durchlassstrahlung der Block- / Lamellenblende: - - -	
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten:	
— Zelle 630 (Strahlenfeld)	— Zelle 631 (Cross-Plane, Strl.-Feld-nächste)
— Zelle 632 (Cross-Plane)	— Zelle 633 (Cross-Plane, Strl.-Feld-fernste)
— Zelle 635 (In-Plane, Strl.-Feld-nächste)	— Zelle 636 (In-Plane)
— Zelle 637 (In-Plane, Strl.-Feld-fernste)	

**Abbildung 5.49:** Dosishalbprofile in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Durchgehende schwarze Linien zeigen Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes, die an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generiert wurden. Punktlinien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes in 10 cm Wassertiefe, sofern diese im Diagramm für 20 cm Wassertiefe eingetragen sind. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



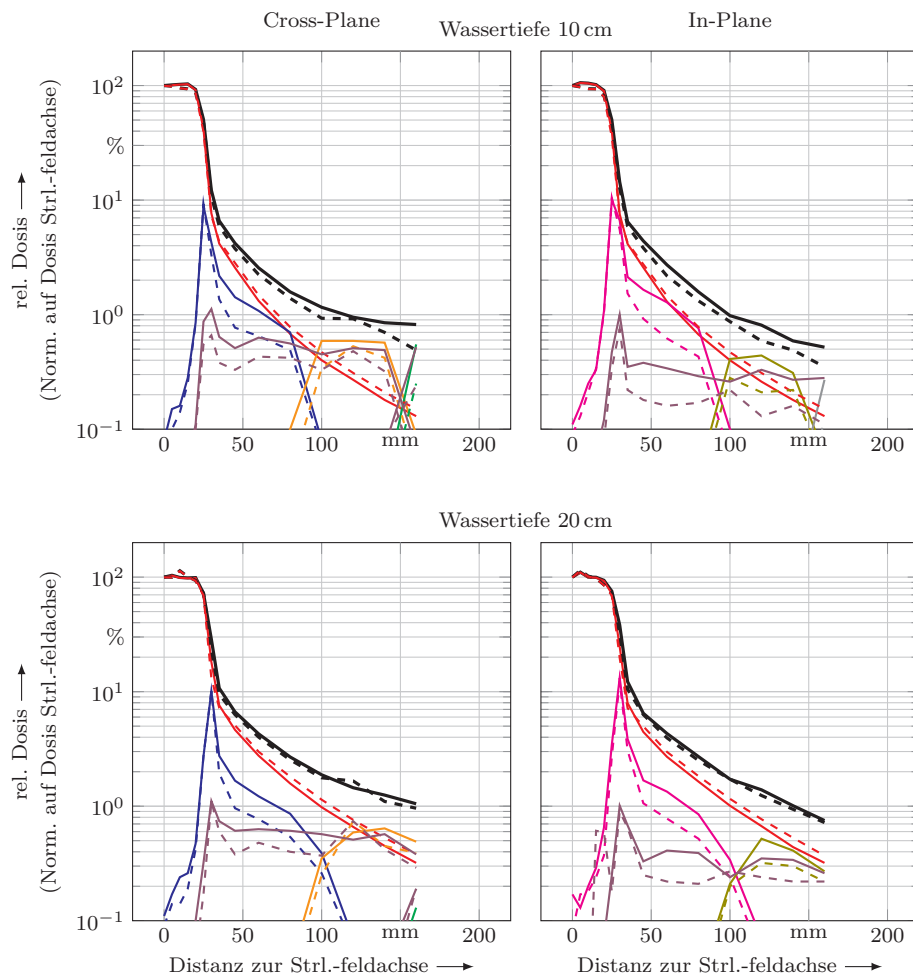
Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise mit Ausgleichsfilter	- - - Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten: (Linienstil Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter analog oben genanntem)	
— Zelle 630 (Strahlenfeld)	— Zelle 631 (Cross-Plane, Strl.-Feld-nächste)
— Zelle 632 (Cross-Plane)	— Zelle 633 (Cross-Plane)
— Zelle 634 (Cross-Plane, Strl.-Feld-fernste)	— Zelle 635 (In-Plane, Strl.-Feld-nächste)
— Zelle 636 (In-Plane)	— Zelle 637 (In-Plane)
— Zelle 638 (In-Plane, Strl.-Feld-fernste)	— Durchlassstrahlung Block- / Lam.-blende

**Abbildung 5.50:** Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes, die an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generiert wurden. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise mit Ausgleichsfilter	- - - Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten: (Linienstil Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter analog oben genanntem)	
— Zelle 630 (Strahlenfeld)	— Zelle 631 (Cross-Plane, Strl.-Feld-nächste)
— Zelle 632 (Cross-Plane)	— Zelle 633 (Cross-Plane)
— Zelle 634 (Cross-Plane, Strl.-Feld-fernste)	— Zelle 635 (In-Plane, Strl.-Feld-nächste)
— Zelle 636 (In-Plane)	— Zelle 637 (In-Plane)
— Zelle 638 (In-Plane, Strl.-Feld-fernste)	— Durchlassstrahlung Block- / Lam.-blende

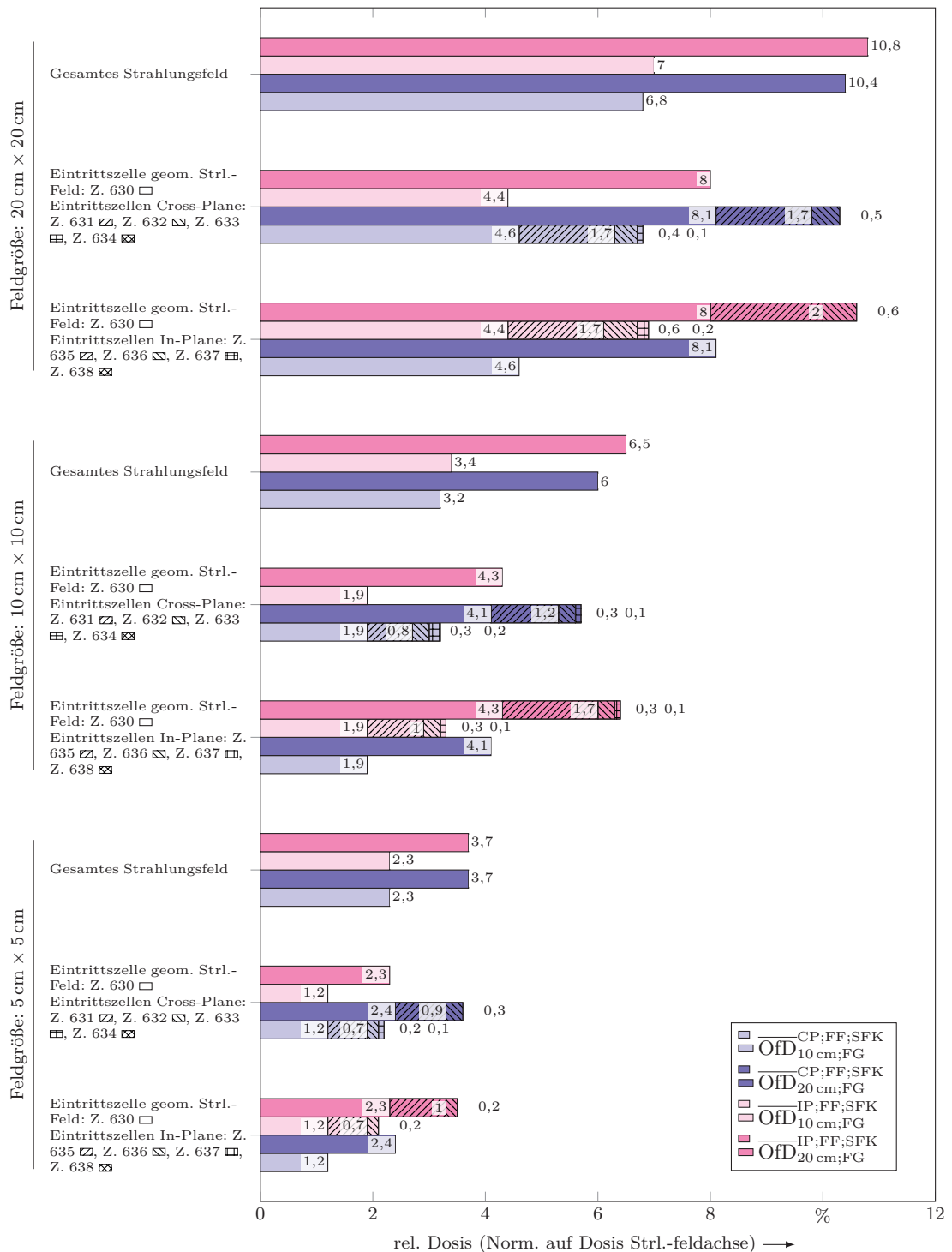
**Abbildung 5.51:** Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes, die an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generiert wurden. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm



Dosisverteilungen erzeugt durch gesamtes Strahlungsfeld:	
— Betriebsweise mit Ausgleichsfilter	- - - Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter
Dosisverteilungen erzeugt durch Strahlungsfeldkomponenten: (Linienstil Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter analog oben genanntem)	
— Zelle 630 (Strahlenfeld)	— Zelle 631 (Cross-Plane, Strl.-Feld-nächste)
— Zelle 632 (Cross-Plane)	— Zelle 633 (Cross-Plane)
— Zelle 634 (Cross-Plane, Strl.-Feld-fernste)	— Zelle 635 (In-Plane, Strl.-Feld-nächste)
— Zelle 636 (In-Plane)	— Zelle 637 (In-Plane)
— Zelle 638 (In-Plane, Strl.-Feld-fernste)	— Durchlassstrahlung Block- / Lam.-blende

**Abbildung 5.52:** Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes, die an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generiert wurden. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm

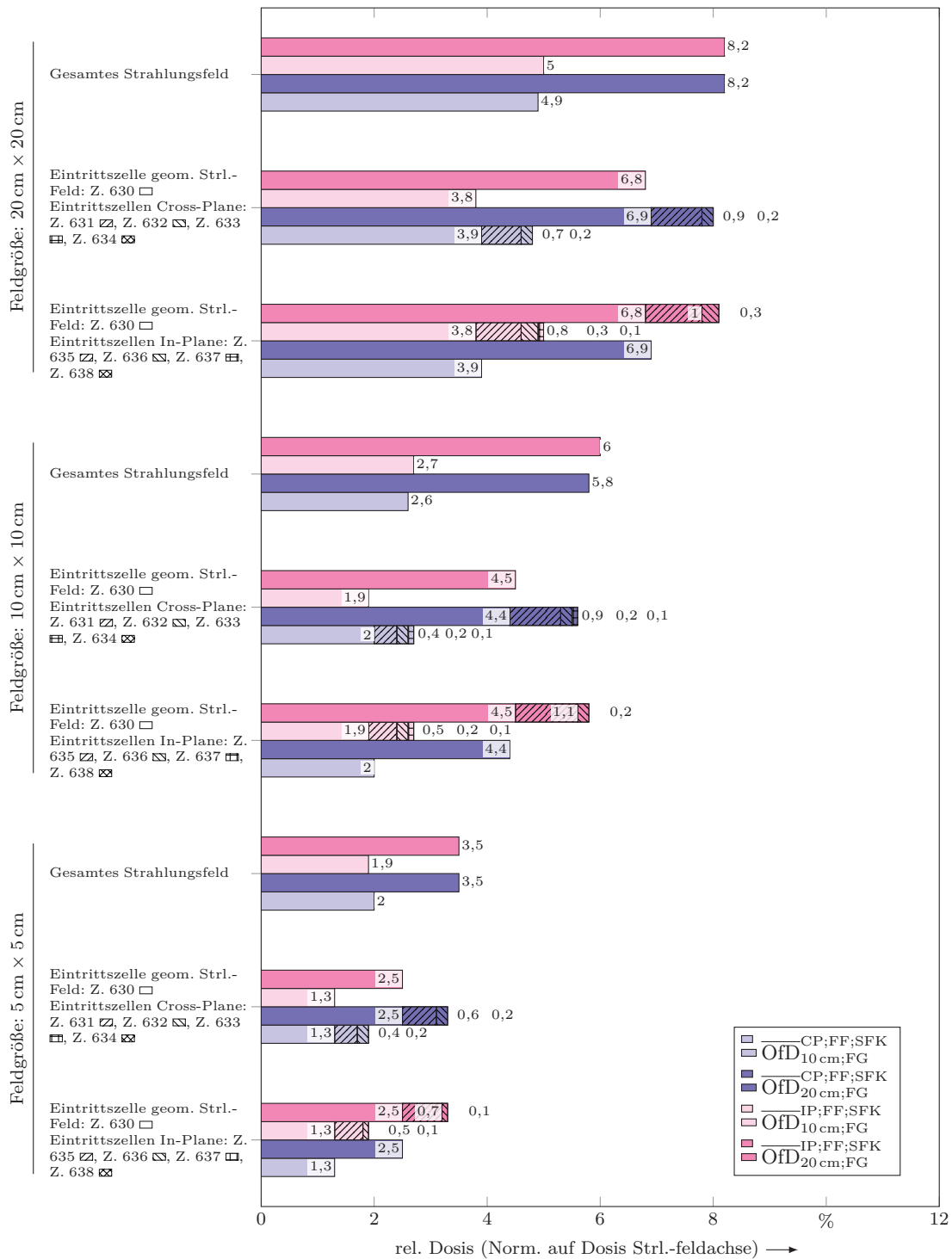




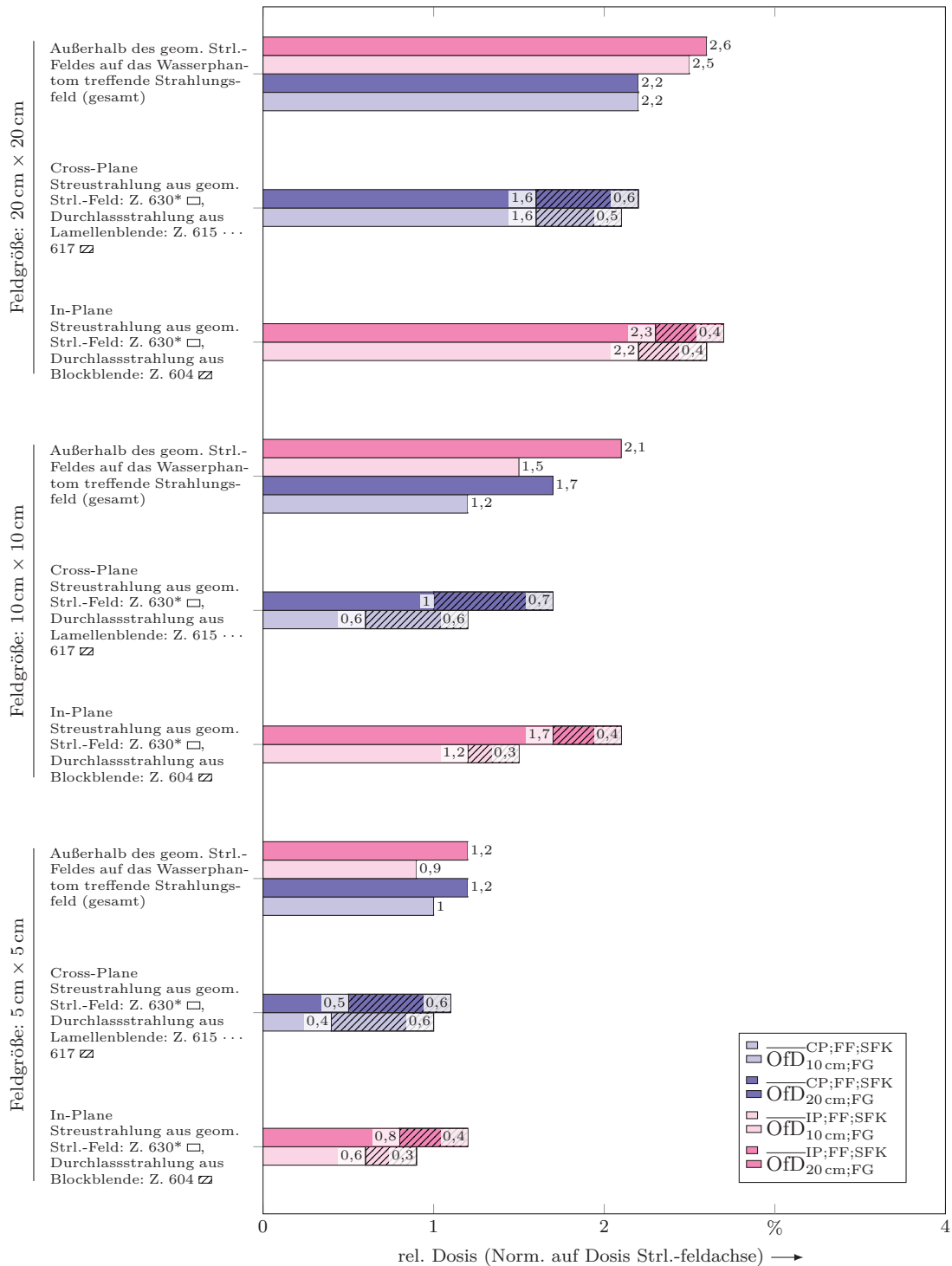
**Abbildung 5.53:** Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{OFD}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld sowie an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generierte Strahlungsfeldkomponenten in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** für alle simulierten Feldkonstellationen.



## 5.8 Strahlungsfeldkomponenten Eintrittsfläche Wasserphantom

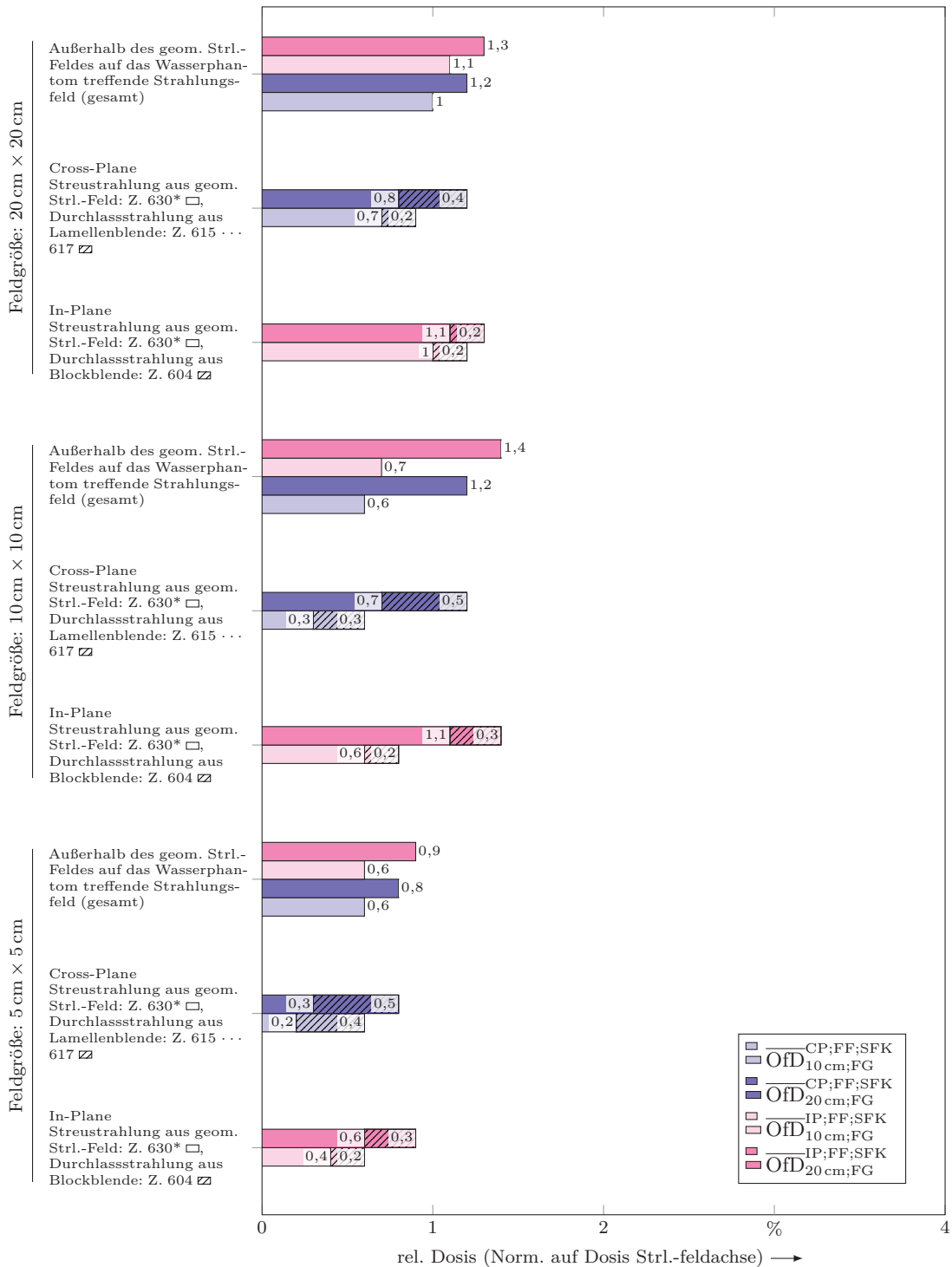


**Abbildung 5.54:** Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{OFD}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld sowie an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generierte Strahlungsfeldkomponenten in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** für alle simulierten Feldkonstellationen.



**Abbildung 5.55:** Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}$ ) verursacht durch das außerhalb der geom. Feldgrenzen auf das **Wasserphantom** auftreffende Strahlungsfeld insgesamt sowie unterteilt in Durchlasstrahlung der Betriebsblenden und Streustrahlung aus dem geom. Strl.-Feld in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** für alle simulierten Feldgrößen.

## 5.8 Strahlungsfeldkomponenten Eintrittsfläche Wasserphantom



**Abbildung 5.56:** Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{OfD}$ ) verursacht durch das außerhalb der geom. Feldgrenzen auf das **Wasserphantom** auftreffende Strahlungsfeld insgesamt sowie unterteilt in Durchlassstrahlung der Betriebsblenden und Streustrahlung aus dem geom. Strl.-Feld in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** für alle simulierten Feldgrößen.



# KAPITEL 6

---

## Diskussion

---

### Inhaltsübersicht

6.1	Diskussion der Methoden . . . . .	123
6.2	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	125
6.2.1	Targetsystem . . . . .	125
6.2.2	Primärblende . . . . .	126
6.2.3	Winkelanalysescheibe . . . . .	126
6.2.4	Blockblende / Lamellenblende . . . . .	128
6.2.5	Eintrittsfläche Wasserphantom . . . . .	130
6.3	Ausblick . . . . .	131

### 6.1 Diskussion der Methoden

Für die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Monte-Carlo-Simulationen wurde der Monte-Carlo-Code MCNP6 genutzt. MCNP6 ist ein vom Los Alamos National Laboratory, USA, entwickelter Vielzweck Monte-Carlo-Strahlungstransport-Code und kann neben Photonen, Elektronen, Positronen und Neutronen den Transport von 29 weiteren Teilchenarten über einen großen Energiebereich simulieren. Der Code war damit grundsätzlich zur Bearbeitung der Aufgaben der vorliegenden Arbeit geeignet. Von Nachteil bei dem Code war jedoch die umständliche und damit zeitaufwendige Erstellung des virtuellen Modells. Alle nachgebildeten Elemente des Beschleunigerkopfes sowie das Wasserphantom einschließlich der Zellen zur Dosiserfassung mussten aus einzelnen Flächen, Zellen und selbst generierten Materialien über Text-Befehle in der Input-Datei programmiert werden. Eine komfortable, grafische Benutzeroberfläche gibt es zwar, den „Visual Editor for MCNP“ von Randy Schwarz, diese konnte jedoch aufgrund der Komplexität des Modells nicht genutzt werden. Im Modell waren zu viele miteinander verknüpfte Zellen vorhanden, was zu einem Speicherüberlauf führte. Hilfreich im Sinne einer Zeitersparnis wäre insbesondere, analog zu den „Component Modules“ bei BEAMnrc zur komfortablen Erstellung von Baugruppen, eine Art Makro für den Bau der Lamellenblende gewesen. Die Lamellenblende war die mit Abstand aufwendigste Baugruppe.

Grundlage für die Modellbildung waren Herstellerangaben zu den Bauelementen und selbst durchgeführte Messungen an der Lamellenblende am realen Beschleuniger sowie an baugleichen ausgebauten einzelnen Lamellen. Es stellte sich heraus, dass der Abstand zwischen den einzelnen Lamellen und die korrekte Nachbildung des Nut- und Feder-Designs die Dosis außerhalb der Feldgrenzen maßgeblich beeinflusst. Aus diesem Grund war eine detaillierte Nachbildung jeder einzelnen Lamelle erforderlich. Aufgrund der doppelten

Fokussierung war dies mit etwa 800 Zeilen Programmiercode ein überaus aufwendiger Prozess.

Nach der Anpassung der virtuellen Elektronenstrahlungsquelle an den realen Beschleuniger erfolgte die Validierung des Modells durch Vergleich der gemessenen und simulierten Dosisverteilungen. Dabei zeigte sich bei der kleinsten simulierten Feldgröße ( $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ) ein nicht erwartetes und nicht nachvollziehbares Verhalten, was die Dosisbestimmung in einem Abstand von 18 cm bzw. 20 cm von der Strahlenfeldachse in beiden Hauptebenen und Wassertiefen betraf. Mit zunehmender Anzahl an simulierten Teilchenhistorien hat sich zunächst, wie zu erwarten, die Standardabweichung der betreffenden Ergebnisse verkleinert. Im weiteren Verlauf der Simulation hat sich diese jedoch ohne nachvollziehbaren Grund erheblich vergrößert, wurde daraufhin erneut kleiner und wieder größer. Da der Grund für dieses Verhalten nicht abschließend geklärt werden konnte, wurde auf die Dosisbestimmung in den genannten Feldkonstellationen und Abständen zur Strahlenfeldachse im Verlauf der weiteren Arbeit verzichtet.

Die exakte Modellierung hinsichtlich Geometrie und Material war eine zwingende Notwendigkeit für die Validierung des Modells. Ohne die Herstellerangaben zu den Materialien und der Geometrie und ohne die Ermittlung des realen Abstandes zwischen den Lamellen wäre eine erfolgreiche Validierung nicht möglich gewesen.

MCNP6 bietet verschiedene Tallies zur Dosisbestimmung in einer Zelle an, die mit Näherungsverfahren, wie beispielsweise die Kermanäherung, kombiniert werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wurde festgestellt, dass insbesondere im Zusammenhang mit der Lamellenblende ausschließlich der +F6 Tally ohne zusätzliche Näherungsverfahren die Dosis im Vergleich zur Messung hinreichend genau wiedergegeben hat. Der in diesem Tally genutzte Algorithmus ermittelt die durch Photonen respektive Elektronen erzeugte Dosis gemäß der Dokumentation zum MCNP6 Code in einer Zelle exakt. Im Vergleich zu anderen Tallies bzw. der Kombination mit Näherungsverfahren ist die Rechenzeit zur Erreichung der erforderlichen statistischen Sicherheit jedoch deutlich höher.

Varianzreduktionsverfahren können die Rechenzeit einer Simulation erheblich reduzieren. Der Einsatz bestimmter Varianzreduktionsverfahren führte jedoch in dieser Arbeit zu abweichenden Ergebnissen, weshalb die Nutzung nicht möglich war. Dies betraf die, im Vergleich zur Realität, vermehrte Produktion von höherenergetischen Photonen und die forcierte Produktion von Photonen in Vorwärtsrichtung bei der Erzeugung von Bremsstrahlung. Diesbezüglich wurde sogar das Entwicklerteam von MCNP6 kontaktiert, dem das Auftreten der Abweichung im Vergleich zur Simulation ohne genannte Varianzreduktionsverfahren nicht unbekannt war.

Die in den vorgenannten Absätzen genannten Umstände haben dazu geführt, dass eine Simulation auf dem Rechnerverbund, bestehend aus vier PC, stellenweise bis zu einem Monat gedauert hat. Nur dann war sichergestellt, dass die durch die Durchlassstrahlung der Block- und Lamellenblende verursachte Dosis statistisch ausreichend sicher bestimmt war. Im Hinblick auf eine mögliche Fortführung der Untersuchungen der vorliegenden Arbeit wird deshalb darauf zu achten sein, dass deutlich mehr Rechenleistung zur Verfügung steht, um in kürzerer Zeit valide Ergebnisse zu erzeugen. Dies würde auch die Untersuchung größerer Distanzen zur Strahlenfeldachse erlauben.

Die Markierung von Photonen durch das Cell- bzw. Surface-Flagging war von zentraler

Bedeutung für die vorliegende Arbeit. Ohne diese Funktion wäre die Ermittlung vieler Ergebnisse nicht möglich gewesen bzw. nur durch erheblichen zusätzlichen Aufwand. Die Funktion war ohne viel Aufwand durch die Erweiterung der Tally Funktion in der Input-Datei zu implementieren. Wünschenswert wäre noch eine logische „UND“ Verknüpfung gewesen, die der Code jedoch nicht vorsieht. Damit wäre es beispielsweise möglich gewesen zu prüfen, ob der Hauptgrund für die Streustrahlung in der Primärblende tatsächlich die Durchlassstrahlung des Targetsystems außerhalb der vorgesehenen Austrittsfläche ist.

CHANEY u. a. [Cha94] haben zur Identifizierung von Streukörpern im Strahlerkopf eines Siemens MD2 Linearbeschleunigers den Code EGS4 genutzt. Zur Reduzierung der Rechenzeit wurden Vereinfachungen am Modell vorgenommen. Angaben zu einer möglichen Validierung des Modells anhand von Messdaten konnten im Artikel nicht gefunden werden. Die Identifizierung von Streukörpern erfolgte mit Hilfe der Anzahl von gestreuten Photonen bzw. der Fluenz. Eine mit der Streuung einhergehende Dosis außerhalb der Feldgrenzen in einem Phantom wurde nicht bestimmt.

KRY u. a. [Kry10] erstellten mit MCNPX ein Monte-Carlo-Modell eines Varian 2100 Linearbeschleunigers einschließlich Wasserphantom und untersuchten den Einfluss des Ausgleichsfilters auf die Dosis außerhalb der Feldgrenzen. Die Autoren haben nach eigener Angabe das Modell am realen Vorbild erfolgreich validiert. Außerdem geben sie an, dass sie, zur Reduzierung statistischer Unsicherheiten, die Kermanäherung eingesetzt haben. Neben der gesamten Dosis außerhalb der Feldgrenzen wurden zusätzlich die Anteile durch Blenden-Streuung, Patienten-Streuung und Durchlassstrahlung durch Vernichtung von Photonen des geometrischen Strahlenfelds an der Lamellen-Blende und im Wasserphantom bestimmt.

Die erfolgreiche Validierung des Modells bei Einsatz der Kermanäherung ist bemerkenswert. Im Rahmen von Testsimulationen ist dies in der vorliegenden Arbeit nicht gelungen. Dieser Punkt sollte deshalb bei Folgearbeiten genauer untersucht werden, da er eine erhebliche Zeitersparnis bei den Simulationen ermöglicht.

CHOFOR u. a. [Cho12] erstellten nach eigener Angabe ein detailliertes Modell eines Siemens Primus Linearbeschleunigers einschließlich Phantom mit dem Code BEAMnrc. Weiterhin geben sie jedoch an, dass die Lamellenblende aus Gründen der Komplexität vereinfacht modelliert wurde. So wurde ein Lamellensatz als Block nachgebildet und somit auf den Bau der einzelnen Lamellen verzichtet. Das Modell entsprach daher nicht dem realen Vorbild. Aufgrund der fehlenden „Interleaf-Leakage“ wurden deshalb zuvor durchgeführte Messungen in der Publikation genutzt.

## 6.2 Diskussion der Ergebnisse

### 6.2.1 Targetsystem

In Abhängigkeit der konkreten Feldkonstellation werden 3 % bis 8 % der mittleren Dosis außerhalb der Feldgrenzen durch Photonen erzeugt, die das Targetsystem nicht, wie vorgesehen, über die Austrittsfläche verlassen. Dieser Anteil wäre durch eine adäquate Abschirmung am Targetsystem vermeidbar. Dokumentationen in der Literatur konnten diesbezüglich nicht gefunden werden.

### 6.2.2 Primärblende

In Abhängigkeit der konkreten Feldkonstellation werden 3 % bis 11 % der mittleren Dosis außerhalb der Feldgrenzen durch Photonen erzeugt, die die Primärblende passiert haben. Auch wenn durch das Cell-Flagging ausschließlich der Aufenthalt eines Photons in der Primärblende nachgewiesen werden kann und nicht dessen Streuung, ist davon auszugehen, dass die Dosis außerhalb der Feldgrenzen hauptsächlich durch in der Primärblende gestreute Photonen verursacht wurde, wie folgende Überlegungen zeigen:

Die Dosisverteilungen der Einfassung der Austrittsfläche und der Primärblende weisen eine hohe Ähnlichkeit auf. Es ist deshalb davon auszugehen, dass vornehmlich Photonen, die das Targetsystem über die Einfassung der Austrittsfläche (Fläche Nr. 9, Abb. 4.7, S. 31) passiert haben, in die Zelle der Primärblende eintreten. Weiterhin zeigen die Dosisverteilungen der durch die Primärblende markierten Photonen ein Dosismaximum innerhalb der geometrischen Feldgrenzen (Abb. 5.9 bis 5.11 S. 54 ff. (Linien ---)), was den Rückschluss zulässt, dass die markierten Photonen innerhalb der geometrischen Feldgrenzen auf das Wasserphantom getroffen sind. Unter Berücksichtigung der vorgenannten Kriterien ist somit mindestens eine Richtungsänderung (Streuprozess) – entweder im Targetsystem oder in der Primärblende – erforderlich gewesen, wie die Abbildung 6.1 S. 127 zeigt. Eine Passage der Photonen durch die Zelle der Primärblende ohne Streuvorgang ist nur dann möglich gewesen, wenn das aus dem Target emittierte Photon stark seitlich in Bezug auf die Strahlenfeldachse gestreut wurde (Photon P1 in Abb. 6.1 S. 127). Dies ist jedoch aufgrund der Höhe der Energie der Primärelektronen, in der die Emission der Photonen vornehmlich in Einstrahlrichtung der Elektronen erfolgt, unwahrscheinlich gewesen (Abb. 3.2 S. 14). Wahrscheinlicher war die Photonenemission unter einem kleineren Winkel und damit die Streuung in der Primärblende (Photon P2 in Abb. 6.1 S. 127).

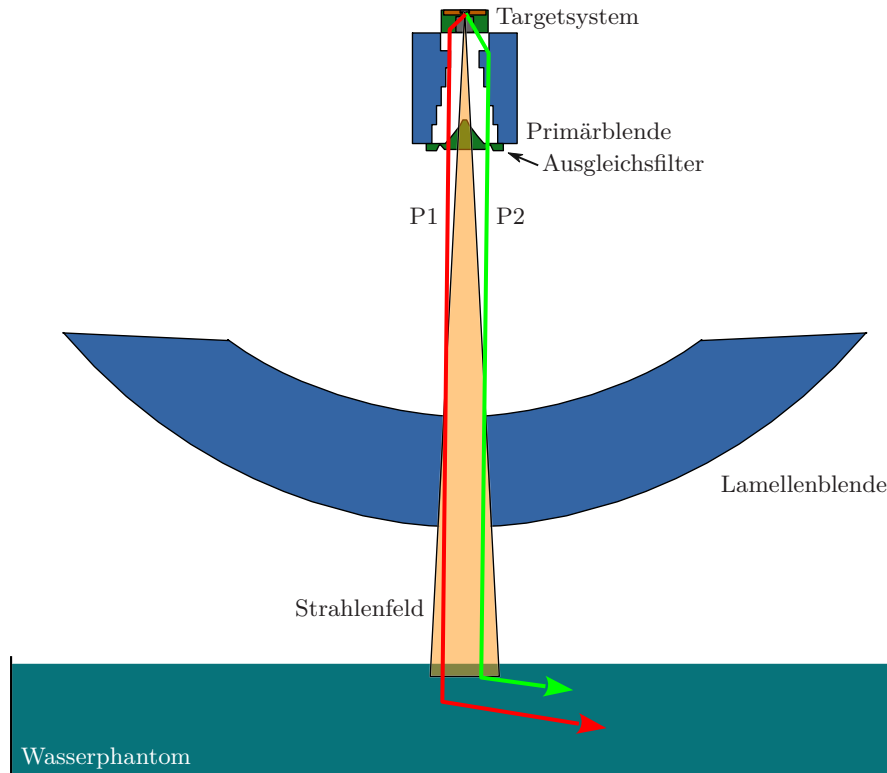
Detaillierte Angaben zum Streuverhalten der Primärblende konnten nur bei CHANEY u. a. [Cha94] gefunden werden. Diese beziehen sich allerdings auf die Anzahl gestreuter Photonen innerhalb des geometrischen Strahlenfeldes. Angaben zu einer Dosis oder den Verhältnissen außerhalb des Strahlenfeldes werden nicht gemacht. CHANEY u. a. [Cha94] geben an, dass die Primärblende der stärkste Streukörper im Beschleunigerkopf ist, was die Anzahl der gestreuten Photonen betrifft. Wie den Abbildungen 5.9 bis 5.11 S. 54 ff. (Linien ---) und 5.19 bis 5.24 S. 73 ff. (Linie —) entnommen werden kann, kommt die vorliegende Arbeit zu dem Ergebnis, dass die im geometrischen Strahlenfeld durch die Streustrahlung der Primärblende erzeugte Dosis kleiner ist, als beispielsweise die Streuung an den wirksamen Kanten der Blockblende. Die Anzahl der Streuphotonen steht offensichtlich nicht im direkten Zusammenhang mit einer Dosis im Wasserphantom.

### 6.2.3 Winkelanalysescheibe

Die Winkelanalysescheibe hat den Zusammenhang zwischen dem Emissionswinkel der Photonen aus dem Targetsystem und deren Einfluss auf die Höhe der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen gezeigt und damit insbesondere die Auswirkungen des Ausgleichsfilters anschaulich demonstriert.

Bei mittlerer und kleinster simulierter Feldgröße ( $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ,  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ) verursacht der Ausgleichsfilter eine Reduktion der Dosis außerhalb der Feldgrenzen von Photonen, die das Target unter einem Emissionswinkel von  $0^\circ$  bis  $2^\circ$  zur Strahlenfeldachse verlassen

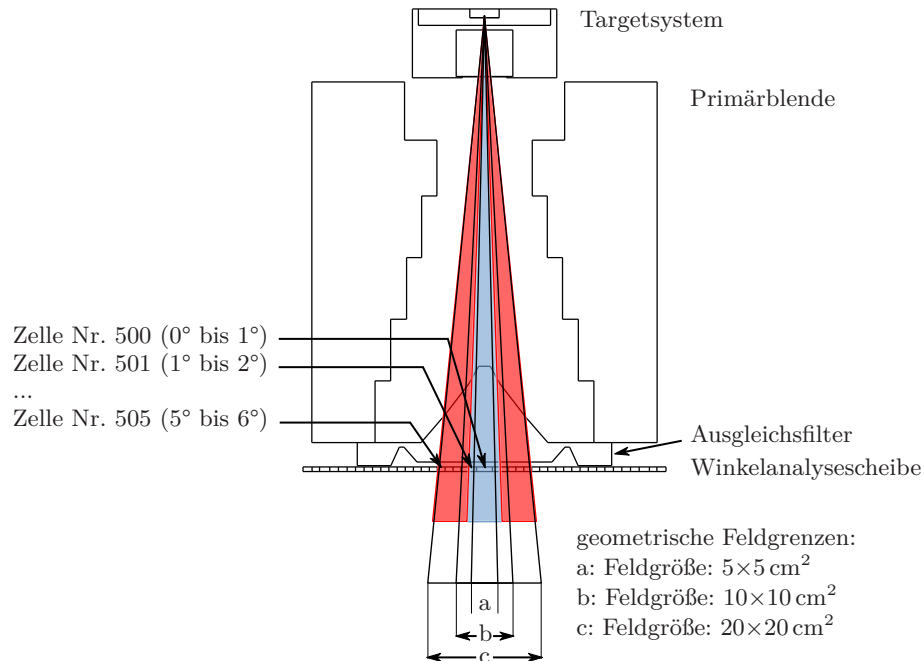




**Abbildung 6.1:** X-Z Schnitt des Targetsystems, der Primärblende, des Ausgleichsfilters, der Lamellenblende und des Wasserphantoms auf der Strahlenfeldachse ( $Y=0$  cm). Mit Ausnahme der Abmessungen des Wasserphantoms sowie dessen Abstand zur Lamellenblende bzw. Target ist die Skizze maßstabsgerecht. Die Markierung von Photonen in der Primärblende bei vorheriger Passage der Einfassung der Austrittsfläche des Targetsystems und Auftreffen auf das Wasserphantom innerhalb der geometrischen Feldgrenzen ist nur dann möglich, wenn das Photon mindestens einmal gestreut wurde. In der Abbildung sind beispielhaft zwei Photonentrjektorien eingezeichnet - Streuung im Targetsystem (Photonentrjektorie P1 in rot) oder in der Primärblende (Photonentrjektorie P2 in grün).

(Abb. 6.2 S. 128), im Vergleich zum Betrieb ohne Ausgleichsfilter. Bei größter simulierter Feldgröße ( $20 \times 20 \text{ cm}^2$ ) verursacht der Ausgleichsfilter einen Anstieg der Dosis außerhalb der Feldgrenzen von Photonen, die das Target unter einem Emissionswinkel von  $2^\circ$  bis  $6^\circ$  zur Strahlenfeldachse verlassen (Abb. 6.2 S. 128), im Vergleich zum Betrieb ohne Ausgleichsfilter. Zur Begründung sei auf Abschnitt 5.5.3 S. 61 verwiesen.

Eine retrospektive Betrachtung verdeutlicht, dass es sinnvoller gewesen wäre, die Winkelanalysescheibe anstatt rund rechteckig auszuführen. Dies hätte die Verhältnisse im geometrischen Feld noch realistischer dargestellt, da die Winkelanalysescheibe dann, aufgrund der übereinstimmenden Geometrie, das gesamte geometrische Strahlenfeld überdeckt hätte. Da jedoch beide Betriebsweisen hinsichtlich des Ausgleichsfilters unter ansonsten exakt gleichen geometrischen Bedingungen durchgeführt wurden, ist eine Änderung an der Grundaussage nicht zu erwarten.



**Abbildung 6.2:** Maßstabsgerechter X-Z Schnitt des Targetsystems, der Primärblende, des Ausgleichsfilters und der Winkelanalysescheibe auf der Strahlenfeldachse ( $Y=0$  cm). Der Schnitt wurde mit Hilfe des „Geometry Plotters“, einer Funktion des MCNP6-Codes zur Visualisierung der in der Input-Datei programmierten Zellen, erzeugt. Zusätzlich wurden die Winkelbereiche von  $0^\circ$  bis  $2^\circ$  zur Strahlenfeldachse in **blau** und von  $2^\circ$  bis  $6^\circ$  zur Strahlenfeldachse in **rot** eingezeichnet. Photonen, die unter einem Winkel von  $0^\circ$  bis  $2^\circ$  (**blau**) aus der Strahlenquelle emittiert wurden, hatten in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** im Vergleich zum Betrieb ohne Ausgleichsfilter eine **kleinere Dosis** außerhalb der geometrischen Feldgrenzen zur Folge, was die kleinste und mittelgroße simulierte Feldgröße betraf. Photonen, die unter einem Winkel von  $2^\circ$  bis  $6^\circ$  (**rot**) emittiert wurden, hatten in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** im Vergleich zum Betrieb ohne Ausgleichsfilter eine **höhere Dosis** außerhalb der geometrischen Feldgrenzen zur Folge, was die größte simulierte Feldgröße betraf.

#### 6.2.4 Blockblende / Lamellenblende

Durch die Markierung der Photonen an den wirksamen Kanten beider Blendenblöcke und Lamellensätze war es möglich, die durch die gestreuten Photonen deponierte Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen individuell für jeden Blendenblock bzw. Lamellensatz zu bestimmen, unabhängig davon, ob die Photonen innerhalb oder außerhalb der geometrischen Feldgrenzen auf das Phantom getroffen sind. Dies ist ein relevanter Unterschied zu den Arbeiten von KRY u. a. [Kry10], CHOFOR u. a. [Cho10] und CHOFOR u. a. [Cho12], die Streukörper nicht individuell betrachtet haben und ausschließlich Photonen, die außerhalb der geometrischen Feldgrenzen auf das Phantom getroffen sind, als „collimator scatter“ identifiziert haben – eine unter dem methodischen Aspekt fragwürdige Herangehensweise, da somit alle Photonen vernachlässigt wurden, die an den wirksamen Kanten gestreut wurden, innerhalb der geometrischen Feldgrenzen auf das Phantom getroffen sind und durch Streuung im Phantom eine Dosis außerhalb der Feldgrenzen erzeugt haben. Im

Sinne einer umfassenden Untersuchung in Bezug auf die Dosis außerhalb der Feldgrenzen ist offensichtlich die Einbeziehung aller gestreuten Photonen erforderlich. Denkbar wäre beispielsweise, dass an der wirksamen Kante gestreute Photonen in Abhängigkeit des Streuwinkels einen bedeutsamen Energieverlust erfahren. Im Vergleich zu nicht gestreuten und damit höherenergetischen Photonen würden an der wirksamen Kante gestreute Photonen im Phantom folglich vermehrt zur Seite gestreut werden und damit eine höhere Dosis außerhalb der Feldgrenzen erzeugen.

Wie den Abbildungen 5.19 bis 5.24 S. 73 ff. (In-Plane, Fläche Nr. 203, Linie —) entnommen werden kann, haben an der wirksamen Kante des Blendenblocks gestreute Photonen eine Dosisverteilung in In-Plane zur Folge. Die gestreuten Photonen erzeugen auf der Seite der Hauptebene, auf der sich auch der streuende Blendenblock befindetet, innerhalb und außerhalb der Feldgrenzen eine vergleichsweise hohe Dosis im Wasserphantom, während am gegenüberliegenden Blendenblock gestreute Photonen eine vergleichsweise kleine Dosis zur Folge haben (Abb. 5.19 bis 5.24 S. 73 ff. (In-Plane, Fläche Nr. 253, Linie —)).

Die individuelle Betrachtung der Blendenblöcke in Verbindung mit der Markierung der Photonen an den wirksamen Kanten ermöglichte, den Vorgang der Dosiserzeugung außerhalb der Feldgrenzen nachzuvollziehen. Es konnte gezeigt werden, dass der Streuvorgang an der wirksamen Kante (Fläche Nr. 203) nicht im Zusammenhang mit der Höhe der Dosis außerhalb der Feldgrenzen steht, da sich der Streuwinkel und damit auch der Energieverlust der gestreuten Photonen als klein herausstellte (Abschnitt 5.6.2 S. 70). Die vergleichsweise hohe Dosis außerhalb des geometrischen Feldes ergibt sich durch die Nähe der an der wirksamen Kante gestreuten Photonen zur Feldgrenze im Phantom.

Die an den wirksamen Kanten gestreuten Photonen verursachen zusätzlich in der Hauptebene Cross-Plane eine Dosisverteilung (Abb. 5.19 bis 5.24 S. 73 ff. (Cross-Plane, Fläche Nr. 253 und 203, Linien ==)). Analog zur Hauptebene In-Plane erzeugen auch hier an den wirksamen Kanten gestreute Photonen ein Strahlungsfeld, das innerhalb der Feldgrenzen auf das Phantom trifft und aufgrund von Streuung eine Dosis außerhalb der Feldgrenzen zur Folge hat.

Die vorhergehende Diskussion zur Blockblende ist analog auf die Lamellenblende übertragbar.

Eine Diskussion der Erkenntnisse bezüglich der durch die Streuung an den wirksamen Kanten erzeugten Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen mit den einschlägigen Veröffentlichungen ist nicht möglich, da sich, wie schon weiter oben beschrieben, die Methode zur Ermittlung von der vorliegenden Arbeit unterscheidet. Die durch Photonen verursachte Dosis außerhalb der Feldgrenzen, die außerhalb des Feldes auf das Phantom treffen, wird in Abschnitt 6.2.5 (Eintrittsfläche Wasserphantom) diskutiert.

Weiterhin wurde die durchlassstrahlungsbedingte Dosis außerhalb der Feldgrenzen der Block- und Lamellenblende innerhalb der vorliegenden Arbeit bestimmt. CHOFOR u. a. [Cho10] haben diese Dosis, unter zu dieser Arbeit vergleichbaren Bedingungen (gleicher Beschleuniger, Feldgröße, Wassertiefe, Betriebsweise mit Ausgleichsfilter), messtechnisch durch die Einbringung zusätzlicher Abschirmungen bestimmt. Die Ergebnisse sind mit denen der vorliegenden Arbeit vergleichbar. KRY u. a. [Kry10] kommen anhand von Monte-Carlo-Simulationen an einem Varian 2100 Beschleuniger zu dem Ergebnis, dass durch die Entfernung des Ausgleichsfilters die durchlassstrahlungsbedingte Dosis deutlich reduziert

wird. Eine Reduktion kann in dieser Arbeit ebenfalls beobachtet werden. Auffällig ist, dass die durchlassstrahlungsbedingte Dosis bei KRY u. a. [Kry10] im Vergleich zur vorliegenden Arbeit um etwa einen Faktor 10 kleiner ist. Hierzu ist anzumerken, dass KRY u. a. [Kry10] einen anderen Beschleuniger, einen Varian 2100, untersucht haben und sich der Unterschied offensichtlich aus der differierenden Bauart der betrachteten Beschleuniger ergibt.

Darüber hinaus wurde die Durchlassstrahlung an der Lamellenblende hinsichtlich der Austrittsorte mit Hilfe der Zellen Nr. 615, 616, 617 genauer untersucht (Abb. 4.12 S. 36). Das Interesse galt dabei der Feststellung, ob möglicherweise der gesamte Lamellensatz aufgrund von Vielfachstreuprozessen zu einer großvolumigen „Strahlenquelle“ wird. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass dies, zumindest für die betrachteten Distanzen zur Strahlenfeldachse, nicht der Fall ist. Die durch die Strahlungsfeldkomponente der Zelle Nr. 617 erzeugte Dosis ist nahezu nicht existent.

### 6.2.5 Eintrittsfläche Wasserphantom

Zur Vervollständigung des Einblicks in die Entstehung der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen waren abschließend noch die Eintrittsorte der dosiserzeugenden Photonen in das Wasserphantom zu bestimmen. Hierfür wurden unmittelbar oberhalb der Wasseroberfläche Zellen implementiert, die eine Markierung der Photonen ermöglichten. So konnte insbesondere auch die Dosisverteilung des Strahlungsfeldes, das zusätzlich zur Durchlassstrahlung der Block- und Lamellenblende außerhalb der Feldgrenzen auf das Phantom getroffen ist und dessen Ursprung Streuvorgänge an den wirksamen Kanten der Block-, Lamellen- und Primärblende sind, ermittelt werden. Sehr hilfreich im Sinne einer noch detaillierteren Untersuchung wäre gewesen, wenn eine logische UND-Verknüpfung der photonemarkierenden Zellen bzw. Flächen technisch möglich gewesen wäre. Eine Verknüpfung der Primärblende mit den Zellen an der Eintrittsfläche des Wasserphantoms hätte eine eindeutige Unterscheidung in Photonen ermöglicht, die in der Primärblende gestreut wurden *und* innerhalb bzw. außerhalb der Feldgrenzen auf das Phantom getroffen sind. Gleiches gilt für die wirksamen Kanten der Block- bzw. Lamellenblende.

CHOFOR u. a. [Cho12] geben an, dass der Beitrag durch „head scatter“ an der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen durch Monte-Carlo-Simulationen bestimmt und bewertet werden soll. Der Beitrag soll sich, so die Autoren, als Differenz zwischen der Dosisverteilung des gesamten Strahlungsfeldes und der Dosisverteilung, die durch Streuung im Phantom verursacht wurde, ergeben (Abbildung Nr. 3 in der Veröffentlichung). Die Dosisverteilungen sind jedoch nicht in einer Art und Weise dargestellt, dass dort konkrete Werte entnommen werden könnten. Die Kurven befinden sich bei dem gewählten Maßstab zu dicht beieinander. Ein Vergleich der Ergebnisse ist somit nicht möglich.

CHOFOR u. a. [Cho10] haben den Anteil an der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen, der auf Streustrahlung an den Blenden und dem Ausgleichsfilter zurückzuführen ist, messtechnisch ermittelt, indem, zur Vermeidung der Streustrahlung des Phantoms, der Streukörper<sup>1</sup> aus dem geometrischen Feld entfernt wurde und, zur Reduzierung der

---

<sup>1</sup> Als Phantom wurde ein wasseräquivalentes Festkörperphantom genutzt, das aus zwei Teilen bestand. Zur Vermeidung der Streustrahlung durch das Phantom wurde der vom geometrischen Strahlenfeld getroffene Teil entfernt.

Durchlassstrahlung der Block- bzw. Lamellenblende, die Messung in einem Winkel von 45 Grad zur Hauptebene In-Plane durchgeführt wurde. Die so ermittelten Werte stimmen gut mit denen der vorliegenden Arbeit überein. Gleiches gilt für die Bestimmung der Dosis außerhalb der Feldgrenzen, die durch die Streustrahlung im Phantom verursacht wurde.

KRY u. a. [Kry10] haben mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen u.a. den Einfluss des Ausgleichsfilters auf die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen durch Streuung an den Blenden und im Phantom in einer Phantomtiefen von 5 cm bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  untersucht. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass sich in der Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter die Dosis durch Streustrahlung an den „Blenden<sup>1</sup>“ reduziert, während sich die durch die Streuung im Phantom verursachte Dosis erhöht. Die Beobachtungen stimmen mit den Ergebnisse der vorliegenden Arbeit überein.

Ein Vergleich mit anderen Untersuchungen bzgl. der Eintrittsorte außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in Bezug auf den Abstand zum Strahlenfeld (Zellen Nr. 631 bis Nr. 634 und Nr. 635 bis Nr. 638) ist nicht möglich, da hierzu keine Veröffentlichungen gefunden werden konnten.

### 6.3 Ausblick

Die aus physikalischen und technischen Gründen unvermeidbare Exposition von Gewebe und Organen im Menschen bei der Therapie mit ionisierender Strahlung ist im Hinblick auf die vermehrte Nutzung der IMRT und dem hiermit verbundenen ansteigenden Zweitkrebsrisiko sowie dem Anstieg der Überlebenszeit nach Krebserkrankungen ein zunehmend relevantes Thema in der Strahlentherapie.

Ein erster wichtiger Schritt im Umgang mit der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen wäre die systematische, patientenindividuelle Bestimmung. Hierdurch könnte einerseits das Risiko für das Auftreten von stochastischen Wirkungen vor Beginn der Therapie auf der Grundlage des LNT-Modells bestimmt werden. Insbesondere jüngere Patienten könnten davon profitieren, sofern eine Optimierung der Dosis außerhalb der Feldgrenzen möglich ist. Dies ist sicherlich von den individuellen Umständen des Einzelfalles abhängig.

Darüber hinaus ermöglicht die systematische Untersuchung der exponierten Gewebe bzw. Organe in Bezug auf die Strahlenexposition, das derzeit begrenzte Wissen über die Wirkung der ionisierenden Strahlung hinsichtlich „kleiner Strahlendosen“ auf den Menschen deutlich auszubauen, so dass auf die Anwendung des LNT-Modells, aufgrund einer soliden Datenbasis, zukünftig verzichtet werden könnte.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit geben anhand der Untersuchung von drei quadratischen Feldern einen Einblick in die komplexen Abhängigkeiten zwischen den untersuchten Parametern und der Dosis außerhalb der Feldgrenzen bzw. dessen Zusammensetzung. Bei den gegenwärtig üblichen Bestrahlungstechniken, wie IMRT und IMAT, die mit einer Vielzahl von Strahlenfeldern unterschiedlicher Form und Größe einhergehen, ist eine adäquate patientenindividuelle Berechnung mit einem entsprechend großen Aufwand verbunden. Die Überführung in die praktische Routine der Strahlentherapie ist deshalb ohne geeignete

---

<sup>1</sup> Es wurden keine Angaben darüber gemacht, welche Blende genau gemeint ist.

technische Hilfsmittel nicht ohne Weiteres realisierbar. Effektiv wäre die Implementierung von den Anforderungen entsprechenden Algorithmen zur Bestimmung der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in die Bestrahlungsplanungssysteme. Wie bereits in der Einleitung angesprochen, sind die Bestrahlungsplanungssysteme jedoch zur Berechnung der Dosis außerhalb der Feldgrenzen nicht geeignet. Dessen präzise Berechnung ist, wie im Rahmen dieser Arbeit deutlich wurde, selbst bei kleinen Distanzen zur Strahlenfeldgrenze mit einem erheblichen Rechenaufwand verbunden. Eine Möglichkeit wäre die Hinterlegung eines analytischen Modells in den Bestrahlungsplanungssystemen. Die Basis des Modells könnte die vorliegende Arbeit liefern. Die Dosisverteilungen betreffender Strahlungsfeldkomponenten wären zunächst für ausreichend große Distanzen zur Strahlenfeldachse zu bestimmen und nachfolgend eine mathematische Funktion bestmöglich an die Verteilung anzupassen. Bei Berücksichtigung aller relevanten Strahlungsfeldkomponenten ist, in Abhängigkeit von Dichteinhomogenitäten im Patienten, zumindest in erster Näherung eine hinreichende Dosisbestimmung zu erwarten. Die konkretere Ausgestaltung des analytischen Modells sowie eine mögliche Implementierung in eine Bestrahlungsplanungssoftware könnte in nachfolgenden Studien geprüft bzw. realisiert werden.

Das Fernziel im Umgang mit der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen wäre eine umfassende Risikobewertung hinsichtlich der unerwünschten Wirkungen für den Patienten vor dem Beginn der Strahlentherapie, sowie die patientenindividuelle routinemäßige Optimierung der unvermeidbaren Expositionen. Die vorliegende Arbeit hat einen umfassenden Einblick in die unterschiedlichen Abhängigkeiten bzw. Einflussparameter gegeben, auf dessen Grundlage eine Optimierung möglich sein sollte.

# KAPITEL 7

---

## Zusammenfassung der Arbeit

---

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades: Dr. rer. med.

Titel:

Dekomposition des Strahlungsfeldes eines medizinischen Elektronenlinearbeschleunigers zur Ermittlung der Strahlungsfeldkomponenten und deren Anteil an der Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen anhand von Monte-Carlo-Simulationen mit dem Code MCNP6

Eingereicht von: Dipl.-Phys. Christian Grachtrup

Angefertigt an der Universität Leipzig in der Medizinischen Fakultät, Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie

Betreut von Prof. Dr. med. Thomas Kuhnt / Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Wolf

Einreichung: Februar 2022

Die Bestrahlung eines Patienten mit einem medizinischen Elektronenlinearbeschleuniger ist unvermeidbar mit einer Dosis außerhalb des Therapiestrahls, d. h. mit einer Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen verbunden [Kas83; Kry17; Kry05; Ref06; She85; Van93]. Grund für das Auftreten der Dosis sind einerseits Wechselwirkungsprozesse der Photonen bei der Passage vom Entstehungsort, dem Target, im Elektronenlinearbeschleuniger bis in das Zielvolumen im Patienten, sowie die Durchlassstrahlung der Blenden zur Formung des geometrischen Strahlenfeldes. Der relative Anteil der Komponenten an der Dosis außerhalb der Feldgrenzen hängt insbesondere vom Aufbau des Beschleunigers, von der Photonenenergie, der Feldgröße, der Tiefe im bestrahlten Medium (Patient) und der Distanz von der Strahlenfeldachse ab [Kas83; Kry10].

Die außerhalb der geometrischen Feldgrenzen auftretende Dosis findet bei der Bestrahlungsplanung für den Patienten im Allgemeinen keine Berücksichtigung, was insbesondere daran liegt, dass selbst moderne Bestrahlungsplanungssysteme große Ungenauigkeiten in Bezug auf deren Berechnung aufweisen [Far19; How10; Hua13; Joo11; Kry17; Sán20; Shi19].

Ionisierende Strahlung kann gesundheitsschädigende Wirkung für den Menschen haben. Sie ist ein gut dokumentierter Risikofaktor für die Induktion von Krebserkrankungen [Pre07; Pre03] und deshalb seit vielen Jahren von der Weltgesundheitsorganisation, WHO, als krebserregend anerkannt [Eff08; El 09]. Darüber hinaus kann ionisierende Strahlung

insbesondere Herzkrankheiten [Han93; Iva06; Kre06; Pre03] und Katarakte [Ain09; Bla10; Cho08; Cuc01; Ham93; Jon07; Mer72; Nak06; Ner07; Not66; Osm11; Raf05; Wil97; Wor07] verursachen.

Die großen technischen Entwicklungen der vergangenen Jahrzehnte [Ber04; Buc05; Lic95], insbesondere die Einführung der IMRT, der VMAT und der IGRT [Ver07], die heute, gemeinsam angewendet, als „State of the Art“ im Bereich der Photonen-Strahlentherapie gelten, haben die Möglichkeiten zur Applikationen hoher Strahlendosen im Zielvolumen bei bestmöglicher Schonung von gesundem Gewebe und Risikoorganen erheblich verbessert [Bor06b; Web03]. Diese Verbesserungen der Dosis-Konformierung bezieht sich jedoch auf die Dosis innerhalb der geometrischen Feldgrenzen. Die außerhalb der Feldgrenzen auftretende Dosis blieb dabei ohne Berücksichtigung [Kry17]. Der Zugewinn an Konformität durch die IMRT erhöht die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen [Hal03]. Mit Bezug auf das LNT Modell [Mot04] ergibt sich damit eine Erhöhung des Risikos für eine Zweitkrebskrankung. NEWHAUSER u. a. [New11] gehen von einer Verdopplung des Risikos aus.

Die Erhöhung der Dosis außerhalb der Feldgrenzen durch die Nutzung der IMRT und das hiermit ansteigende Zweitkrebsrisiko sowie der Anstieg der Überlebenszeit nach Krebserkrankungen zeigen die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen mit dem Ziel, die Dosis außerhalb der Feldgrenzen im Sinne des ALARA-Prinzips [Sie59] zu reduzieren.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war eine umfassendere, detailliertere Untersuchung zur Ausbreitung des eine Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen erzeugenden Strahlungsfeldes vom Entstehungsort, dem Target, bis zum Ort der Dosisdeposition im Phantom mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen als dies bisher in den einschlägigen Veröffentlichungen dokumentiert war. Konkret setzte sich die Aufgabenstellung der Arbeit aus 5 Teilaufgaben zusammen, die wie folgt zusammengefasst werden können<sup>1</sup>:

1. Erstellung eines für die Aufgabenstellung geeigneten, validierten virtuellen Modells eines Siemens Primus Beschleunigers mit einem geeigneten Monte-Carlo-Code
2. Untersuchung des Targetsystems hinsichtlich vermeidbarer Strahlungsfeldanteile in Bezug auf die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen
3. Untersuchung des Einflusses der Primär-, Block- und Lamellenblende auf die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen bei jeweils individueller Betrachtung der Blendenblöcke bzw. Lamellensätze
4. Untersuchung des Strahlungsfeldes, das außerhalb der geometrischen Feldgrenzen auf das bestrahlte Phantom trifft, hinsichtlich örtlicher Verteilung und Zusammensetzung
5. Untersuchung des geometrischen Strahlenfeldes hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen dem Emissionswinkel der Photonen aus dem Target und deren Einfluss auf die Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen

Für alle Untersuchungen war zusätzlich der Einfluss der Feldgröße, der Tiefe im bestrahlten Medium (Wasserphantom), der Hauptebene und des Ausgleichsfilters zu ermitteln.

---

<sup>1</sup> Es handelt sich um eine verkürzte Darstellung, die ausführliche Beschreibung findet sich in 2 auf S. 11



---

*Zu Aufgabe 1* Die Grundlage für die Ermittlung der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit war der erfolgreiche Aufbau eines virtuellen Modells, bestehend aus einem Elektronenlinearbeschleuniger und einem Wasserphantom, mit dem Monte-Carlo-Code MCNP6, das die Dosisverteilung sowohl innerhalb als auch außerhalb der geometrischen Feldgrenzen des Strahlenfeldes der Realität entsprechend mit ausreichender Genauigkeit wiedergab. Zur Prüfung der Qualität des Modells wurde eine Validierung in Bezug auf die Dosisverteilungen innerhalb und außerhalb der geometrischen Feldgrenzen des Strahlenfeldes durch Vergleich mit Messdaten erfolgreich durchgeführt.

Wesentlich für die Umsetzung der Aufgaben der vorliegenden Arbeit war die Dekomposition des Strahlungsfeldes. Das Strahlungsfeld wurde in einzelne Komponenten zerlegt. Eine Strahlungsfeldkomponente beinhaltete dabei Photonen, die bei der Passage durch eine zuvor festgelegte Zelle oder Fläche des Modells markiert wurden. Hierdurch war es möglich, die räumliche Ausbreitung des Strahlungsfeldes vom Target bis in das Wasserphantom indirekt nachzuvollziehen. Es wurden Dosis-Halbprofile in beiden Hauptebenen des Beschleunigers von drei quadratischen Feldgrößen ( $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ,  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ,  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ ) in zwei Wassertiefen (10 cm und 20 cm) simuliert und deren Zusammensetzung in Bezug auf die Dosisanteile der Strahlungsfeldkomponenten untersucht. Darüber hinaus wurden mittlere normierte Dosen außerhalb der geometrischen Feldgrenzen bestimmt. Der Einfluss des Ausgleichsfilters wurde ermittelt, indem alle Simulationen zusätzlich ohne im Strahlengang befindlichen Filter durchgeführt wurden. Insgesamt wurden somit 24 Feldkonstellationen simuliert und systematisch untersucht.

*Zu Aufgabe 2* Bei der Untersuchung des Targetsystems zeigte sich, dass, in Abhängigkeit der Feldkonstellation, 92 % bis 97 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen von Photonen erzeugt wurde, die das Targetsystem über die hierfür vorgesehene Austrittsfläche passiert hatten. Dementsprechend wurden 3 % bis 8 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen von Photonen erzeugt, die das Targetsystem über die hierfür nicht vorgesehene Einfassung der Austrittsfläche passierten.

*Zu Aufgabe 3*

*Zur Primärblende* In Abhängigkeit der Feldkonstellation wurden 3 % bis 11 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen von Photonen erzeugt, die die Primärblende passiert hatten und mit hoher Wahrscheinlichkeit in dieser gestreut wurden.

*Zur Blockblende* An den wirksamen Kanten der Blockblende gestreute Photonen erzeugten in der Hauptebene Cross-Plane eine Dosis. In Abhängigkeit der konkreten Feldkonstellation waren dies bis zu 11 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen.

In Abhängigkeit der Feldkonstellation wurden 84 % bis 97 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in der Hauptebene In-Plane von Photonen erzeugt, die die Blockblende innerhalb der geometrischen Feldgrenzen passiert hatten.

Die Durchlassstrahlung eines Blendenblocks erzeugte ausschließlich auf der Seite der Hauptebene eine Dosis außerhalb der Feldgrenzen, auf der sich der Blendenblock befand. In Abhängigkeit der Feldkonstellation waren dies zwischen 2 % und 14 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen. In Bezug auf den Abstand zur Strahlenfeldachse war die Dosis relativ konstant.

Die an der wirksamen Kante eines Blendenblocks gestreuten Photonen erzeugten auf der zum streuenden Blendenblock gegenüberliegenden Seite der Hauptebene eine Dosis. In Abhängigkeit der Feldkonstellation waren dies bis zu 7 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen.

Die an der wirksamen Kante eines Blendenblocks gestreuten Photonen erzeugten auf der Seite der Hauptebene des streuenden Blendenblocks eine Dosis. In Abhängigkeit der Feldkonstellation waren dies zwischen 59 % und 80 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen. Die Höhe der Dosis war dabei nicht durch den Streuvorgang bedingt, sondern durch die Nähe der gestreuten Photonen zur Feldgrenze im Wasserphantom.

Zur Lamellenblende Die Ergebnisse der Blockblende sind grundsätzlich analog auf die Lamellenblende übertragbar. An den wirksamen Kanten der Lamellenblende gestreute Photonen erzeugten in der Hauptebene In-Plane eine Dosis. In Abhängigkeit der konkreten Feldkonstellation waren dies bis zu 12 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen.

In Abhängigkeit der Feldkonstellation wurden 72 % bis 93 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen in der Hauptebene Cross-Plane von Photonen erzeugt, die die Lamellenblende innerhalb der geometrischen Feldgrenzen passiert haben.

Die Durchlassstrahlung eines Lamellensatzes erzeugte ausschließlich auf der Seite der Hauptebene eine Dosis außerhalb der Feldgrenzen, auf der sich der Lamellensatz befand. In Abhängigkeit der Feldkonstellation waren dies zwischen 5 % und 24 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen. In Bezug auf den Abstand zur Strahlenfeldachse war die Dosis relativ konstant.

Die an der wirksamen Kante eines Lamellensatzes gestreuten Photonen erzeugten auf der zum streuenden Lamellensatz gegenüberliegenden Seite der Hauptebene eine Dosis. In Abhängigkeit der Feldkonstellation waren dies bis zu 4 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen.

Die an der wirksamen Kante eines Lamellensatzes gestreuten Photonen erzeugten auf der Seite der Hauptebene des streuenden Lamellensatzes eine Dosis. In Abhängigkeit der Feldkonstellation waren dies zwischen 56 % und 82 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen.

*Zu Aufgabe 4* In Abhängigkeit der Feldkonstellation wurden in In-Plane 53 % bis 83 % und in Cross-Plane 52 % bis 85 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen durch Photonen erzeugt, die innerhalb der geometrischen Feldgrenzen auf das Wasserphantom trafen.

---

In Abhängigkeit der Feldkonstellation wurden in In-Plane 16 % bis 47 % und in Cross-Plane 15 % bis 48 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen durch Photonen erzeugt, die außerhalb der geometrischen Feldgrenzen auf das Wasserphantom trafen. Bei den dosiserzeugenden Photonen handelte es sich einerseits um Durchlassstrahlung der Block- bzw. Lamellenblende und andererseits um Streustrahlung aus dem geometrischen Feld. Letztgenannte Photonen befanden sich in Höhe der Block- bzw. Lamellenblende noch innerhalb der geometrischen Feldgrenzen, trafen jedoch aufgrund von Streuvorgängen im Beschleunigerkopf außerhalb dieser auf das Wasserphantom auf. In Abhängigkeit der konkreten Feldkonstellation wurden hierdurch in In-Plane 13 % bis 34 % und in Cross-Plane 10 % bis 24 % der mittleren Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen erzeugt.

Die durch die Streustrahlung außerhalb der geometrischen Feldgrenzen erzeugte mittlere Dosis war bei ansonsten gleicher Feldkonstellation in der Hauptebene In-Plane größer als in Cross-Plane.

Die Streustrahlung traf in allen betrachteten Feldkonstellationen hauptsächlich in der Nähe zum geometrischen Strahlenfeld auf das Phantom und erzeugte in diesem Bereich eine Dosis.

*Zu Aufgabe 5* Die Ergebnisse zeigten, dass mit wachsendem Emissionswinkel der Photonen zur Strahlenfeldachse deren Beitrag zur Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen deutlich anstieg. Bei mittlerer und kleinster simulierter Feldgröße bewirkte der Ausgleichsfilter eine Reduktion der Dosis außerhalb der Feldgrenzen von Photonen, die unter einem kleinen Winkel vom Target emittiert wurden (von  $0^\circ$  bis  $2^\circ$  zur Strahlenfeldachse), im Vergleich zum Betrieb ohne Ausgleichsfilter. Bei größter simulierter Feldgröße bewirkte der Ausgleichsfilter einen Anstieg der Dosis außerhalb der Feldgrenzen von Photonen, die unter einem größeren Winkel vom Target emittiert wurden (von  $2^\circ$  bis  $6^\circ$  zur Strahlenfeldachse), im Vergleich zum Betrieb ohne Ausgleichsfilter.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit geben einen Einblick in die komplexen Abhängigkeiten zwischen den untersuchten Parametern, der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen und deren Zusammensetzung. Bei den gegenwärtig üblichen Bestrahlungstechniken, wie IMRT und IMAT, die mit einer Vielzahl von Strahlenfeldern unterschiedlicher Form und Größe einhergehen, ist eine adäquate patientenindividuelle Berechnung der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Die Überführung in die praktische Routine der Strahlentherapie ist deshalb ohne geeignete technische Hilfsmittel nicht ohne Weiteres realisierbar. Effektiv wäre die Implementierung von den Anforderungen entsprechenden Algorithmen in die Bestrahlungsplanungssysteme zur Bestimmung der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen.

Das Fernziel im Umgang mit der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen wäre eine umfassende Risikobewertung hinsichtlich der unerwünschten Wirkungen für den Patienten vor dem Beginn der Strahlentherapie, sowie die patientenindividuelle routinemäßige Optimierung der unvermeidbaren Expositionen. Die vorliegende Arbeit hat einen umfassenden Einblick in die unterschiedlichen Abhängigkeiten bzw. Einflussparameter gegeben, auf dessen Grundlage eine Optimierung möglich sein sollte.



---

## Literatur

---

- [Age19] AGENCY, NUCLEAR ENERGY: *PENELOPE 2018: A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport*. 2019: S. 420 (siehe S. 16).
- [Ago03] AGOSTINELLI, S. u. a.: „Geant4—a simulation toolkit“. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (2003), Bd. 506(3): S. 250–303 (siehe S. 16).
- [Ain09] AINSBURY, E A, S D BOUFFLER, W DÖRR, J GRAW, C R MUIRHEAD, A A EDWARDS und J COOPER: „Radiation cataractogenesis: a review of recent studies.“ eng. *Radiat Res* (Juli 2009), Bd. 172(1): S. 1–9 (siehe S. 3, 134).
- [Alj06] ALJARRAH, KHALED, GREG C. SHARP, TONI NEICU und STEVE B. JIANG: „Determination of the initial beam parameters in Monte Carlo linac simulation“. *Medical Physics* (2006), Bd. 33(4): S. 850–858 (siehe S. 25).
- [All05] ALLAN, JAMES M und LOIS B TRAVIS: „Mechanisms of therapy-related carcinogenesis.“ eng. *Nat Rev Cancer* (Dez. 2005), Bd. 5(12): S. 943–955 (siehe S. 4).
- [Alm12] ALMBERG, S. S., J. FRENGEN und T. LINDMO: „Monte Carlo study of in-field and out-of-field dose distributions from a linear accelerator operating with and without a flattening-filter“. *Medical Physics* (2012), Bd. 39(8): S. 5194–5203 (siehe S. 6).
- [Arm10] ARMSTRONG, GREGORY T, MARILYN STOVALL und LESLIE L ROBINSON: „Long-term effects of radiation exposure among adult survivors of childhood cancer: results from the childhood cancer survivor study.“ eng. *Radiat Res* (Dez. 2010), Bd. 174(6): S. 840–850 (siehe S. 4).
- [Bed09] BEDNARZ, BRYAN und X GEORGE XU: „Monte Carlo modeling of a 6 and 18 MV Varian Clinac medical accelerator for in-field and out-of-field dose calculations: development and validation“. *Physics in Medicine & Biology* (2009), Bd. 54(4): N43 (siehe S. 6, 25).
- [Bed08] BEDNARZ, BRYAN und X. GEORGE XU: „A feasibility study to calculate unshielded fetal doses to pregnant patients in 6-MV photon treatments using Monte Carlo methods and anatomically realistic phantoms“. *Medical Physics* (2008), Bd. 35(7Part1): S. 3054–3061 (siehe S. 6).

- [Ber04] BERNIER, JACQUES, ERIC J HALL und AMATO GIACCIA: „Radiation oncology: a century of achievements.“ eng. *Nat Rev Cancer* (Sep. 2004), Bd. 4(9): S. 737–747 (siehe S. 4, 134).
- [Bla10] BLAKELY, E A, N J KLEIMAN, K NERIISHI, G CHODICK, L T CHYLACK, F A CUCINOTTA, A MINAMOTO, E NAKASHIMA, T KUMAGAMI, T KITAOKA, T KANAMOTO, Y KIUCHI, P CHANG, N FUJII und R E SHORE: „Radiation cataractogenesis: epidemiology and biology.“ eng. Bd. 173. 5. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, USA. eablakely@lbl.gov, Mai 2010: S. 709–717 (siehe S. 3, 134).
- [Bor06a] BORTFELD, T., R. SCHMIDT-ULLRICH, W. DE NEVE und WAZER DAVID E.: *Image-Guided IMRT*. Springer Berlin Heidelberg, 2006 (siehe S. 2).
- [Bor06b] BORTFELD, THOMAS: „IMRT: a review and preview.“ eng. *Phys Med Biol* (Juli 2006), Bd. 51(13): R363–79 (siehe S. 5, 134).
- [Bre06] BRENNER, DAVID J. und RAINER K. SACHS: „Estimating radiation-induced cancer risks at very low doses: rationale for using a linear no-threshold approach.“ *Radiation and Environmental Biophysics* (März 2006), Bd. 44(4): S. 253–256 (siehe S. 4).
- [Buc05] BUCCI, M KARA, ALISON BEVAN und MACK 3RD ROACH: „Advances in radiation therapy: conventional to 3D, to IMRT, to 4D, and beyond.“ eng. *CA Cancer J Clin* (März 2005), Bd. 55(2): S. 117–134 (siehe S. 4, 134).
- [Bur10] BURR, KAREN L, JOANNE I ROBINSON, SHUBHRA RASTOGI, MICHAEL T BOYLAN, PHILIP J COATES, SALLY A LORIMORE und ERIC G WRIGHT: „Radiation-induced delayed bystander-type effects mediated by hemopoietic cells.“ eng. *Radiat Res* (Juni 2010), Bd. 173(6): S. 760–768 (siehe S. 4).
- [Car75] CARTER, L.L. und E.D. CASHWELL: „Particle-transport simulation with the Monte Carlo method.“ (Jan. 1975), Bd. (siehe S. 16).
- [Cas08] CASHMORE, JASON: „The characterization of unflattened photon beams from a 6 MV linear accelerator.“ *Physics in Medicine & Biology* (2008), Bd. 53(7): S. 1933 (siehe S. 6).
- [Cha94] CHANEY, E. L., T. J. CULLIP und T. A. GABRIEL: „A Monte Carlo study of accelerator head scatter.“ *Medical Physics* (1994), Bd. 21(9): S. 1383–1390 (siehe S. 6, 125, 126).
- [Cho08] CHODICK, GABRIEL, NURAL BEKIROGLU, MICHAEL HAUPTMANN, BRUCE H ALEXANDER, D MICHAL FREEDMAN, MICHELE MORIN DOODY, LI C CHEUNG, STEVEN L SIMON, ROBERT M WEINSTOCK, ANDRÉ BOUVILLE und ALICE J SIGURDSON: „Risk of cataract after exposure to low doses of ionizing radiation: a 20-year prospective cohort study among US radiologic technologists.“ eng. *Am J Epidemiol* (Sep. 2008), Bd. 168(6): S. 620–631 (siehe S. 3, 134).

- 
- [Cho10] CHOFOR, NDIMOFOR, DIETRICH HARDER, ANTJE RÜHMANN, KAY C WILLBORN, TILO WIEZOREK und BJÖRN POPPE: „Experimental study on photon-beam peripheral doses, their components and some possibilities for their reduction“. *Physics in Medicine & Biology* (2010), Bd. 55(14): S. 4011 (siehe S. 6, 7, 128–130).
- [Cho12] CHOFOR, NDIMOFOR, DIETRICH HARDER, KAY C WILLBORN und BJÖRN POPPE: „Internal scatter, the unavoidable major component of the peripheral dose in photon-beam radiotherapy“. *Physics in Medicine & Biology* (2012), Bd. 57(6): S. 1733 (siehe S. 6, 7, 125, 128, 130).
- [Cov16] COVINGTON, E. L., T. A. RITTER, J. M. MORAN, A. M. OWRANGI und J. I. PRISCIANDARO: „Technical Report: Evaluation of peripheral dose for flattening filter free photon beams“. *Medical Physics* (Juli 2016), Bd. 43(8): S. 4789–4796 (siehe S. 6).
- [Cuc01] CUCINOTTA, F A, F K MANUEL, J JONES, G ISZARD, J MURREY, B DJOJONEGRO und M WEAR: „Space radiation and cataracts in astronauts.“ eng. *Radiat Res* (Nov. 2001), Bd. 156(5 Pt 1): S. 460–466 (siehe S. 3, 134).
- [Del03] DELAPERRIÈRE, MARC: *Primus - Beschreibung grundlegender Funktionen*. Siemens AG, Medical Solutions. 2003 (siehe S. 13–15).
- [DIN 6814-8-00] *DIN 6814-8:2000-12, Begriffe in der radiologischen Technik - Teil 8: Strahlentherapie*. Dez. 2000 (siehe S. vii, 15, 22).
- [Eff08] EFFECTS OF ATOMIC RADIATION, UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE on the: *Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2006 Report, Volume I*. United Nations, 2008 (siehe S. 3, 4, 133).
- [El 09] EL GHISSASSI, FATIHA, ROBERT BAAN, KURT STRAIF, YANN GROSSE, BÉATRICE SECRETAN, VÉRONIQUE BOUVARD, LAMIA BENBRAHIM-TALLAA, NEELA GUHA, CRYSTAL FREEMAN, LAURENT GALICHET und VINCENT COGLIANO: „A review of human carcinogens–part D: radiation.“ eng. *Lancet Oncol* (Aug. 2009), Bd. 10(8): S. 751–752 (siehe S. 3, 133).
- [Far19] FARHOOD, BAGHER und M. GHORBANI: „Dose Calculation Accuracy of Radiotherapy Treatment Planning Systems in Out-of-Field Regions“. *Journal of Biomedical Physics and Engineering* (Apr. 2019), Bd. 9: S. 133–136 (siehe S. 3, 133).
- [Fip01] FIPPEL, M. und F. NÜSSLIN: „Grundlagen der Monte-Carlo-Methode für die Dosisberechnung in der Strahlentherapie“. *Zeitschrift für Medizinische Physik* (2001), Bd. 11(2): S. 73–82 (siehe S. 19).
- [Fol97] FOLLOWILL, DAVID, PAUL GEIS und ARTHUR BOYER: „Estimates of whole-body dose equivalent produced by beam intensity modulated conformal therapy“. *International Journal of Radiation Oncology \* Biology \* Physics* (1997), Bd. 38(3): S. 667–672 (siehe S. 5, 6).

- [Gie01] GIESSEN, PEIT-HEIN van der: „Peridose, a software program to calculate the dose outside the primary beam in radiation therapy“. *Radiotherapy and Oncology* (2001), Bd. 58(2): S. 209–213 (siehe S. 6).
- [Goo13a] GOORLEY, JAMES und BOOTH: *Initial MCNP6 Release Overview - MCNP6 version 1.0*. Los Alamos National Security, LA-UR-13-22934, 2013 (siehe S. 16, 17).
- [Goo13b] GOORLEY, JAMES und BOOTH: *MCNP6 User's Manual, Version 1.0*. Hrsg. von PELOWITZ, DENISE. Los Alamos National Security, LA-CP-13-00634, 2013 (siehe S. 17, 20, 181–183).
- [Hal92] HALBLEIB, J. A., R. P. KENSEK, G. D. VALDEZ, S. M. SELTZER und M. J. BERGER: „ITS: the integrated TIGER series of electron/photon transport codes-Version 3.0“. *IEEE Transactions on Nuclear Science* (Aug. 1992), Bd. 39(4): S. 1025–1030 (siehe S. 16).
- [Hal03] HALL, ERIC J und CHENG-SHIE WUU: „Radiation-induced second cancers: the impact of 3D-CRT and IMRT.“ eng. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* (Mai 2003), Bd. 56(1): S. 83–88 (siehe S. 5, 134).
- [Hal06] HALL, ERIC J.: „Intensity-modulated radiation therapy, protons, and the risk of second cancers“. *International Journal of Radiation Oncology \* Biology \* Physics* (2006), Bd. 65(1): S. 1–7 (siehe S. 4, 5).
- [Ham93] HAMON, M D, R F GALE, I D MACDONALD, O P SMITH, C H COLLIS, D B SKEGGS, L GANDHI und H G PRENTICE: „Incidence of cataracts after single fraction total body irradiation: the role of steroids and graft versus host disease.“ eng. *Bone Marrow Transplant* (Sep. 1993), Bd. 12(3): S. 233–236 (siehe S. 3, 134).
- [Han09] HAN, BIN, BRYAN BEDNARZ und X. GEORGE XU: „A STUDY OF THE SHIELDING USED TO REDUCE LEAKAGE AND SCATTERED RADIATION TO THE FETUS IN A PREGNANT PATIENT TREATED WITH A 6-MV EXTERNAL X-RAY BEAM“. *Health Physics* (2009), Bd. 97(6) (siehe S. 6).
- [Han93] HANCOCK, S L, M A TUCKER und R T HOPPE: „Factors affecting late mortality from heart disease after treatment of Hodgkin's disease.“ eng. *JAMA* (Okt. 1993), Bd. 270(16): S. 1949–1955 (siehe S. 3, 134).
- [Hau16] HAURI, PASCAL, ROGER A. HÄLG, JÜRGEN BESSERER und UWE SCHNEIDER: „A general model for stray dose calculation of static and intensity-modulated photon radiation“. *Medical Physics* (2016), Bd. 43(4): S. 1955–1968 (siehe S. 6).
- [Hen13] HENDEE, WILLIAM R.: *Monte Carlo Techniques in Radiation Therapy*. Hrsg. von JOAO SECO, FRANK VERHAEGEN. CRC Press Taylor & Francis Group, 2013 (siehe S. 16–19).
- [Her06] HERRMANN, T., M. BAUMANN und W. DÖRR: *Klinische Strahlenbiologie: kurz und bündig*. Elsevier, Urban und Fischer, 2006 (siehe S. 4).



- 
- [How10] HOWELL, REBECCA M, SARAH B SCARBORO, S F KRY und DEREK Z YALDO: „Accuracy of out-of-field dose calculations by a commercial treatment planning system“. *Physics in Medicine & Biology* (2010), Bd. 55(23): S. 6999 (siehe S. 3, 133).
- [How06] HOWELL, REBECCA M., NOLAN E. HERTEL, ZHONGLU WANG, JESSON HUTCHINSON und GARY D. FULLERTON: „Calculation of effective dose from measurements of secondary neutron spectra and scattered photon dose from dynamic MLC IMRT for 6MV, 15MV, and 18MV beam energies“. *Medical Physics* (2006), Bd. 33(2): S. 360–368 (siehe S. 5, 6).
- [Hua13] HUANG, JESSIE Y., DAVID S. FOLLOWILL, XIN A. WANG und STEPHEN F. KRY: „Accuracy and sources of error of out-of field dose calculations by a commercial treatment planning system for intensity-modulated radiation therapy treatments“. *Journal of Applied Clinical Medical Physics* (2013), Bd. 14(2): S. 186–197 (siehe S. 3, 6, 133).
- [Huq02] HUQ, M SAIFUL, INDRA J DAS, TODD STEINBERG und JAMES M GALVIN: „A dosimetric comparison of various multileaf collimators.“ eng. *Phys Med Biol* (Juni 2002), Bd. 47(12): N159–70 (siehe S. 6, 15).
- [Iva06] IVANOV, V. K., M. A. MAKSIUTOV, S. YU. CHEKIN, A. V. PETROV, A. P. BIRYUKOV, Z. G. KRUGLOVA, V. A. MATYASH, A. F. TSYB, K. G. MANTON und J. S. KRAVCHENKO: „THE RISK OF RADIATION-INDUCED CEREBROVASCULAR DISEASE IN CHERNOBYL EMERGENCY WORKERS“. *Health Physics* (2006), Bd. 90(3) (siehe S. 3, 134).
- [Jag15] JAGETIC, LYDIA J und WAYNE D NEWHAUSER: „A simple and fast physics-based analytical method to calculate therapeutic and stray doses from external beam, megavoltage x-ray therapy“. *Physics in Medicine & Biology* (2015), Bd. 60(12): S. 4753 (siehe S. 6).
- [Jon07] JONES, JEFFREY A, MICHAEL McCARTEN, KEITH MANUEL, BABY DJOJONEGORO, JOCELYN MURRAY, AL FEIVERSEN und MARY WEAR: „Cataract formation mechanisms and risk in aviation and space crews.“ eng. *Aviat Space Environ Med* (Apr. 2007), Bd. 78(4 Suppl): A56–66 (siehe S. 3, 134).
- [Joo11] JOOSTEN, A, F BOCHUD, S BAECHLER, F LEVI, R-O MIRIMANOFF und R MOECKLI: „Variability of a peripheral dose among various linac geometries for second cancer risk assessment“. *Physics in Medicine & Biology* (2011), Bd. 56(16): S. 5131 (siehe S. 3, 6, 133).
- [Kas83] KASE, KENNETH R., GORAN K. SVENSSON, ANTHONY B. WOLBARST und MICHAEL A. MARKS: „Measurements of dose from secondary radiation outside a treatment field“. *International Journal of Radiation Oncology \* Biology \* Physics* (1983), Bd. 9(8): S. 1177–1183 (siehe S. 2, 3, 6, 133).

- [Kaw16] KAWRAKOW, I., E. MAINEGRAHNG und F. TESSIER: „The EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport“. 2016 (siehe S. 16).
- [Kim01] KIM, JONG OH, JEFFREY V. SIEBERS, PAUL J. KEALL, MARK R. ARNFIELD und RADHE MOHAN: „A Monte Carlo study of radiation transport through multileaf collimators“. *Medical Physics* (2001), Bd. 28(12): S. 2497–2506 (siehe S. 15).
- [Kra11] KRAGL, GABRIELE, FRANZISKA BAIER, STEFFEN LUTZ, DAVID ALBRICH, MÅRTEN DALARYD, BERNHARD KROUPA, TILO WIEZOREK, TOMMY KNÖÖS und DIETMAR GEORG: „Flattening filter free beams in SBRT and IMRT: Dosimetric assessment of peripheral doses“. *Zeitschrift für Medizinische Physik* (2011), Bd. 21(2): S. 91–101 (siehe S. 6, 8).
- [Kre06] KREUZER, M, M KREISHEIMER, M KANDEL, M SCHNELZER, A TSCHENSE und B GROSCHKE: „Mortality from cardiovascular diseases in the German uranium miners cohort study, 1946-1998.“ eng. *Radiat Environ Biophys* (Sep. 2006), Bd. 45(3): S. 159–166 (siehe S. 3, 134).
- [Kri09] KRIEGER, HANNO: *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes*. Hanno Krieger, 2009 (siehe S. 2, 13, 14, 62, 70, 105).
- [Kri05] KRIEGER, HANNO: *Strahlungsquellen für Technik und Medizin*. 2005 (siehe S. 13, 15).
- [Kry17] KRY, STEPHEN F., BRYAN BEDNARZ, REBECCA M. HOWELL, LARRY DAUER, DAVID FOLLOWILL, ERIC KLEIN, HARALD PAGANETTI, BRIAN WANG, CHENG-SHIE WUU und X. GEORGE XU: „AAPM TG 158: Measurement and calculation of doses outside the treated volume from external-beam radiation therapy“. *Medical Physics* (2017), Bd. 44(10): e391–e429 (siehe S. 2, 3, 5, 133, 134).
- [Kry05] KRY, STEPHEN F., MOHAMMAD SALEHPOUR, DAVID S. FOLLOWILL, MARILYN STOVALL, DEBORAH A. KUBAN, R. ALLEN WHITE und ISAAC I. ROSEN: „Out-of-field photon and neutron dose equivalents from step-and-shoot intensity-modulated radiation therapy“. *International Journal of Radiation Oncology \* Biology \* Physics* (2005), Bd. 62(4): S. 1204–1216 (siehe S. 2, 5, 133).
- [Kry09] KRY, STEPHEN F., MOHAMMAD SALEHPOUR, UWE TITT, R. ALLEN WHITE, MARILYN STOVALL und DAVID FOLLOWILL: „Monte Carlo study shows no significant difference in second cancer risk between 6- and 18-MV intensity-modulated radiation therapy“. *Radiotherapy and Oncology* (2009), Bd. 91(1): S. 132–137 (siehe S. 6).

- 
- [Kry07] KRY, STEPHEN F., UWE TITT, DAVID FOLLOWILL, FALK PÖNISCH, OLEG N. VASSILIEV, R. ALLEN WHITE, MARILYN STOVALL und MOHAMMAD SALEHPOUR: „A Monte Carlo model for out-of-field dose calculation from high-energy photon therapy“. *Medical Physics* (2007), Bd. 34(9): S. 3489–3499 (siehe S. 6).
- [Kry06] KRY, STEPHEN F., UWE TITT, FALK PÖNISCH, DAVID FOLLOWILL, OLEG N. VASSILIEV, R. ALLEN WHITE, RADHE MOHAN und MOHAMMAD SALEHPOUR: „A Monte Carlo model for calculating out-of-field dose from a Varian 6MV beam“. *Medical Physics* (2006), Bd. 33(11): S. 4405–4413 (siehe S. 6).
- [Kry10] KRY, STEPHEN F., OLEG N VASSILIEV und RADHE MOHAN: „Out-of-field photon dose following removal of the flattening filter from a medical accelerator“. *Physics in Medicine & Biology* (2010), Bd. 55(8): S. 2155 (siehe S. 3, 6, 7, 15, 125, 128–131, 133).
- [Lic95] LICHTER, A S und T S LAWRENCE: „Recent advances in radiation oncology.“ eng. *N Engl J Med* (Feb. 1995), Bd. 332(6): S. 371–379 (siehe S. 4, 134).
- [Lin01] LIN, SUNG-YEN, TIEH-CHI CHU und JAO-PERNG LIN: „Monte Carlo simulation of a clinical linear accelerator“. *Applied Radiation and Isotopes* (2001), Bd. 55(6): S. 759–765 (siehe S. 25, 27).
- [Lon14] LONSKI, P., M. L. TAYLOR, R. D. FRANICH und T. KRON: „A collimated detection system for assessing leakage dose from medical linear accelerators at the patient plane“. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine* (März 2014), Bd. 37(1): S. 15–23 (siehe S. 6).
- [Maj17] MAJER, MARIJA, LILIANA STOLARCZYK, MARIJKE DE SAINT-HUBERT, DAMIAN KABAT, ŽELJKA KNEŽEVIC, SAVETA MILJANIC, NATALIA MOJESZEK und ROGER HARRISON: „OUT-OF-FIELD DOSE MEASUREMENTS FOR 3D CONFORMAL AND INTENSITY MODULATED RADIOTHERAPY OF A PAEDIATRIC BRAIN TUMOUR.“ eng. *Radiat Prot Dosimetry* (Nov. 2017), Bd. 176(3): S. 331–340 (siehe S. 6).
- [May07] MAYLES, NAHUM und ROSENWALD, Hrsg.: *Handbook of Radiotherapy Physics, Theory and Practice*. Taylor & Francis, 2007 (siehe S. 1, 2).
- [Mer72] MERRIAM, G. R., A. SZECHTER und E. F. FOCHT: „The Effects of Ionizing Radiations on the Eye1“. *Frontiers of Radiation Therapy and Oncology* (1972), Bd.: S. 346–385 (siehe S. 3, 134).
- [Mon08] MONTY, CHARLES W.: „ICRP Publication 103: Recommendations of the ICRP†“. *Radiation Protection Dosimetry* (Mai 2008), Bd. 129(4): S. 500–507 (siehe S. 4).
- [Mot04] MOTHERSILL, CARMEL und COLIN B SEYMOUR: „Radiation-induced bystander effects—implications for cancer.“ eng. *Nat Rev Cancer* (Feb. 2004), Bd. 4(2): S. 158–164 (siehe S. 4, 5, 134).

- [mpi] MPICH2: *MPICH2*. <http://www.mcs.anl.gov/mpi/mpich2> (siehe S. 39).
- [Mul09] MULLENDERS, LEON, MIKE ATKINSON, HERWIG PARETZKE, LAURE SABATIER und SIMON BOUFFLER: „Assessing cancer risks of low-dose radiation.“ eng. *Nat Rev Cancer* (Aug. 2009), Bd. 9(8): S. 596–604 (siehe S. 4).
- [Nak06] NAKASHIMA, EIJI, KAZUO NERIISHI und ATSUSHI MINAMOTO: „A REANALYSIS OF ATOMIC-BOMB CATARACT DATA, 2000-2002: A THRESHOLD ANALYSIS“. *Health Physics* (2006), Bd. 90(2) (siehe S. 3, 134).
- [Ner07] NERIISHI, KAZUO, EIJI NAKASHIMA, ATSUSHI MINAMOTO, SAEKO FUJIWARA, MASAZUMI AKAHOSHI, HIROMU K MISHIMA, TAKASHI KITAOKA und ROY E SHORE: „Postoperative cataract cases among atomic bomb survivors: radiation dose response and threshold.“ eng. *Radiat Res* (Okt. 2007), Bd. 168(4): S. 404–408 (siehe S. 3, 134).
- [New11] NEWHAUSER, WAYNE D. und MARCO DURANTE: „Assessing the risk of second malignancies after modern radiotherapy“. *Nature Reviews Cancer* (Mai 2011), Bd. 11: S. 438 (siehe S. 4, 5, 134).
- [Not66] NOTTER, G, R WALSTAM und L WIKHOLM: „Radiation induced cataracts after radium therapy in children. A preliminary report.“ eng. *Acta Radiol Diagn (Stockh)* (1966), Bd.: Suppl 254:87–9 (siehe S. 3, 134).
- [Olo03] OLOFSSON, JÖRGEN, DIETMAR GEORG und MIKAEL KARLSSON: „A widely tested model for head scatter influence on photon beam output“. *Radiotherapy and Oncology* (2003), Bd. 67(2): S. 225–238 (siehe S. 6).
- [Osm11] OSMAN, IHAB M, HANA ABOUZEID, AUBIN BALMER, MARIE-CLAIRE GAILLARD, PHILIPPE OTHENIN-GIRARD, ALESSIA PICA, RAPHAËL MOECKLI, DANIEL F SCHORDERET und FRANCIS L MUNIER: „Modern cataract surgery for radiation-induced cataracts in retinoblastoma.“ eng. *Br J Ophthalmol* (Feb. 2011), Bd. 95(2): S. 227–230 (siehe S. 3, 134).
- [Paw08] PAWEL, DAVID, DALE PRESTON, DONALD PIERCE und JOHN COLOGNE: „Improved estimates of cancer site-specific risks for A-bomb survivors.“ eng. *Radiat Res* (Jan. 2008), Bd. 169(1): S. 87–98 (siehe S. 4).
- [Pen04] PENA, J, L FRANCO, F GÓMEZ, A IGLESIAS, R LOBATO, J MOSQUERA, A PAZOS, J PARDO, M POMBAR, A RODRÍGUEZ und J SENDÓN: „Commissioning of a medical accelerator photon beam Monte Carlo simulation using wide-field profiles“. *Physics in Medicine & Biology* (2004), Bd. 49(21): S. 4929 (siehe S. 26).
- [Pod05] PODGORSK, E.B., Hrsg.: *Radiation Oncology Physics*. Non-serial Publications. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2005 (siehe S. 1, 2).

- 
- [Pre07] PRESTON, D. L., E. RON, S. TOKUOKA, S. FUNAMOTO, N. NISHI, M. SODA, K. MABUCHI und K. KODAMA: „Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors: 1958-1998“. *Radiation Research* (Juli 2007), Bd. 168(1): S. 1–64 (siehe S. 3, 133).
- [Pre03] PRESTON, DALE L., YUKIKO SHIMIZU, DONALD A. PIERCE, AKIHIKO SUYAMA und KIYOHICO MABUCHI: „Studies of Mortality of Atomic Bomb Survivors. Report 13: Solid Cancer and Noncancer Disease Mortality: 1950–1997“. *Radiation Research* (2003), Bd. 160(4): S. 381–407 (siehe S. 3, 133, 134).
- [Raf05] RAFNSSON, VILHJALMUR, EYDIS OLAFSDOTTIR, JON HRAFNKELSSON, HIROSHI SASAKI, ARSAELL ARNARSSON und FRIDBERT JONASSON: „Cosmic radiation increases the risk of nuclear cataract in airline pilots: a population-based case-control study.“ eng. *Arch Ophthalmol* (Aug. 2005), Bd. 123(8): S. 1102–1105 (siehe S. 3, 134).
- [Ref06] REFT, CHESTER S, RENATE RUNKEL-MULLER und LEON MYRIANTHOPOULOS: „In vivo and phantom measurements of the secondary photon and neutron doses for prostate patients undergoing 18 MV IMRT.“ eng. *Med Phys* (Okt. 2006), Bd. 33(10): S. 3734–3742 (siehe S. 2, 6, 133).
- [Sac05] SACHS, RAINER K und DAVID J BRENNER: „Solid tumor risks after high doses of ionizing radiation.“ eng. *Proc Natl Acad Sci U S A* (Sep. 2005), Bd. 102(37): S. 13040–13045 (siehe S. 4).
- [Sán15] SÁNCHEZ-NIETO, B, R EL-FAR, L IRAZOLA, M ROMERO-EXPÓSITO, J I LAGARES, J C MATEO, J A TERRÓN und F SÁNCHEZ DOBLADO: „Analytical model for photon peripheral dose estimation in radiotherapy treatments“. *Biomedical Physics & Engineering Express* (2015), Bd. 1(4): S. 045205 (siehe S. 6).
- [Sán20] SÁNCHEZ-NIETO, B, K N MEDINA-ASCANIO, J L RODRÍGUEZ-MONGUA, E DOERNER und I ESPINOZA: „Study of out-of-field dose in photon radiotherapy: A commercial treatment planning system versus measurements and Monte Carlo simulations.“ eng. *Med Phys* (Sep. 2020), Bd. 47(9): S. 4616–4625 (siehe S. 3, 133).
- [Sch06] SCHLEGEL, W., T. BORTFELD und A.-L. GROSU, Hrsg.: *New Technologies in Radiation Oncology*. Springer, 2006 (siehe S. 1, 2).
- [Sch17] SCHNEIDER, CHRISTOPHER W., WAYNE D. NEWHAUSER, LYDIA J. WILSON, UWE SCHNEIDER, ROBERT KADERKA, SAVETA MILJANIĆ, ŽELJKA KNEŽEVIĆ, LILIANA STOLARCZYK, MARCO DURANTE und ROGER M. HARRISON: „A descriptive and broadly applicable model of therapeutic and stray absorbed dose from 6 to 25 MV photon beams“. *Medical Physics* (2017), Bd. 44(7): S. 3805–3814 (siehe S. 6).

- [Ser06] SERRANO, B., A. HACHEM, E. FRANCHISSEUR, J. HÉRAULT, S. MARCIÉ, A. COSTA, R. J. BENSADOUN, J. BARTHE und J. P. GÉRARD: „Monte Carlo simulation of a medical linear accelerator for radiotherapy use“. *Radiation Protection Dosimetry* (2006), Bd. 119(1-4): S. 506–509 (siehe S. 26).
- [She97] SHEPHERD, STEPHEN F., PETER J. CHILDS, JOHN D. GRAHAM, ALAN P. WARRINGTON und MICHAEL BRADA: „Whole body doses from linear accelerator-based stereotactic radiotherapy“. *International Journal of Radiation Oncology \* Biology \* Physics* (1997), Bd. 38(3): S. 657–665 (siehe S. 6).
- [She85] SHERAZI, SHIRIN und KENNETH R. KASE: „Measurements of dose from secondary radiation outside a treatment field: Effects of wedges and blocks“. *International Journal of Radiation Oncology \* Biology \* Physics* (1985), Bd. 11(12): S. 2171–2176 (siehe S. 2, 6, 133).
- [Shi19] SHINE, N S, RAGHUKUMAR PARAMU, M GOPINATH, R C JAON BOS und P M JAYADEVAN: „Out-of-Field Dose Calculation by a Commercial Treatment Planning System and Comparison by Monte Carlo Simulation for Varian TrueBeam(®)“. eng. *J Med Phys* (Juli 2019), Bd. 44(3): S. 156–175 (siehe S. 3, 133).
- [Sie12] SIEMENS: *Digital Linear Accelerator, Physics Primer*. Techn. Ber. 2012 (siehe S. 15).
- [Sie59] SIEVERT, ROLF M.: „ICRP Publication 1: Recommendations of the ICRP†“. *Radiation Protection Dosimetry* (1959), Bd. (siehe S. v, 5, 134).
- [Smi10] SMITH, MALCOLM A, NITA L SEIBEL, SEAN F ALTEKRUSE, LYNN A G RIES, DANIELLE L MELBERT, MAURA O’LEARY, FRANKLIN O SMITH und GREGORY H REAMAN: „Outcomes for children and adolescents with cancer: challenges for the twenty-first century.“ eng. *J Clin Oncol* (Mai 2010), Bd. 28(15): S. 2625–2634 (siehe S. 5).
- [Ste99] STERN, ROBIN L.: „Peripheral dose from a linear accelerator equipped with multileaf collimation“. *Medical Physics* (1999), Bd. 26(4): S. 559–563 (siehe S. 6).
- [Tad13] TADDEI, PHILLIP J, WASSIM JALBOUT, REBECCA M HOWELL, NABIL KHATER, FADY GEARA, KENNETH HOMANN und WAYNE D NE-WHAUSER: „Analytical model for out-of-field dose in photon craniospinal irradiation“. *Physics in Medicine & Biology* (2013), Bd. 58(21): S. 7463 (siehe S. 6).
- [Tak65] TAKAHASHI, S: „Conformation radiotherapy. Rotation techniques as applied to radiography and radiotherapy of cancer.“ eng. *Acta Radiol Diagn (Stockh)* (1965), Bd.: Suppl 242:1+ (siehe S. 1).

- 
- [Tit06] TITT, U., O. N. VASSILIEV, F. PÖNISCH, L. DONG, H. LIU und R. MOHAN: „A flattening filter free photon treatment concept evaluation with Monte Carlo“. *Medical Physics* (2006), Bd. 33(6Part1): S. 1595–1602 (siehe S. 6, 14, 15).
- [Tub09] TUBIANA, MAURICE: „Can we reduce the incidence of second primary malignancies occurring after radiotherapy? A critical review“. *Radiotherapy and Oncology* (2009), Bd. 91(1): S. 4–15 (siehe S. 4).
- [Van97] VAN DER GIESSEN, PIET-HEIN und HERMAN W. J. BIERHUIZEN: „Comparison of measured and calculated peripheral doses in patients undergoing radiation therapy“. *Radiotherapy and Oncology* (1997), Bd. 42(3): S. 265–270 (siehe S. 6).
- [Van93] VAN DER GIESSEN, PIET-HEIN und COEN W. HURKMANS: „Calculation and measurement of the dose to points outside the primary beam for CO-60 gamma radiation“. *International Journal of Radiation Oncology \* Biology \* Physics* (1993), Bd. 27(3): S. 717–724 (siehe S. 2, 6, 133).
- [Ver07] VERELLEN, DIRK, MARK DE RIDDER, NADINE LINTHOUT, KOEN TOURNEL, GUY SOETE und GUY STORME: „Innovations in image-guided radiotherapy.“ eng. *Nat Rev Cancer* (Dez. 2007), Bd. 7(12): S. 949–960 (siehe S. 4, 134).
- [Ver03] VERHAEGEN, FRANK und JAN SEUNTJENS: „Monte Carlo modelling of external radiotherapy photon beams“. *Physics in Medicine & Biology* (2003), Bd. 48(21): R107 (siehe S. 15, 16, 26).
- [Wak12] WAKEFORD, RICHARD: „Cancer risk modelling and radiological protection“. *Journal of Radiological Protection* (2012), Bd. 32(1): N89 (siehe S. 4).
- [Web03] WEBB, S: „The physical basis of IMRT and inverse planning.“ eng. *Br J Radiol* (Okt. 2003), Bd. 76(910): S. 678–689 (siehe S. 5, 134).
- [Wie09] WIEZOREK, TILO, DIETMAR GEORG, MICHAEL SCHWEDAS, HENNING SALZ und THOMAS G. WENDT: „Experimental determination of peripheral photon dose components for different IMRT techniques and linear accelerators“. *Zeitschrift für Medizinische Physik* (2009), Bd. 19(2): S. 120–128 (siehe S. 6).
- [Wie08] WIEZOREK, TILO, ALEXANDER VOIGT, NOREEN METZGER, DIETMAR GEORG, MICHAEL SCHWEDAS, HENNING SALZ und THOMAS G. WENDT: „Experimental Determination of Peripheral Doses for Different IMRT Techniques Delivered by a Siemens Linear Accelerator“. *Strahlentherapie und Onkologie* (Feb. 2008), Bd. 184(2): S. 73–79 (siehe S. 6).
- [Wij19] WIJESOORIYA, KRISHNI: „Part I: Out-of-field dose mapping for 6X and 6X-flattening-filter-free beams on the TrueBeam for extended distances.“ eng. *Med Phys* (Feb. 2019), Bd. 46(2): S. 868–876 (siehe S. 6).

- [Wil97] WILDE, GUNILLA und JOHAN SJÖSTRAND: „A clinical study of radiation cataract formation in adult life following Y irradiation of the lens in early childhood“. *British Journal of Ophthalmology* (1997), Bd. 81(4): S. 261–266 (siehe S. 3, 134).
- [Wol15] WOLF, ULRICH: *Private Kommunikation mit Siemens*. 2015 (siehe S. 26).
- [Wor07] WORGUL, B V, Y I KUNDIYEV, N M SERGIYENKO, V V CHUMAK, P M VITTE, C MEDVEDOVSKY, E V BAKHANOVA, A K JUNK, O Y KYRYCHENKO, N V MUSIJACHENKO, S A SHYLO, O P VITTE, S XU, X XUE und R E SHORE: „Cataracts among Chernobyl clean-up workers: implications regarding permissible eye exposures.“ eng. *Radiat Res* (Feb. 2007), Bd. 167(2): S. 233–243 (siehe S. 3, 134).
- [X-503] X-5, MONTE-CARLO-TEAM: *MCNP - Version 5, Vol. I: Overview and Theory*. LA-UR-03-1987, 2003 (siehe S. 16, 17, 19, 20).
- [Yoo17] YOON, JIHYUNG, DAVID HEINS, XIAODONG ZHAO, MARY SANDERS und RUI ZHANG: „Measurement and modeling of out-of-field doses from various advanced post-mastectomy radiotherapy techniques“. *Physics in Medicine & Biology* (2017), Bd. 62(23): S. 9039 (siehe S. 6).
- [Zha21] ZHANG, YAN, SHAOJIE YAN, ZHEN CUI, YUNGANG WANG, ZHENJIANG LI, YONG YIN, BAOSHENG LI, HONG QUAN und JIAN ZHU: „Out-of-field dose assessment for a 1.5 T MR-Linac with optically stimulated luminescence dosimeters.“ eng. *Med Phys* (März 2021), Bd. (siehe S. 6).



---

## Abbildungsverzeichnis

---

1.1	Gegenüberstellung der Dosisverteilungen der dreidimensionalen konformalen Strahlentherapie (links) und der intensitätsmodulierten Strahlentherapie (rechts). Strahlenfelder homogener Fluenz führen grundsätzlich zu einer konvexen Dosisverteilung. Befindet sich ein Risikoorgan in der Einbuchtung eines konkav geformten Tumors, erhält dieses zwangsläufig die gleiche Dosis wie der Tumor. Bei der IMRT wird die Fluenz jedes Strahlenfeldes derart angepasst, dass der Tumor eine höhere Fluenz erhält als die Felder, die das Risikoorgan passieren. Die Kombination ausreichend vieler Einzelfelder liefert dann die optimierte Dosisverteilung [Bor06a]. Die Abbildung wurde aus T. BORTFELD u. a. [Bor06a] nachskizziert. . . . .	2
1.2	Schematische, nicht maßstabgerechte Darstellung zur Entstehung der Dosis außerhalb der geometrischen Feldgrenzen. Das geometrische Strahlenfeld ist orange dargestellt. Ausgewählte, mögliche Trajektorien von Photonen, die eine Dosis außerhalb der Feldgrenzen erzeugen, sind als farbige bzw. schwarze Linien dargestellt. Grün: Durchlassstrahlung durch Blockblende, Violett: Streuung an der wirksamen Kante der Blockblende, Schwarz: Streuung in der Primärblende, Blau: Streuung im Ausgleichsfilter, Rot: Streuung im Wasserphantom. Der betrachtete Punkt P1 steht dabei stellvertretend für einen beliebigen Punkt im Patienten außerhalb der geometrischen Feldgrenzen. Auf die Darstellung der Lamellenblende wurde aus Gründen der Übersicht verzichtet. . . . .	3
1.3	Dosis-Wirkungs-Beziehung für strahleninduzierte Krebserkrankungen übernommen aus ERIC J. HALL [Hal06] und NEWHAUSER u. a. [New11]. Daten der Überlebenden der Atombombenabwürfe sind der „Goldstandard“ (0,1 Sv bis 2,5 Sv). Erhebliche Unsicherheiten bestehen bei kleineren und größeren Dosen [Hal06; New11]. . . . .	5
3.1	Schematischer Aufbau eines medizinischen Elektronenlinearbeschleunigers mit Bezug auf die relevanten Komponenten zur Strahlerzeugung und -formung in Anlehnung an [Del03](Y-Z Schnitt). . . . .	14
3.2	Winkelverteilung von Bremsstrahlungsphotonen als Funktion der Elektronenenergie $E$ an einem dicken Wolframtarget. Mit steigender Energie verschieben sich die Intensitätsmaxima zunehmend in die Einstrahlrichtung der Elektronen [Kri09]. . . . .	14

3.3	Schematische Darstellung von Dosishalbprofilen mit und ohne Ausgleichsfilter im Strahlengang in 10 cm Wassertiefe. Ohne Ausgleichsfilter ist die Dosis auf der Zentralachse etwa um den Faktor 2 größer [Tit06]. . . . .	14
3.4	Schematische Schnittdarstellung (Y-Z Ansicht) der Lamellenblende des simulierten Siemens Linearbeschleunigers [Sie12, S. 99]. . . . .	15
3.5	Schematische, vereinfachte Schnittdarstellung (Y-Z Ansicht) zur Verdeutlichung des Nut- und Federdesigns. . . . .	15
3.6	Beispiel zur numerischen Integration mit der Monte-Carlo-Methode. Mit $\xi_i$ als Zufallszahl auf dem Intervall $[a, b]$ ist eine erste Annäherung gegeben durch $A_1 = (b - a)f(\xi_1)$ , eine Zweite durch $\tilde{A}_2 = \frac{1}{2} \{(b - a)f(\xi_2) + A_1\}$ . Nach $N$ Iterationen mit $N$ Zufallszahlen ergibt sich das genäherte Ergebnis aus $A_N = \frac{b-a}{N} \sum_{i=1}^N f(\xi_i) \approx A = \int_a^b f(x) dx$ (analog nach [Hen13]). . . . .	16
3.7	Die Abbildung zeigt beispielhaft die Teilchenhistorie eines Photons. Durch den Comptoneffekt ( $C$ ) und die Paarbildung ( $P$ ) werden sekundäre Photonen ( $p$ ), Elektronen ( $e^-$ ) und ein Positron ( $e^+$ ) erzeugt [Hen13; X-503]. . . . .	16
4.1	Maßstabsgerechter Y-Z Schnitt des modellierten Strahlerkopfes auf der Zentralachse ( $X=0$ cm). Die Materialien sind farblich hinterlegt. Detailliertere Information hierzu finden sich in Tab. 4.1 S. 24. . . . .	23
4.2	Maßstabsgerechter X-Z Schnitt des modellierten Strahlerkopfes auf der Zentralachse ( $Y=0$ cm). Die Materialien sind farblich hinterlegt. Detailliertere Information hierzu finden sich in Tab. 4.1 S. 24. . . . .	23
4.3	Detailaufnahmen einer Lamelle des realen Beschleunigers . . . . .	25
4.4	Maßstabsgerechter Y-Z Schnitt eines Satzes der modellierten Lamellenblende. Der Schnitt wurde mit Hilfe des „Geometry Plotter“, einer Funktion des MCNP6-Codes zur Visualisierung der in der Input-Datei programmierten Zellen, erzeugt. Zusätzlich wurde auf der linken Seite ein vergrößerter Ausschnitt zur Verdeutlichung der Distanz zwischen aneinander angrenzenden Lamellen eingefügt. Gut erkennbar ist die Ausrichtung der einzelnen Lamellen entsprechend der Strahldivergenz sowie das Nut- und Feder-Design (rot markiert) und die Kugellaufbahnen (grün markiert). . . . .	26
4.5	X-Z Schnitt des modellierten Wasserphantoms auf der Zentralachse ( $Y=0$ cm) zur Generierung der Tiefendosisverteilung. Die aus Wasser bestehenden Zellen zur Dosiserfassung sind in rot, das geometrische Strahlenfeld in orange eingezeichnet. Der Y-Z Schnitt ist identisch. Die Skizze ist nicht maßstabsgerecht. Die Zellen zur Dosiserfassung sind zur besseren Visualisierung im Vergleich zum Wasserphantom deutlich größer dargestellt. . . . .	28
4.6	X-Z bzw. X-Y Schnitt des modellierten Wasserphantoms zur Generierung der Dosishalbprofile in 10 cm bzw. 20 cm Wassertiefe. Die aus Wasser bestehenden Zellen zur Dosiserfassung sind in rot, das geometrische Strahlenfeld in orange eingezeichnet. Der Y-Z Schnitt ist identisch zum X-Z Schnitt. Die Skizzen sind nicht maßstabsgerecht. Die Zellen zur Dosiserfassung sind zur besseren Visualisierung im Vergleich zum Wasserphantom deutlich größer dargestellt. . . . .	28

- 4.7 X-Z Schnitt ausgewählter Baugruppen des Beschleunigerkopfes und des Wasserphantoms auf der Strahlenfeldachse ( $Y=0$  cm) zur Veranschaulichung der Markierung von Photonen durch das **Targetsystem** (nicht maßstabsgerecht). Die Markierung der Photonen erfolgt bei der Passage der Flächen Nr. 8 (rot) und Nr. 9 (blau) und soll an zwei Beispielen erläutert werden: Das Photon P2, dessen Trajektorie durch einen grünen Pfeil dargestellt wird, verlässt das Targetsystem nach einem Streuprozess über die Fläche Nr. 9 und erhält hierbei eine Markierung durch die Fläche Nr. 9. Das Photon P1 (gelber Pfeil) wird durch Fläche Nr. 8 markiert. Die Lamellenblende, der Spiegel und das Dosismonitorsystem wurden aus Gründen der Übersicht nicht eingezeichnet. . . . . 31
- 4.8 X-Z Schnitt ausgewählter Baugruppen des Beschleunigerkopfes und des Wasserphantoms auf der Strahlenfeldachse ( $Y=0$  cm) zur Veranschaulichung der Markierung von Photonen durch die **Primärblende** (nicht maßstabsgerecht). Die Markierung der Photonen erfolgt ausschließlich bei der Passage der aus einer einzigen Zelle bestehenden Primärblende (Zelle Nr. 20, blau dargestellt) und soll an drei Beispielen erläutert werden: Das Photon P1, dessen Trajektorie durch einen roten Pfeil dargestellt wird, erhält keine Markierung, da es die Zelle der Primärblende nicht passiert. Die Photonen P2 (hellblauer Pfeil) und P3 (grüner Pfeil) erhalten eine Markierung. Die Lamellenblende, der Spiegel und das Dosismonitorsystem wurden aus Gründen der Übersicht nicht eingezeichnet. . . . . 32
- 4.9 X-Z Schnitt ausgewählter Baugruppen des Beschleunigerkopfes und des Wasserphantoms auf der Strahlenfeldachse ( $Y=0$  cm) zur Veranschaulichung der Markierung von Photonen durch den **Ausgleichsfilter** (nicht maßstabsgerecht). Die Markierung der Photonen erfolgt ausschließlich bei der Passage des aus einer einzigen Zelle bestehenden Ausgleichsfilters (Zelle Nr. 30, grün dargestellt) und soll an drei Beispielen erläutert werden: Die Photonen P1 und P2, dessen Trajektorien durch einen roten bzw. grünen Pfeil dargestellt werden, erhalten eine Markierung, da sie die Zelle des Ausgleichsfilters passieren. Das Photon P3 (hellblauer Pfeil) erhält keine Markierung. Die Lamellenblende, der Spiegel und das Dosismonitorsystem wurden aus Gründen der Übersicht nicht eingezeichnet. . . . . 33
- 4.10 X-Z Schnitt ausgewählter Baugruppen des Beschleunigerkopfes und des Wasserphantoms auf der Strahlenfeldachse ( $Y=0$  cm) zur Veranschaulichung der Markierung von Photonen durch die **Winkelanalysescheibe** (nicht maßstabsgerecht). Die Markierung der Photonen erfolgt ausschließlich bei der Passage betreffender Zellen der Winkelanalysescheibe und soll an zwei Beispielen erläutert werden: Das Photon P1, dessen Trajektorie durch einen grünen Pfeil dargestellt wird, erhält eine Markierung durch die Zelle Nr. 500. Das Photon P2 (rote Trajektorie) erhält eine Markierung durch die Zelle Nr. 502. Der Spiegel und das Dosismonitorsystem wurden aus Gründen der Übersicht nicht eingezeichnet. . . . . 34

- 4.11 Y-Z Schnitt ausgewählter Baugruppen des Beschleunigerkopfes und des Wasserphantoms auf der Strahlenfeldachse ( $X=0$  cm) zur Veranschaulichung der Markierung von Photonen an der **Blockblende** (nicht maßstabsgerecht). Die Markierung der Photonen erfolgt ausschließlich bei der Passage betreffender Zellen bzw. Flächen und soll an zwei Beispielen erläutert werden: Das Photon P1, dessen Trajektorie durch einen grünen Pfeil dargestellt wird, erhält eine Markierung durch die Zelle Nr. 602, die Fläche Nr. 253 und die Zelle Nr. 605. Das Photon P2 (rote Trajektorie) erhält eine Markierung durch die Zelle Nr. 602, die Fläche Nr. 203 und die Zelle Nr. 604. Der Spiegel und das Dosismonitorsystem wurden aus Gründen der Übersicht nicht eingezeichnet. . . . . 35
- 4.12 X-Z Schnitt ausgewählter Baugruppen des Beschleunigerkopfes und des Wasserphantoms auf der Strahlenfeldachse ( $Y=0$  cm) zur Veranschaulichung der Markierung von Photonen an der **Lamellenblende** (nicht maßstabsgerecht). Die Markierung der Photonen erfolgt ausschließlich bei der Passage betreffender Zellen und soll an drei Beispielen erläutert werden: Das Photon P1, dessen Trajektorie durch einen grünen Pfeil dargestellt wird, erhält eine Markierung durch die Zellen Nr. 613 und 618, das Photon P2 (rote Trajektorie) durch die Zellen Nr. 611 und Nr. 615. Das Photon P3 (blaue Trajektorie) wird durch die Zelle Nr. 611 und nach einem Mehrfach-Streuprozess durch die Zelle Nr. 617 markiert. Der Spiegel und das Dosismonitorsystem wurden aus Gründen der Übersicht nicht eingezeichnet. . . . . 36
- 4.13 Y-Z Schnitt ausgewählter Baugruppen des Beschleunigerkopfes und des Wasserphantoms auf der Strahlenfeldachse ( $X=0$  cm) zur Veranschaulichung der Markierung von Photonen durch unmittelbar oberhalb des **Wasserphantoms** positionierte Zellen (nicht maßstabsgerecht). Der X-Z Schnitt ist bezüglich der Größe und der Anzahl der markierenden Zellen identisch (Abb. 4.14, S. 38). Die Markierung der Photonen erfolgt ausschließlich bei der Passage betreffender Zellen und soll an drei Beispielen erläutert werden: Das Photon P1, dessen Trajektorie durch einen blauen Pfeil dargestellt wird, erhält eine Markierung durch die Zelle Nr. 630, das Photon P2 (grüne Trajektorie) durch die Zelle Nr. 635, das Photon P3 (rote Trajektorie) durch die Zelle Nr. 636. Der Spiegel und das Dosismonitorsystem wurden aus Gründen der Übersicht nicht eingezeichnet. . . . . 37
- 4.14 X-Y Schnitt an der Strahleintrittsfläche des Wasserphantoms zur Veranschaulichung der Markierung von Photonen durch unmittelbar oberhalb des Wasserphantoms positionierte Zellen. . . . . 38
- 5.1 Gemessene und simulierte relative **Tiefendosiskurven** auf der Strahlenfeldachse bei unterschiedlichen mittleren Elektronenenergien  $E_{EL}$ . Die Normierung erfolgte auf den Dosiswert in 10 cm Wassertiefe. Der untere Teil zeigt die Abweichung der simulierten von den gemessenen Werten. . . . . 43

5.2	Simulierte Dosishalbprofile beider Hauptebenen in Abhängigkeit vom <b>Elektronenstrahldurchmesser</b> in X-Richtung ( $d_X=2,4\text{ mm}$ , $d_X=2,2\text{ mm}$ , $d_X=2,0\text{ mm}$ ) und konstantem Durchmesser in Y-Richtung ( $d_Y=2,0\text{ mm}$ ) bei einer Feldgröße von $20\times 20\text{ cm}^2$ . Zusätzlich sind die Abweichungen zur Messung sowie die gemessenen Halbprofile selbst ersichtlich. . . . .	45
5.3	Simulierte Dosishalbprofile beider Hauptebenen in Abhängigkeit vom <b>Elektronenstrahldurchmesser</b> in X-Richtung ( $d_X=1,8\text{ mm}$ , $d_X=1,6\text{ mm}$ , $d_X=1,4\text{ mm}$ ) und konstantem Durchmesser in Y-Richtung ( $d_Y=2,0\text{ mm}$ ) bei einer Feldgröße von $20\times 20\text{ cm}^2$ . Zusätzlich sind die Abweichungen zur Messung sowie die gemessenen Halbprofile selbst ersichtlich. . . . .	46
5.4	Simulierte Dosishalbprofile beider Hauptebenen bei einer mittleren Elektronenenergie von $E_{\text{El.}}=6,33\text{ MeV}$ und einem Elektronenstrahldurchmesser von $d_X=2,2\text{ mm}$ bzw. $d_Y=2,0\text{ mm}$ zur Validierung der ermittelten Elektronenstrahlungsquellenparameter bei einer Feldgröße von $10\times 10\text{ cm}^2$ . Zusätzlich sind die Abweichungen zur Messung sowie die gemessenen Halbprofile selbst ersichtlich. . . . .	47
5.5	Simulierte Dosishalbprofile beider Hauptebenen bei einer mittleren Elektronenenergie von $E_{\text{El.}}=6,33\text{ MeV}$ und einem Elektronenstrahldurchmesser von $d_X=2,2\text{ mm}$ bzw. $d_Y=2,0\text{ mm}$ zur Validierung der ermittelten Elektronenstrahlungsquellenparameter bei einer Feldgröße von $5\times 5\text{ cm}^2$ . Zusätzlich sind die Abweichungen zur Messung sowie die gemessenen Halbprofile selbst ersichtlich. . . . .	47
5.6	Photonenmarkierende Flächen und Zellen am Targetsystem, der Primärblende und Ausgleichsfilter in der Übersicht. . . . .	48
5.7	Photonenmarkierende Flächen und Zellen am Targetsystem, der Primärblende und Ausgleichsfilter in der Übersicht. . . . .	51
5.8	Photonenmarkierende Flächen und Zellen am Targetsystem, der Primärblende und Ausgleichsfilter in der Übersicht. . . . .	53
5.9	Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise <b>mit</b> und <b>ohne Ausgleichsfilter</b> bei einer Feldgröße von $20\times 20\text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von im <b>Targetsystem</b> , in der <b>Primärblende</b> und im <b>Ausgleichsfilter</b> , bzw. dessen Hülle in der Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter, generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . .	54
5.10	Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise <b>mit</b> und <b>ohne Ausgleichsfilter</b> bei einer Feldgröße von $10\times 10\text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von im <b>Targetsystem</b> , in der <b>Primärblende</b> und im <b>Ausgleichsfilter</b> , bzw. dessen Hülle in der Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter, generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . .	55

5.11	Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise <b>mit</b> und <b>ohne Ausgleichsfilter</b> bei einer Feldgröße von $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von im <b>Targetsystem</b> , in der <b>Primärblende</b> und im <b>Ausgleichsfilter</b> , bzw. dessen Hülle in der Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter, generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . .	56
5.12	Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld sowie im <b>Target</b> , in der <b>Primärblende</b> und im <b>Ausgleichsfilter</b> generierte Strahlungsfeldkomponenten in der Betriebsweise <b>mit Ausgleichsfilter</b> für alle simulierten Feldkonstellationen. . . . .	58
5.13	Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld sowie im <b>Target</b> , in der <b>Primärblende</b> und <b>in der Hülle des Ausgleichsfilters</b> generierte Strahlungsfeldkomponenten in der Betriebsweise <b>ohne Ausgleichsfilter</b> für alle simulierten Feldkonstellationen. . . . .	59
5.14	Photonenmarkierende Zellen der Winkelanalysescheibe. Zelle Nr. 500: Winkelbereich von $0^\circ$ bis $1^\circ$ um die Strahlenfeldachse, Zelle Nr. 501: Winkelbereich von $1^\circ$ bis $2^\circ$ um die Strahlenfeldachse, u.s.w. . . . .	60
5.15	Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise <b>mit</b> und <b>ohne Ausgleichsfilter</b> bei einer Feldgröße von $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der <b>Winkelanalysescheibe</b> generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . .	63
5.16	Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise <b>mit</b> und <b>ohne Ausgleichsfilter</b> bei einer Feldgröße von $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der <b>Winkelanalysescheibe</b> generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . .	64
5.17	Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise <b>mit</b> und <b>ohne Ausgleichsfilter</b> bei einer Feldgröße von $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der <b>Winkelanalysescheibe</b> generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . .	65
5.18	Photonenmarkierende Flächen und Zellen an der Blockblende. . . . .	66

- 5.19 Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Blockblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 73
- 5.20 Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Blockblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 74
- 5.21 Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Blockblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 75
- 5.22 Dosishalbprofile in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Blockblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 76
- 5.23 Dosishalbprofile in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Blockblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 77
- 5.24 Dosishalbprofile in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Blockblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 78
- 5.25 Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen ausgewählte Halbprofile von in der **Blockblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 79

- 5.26 Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen ausgewählte Halbprofile von in der **Blockblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 80
- 5.27 Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen ausgewählte Halbprofile von in der **Blockblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 81
- 5.28 Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld sowie in der **Blockblende** generierte Strahlungsfeldkomponenten in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** für alle simulierten Feldkonstellationen. . . . . 82
- 5.29 Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld sowie in der **Blockblende** generierte Strahlungsfeldkomponenten in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** für alle simulierten Feldkonstellationen. . . . . 83
- 5.30 Photonenmarkierende Zellen an der Lamellenblende. . . . . 84
- 5.31 Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Lamellenblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 88
- 5.32 Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Lamellenblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 89
- 5.33 Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Lamellenblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 90



- 5.34 Dosishalbprofile in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Lamellenblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 91
- 5.35 Dosishalbprofile in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Lamellenblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 92
- 5.36 Dosishalbprofile in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von in der **Lamellenblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 93
- 5.37 Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen ausgewählte Halbprofile von in der **Lamellenblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 94
- 5.38 Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen ausgewählte Halbprofile von in der **Lamellenblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 95
- 5.39 Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen ausgewählte Halbprofile von in der **Lamellenblende** generierten Komponenten des Strahlungsfeldes. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 96
- 5.40 Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld sowie in der **Lamellenblende** generierte Strahlungsfeldkomponenten in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** für alle simulierten Feldkonstellationen. . . . . 98

- 5.41 Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{OfD}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld sowie in der **Lamellenblende** generierte Strahlungsfeldkomponenten in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** für alle simulierten Feldkonstellationen. . . . . 99
- 5.42 Unmittelbar oberhalb des Wasserphantoms positionierte, photonenmarkierende Zellen an der Strahleneintrittsseite (X-Y Schnitt). . . . . 100
- 5.43 Y-Z Schnitt ausgewählter Baugruppen des Beschleunigerkopfes und des Wasserphantoms auf der Strahlenfeldachse ( $X=0$  cm) zur Veranschaulichung der Markierung von Photonen durch unmittelbar oberhalb des **Wasserphantoms** positionierte Zellen (nicht maßstabsgerecht). Das Photon P2 (grüne Trajektorie) befindet sich in Höhe der Blockblende noch innerhalb der geometrischen Feldgrenzen und wird entsprechend durch die Zelle Nr. 605 markiert. Während der Passage verlässt es die Feldgrenzen, trifft schließlich außerhalb der selbigen auf das Wasserphantom und wird durch Zelle Nr. 635 markiert. . . . . 101
- 5.44 Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  **$20 \times 20 \text{ cm}^2$** . Durchgehende schwarze Linien zeigen Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes, die an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generiert wurden. Punktlinien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes in 10 cm Wassertiefe, sofern diese im Diagramm für 20 cm Wassertiefe eingetragen sind. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 108
- 5.45 Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  **$10 \times 10 \text{ cm}^2$** . Durchgehende schwarze Linien zeigen Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes, die an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generiert wurden. Punktlinien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes in 10 cm Wassertiefe, sofern diese im Diagramm für 20 cm Wassertiefe eingetragen sind. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 109
- 5.46 Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  **$5 \times 5 \text{ cm}^2$** . Durchgehende schwarze Linien zeigen Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes, die an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generiert wurden. Punktlinien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes in 10 cm Wassertiefe, sofern diese im Diagramm für 20 cm Wassertiefe eingetragen sind. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 110

- 5.47 Dosishalbprofile in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Durchgehende schwarze Linien zeigen Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes, die an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generiert wurden. Punktlinien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes in 10 cm Wassertiefe, sofern diese im Diagramm für 20 cm Wassertiefe eingetragen sind. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 111
- 5.48 Dosishalbprofile in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Durchgehende schwarze Linien zeigen Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes, die an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generiert wurden. Punktlinien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes in 10 cm Wassertiefe, sofern diese im Diagramm für 20 cm Wassertiefe eingetragen sind. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 112
- 5.49 Dosishalbprofile in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Durchgehende schwarze Linien zeigen Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes, die an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generiert wurden. Punktlinien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes in 10 cm Wassertiefe, sofern diese im Diagramm für 20 cm Wassertiefe eingetragen sind. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 113
- 5.50 Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $20 \times 20 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes, die an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generiert wurden. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 114
- 5.51 Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes, die an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generiert wurden. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 115

- 5.52 Gegenüberstellung der Dosishalbprofile in der Betriebsweise **mit** und **ohne Ausgleichsfilter** bei einer Feldgröße von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ . Schwarze Linien zeigen die Halbprofile unter Einbeziehung des gesamten Strahlungsfeldes. Farbige Linien zeigen Halbprofile von Komponenten des Strahlungsfeldes, die an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generiert wurden. Linke Spalte: Hauptebene Cross-Plane, rechte Spalte: Hauptebene In-Plane, obere Zeile: Wassertiefe 10 cm, untere Zeile: Wassertiefe 20 cm . . . . . 116
- 5.53 Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld sowie an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generierte Strahlungsfeldkomponenten in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** für alle simulierten Feldkonstellationen. . . . . 118
- 5.54 Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld sowie an der **Eintrittsfläche des Wasserphantoms** generierte Strahlungsfeldkomponenten in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** für alle simulierten Feldkonstellationen. . . . . 119
- 5.55 Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}$ ) verursacht durch das außerhalb der geom. Feldgrenzen auf das **Wasserphantom** auftreffende Strahlungsfeld insgesamt sowie unterteilt in Durchlassstrahlung der Betriebsblenden und Streustrahlung aus dem geom. Strl.-Feld in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** für alle simulierten Feldgrößen. . . . . 120
- 5.56 Mittlere Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}$ ) verursacht durch das außerhalb der geom. Feldgrenzen auf das **Wasserphantom** auftreffende Strahlungsfeld insgesamt sowie unterteilt in Durchlassstrahlung der Betriebsblenden und Streustrahlung aus dem geom. Strl.-Feld in der Betriebsweise **ohne Ausgleichsfilter** für alle simulierten Feldgrößen. . . . . 121
- 6.1 X-Z Schnitt des Targetsystems, der Primärblende, des Ausgleichsfilters, der Lamellenblende und des Wasserphantoms auf der Strahlenfeldachse ( $Y=0 \text{ cm}$ ). Mit Ausnahme der Abmessungen des Wasserphantoms sowie dessen Abstand zur Lamellenblende bzw. Target ist die Skizze maßstabsgerecht. Die Markierung von Photonen in der Primärblende bei vorheriger Passage der Einfassung der Austrittsfläche des Targetsystems und Auftreffen auf das Wasserphantom innerhalb der geometrischen Feldgrenzen ist nur dann möglich, wenn das Photon mindestens einmal gestreut wurde. In der Abbildung sind beispielhaft zwei Photonentrajektorien eingezeichnet - Streuung im Targetsystem (Photonentrajektorie P1 in rot) oder in der Primärblende (Photonentrajektorie P2 in grün). . . . . 127

- 6.2 Maßstabsgerechter X-Z Schnitt des Targetsystems, der Primärblende, des Ausgleichsfilters und der Winkelanalysescheibe auf der Strahlenfeldachse ( $Y=0$  cm). Der Schnitt wurde mit Hilfe des „Geometry Plotters“, einer Funktion des MCNP6-Codes zur Visualisierung der in der Input-Datei programmierten Zellen, erzeugt. Zusätzlich wurden die Winkelbereiche von **0° bis 2°** zur Strahlenfeldachse in **blau** und von **2° bis 6°** zur Strahlenfeldachse in **rot** eingezeichnet. Photonen, die unter einem Winkel von **0° bis 2° (blau)** aus der Strahlenquelle emittiert wurden, hatten in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** im Vergleich zum Betrieb ohne Ausgleichsfilter eine **kleinere Dosis** außerhalb der geometrischen Feldgrenzen zur Folge, was die kleinste und mittelgroße simulierte Feldgröße betraf. Photonen, die unter einem Winkel von **2° bis 6° (rot)** emittiert wurden, hatten in der Betriebsweise **mit Ausgleichsfilter** im Vergleich zum Betrieb ohne Ausgleichsfilter eine **höhere Dosis** außerhalb der geometrischen Feldgrenzen zur Folge, was die größte simulierte Feldgröße betraf. . . . . 128



---

## Tabellenverzeichnis

---

4.1	Bei der Modellbildung des Strahlerkopfes berücksichtigte Einzelteile bzw. Baugruppen des Strahlerkopfes sowie Angaben zu deren Materialien, Geometrie und Quellcode. . . . .	24
4.2	Übersicht über die Distanzen zur Strahlenfeldachse $D_M$ , deren zugehörige Dosiswerte für die Ermittlung der mittleren Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen, $\overline{OfD}_{WT;FG}^{HE;BW;SFK}$ , herangezogen wurden. Außerdem sind die geometrischen Feldgrenzen angegeben. . . . .	29
4.3	Übersicht über die in dieser Arbeit verwendeten Simulationsparameter in Bezug auf Photonen . . . . .	39
4.4	Übersicht über die in dieser Arbeit verwendeten Simulationsparameter in Bezug auf Elektronen . . . . .	40
C.1	Normierte mittlere Dosen außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes ( $\overline{OfD}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld bzw. einzelne Strahlungsfeldkomponenten bei <b>eingebautem Ausgleichsfilter</b> und einer Feldgröße von <b>20 cm×20 cm</b> . Die Normierung erfolgte auf den Dosiswert der Strahlenfeldachse in betreffender Wassertiefe. . . . .	186
C.2	Normierte mittlere Dosen außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes ( $\overline{OfD}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld bzw. einzelne Strahlungsfeldkomponenten bei <b>eingebautem Ausgleichsfilter</b> und einer Feldgröße von <b>10 cm×10 cm</b> . Die Normierung erfolgte auf den Dosiswert der Strahlenfeldachse in betreffender Wassertiefe. . . . .	188
C.3	Normierte mittlere Dosen außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes ( $\overline{OfD}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld bzw. einzelne Strahlungsfeldkomponenten bei <b>eingebautem Ausgleichsfilter</b> und einer Feldgröße von <b>5 cm×5 cm</b> . Die Normierung erfolgte auf den Dosiswert der Strahlenfeldachse in betreffender Wassertiefe. . . . .	190
C.4	Normierte mittlere Dosen außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes ( $\overline{OfD}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld bzw. einzelne Strahlungsfeldkomponenten bei <b>nicht eingebautem Ausgleichsfilter</b> und einer Feldgröße von <b>20 cm×20 cm</b> . Die Normierung erfolgte auf den Dosiswert der Strahlenfeldachse in betreffender Wassertiefe. . . . .	192

C.5 Normierte mittlere Dosen außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes ( $\overline{OfD}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld bzw. einzelne Strahlungsfeldkomponenten bei **nicht eingebautem Ausgleichsfilter** und einer Feldgröße von **10 cm × 10 cm**. Die Normierung erfolgte auf den Dosiswert der Strahlenfeldachse in betreffender Wassertiefe. . . . . 194

C.6 Normierte mittlere Dosen außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes ( $\overline{OfD}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld bzw. einzelne Strahlungsfeldkomponenten bei **nicht eingebautem Ausgleichsfilter** und einer Feldgröße von **5 cm × 5 cm**. Die Normierung erfolgte auf den Dosiswert der Strahlenfeldachse in betreffender Wassertiefe. . . . . 196



---

## Quellcodeverzeichnis

---

4.1	Quellcode zur Ergebnisermittlung . . . . .	29
A.1	Quellcode zur Erzeugung der Zelle des Vakuums für Elektronenstrahlquelle	169
A.2	Quellcode zur Erzeugung der Flächen des Vakuums für Elektronenstrahlquelle	169
A.3	Quellcode zur Erzeugung der Elektronenstrahlquelle . . . . .	169
A.4	Quellcode zur Erzeugung der Zellen des Elektronenstrahl-Austrittsfensters .	169
A.5	Quellcode zur Erzeugung der Flächen des Elektronenstrahl-Austrittsfensters	170
A.6	Quellcode zur Erzeugung der Zellen des Targetsystems . . . . .	170
A.7	Quellcode zur Erzeugung der Flächen des Targetsystems . . . . .	170
A.8	Quellcode zur Erzeugung der Zellen der Primärblende . . . . .	171
A.9	Quellcode zur Erzeugung der Flächen der Primärblende . . . . .	171
A.10	Quellcode zur Erzeugung der Zellen des Ausgleichsfilters . . . . .	172
A.11	Quellcode zur Erzeugung der Flächen des Ausgleichsfilters . . . . .	172
A.12	Quellcode zur Erzeugung der Zellen des Dosismonitorsystems . . . . .	173
A.13	Quellcode zur Erzeugung der Flächen des Dosismonitorsystems . . . . .	173
A.14	Quellcode zur Erzeugung der Zellen des Spiegels . . . . .	173
A.15	Quellcode zur Erzeugung der Flächen des Spiegels . . . . .	173
A.16	Quellcode zur Erzeugung der Zellen des Wasserphantoms . . . . .	174
A.17	Quellcode zur Erzeugung der Flächen des Wasserphantoms . . . . .	174
A.18	Quellcode zur Erzeugung der Zellen der Blockblende . . . . .	174
A.19	Quellcode zur Erzeugung der Flächen der Blockblende . . . . .	175
A.20	Quellcode zur Erzeugung der Zellen der +X Zentrumslamelle . . . . .	175
A.21	Quellcode zur Erzeugung der Flächen der +X Zentrumslamelle . . . . .	176
A.22	Quellcode zur Erzeugung der Materialien . . . . .	177
A.23	Quellcode zur Implementierung der Varianzreduktion . . . . .	177
A.24	Quellcode zur Definition der Abschneideenergien . . . . .	178
A.25	Quellcode zur Definition des Elektronentransportalgorithmus . . . . .	178
A.26	Quellcode zur Definition der Strahlenquelle . . . . .	178
A.27	Quellcode zur Definition Abbruchkriteriums . . . . .	179
A.28	Quellcode zur Ergebnisermittlung . . . . .	179



# A Ausgewählte Quellcodes

## A.1 Vakuum für Elektronenstrahlquelle

```
1 c -----
2 c vacuum for source
3 c -----
4 5      0      -100 80 -84  trcl=6
```

**Quellcode A.1:** Quellcode zur Erzeugung der Zelle des Vakuums für Elektronenstrahlquelle

```
1 c -----
2 c vacuum for source
3 c -----
4 80      pz 0.65786
5 84      cz 0.39624
6 100     pz 4
```

**Quellcode A.2:** Quellcode zur Erzeugung der Flächen des Vakuums für Elektronenstrahlquelle

## A.2 Elektronenstrahlquelle

```
1 c -----
2 c strahlenquelle
3 c -----
4 sdef x=d1 y=d2 z=0.4 par=e erg=d3 vec=0 0 -1 dir=1
5 c angabe ist durchmesser in cm
6 sp1 -41 0.22 0
7 sp2 -41 0.20 0
8 sp3 -4 0.8862 6.33
9 c -----
```

**Quellcode A.3:** Quellcode zur Erzeugung der Elektronenstrahlquelle

## A.3 Elektronenstrahl-Austrittsfenster

```
1 c -----
2 c cell exit window + vacuum for source
3 c -----
4 c exit window ti sheet
5      2      7      -4.5 -80 81 -84  trcl=6
6 c exit window cooling water
7      3      280      -1 -81 83 -84  trcl=6
8 c exit window ti sheet
9      4      7      -4.5 -83 82 -84  trcl=6
```

**Quellcode A.4:** Quellcode zur Erzeugung der Zellen des Elektronenstrahl-Austrittsfensters

```

1 c -----
2 c exit window 80-89
3 c -----
4   80      pz 0.65786
5   81      pz 0.65278
6   82      pz 0.57658
7   83      pz 0.58166
8   84      cz 0.39624

```

**Quellcode A.5:** Quellcode zur Erzeugung der Flächen des Elektronenstrahl-Austrittsfensters

#### A.4 Targetsystem

```

1 c -----
2 c cell target
3 c -----
4 c target layer1 air
5   10  204 -0.001225 -2 3 -1
6 c target layer2 tungsten
7  1011  272   -18 -3 910 -1
8  1012  272   -18 -910 911 -1
9  1013  272   -18 -911 912 -1
10 1014  272   -18 -912 913 -1
11 1015  272   -18 -913 914 -1
12 1016  272   -18 -914 915 -1
13 1017  272   -18 -915 4 -1
14 c target layer3 copper
15   12   1  -8.96 (-4 5 -10 ):(4 -2 1 -10 )
16 c target layer4 SST
17   13   2  -8.19 (-2 10 -11 5 ):(-5 6 -11 ):(-6 12 -11 7 ):(-11 -7 8 ):
18           (13 -8 9 -11 )
19 c target layer5 graphite
20   14  322   -2.2 -6 -12 7

```

**Quellcode A.6:** Quellcode zur Erzeugung der Zellen des Targetsystems

```

1 c -----
2 c surfaces target 1-19
3 c -----
4 c target layer1 r1, layer2 r1
5   1      cz 0.318
6 c target layer1 plane top
7   2      pz 0
8 c target layer2 plane top
9   3      pz -0.127
10 c target layer3 plane top
11  4      pz -0.1905
12 c target layer4 plane top
13  5      pz -0.3556
14 c target layer5 plane top

```

```

15      6      pz -0.4572
16 c target layer6 plane top
17      7      pz -1.4732
18 c target layer7 plane top
19      8      pz -1.477
20 c target layer7 plane bottom
21      9      pz -1.5024
22 c target layer1 r2, layer2 r2, layer3 r1
23     10      cz 1.443
24 c target layer1 r3, layer2 r3, layer3 r2, layer4 r1, layer5 r2, layer6 r1, 17 r2
25     11      cz 1.575
26 c target layer5 r1
27     12      cz 0.618
28 c target layer7 r1
29     13      cz 0.483

```

**Quellcode A.7:** Quellcode zur Erzeugung der Flächen des Targetsystems

## A.5 Primärblende

```

1 c -----
2 c cell primary collimator
3 c -----
4     20    272     -18 (-27 28 20 -37 38 34 -39 ):(-28 29 21 -39 34 -37 38 ):
5         (-29 30 22 -39 34 -35 36 ):(-30 31 23 -35 36 34 -39 ):
6         (-31 32 -39 34 -35 36 24 ):(-32 33 -39 34 -35 36 25 )

```

**Quellcode A.8:** Quellcode zur Erzeugung der Zellen der Primärblende

```

1 c -----
2 c primary collimator 20-39
3 c -----
4 c p-colli layer1 r1 top
5     20      cz 1.7475
6 c p-colli layer2 r1
7     21      cz 1.0414
8 c p-colli layer3 r1
9     22      cz 1.3716
10 c p-colli layer4 r1
11     23      cz 1.7018
12 c p-colli layer5 r1
13     24      cz 2.0498
14 c p-colli layer6 r1
15     25      cz 2.3876
16 c p-colli 11 r2, 12 r2, 13 r2, 14 r2, 15 r2, 16 r2
17 c     20      cz 3.7719
18 c p-colli layer1 plane top
19     27      pz -1.59
20 c p-colli layer2 plane top
21     28      pz -2.8664

```

```

22 c p-colli layer3 plane top
23   29      pz -4.0792
24 c p-colli layer4 plane top
25   30      pz -5.4254
26 c p-colli layer5 plane top
27   31      pz -6.7716
28 c p-colli layer6 plane top
29   32      pz -8.1178
30 c p-colli layer6 plane bottom, flat-fil layer4 plane top
31   33      pz -9.464
32 c zusatz primary collimator (verschlanung oben, eckig)
33   34      px -3.77
34   35      py 3.14
35   36      py -3.14
36   37      py 2.14
37   38      py -2.14
38   39      px 3.77

```

**Quellcode A.9:** Quellcode zur Erzeugung der Flächen der Primärblende

## A.6 Ausgleichsfilter

```

1 c -----
2 c cell flattening filter
3 c -----
4   30      3   -8.19 (-40 46 -48 ):(-46 47 -49 ):(-47 52 -50 ):(-52 42 -41 ):
5           (-42 44 -43 ):(-42 44 51 -41 ):(-44 45 51 -41 )

```

**Quellcode A.10:** Quellcode zur Erzeugung der Zellen des Ausgleichsfilters

```

1 c -----
2 c flattening filter 40-59
3 c -----
4 c flat-fil layer1 plane top
5   40      pz -7.798
6 c flat-fil layer4 r1, layer5 r3 top till bottom, layer6 r2 top till bottom
7   41      cz 2.776
8 c flat-fil layer5 plane top
9   42      pz -9.566
10 c flat-fil layer5 r1 top till bottom
11  43      kz -11.5568 0.77979844039455 1
12 c flat-fil layer6 plane top
13  44      pz -9.891
14 c flat-fil layer6 plane bottom
15  45      pz -9.972
16 c flat-fil layer2 plane top
17  46      pz -8.169
18 c flat-fil layer3 plane top
19  47      pz -8.918
20 c flat-fil layer1 r1 top till bottom

```

```

21 48      kz -7.5659 0.299490437169 -1
22 c flat-fil layer2 r1 top till bottom
23 49      kz -7.741 0.5934880685023 -1
24 c flat-fil layer3 r1 top till bottom
25 50      kz -7.8798 0.76320579015456 -1
26 c flat-fil layer5 r2 top till bottom, layer6 r1 top till bottom
27 51      kz -5.511 0.21019403701104 -1
28 52      pz -9.464

```

**Quellcode A.11:** Quellcode zur Erzeugung der Flächen des Ausgleichsfilters

## A.7 Dosismonitorsystem

```

1 c -----
2 c cell dose chamber photonen
3 c -----
4 40      4   -6.09 (-68 60 -65 ):(-65 66 61 -60 ):(-61 62 -65 ):
5          (-65 66 -62 63 ):(-63 64 -65 )

```

**Quellcode A.12:** Quellcode zur Erzeugung der Zellen des Dosismonitorsystems

```

1 c -----
2 c dose chamber 60-69
3 c -----
4 60      pz -10.655
5 61      pz -10.839
6 62      pz -10.992
7 63      pz -11.176
8 64      pz -11.328
9 65      cz 3.79
10 66     cz 3.429
11 68     pz -10.503

```

**Quellcode A.13:** Quellcode zur Erzeugung der Flächen des Dosismonitorsystems

## A.8 Spiegel

```

1 c -----
2 c cell mirror
3 c -----
4 c mirror glass
5 50      5   -2.5 70 -72 73 -76 75 -74
6 c mirror aluminium
7 51     13  -2.699 76 -72 73 -71 75 -74

```

**Quellcode A.14:** Quellcode zur Erzeugung der Zellen des Spiegels

```

1 c -----
2 c mirror 70-79
3 c -----
4 70      p 0 -3.774 -11.45 -5 4.226 -18.63 5 4.226 -18.63

```

## A Ausgewählte Quellcodes

---

```
5 71      p 0 -4.007 -11.45 -5 3.993 -18.63 5 3.993 -18.63
6 72      pz -11.45
7 73      pz -18.63
8 74      px 3.24
9 75      px -3.24
10 76     p 0 -4 -11.45 -5 4 -18.63 5 4 -18.63
```

**Quellcode A.15:** Quellcode zur Erzeugung der Flächen des Spiegels

### A.9 Wasserphantom

```
1 c -----
2 c water tank
3 c -----
4 60 280 -1 -110 111 -113 112 -114 115 #70 #71 #73 #650 #651
5 #652 #653 #654 #655 #656 trcl=5
```

**Quellcode A.16:** Quellcode zur Erzeugung der Zellen des Wasserphantoms

```
1 c -----
2 c water tank 110-129
3 c -----
4 110      pz -90
5 c water tank
6 111      pz -140
7 c water tank
8 112      px -25
9 c water tank
10 113     px 25
11 c water tank
12 114     py 25
13 c water tank
14 115     py -25
```

**Quellcode A.17:** Quellcode zur Erzeugung der Flächen des Wasserphantoms

### A.10 Blockblende

```
1 c -----
2 c +y jaw
3 c -----
4 110 272 -18 -200 201 -202 -203 -204 205
5 c -----
6 c -----
7 c -y jaw
8 c -----
9 120 272 -18 -250 251 252 -253 -254 255
```

**Quellcode A.18:** Quellcode zur Erzeugung der Zellen der Blockblende



```

1 c -----
2 c -----
3 c +y jaw 200-249
4 c -----
5 c +y jaw
6 c y jaw top
7   200      pz -19.734
8 c y jaw bottom
9   201      pz -27.525
10 c y jaw outside
11   202      py 9.3
12 c y jaw inside
13 c 203      py 0
14   203      p 0 0 -0.1905 12 5 -100.1905 -12 5 -100.1905
15 c y jaw +x end
16   204      px 5.65
17 c y jaw -x end
18   205      px -5.65
19 c -----
20 c -----
21 c -y jaw 250-299
22 c -----
23 c -y jaw
24 c y jaw top
25   250      pz -19.735
26 c y jaw bottom
27   251      pz -27.524
28 c y jaw outside
29   252      py -9.3
30 c y jaw inside
31 c 253      py 0
32   253      p 0 0 -0.1905 12 -5 -100.1905 -12 -5 -100.1905
33 c y jaw +x end
34   254      px 5.65
35 c y jaw -x end
36   255      px -5.65

```

Quellcode A.19: Quellcode zur Erzeugung der Flächen der Blockblende

## A.11 Lamellenblende

Aus Gründen der Platzersparnis wird beispielhaft der Code einer Lamelle gezeigt. Da es sich um eine doppeltfokussierte Blende handelt, musste jede einzelne Lamelle individuell programmiert werden. Der Code für die Zellen der Lamellen beansprucht in der Summe knapp 500 Zeilen, für die Flächen knapp 300 Zeilen.

```

1 c -----
2 c +x center jaw
3 c -----
4   200   272   -18 ((((-300 303 320 301 302 -310 (300 :-303 :-310 :311 :-301

```

## A Ausgewählte Quellcodes

---

```

5          :318 )):(-300 303 310 -311 318 302 ):(-300 303 311 -312 301 302 ))
6      (300 :-303 :-312 :313 :319 :-302 )):(-300 303 312 -313 319 301 ):
7      (-300 303 313 -308 302 301 )):(308 306 307 -309 -300 303 ):(((
8      (-300 303 309 302 301 -314 (300 :-303 :-314 :315 :318 )):
9      (-300 303 314 -315 302 318 ):(-300 303 315 302 301 -316 ):
10     (-300 303 -317 316 301 319 ))(300 :-303 :-316 :317 :-302 :319 )):
11     (-300 303 317 302 301 -305 )) trcl=10

```

**Quellcode A.20:** Quellcode zur Erzeugung der Zellen der +X Zentrumslamelle

```

1 c -----
2 c +x jaw 300-599
3 c -----
4 c center jaw
5   300      pz -23.8
6 c +y richtung aussenseite, paralleler leaf
7 c   301      py 0.16
8 c +y richtung aussenseite, fokussierter leaf
9   301      p 0 0 -0.15875 0 0.175 -35.86 10 0.175 -35.86
10 c -y richtung aussenseite, paralleler leaf
11 c   302      py -0.16
12 c -y richtung aussenseite, fokussierter leaf
13   302      p 0 0 -0.15875 0 -0.175 -35.86 10 -0.175 -35.86
14   303      px 0
15   304      px 9.3
16   305      cy 35.86
17 c +y richtung erhoehung, paralleler leaf
18 c   306      py 0.205
19 c +y richtung erhoehung, fokussierter leaf
20   306      p 0 0 -0.15875 0 0.225 -33.53 10 0.225 -33.53
21 c -y richtung erhoehung, paralleler leaf
22 c   307      py -0.205
23 c -y richtung erhoehung, fokussierter leaf
24   307      p 0 0 -0.15875 0 -0.225 -33.53 10 -0.225 -33.53
25   308      cy 31.03
26   309      cy 33.53
27   310      cy 29.88
28   311      cy 30.12
29   312      cy 30.38
30   313      cy 30.62
31   314      cy 33.88
32   315      cy 34.12
33   316      cy 34.88
34   317      cy 35.12
35 c +y richtung kugellaufbahn, paralleler leaf
36 c   318      py 0.04
37 c +y richtung kugellaufbahn, fokussierter leaf
38   318      p 0 0 -0.15875 0 0.04 -34.12 10 0.04 -34.12
39 c -y richtung kugellaufbahn, paralleler leaf
40 c   319      py -0.04

```

```

41 c -y richtung kugellaufbahn, fokussierter leaf
42 319      p 0 0 -0.15875 0 -0.04 -34.12 10 -0.04 -34.12
43 320      cy 28.3

```

**Quellcode A.21:** Quellcode zur Erzeugung der Flächen der +X Zentrumslamelle

## A.12 Definition der Materialien

```

1 c -----
2 c definition of materials
3 c -----
4 c air
5 m204 7000.      -0.755636
6      8000.      -0.231475 18000.      -0.012889
7 c copper
8 m1 29000.      -1
9 c SST 304
10 m2 6000.      -0.0005
11      25000.      -0.02 14000.      -0.01 24000.      -0.19
12      28000.      -0.095 26000.      -0.6845
13 c tungsten
14 m272 74000.      -1
15 c titanium
16 m7 22000.      -1
17 c carbon, graphite
18 m322 6000.      -1
19 c glas for mirror
20 m5 14000.      -0.467436
21      8000.      -0.532563
22 c aluminiumoxid for dose chamber
23 m4 13000.      -0.529256
24      8000.      -0.4707434
25 c aluminium for mirror
26 m13 13000.      -1
27 c SST 303
28 m3 6000.      -0.001
29      25000.      -0.02 15000.      -0.00045 16000.      -0.0003
30      14000.      -0.01 24000.      -0.18 28000.      -0.09
31      26000.      -0.69825
32 c water for gamma-ray transport
33 m280 1000.      -0.111915
34      8000.      -0.888085

```

**Quellcode A.22:** Quellcode zur Erzeugung der Materialien

## A.13 Varianzreduktion

```

1 c -----
2 c varianz reduktion
3 c -----

```



```

4 sdef x=d1 y=d2 z=0.4 par=e erg=d3 vec=0 0 -1 dir=1
5 c angabe ist durchmesser in cm
6 sp1 -41 0.22 0
7 sp2 -41 0.20 0
8 sp3 -4 0.8862 6.33

```

**Quellcode A.26:** Quellcode zur Definition der Strahlenquelle

## A.17 Abbruchkriterium

```

1 c -----
2 c abbruchkriterien
3 c -----
4 nps 5e8

```

**Quellcode A.27:** Quellcode zur Definition Abbruchkriterieums

## A.18 Ergebnisermittlung

```

1 c *****Beginn Primaerblende
  c *****
2 c -----y tallies
3 c *****cf20
4 +f206 70
5 fq206 s f
6 fs206 870 871 872 873 874 875 876 877 878
7 sd206 18 18 18 18 18 18 18 18 18
8 cf206 20
9 +f216 71
10 fq216 s f
11 fs216 870 871 872 873 874 875 876 877 878
12 sd216 18 18 18 18 18 18 18 18 18
13 cf216 20
14 c
15 c -----x tallies
16 c *****cf20
17 +f236 73
18 fq236 s f
19 fs236 870 871 872 873 874 875 876 877 878
20 sd236 18 18 18 18 18 18 18 18 18
21 cf236 20
22 c *****Ende Primaerblende
  c *****

```

**Quellcode A.28:** Quellcode zur Ergebnisermittlung



## B Ausgewählte Befehle von MCNP6

### B.1 Flächen

MCNP6 bietet verschiedene Möglichkeiten der Erzeugung von Flächen an. Innerhalb dieser Arbeit fanden ausschließlich die Definition über Gleichungen (Karte B.1) und Punkte (Karte B.2) Anwendung. Erstgenannte gestattet die Erstellung von Ebenen, Kugeln, Zylindern, Kegel, Ellipsoiden, Hyperboloiden, Paraboloiden und Tori.

Aufbau der Karte	Kürzel	Erläuterung
j n A list	j	benutzerdefinierte Nummer der Fläche
	n	Angaben zu Koordinatentransformationen
	A	Spezifizierung des Flächentyps
	list	Angaben zur Flächendefinition

**Karte B.1:** Flächendefinition durch Gleichung [Goo13b, S. 3–7].

Aufbau der Karte	Kürzel	Erläuterung
j n P $x_i y_i z_i$	j	benutzerdefinierte Nummer der Fläche
	n	Angaben zu Koordinatentransformationen
	P	Kürzel für planare Fläche
	$x_i y_i z_i$	Koordinaten dreier Punkte

**Karte B.2:** Flächendefinition durch drei Punkte [Goo13b, S. 3–15].

### B.2 Zellen

Für die Erstellung von Zellen können unterschiedliche Formen der Karte in der Input-Datei genutzt werden. Der initiale Weg ist der vollständige Neuaufbau einer Zelle (Karte B.3).

Aufbau der Karte	Kürzel	Erläuterung
j m d geom params	j	benutzerdefinierte Nummer der Zelle
	m	Bezeichner des Materials (Karte B.4)
	d	Dichte des Materials
	geom	zellerzeugende Flächen
	params	optionaler Parameter

**Karte B.3:** Erzeugung einer Zelle [Goo13b, S. 3–4].

### B.3 Materialien

In der Simulation genutzte Materialien sind aus einzelnen Komponenten, die im entsprechenden Verhältnis stehen, zu generieren. Eine Komponente setzt sich dabei zusammen aus einem Nuklid-Bezeichner der Form ZZZAAA und einer optionalen Angabe zur Auswahl einer Bibliothek. Hierbei steht ZZZ für die Ordnungszahl und AAA für die Massenzahl (Karte B.4).

Aufbau der Karte	Kürzel	Erläuterung
Mm zaid <sub>1</sub> fraction <sub>1</sub> zaid <sub>2</sub> fraction <sub>2</sub> zaid <sub>i</sub> fraction <sub>i</sub>	m	benutzerdefinierte Nummer
	zaid <sub>i</sub>	Nuklid-Bezeichner der betreffenden Komponente
	fraction <sub>i</sub>	Anteil des Nuklids

**Karte B.4:** Definition eines Materials [Goo13b, S. 3–55].

## B.4 Strahlenquellen

Zur Quellendefinition stehen in MCNP6 vier unterschiedliche Karten zur Verfügung. Für die Modellierung des auf das Target gerichteten Elektronenstrahls eignet sich ausschließlich die Karte B.5. Anhand zahlreicher Variablen und Parameter ermöglicht sie die Nachbildung nahezu jeder Strahlenquelle. Neben Photonen, Elektronen, Positronen und Neutronen sind über 30 weitere Teilchenarten vorhanden (Karte B.5).

Aufbau der Karte	Kürzel	Erläuterung
SDEF KEYWORD	KEYWORD	Es stehen über 20 KEYWORD für die Quellendefinition zur Verfügung. Aus Gründen der Übersicht wird der geneigte Leser auf das Manual verwiesen

**Karte B.5:** Definition einer Strahlenquelle [Goo13b, S. 3–120].

## B.5 Ergebnisermittlung

Durch eine „Tally“-Karte legt der Benutzer fest, welche Information er aus der Simulation gewinnen möchte (Karte B.6). Zur Funktionserweiterung sind zahlreiche optionale Karten

Aufbau der Karte	Kürzel	Erläuterung
F $n$ : <pl> S <sub>1</sub> ... S <sub>k</sub>	$n$	legt den Typ fest
	pl	bestimmt die betrachtete Teilchenart
	S	die betreffenden Flächen oder Zellen

**Karte B.6:** Erzeugung eines Tallies [Goo13b, S. 3–178].

vorhanden.

### B.5.1 Markierung von Strahlungsteilchen

*Cell Flagging* Gestattet die Kennzeichnung von Teilchen bei der Passage ausgewählter Zellen. Die so „markierten“ Partikel erfahren eine separate Auswertung. Ein Tally gibt dann anstatt einer einzigen Dosis für eine bestimmte Zelle zwei Werte aus: die Gesamtdosis und die Dosis, verursacht durch Strahlungsteilchen, die zuvor eine interessierende Zelle, definiert in Karte B.7, passiert haben (Karte B.7).

CF $n$  c<sub>1</sub> ... c<sub>k</sub>

**Karte B.7:** Implementierung des Cell-Flagging,  $n$  ist die Nummer des Tallies von Karte B.6 und c<sub>1</sub> ... c<sub>k</sub> die Nummern der Zellen, die eine Markierung des Strahlungsteilchens zur Folge haben [Goo13b, S. 3–217].



*Surface Flagging* Das Verfahren ist analog zum Cell Flagging, es gestattet die Kennzeichnung von Teilchen bei der Passage ausgewählter Flächen (Karte B.8).

**SF** $n$   $s_1$  ...  $s_k$

**Karte B.8:** Implementierung des Surface-Flagging,  $n$  ist die Nummer des Tallies von Karte B.6 und  $s_1$  ...  $s_k$  die Nummern der Flächen, die eine Markierung des Strahlungsteilchens zur Folge haben [Goo13b, S. 3–218].



## C Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse

## C Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse

### C.1 Betriebsweise mit Ausgleichsfilter

#### C.1.1 Feldgröße 20 cm × 20 cm

**Tabelle C.1:** Normierte mittlere Dosen außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes ( $\overline{OfD}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld bzw. einzelne Strahlungsfeldkomponenten bei **eingebautem Ausgleichsfilter** und einer Feldgröße von **20 cm × 20 cm**. Die Normierung erfolgte auf den Dosiswert der Strahlenfeldachse in betreffender Wassertiefe.

Markierendes Element	Normierte mittlere Dosis außerhalb der geom. Feldgrenzen ( $\overline{OfD}$ ) [%]			
	Cross-Plane		In-Plane	
	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm
<b>Gesamtes Strahlungsfeld ohne Einschränkung auf eine Komponente</b>				
Keine Markierung	6,819 ± 0,467	10,404 ± 0,327	7,047 ± 0,255	10,795 ± 0,361
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Targetsystem, Primärblende, Ausgleichsfilter</b>				
Fläche Nr. 8 (Austrittsfläche Targetsystem)	6,297 ± 0,244	9,944 ± 0,349	6,594 ± 0,251	10,299 ± 0,380
Fläche Nr. 9 (Einfassung Fläche Nr. 8)	0,527 ± 0,404	0,472 ± 0,048	0,458 ± 0,074	0,511 ± 0,038
Summe	6,825 ± 0,472	10,416 ± 0,352	7,052 ± 0,262	10,810 ± 0,382
Zelle Nr. 20 (Primärblende)	0,671 ± 0,412	0,644 ± 0,055	0,688 ± 0,100	0,743 ± 0,052
Zelle Nr. 30 (Ausgleichsfilter)	6,800 ± 0,478	10,375 ± 0,365	7,014 ± 0,269	10,763 ± 0,396
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Winkelanalysescheibe</b>				
Zelle Nr. 500 (∠ Strl.-feldachse: 0°-1°)	0,075 ± 0,013	0,124 ± 0,012	0,073 ± 0,012	0,135 ± 0,016
Zelle Nr. 501 (∠ Strl.-feldachse: 1°-2°)	0,234 ± 0,038	0,433 ± 0,033	0,245 ± 0,021	0,451 ± 0,031
Zelle Nr. 502 (∠ Strl.-feldachse: 2°-3°)	0,445 ± 0,030	0,771 ± 0,041	0,500 ± 0,065	0,840 ± 0,045
Zelle Nr. 503 (∠ Strl.-feldachse: 3°-4°)	0,704 ± 0,039	1,225 ± 0,056	0,787 ± 0,071	1,276 ± 0,062
Zelle Nr. 504 (∠ Strl.-feldachse: 4°-5°)	1,173 ± 0,050	2,025 ± 0,087	1,264 ± 0,077	2,066 ± 0,091
Zelle Nr. 505 (∠ Strl.-feldachse: 5°-6°)	1,637 ± 0,065	2,788 ± 0,119	1,720 ± 0,074	2,930 ± 0,131
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Zellen / Flächen an der Blockblende</b>				
Zelle Nr. 600 (Eintrittsfläche -Y Block)	0,109 ± 0,032	0,126 ± 0,019	0,174 ± 0,031	0,193 ± 0,018
Zelle Nr. 601 (Eintrittsfläche +Y Block)	0,101 ± 0,024	0,111 ± 0,017	0,250 ± 0,051	0,285 ± 0,032
Zelle Nr. 602 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	6,599 ± 0,474	10,157 ± 0,359	6,610 ± 0,257	10,305 ± 0,383
Summe	6,809 ± 0,476	10,395 ± 0,360	7,034 ± 0,264	10,783 ± 0,385
Zelle Nr. 603 (Austrittsfläche -Y Block)	0,011 ± 0,005	0,016 ± 0,003	0,008 ± 0,010	0,011 ± 0,004
Zelle Nr. 604 (Austrittsfläche +Y Block)	0,022 ± 0,010	0,025 ± 0,011	0,348 ± 0,062	0,381 ± 0,038
Zelle Nr. 605 (Austrittsfläche Strl.-Feld)	6,709 ± 0,476	10,307 ± 0,364	6,664 ± 0,257	10,373 ± 0,384
Summe	6,741 ± 0,476	10,348 ± 0,364	7,021 ± 0,264	10,766 ± 0,386
Fläche Nr. 203 (wirksame Kante +Y Block)	0,228 ± 0,028	0,311 ± 0,018	4,714 ± 0,142	8,042 ± 0,299
Fläche Nr. 253 (wirksame Kante -Y Block)	0,239 ± 0,033	0,338 ± 0,022	0,209 ± 0,030	0,243 ± 0,018
Summe	0,466 ± 0,044	0,649 ± 0,028	4,923 ± 0,145	8,286 ± 0,299
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Zellen / Flächen an der Lamellenblende</b>				
Zelle Nr. 610 (Eintrittsfläche -X Satz)	0,152 ± 0,068	0,124 ± 0,014	0,106 ± 0,031	0,121 ± 0,023
Zelle Nr. 611 (Eintrittsfläche +X Satz)	0,462 ± 0,074	0,523 ± 0,045	0,092 ± 0,030	0,112 ± 0,015
Zelle Nr. 613 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	6,158 ± 0,461	9,682 ± 0,345	6,790 ± 0,261	10,518 ± 0,389
Summe	6,772 ± 0,472	10,329 ± 0,348	6,989 ± 0,265	10,751 ± 0,390

Fortsetzung auf nächster Seite ...

## C.1 Betriebsweise mit Ausgleichsfilter

Markierendes Element	Normierte mittlere Dosis außerhalb der geom. Feldgrenzen ( $\overline{OFD}$ ) [%]			
	Cross-Plane		In-Plane	
	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm
Zelle Nr. 615 (1. Austrittsfläche +X Satz)	0,336 ± 0,071	0,347 ± 0,033	0,018 ± 0,012	0,021 ± 0,006
Zelle Nr. 616 (2. Austrittsfläche +X Satz)	0,189 ± 0,036	0,254 ± 0,035	0,005 ± 0,002	0,015 ± 0,004
Zelle Nr. 617 (3. Austrittsfläche +X Satz)	0,003 ± 0,002	0,006 ± 0,004	0,001 ± 0,001	0,001 ± 0,001
Zelle Nr. 618 (Austrittsfläche Strl.-Feld)	6,189 ± 0,461	9,691 ± 0,345	6,942 ± 0,267	10,693 ± 0,394
Zelle Nr. 614 (Austrittsfläche -X Satz)	0,051 ± 0,065	0,018 ± 0,009	0,033 ± 0,017	0,031 ± 0,007
Summe	6,768 ± 0,472	10,316 ± 0,348	6,998 ± 0,267	10,762 ± 0,394
Zelle Nr. 619 (wirksame Kante +X Satz)	4,792 ± 0,159	8,009 ± 0,279	0,196 ± 0,028	0,289 ± 0,017
Zelle Nr. 620 (wirksame Kante -X Satz)	0,126 ± 0,020	0,160 ± 0,016	0,204 ± 0,027	0,327 ± 0,074
Summe	4,918 ± 0,161	8,169 ± 0,279	0,400 ± 0,039	0,616 ± 0,076
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Zellen unmittelbar oberhalb des Wasserphantoms</b>				
Zelle 630 (Strahlenfeld)	4,586 ± 0,150	8,088 ± 0,287	4,446 ± 0,130	8,033 ± 0,304
Zelle 631 (X-Richtung, Strahlenfeld-nächste)	1,702 ± 0,432	1,678 ± 0,093	--	--
Zelle 632 (X-Richtung)	0,372 ± 0,050	0,462 ± 0,045	--	--
Zelle 633 (X-Richtung)	0,085 ± 0,023	0,035 ± 0,003	--	--
Zelle 634 (X-Richtung, Strahlenfeld-fernste)	0,004 ± 0,001	0,004 ± 0,001	--	--
Summe	6,748 ± 0,460	10,268 ± 0,305	--	--
Zelle 635 (Y-Richtung, Strahlenfeld-nächste)	--	--	1,725 ± 0,163	1,956 ± 0,107
Zelle 636 (Y-Richtung)	--	--	0,649 ± 0,099	0,633 ± 0,053
Zelle 637 (Y-Richtung)	--	--	0,155 ± 0,052	0,041 ± 0,003
Zelle 638 (Y-Richtung, Strahlenfeld-fernste)	--	--	0,008 ± 0,008	0,005 ± 0,001
Summe	--	--	6,983 ± 0,237	10,668 ± 0,327

## C Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse

### C.1.2 Feldgröße 10 cm × 10 cm

**Tabelle C.2:** Normierte mittlere Dosen außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes ( $\overline{\text{OfD}}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld bzw. einzelne Strahlungsfeldkomponenten bei **eingebautem Ausgleichsfilter** und einer Feldgröße von **10 cm × 10 cm**. Die Normierung erfolgte auf den Dosiswert der Strahlenfeldachse in betreffender Wassertiefe.

Markierendes Element	Normierte mittlere Dosis außerhalb der geom. Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}$ ) [%]			
	Cross-Plane		In-Plane	
	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm
<b>Gesamtes Strahlungsfeld ohne Einschränkung auf eine Komponente</b>				
Keine Markierung	3,214 ± 0,145	6,020 ± 0,408	3,427 ± 0,133	6,544 ± 0,468
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Targetsystem, Primärblende, Ausgleichsfilter</b>				
Fläche Nr. 8 (Austrittsfläche Targetsystem)	3,032 ± 0,158	5,796 ± 0,515	3,193 ± 0,165	6,242 ± 0,597
Fläche Nr. 9 (Einfassung Fläche Nr. 8)	0,174 ± 0,058	0,221 ± 0,058	0,239 ± 0,057	0,354 ± 0,139
Summe	3,206 ± 0,168	6,017 ± 0,518	3,432 ± 0,175	6,596 ± 0,613
Zelle Nr. 20 (Primärblende)	0,224 ± 0,057	0,289 ± 0,056	0,388 ± 0,076	0,502 ± 0,136
Zelle Nr. 30 (Ausgleichsfilter)	3,196 ± 0,152	6,000 ± 0,479	3,407 ± 0,142	6,525 ± 0,550
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Winkelanalysescheibe</b>				
Zelle Nr. 500 (∠ Strl.-feldachse: 0°-1°)	0,145 ± 0,020	0,334 ± 0,067	0,148 ± 0,017	0,317 ± 0,042
Zelle Nr. 501 (∠ Strl.-feldachse: 1°-2°)	0,487 ± 0,022	1,063 ± 0,098	0,496 ± 0,022	1,154 ± 0,221
Zelle Nr. 502 (∠ Strl.-feldachse: 2°-3°)	0,964 ± 0,043	2,348 ± 0,312	0,995 ± 0,039	2,646 ± 0,319
Zelle Nr. 503 (∠ Strl.-feldachse: 3°-4°)	0,541 ± 0,038	1,033 ± 0,100	0,548 ± 0,037	0,956 ± 0,078
Zelle Nr. 504 (∠ Strl.-feldachse: 4°-5°)	0,189 ± 0,030	0,261 ± 0,040	0,204 ± 0,036	0,294 ± 0,069
Zelle Nr. 505 (∠ Strl.-feldachse: 5°-6°)	0,158 ± 0,030	0,198 ± 0,037	0,213 ± 0,068	0,303 ± 0,127
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Zellen / Flächen an der Blockblende</b>				
Zelle Nr. 600 (Eintrittsfläche -Y Block)	0,064 ± 0,021	0,078 ± 0,019	0,146 ± 0,042	0,174 ± 0,033
Zelle Nr. 601 (Eintrittsfläche +Y Block)	0,059 ± 0,019	0,075 ± 0,017	0,249 ± 0,039	0,294 ± 0,045
Zelle Nr. 602 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	3,083 ± 0,149	5,856 ± 0,473	3,019 ± 0,127	6,064 ± 0,536
Summe	3,205 ± 0,152	6,009 ± 0,474	3,413 ± 0,140	6,532 ± 0,539
Zelle Nr. 603 (Austrittsfläche -Y Block)	0,018 ± 0,009	0,022 ± 0,006	0,009 ± 0,004	0,018 ± 0,006
Zelle Nr. 604 (Austrittsfläche +Y Block)	0,017 ± 0,006	0,028 ± 0,012	0,321 ± 0,056	0,427 ± 0,064
Zelle Nr. 605 (Austrittsfläche Strl.-Feld)	3,101 ± 0,146	5,927 ± 0,477	3,070 ± 0,128	6,074 ± 0,532
Summe	3,136 ± 0,146	5,978 ± 0,477	3,400 ± 0,140	6,519 ± 0,536
Fläche Nr. 203 (wirksame Kante +Y Block)	0,161 ± 0,019	0,248 ± 0,021	2,007 ± 0,067	4,251 ± 0,411
Fläche Nr. 253 (wirksame Kante -Y Block)	0,166 ± 0,020	0,251 ± 0,024	0,188 ± 0,043	0,289 ± 0,133
Summe	0,327 ± 0,027	0,499 ± 0,032	2,195 ± 0,080	4,541 ± 0,431
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Zellen / Flächen an der Lamellenblende</b>				
Zelle Nr. 610 (Eintrittsfläche -X Satz)	0,099 ± 0,032	0,103 ± 0,034	0,087 ± 0,032	0,098 ± 0,026
Zelle Nr. 611 (Eintrittsfläche +X Satz)	0,549 ± 0,109	0,597 ± 0,088	0,076 ± 0,031	0,090 ± 0,025
Zelle Nr. 613 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	2,531 ± 0,096	5,253 ± 0,451	3,207 ± 0,132	6,307 ± 0,543
Summe	3,178 ± 0,149	5,954 ± 0,461	3,371 ± 0,139	6,495 ± 0,544
Zelle Nr. 615 (1. Austrittsfläche +X Satz)	0,356 ± 0,058	0,485 ± 0,072	0,025 ± 0,009	0,040 ± 0,017

Fortsetzung auf nächster Seite ...

## C.1 Betriebsweise mit Ausgleichsfilter

Markierendes Element	Normierte mittlere Dosis außerhalb der geom. Feldgrenzen ( $\overline{OFD}$ ) [%]			
	Cross-Plane		In-Plane	
	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm
Zelle Nr. 616 (2. Austrittsfläche +X Satz)	0,204 ± 0,086	0,161 ± 0,053	0,007 ± 0,004	0,008 ± 0,003
Zelle Nr. 617 (3. Austrittsfläche +X Satz)	0,018 ± 0,038	0,007 ± 0,009	0,002 ± 0,003	0,002 ± 0,003
Zelle Nr. 618 (Austrittsfläche Strl.-Feld)	2,577 ± 0,098	5,206 ± 0,443	3,312 ± 0,139	6,415 ± 0,546
Zelle Nr. 614 (Austrittsfläche -X Satz)	0,023 ± 0,025	0,031 ± 0,029	0,033 ± 0,012	0,046 ± 0,011
Summe	3,178 ± 0,149	5,890 ± 0,453	3,379 ± 0,140	6,511 ± 0,547
Zelle Nr. 619 (wirksame Kante +X Satz)	1,981 ± 0,055	3,990 ± 0,337	0,152 ± 0,030	0,237 ± 0,024
Zelle Nr. 620 (wirksame Kante -X Satz)	0,115 ± 0,021	0,188 ± 0,133	0,161 ± 0,028	0,251 ± 0,029
Summe	2,096 ± 0,059	4,178 ± 0,362	0,313 ± 0,041	0,488 ± 0,038
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Zellen unmittelbar oberhalb des Wasserphantoms</b>				
Zelle 630 (Strahlenfeld)	1,895 ± 0,051	4,181 ± 0,386	1,867 ± 0,049	4,259 ± 0,415
Zelle 631 (X-Richtung, Strahlenfeld-nächste)	0,753 ± 0,091	1,226 ± 0,139	--	--
Zelle 632 (X-Richtung)	0,266 ± 0,047	0,305 ± 0,057	--	--
Zelle 633 (X-Richtung)	0,199 ± 0,089	0,125 ± 0,052	--	--
Zelle 634 (X-Richtung, Strahlenfeld-fernste)	0,003 ± 0,001	0,003 ± 0,001	--	--
Summe	3,116 ± 0,145	5,840 ± 0,417	--	--
Zelle 635 (Y-Richtung, Strahlenfeld-nächste)	--	--	1,027 ± 0,107	1,713 ± 0,228
Zelle 636 (Y-Richtung)	--	--	0,296 ± 0,035	0,319 ± 0,038
Zelle 637 (Y-Richtung)	--	--	0,144 ± 0,046	0,081 ± 0,020
Zelle 638 (Y-Richtung, Strahlenfeld-fernste)	--	--	0,004 ± 0,003	0,003 ± 0,001
Summe	--	--	3,338 ± 0,132	6,375 ± 0,475

## C Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse

### C.1.3 Feldgröße 5 cm × 5 cm

**Tabelle C.3:** Normierte mittlere Dosen außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes ( $\overline{OfD}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld bzw. einzelne Strahlungsfeldkomponenten bei **eingebautem Ausgleichsfilter** und einer Feldgröße von **5 cm × 5 cm**. Die Normierung erfolgte auf den Dosiswert der Strahlenfeldachse in betreffender Wassertiefe.

Markierendes Element	Normierte mittlere Dosis außerhalb der geom. Feldgrenzen ( $\overline{OfD}$ ) [%]			
	Cross-Plane		In-Plane	
	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm
<b>Gesamtes Strahlungsfeld ohne Einschränkung auf eine Komponente</b>				
Keine Markierung	2,340 ± 0,126	3,749 ± 0,247	2,260 ± 0,106	3,708 ± 0,181
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Targetsystem, Primärblende, Ausgleichsfilter</b>				
Fläche Nr. 8 (Austrittsfläche Targetsystem)	2,213 ± 0,122	3,609 ± 0,264	2,092 ± 0,101	3,531 ± 0,207
Fläche Nr. 9 (Einfassung Fläche Nr. 8)	0,118 ± 0,044	0,134 ± 0,031	0,161 ± 0,044	0,171 ± 0,028
Summe	2,331 ± 0,130	3,743 ± 0,266	2,253 ± 0,110	3,702 ± 0,209
Zelle Nr. 20 (Primärblende)	0,135 ± 0,043	0,164 ± 0,041	0,184 ± 0,042	0,197 ± 0,029
Zelle Nr. 30 (Ausgleichsfilter)	2,320 ± 0,130	3,729 ± 0,269	2,242 ± 0,111	3,690 ± 0,214
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Winkelanalysescheibe</b>				
Zelle Nr. 500 (∠ Strl.-feldachse: 0°-1°)	0,447 ± 0,016	0,991 ± 0,188	0,466 ± 0,024	0,940 ± 0,069
Zelle Nr. 501 (∠ Strl.-feldachse: 1°-2°)	0,864 ± 0,044	1,648 ± 0,202	0,876 ± 0,051	1,709 ± 0,135
Zelle Nr. 502 (∠ Strl.-feldachse: 2°-3°)	0,224 ± 0,037	0,309 ± 0,042	0,202 ± 0,029	0,293 ± 0,035
Zelle Nr. 503 (∠ Strl.-feldachse: 3°-4°)	0,128 ± 0,034	0,147 ± 0,022	0,110 ± 0,022	0,136 ± 0,018
Zelle Nr. 504 (∠ Strl.-feldachse: 4°-5°)	0,111 ± 0,024	0,154 ± 0,025	0,133 ± 0,031	0,165 ± 0,025
Zelle Nr. 505 (∠ Strl.-feldachse: 5°-6°)	0,111 ± 0,041	0,131 ± 0,020	0,135 ± 0,041	0,144 ± 0,023
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Zellen / Flächen an der Blockblende</b>				
Zelle Nr. 600 (Eintrittsfläche -Y Block)	0,044 ± 0,021	0,060 ± 0,015	0,125 ± 0,028	0,127 ± 0,019
Zelle Nr. 601 (Eintrittsfläche +Y Block)	0,049 ± 0,019	0,054 ± 0,013	0,249 ± 0,036	0,309 ± 0,031
Zelle Nr. 602 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	2,231 ± 0,126	3,620 ± 0,266	1,876 ± 0,100	3,265 ± 0,203
Summe	2,324 ± 0,130	3,734 ± 0,267	2,250 ± 0,110	3,700 ± 0,207
Zelle Nr. 603 (Austrittsfläche -Y Block)	0,016 ± 0,007	0,030 ± 0,011	0,012 ± 0,008	0,022 ± 0,012
Zelle Nr. 604 (Austrittsfläche +Y Block)	0,022 ± 0,014	0,026 ± 0,010	0,313 ± 0,045	0,383 ± 0,036
Zelle Nr. 605 (Austrittsfläche Strl.-Feld)	2,268 ± 0,129	3,660 ± 0,268	1,903 ± 0,099	3,277 ± 0,202
Summe	2,306 ± 0,129	3,716 ± 0,268	2,228 ± 0,109	3,682 ± 0,205
Fläche Nr. 203 (wirksame Kante +Y Block)	0,123 ± 0,015	0,172 ± 0,013	1,336 ± 0,057	2,401 ± 0,160
Fläche Nr. 253 (wirksame Kante -Y Block)	0,119 ± 0,020	0,195 ± 0,033	0,159 ± 0,027	0,180 ± 0,018
Summe	0,242 ± 0,025	0,367 ± 0,035	1,496 ± 0,063	2,581 ± 0,161
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Zellen / Flächen an der Lamellenblende</b>				
Zelle Nr. 610 (Eintrittsfläche -X Satz)	0,087 ± 0,043	0,079 ± 0,014	0,050 ± 0,014	0,059 ± 0,010
Zelle Nr. 611 (Eintrittsfläche +X Satz)	0,539 ± 0,086	0,575 ± 0,048	0,051 ± 0,018	0,075 ± 0,021
Zelle Nr. 613 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	1,673 ± 0,084	3,028 ± 0,252	2,110 ± 0,106	3,516 ± 0,208
Summe	2,299 ± 0,128	3,682 ± 0,256	2,210 ± 0,108	3,650 ± 0,209
Zelle Nr. 615 (1. Austrittsfläche +X Satz)	0,481 ± 0,064	0,577 ± 0,049	0,028 ± 0,012	0,037 ± 0,013

*Fortsetzung auf nächster Seite ...*



## C.1 Betriebsweise mit Ausgleichsfilter

Markierendes Element	Normierte mittlere Dosis außerhalb der geom. Feldgrenzen ( $\overline{OFD}$ ) [%]			
	Cross-Plane		In-Plane	
	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm
Zelle Nr. 616 (2. Austrittsfläche +X Satz)	0,087 ± 0,059	0,040 ± 0,009	0,008 ± 0,010	0,006 ± 0,002
Zelle Nr. 617 (3. Austrittsfläche +X Satz)	0,003 ± 0,002	0,007 ± 0,005	0,002 ± 0,002	0,002 ± 0,001
Zelle Nr. 618 (Austrittsfläche Strl.-Feld)	1,696 ± 0,086	3,032 ± 0,253	2,165 ± 0,109	3,589 ± 0,211
Zelle Nr. 614 (Austrittsfläche -X Satz)	0,031 ± 0,036	0,029 ± 0,009	0,029 ± 0,011	0,040 ± 0,008
Summe	2,299 ± 0,128	3,684 ± 0,258	2,231 ± 0,111	3,673 ± 0,212
Zelle Nr. 619 (wirksame Kante +X Satz)	1,313 ± 0,043	2,413 ± 0,228	0,098 ± 0,008	0,195 ± 0,039
Zelle Nr. 620 (wirksame Kante -X Satz)	0,095 ± 0,024	0,117 ± 0,012	0,110 ± 0,011	0,164 ± 0,014
Summe	1,407 ± 0,049	2,531 ± 0,229	0,208 ± 0,014	0,359 ± 0,042
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Zellen unmittelbar oberhalb des Wasserphantoms</b>				
Zelle 630 (Strahlenfeld)	1,216 ± 0,036	2,375 ± 0,228	1,208 ± 0,048	2,296 ± 0,156
Zelle 631 (X-Richtung, Strahlenfeld-nächste)	0,689 ± 0,090	0,878 ± 0,079	--	--
Zelle 632 (X-Richtung)	0,247 ± 0,053	0,271 ± 0,033	--	--
Zelle 633 (X-Richtung)	0,075 ± 0,058	0,023 ± 0,006	--	--
Zelle 634 (X-Richtung, Strahlenfeld-fernste)	0,001	0,001	--	--
Summe	2,227 ± 0,125	3,549 ± 0,244	--	--
Zelle 635 (Y-Richtung, Strahlenfeld-nächste)	--	--	0,748 ± 0,089	1,000 ± 0,080
Zelle 636 (Y-Richtung)	--	--	0,161 ± 0,027	0,200 ± 0,027
Zelle 637 (Y-Richtung)	--	--	0,037 ± 0,014	0,011 ± 0,002
Zelle 638 (Y-Richtung, Strahlenfeld-fernste)	--	--	0,001	0,001
Summe	--	--	2,155 ± 0,106	3,508 ± 0,177

C.2 Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter

C.2.1 Feldgröße 20 cm × 20 cm

**Tabelle C.4:** Normierte mittlere Dosen außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes ( $\overline{\text{OfD}}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld bzw. einzelne Strahlungsfeldkomponenten bei **nicht eingebautem Ausgleichsfilter** und einer Feldgröße von **20 cm × 20 cm**. Die Normierung erfolgte auf den Dosiswert der Strahlenfeldachse in betreffender Wassertiefe.

Markierendes Element	Normierte mittlere Dosis außerhalb der geom. Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}$ ) [%]			
	Cross-Plane		In-Plane	
	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm
<b>Gesamtes Strahlungsfeld ohne Einschränkung auf eine Komponente</b>				
keine Markierung	4,941 ± 0,217	8,192 ± 0,206	4,968 ± 0,141	8,223 ± 0,201
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Targetsystem, Primärblende, Ausgleichsfilter</b>				
Fläche Nr. 8 (Austrittsfläche Targetsystem)	4,583 ± 0,129	7,862 ± 0,219	4,620 ± 0,136	7,835 ± 0,211
Fläche Nr. 9 (Einfassung Fläche Nr. 8)	0,362 ± 0,179	0,336 ± 0,021	0,350 ± 0,048	0,396 ± 0,023
Summe	4,944 ± 0,220	8,198 ± 0,220	4,970 ± 0,144	8,232 ± 0,212
Zelle Nr. 20 (Primärblende)	0,378 ± 0,184	0,387 ± 0,026	0,410 ± 0,066	0,482 ± 0,026
Zelle Nr. 30 (Hülle Ausgleichsfilter)	4,932 ± 0,223	8,178 ± 0,227	4,956 ± 0,149	8,207 ± 0,221
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Winkelanalysescheibe</b>				
Zelle Nr. 500 (∠ Strl.-feldachse: 0°-1°)	0,081 ± 0,007	0,138 ± 0,009	0,085 ± 0,029	0,147 ± 0,009
Zelle Nr. 501 (∠ Strl.-feldachse: 1°-2°)	0,247 ± 0,015	0,457 ± 0,035	0,245 ± 0,015	0,448 ± 0,021
Zelle Nr. 502 (∠ Strl.-feldachse: 2°-3°)	0,425 ± 0,019	0,763 ± 0,030	0,448 ± 0,039	0,769 ± 0,027
Zelle Nr. 503 (∠ Strl.-feldachse: 3°-4°)	0,640 ± 0,022	1,153 ± 0,039	0,672 ± 0,030	1,172 ± 0,040
Zelle Nr. 504 (∠ Strl.-feldachse: 4°-5°)	0,986 ± 0,033	1,737 ± 0,060	1,038 ± 0,046	1,743 ± 0,057
Zelle Nr. 505 (∠ Strl.-feldachse: 5°-6°)	1,304 ± 0,044	2,193 ± 0,076	1,292 ± 0,042	2,255 ± 0,075
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Zellen / Flächen an der Blockblende</b>				
Zelle Nr. 600 (Eintrittsfläche -Y Block)	0,054 ± 0,032	0,063 ± 0,006	0,093 ± 0,017	0,115 ± 0,010
Zelle Nr. 601 (Eintrittsfläche +Y Block)	0,048 ± 0,015	0,066 ± 0,010	0,122 ± 0,031	0,173 ± 0,023
Zelle Nr. 602 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	4,835 ± 0,220	8,059 ± 0,225	4,747 ± 0,142	7,929 ± 0,214
Summe	4,937 ± 0,223	8,188 ± 0,225	4,962 ± 0,147	8,218 ± 0,216
Zelle Nr. 603 (Austrittsfläche -Y Block)	0,005 ± 0,003	0,011 ± 0,002	0,006 ± 0,004	0,006 ± 0,002
Zelle Nr. 604 (Austrittsfläche +Y Block)	0,007 ± 0,005	0,010 ± 0,002	0,148 ± 0,034	0,205 ± 0,024
Zelle Nr. 605 (Austrittsfläche Strl.-Feld)	4,891 ± 0,223	8,138 ± 0,226	4,801 ± 0,143	7,996 ± 0,216
Summe	4,904 ± 0,223	8,159 ± 0,226	4,955 ± 0,147	8,207 ± 0,217
Fläche Nr. 203 (wirksame Kante +Y Block)	0,151 ± 0,016	0,237 ± 0,012	3,873 ± 0,088	6,633 ± 0,176
Fläche Nr. 253 (wirksame Kante -Y Block)	0,154 ± 0,032	0,232 ± 0,008	0,125 ± 0,021	0,158 ± 0,010
Summe	0,306 ± 0,036	0,469 ± 0,014	3,997 ± 0,090	6,792 ± 0,177
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Zellen / Flächen an der Lamellenblende</b>				
Zelle Nr. 610 (Eintrittsfläche -X Satz)	0,066 ± 0,019	0,084 ± 0,012	0,063 ± 0,023	0,070 ± 0,010
Zelle Nr. 611 (Eintrittsfläche +X Satz)	0,222 ± 0,039	0,324 ± 0,036	0,061 ± 0,022	0,066 ± 0,008
Zelle Nr. 613 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	4,623 ± 0,217	7,736 ± 0,215	4,818 ± 0,144	8,064 ± 0,218
Summe	4,910 ± 0,221	8,143 ± 0,218	4,942 ± 0,147	8,200 ± 0,218

Fortsetzung auf nächster Seite ...

## C.2 Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter

Markierendes Element	Normierte mittlere Dosis außerhalb der geom. Feldgrenzen ( $\overline{OFD}$ ) [%]			
	Cross-Plane		In-Plane	
	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm
Zelle Nr. 615 (1. Austrittsfläche +X Satz)	0,121 ± 0,027	0,238 ± 0,037	0,005 ± 0,003	0,012 ± 0,004
Zelle Nr. 616 (2. Austrittsfläche +X Satz)	0,118 ± 0,030	0,131 ± 0,017	0,005 ± 0,004	0,008 ± 0,002
Zelle Nr. 617 (3. Austrittsfläche +X Satz)	0,001 ± 0,001	0,003 ± 0,001	0,001 ± 0,001	0,001
Zelle Nr. 618 (Austrittsfläche Strl.-Feld)	4,665 ± 0,218	7,748 ± 0,214	4,925 ± 0,148	8,163 ± 0,220
Zelle Nr. 614 (Austrittsfläche -X Satz)	0,008 ± 0,005	0,011 ± 0,006	0,010 ± 0,005	0,021 ± 0,006
Summe	4,913 ± 0,222	8,130 ± 0,218	4,945 ± 0,148	8,206 ± 0,220
Zelle Nr. 619 (wirksame Kante +X Satz)	3,975 ± 0,091	6,722 ± 0,181	0,155 ± 0,022	0,219 ± 0,009
Zelle Nr. 620 (wirksame Kante -X Satz)	0,082 ± 0,018	0,114 ± 0,009	0,151 ± 0,023	0,225 ± 0,011
Summe	4,056 ± 0,093	6,835 ± 0,181	0,306 ± 0,031	0,444 ± 0,014
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Zellen unmittelbar oberhalb des Wasserphantoms</b>				
Zelle 630 (Strahlenfeld)	3,934 ± 0,089	6,929 ± 0,192	3,819 ± 0,085	6,821 ± 0,185
Zelle 631 (X-Richtung, Strahlenfeld-nächste)	0,735 ± 0,193	0,933 ± 0,055	--	--
Zelle 632 (X-Richtung)	0,192 ± 0,034	0,233 ± 0,022	--	--
Zelle 633 (X-Richtung)	0,036 ± 0,011	0,019 ± 0,002	--	--
Zelle 634 (X-Richtung, Strahlenfeld-fernste)	0,002	0,002	--	--
Summe	4,899 ± 0,216	8,117 ± 0,201	--	--
Zelle 635 (Y-Richtung, Strahlenfeld-nächste)	--	--	0,794 ± 0,092	1,013 ± 0,046
Zelle 636 (Y-Richtung)	--	--	0,261 ± 0,052	0,293 ± 0,022
Zelle 637 (Y-Richtung)	--	--	0,059 ± 0,021	0,021 ± 0,001
Zelle 638 (Y-Richtung, Strahlenfeld-fernste)	--	--	0,002	0,003
Summe	--	--	4,934 ± 0,137	8,150 ± 0,192

## C Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse

### C.2.2 Feldgröße 10 cm × 10 cm

**Tabelle C.5:** Normierte mittlere Dosen außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes ( $\overline{OfD}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld bzw. einzelne Strahlungsfeldkomponenten bei **nicht eingebautem Ausgleichsfilter** und einer Feldgröße von **10 cm × 10 cm**. Die Normierung erfolgte auf den Dosiswert der Strahlenfeldachse in betreffender Wassertiefe.

Markierendes Element	Normierte mittlere Dosis außerhalb der geom. Feldgrenzen ( $\overline{OfD}$ ) [%]			
	Cross-Plane		In-Plane	
	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm
<b>Gesamtes Strahlungsfeld ohne Einschränkung auf eine Komponente</b>				
keine Markierung	2,627 ± 0,092	5,780 ± 0,371	2,704 ± 0,110	6,041 ± 0,444
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Targetsystem, Primärblende, Ausgleichsfilter</b>				
Fläche Nr. 8 (Austrittsfläche Targetsystem)	2,486 ± 0,103	5,573 ± 0,458	2,538 ± 0,133	5,763 ± 0,519
Fläche Nr. 9 (Einfassung Fläche Nr. 8)	0,137 ± 0,040	0,206 ± 0,092	0,164 ± 0,040	0,281 ± 0,088
Summe	2,623 ± 0,111	5,780 ± 0,467	2,702 ± 0,139	6,044 ± 0,526
Zelle Nr. 20 (Primärblende)	0,108 ± 0,027	0,194 ± 0,038	0,229 ± 0,074	0,317 ± 0,077
Zelle Nr. 30 (Hülle Ausgleichsfilter)	2,620 ± 0,100	5,770 ± 0,423	2,695 ± 0,118	6,032 ± 0,495
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Winkelanalysescheibe</b>				
Zelle Nr. 500 (∠ Strl.-feldachse: 0°-1°)	0,175 ± 0,022	0,408 ± 0,080	0,168 ± 0,008	0,362 ± 0,035
Zelle Nr. 501 (∠ Strl.-feldachse: 1°-2°)	0,543 ± 0,020	1,280 ± 0,117	0,549 ± 0,024	1,249 ± 0,099
Zelle Nr. 502 (∠ Strl.-feldachse: 2°-3°)	0,953 ± 0,043	2,310 ± 0,230	0,959 ± 0,032	2,693 ± 0,371
Zelle Nr. 503 (∠ Strl.-feldachse: 3°-4°)	0,486 ± 0,034	1,041 ± 0,180	0,464 ± 0,026	1,021 ± 0,155
Zelle Nr. 504 (∠ Strl.-feldachse: 4°-5°)	0,120 ± 0,027	0,198 ± 0,032	0,165 ± 0,068	0,201 ± 0,034
Zelle Nr. 505 (∠ Strl.-feldachse: 5°-6°)	0,079 ± 0,026	0,126 ± 0,030	0,116 ± 0,040	0,166 ± 0,071
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Zellen / Flächen an der Blockblende</b>				
Zelle Nr. 600 (Eintrittsfläche -Y Block)	0,037 ± 0,019	0,051 ± 0,016	0,110 ± 0,037	0,128 ± 0,027
Zelle Nr. 601 (Eintrittsfläche +Y Block)	0,028 ± 0,011	0,039 ± 0,009	0,134 ± 0,029	0,189 ± 0,033
Zelle Nr. 602 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	2,556 ± 0,097	5,681 ± 0,420	2,454 ± 0,106	5,717 ± 0,488
Summe	2,621 ± 0,099	5,772 ± 0,420	2,697 ± 0,116	6,035 ± 0,490
Zelle Nr. 603 (Austrittsfläche -Y Block)	0,008 ± 0,005	0,015 ± 0,008	0,010 ± 0,010	0,011 ± 0,005
Zelle Nr. 604 (Austrittsfläche +Y Block)	0,011 ± 0,008	0,013 ± 0,004	0,154 ± 0,033	0,261 ± 0,044
Zelle Nr. 605 (Austrittsfläche Strl.-Feld)	2,577 ± 0,099	5,731 ± 0,422	2,525 ± 0,111	5,754 ± 0,487
Summe	2,596 ± 0,099	5,760 ± 0,422	2,689 ± 0,117	6,027 ± 0,489
Fläche Nr. 203 (wirksame Kante +Y Block)	0,133 ± 0,010	0,236 ± 0,016	1,940 ± 0,055	4,293 ± 0,407
Fläche Nr. 253 (wirksame Kante -Y Block)	0,141 ± 0,019	0,244 ± 0,020	0,147 ± 0,036	0,205 ± 0,029
Summe	0,274 ± 0,022	0,480 ± 0,026	2,087 ± 0,066	4,499 ± 0,408
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Zellen / Flächen an der Lamellenblende</b>				
Zelle Nr. 610 (Eintrittsfläche -X Satz)	0,058 ± 0,016	0,097 ± 0,054	0,045 ± 0,016	0,074 ± 0,030
Zelle Nr. 611 (Eintrittsfläche +X Satz)	0,288 ± 0,054	0,422 ± 0,094	0,029 ± 0,009	0,050 ± 0,015
Zelle Nr. 613 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	2,259 ± 0,079	5,205 ± 0,396	2,599 ± 0,115	5,888 ± 0,491
Summe	2,604 ± 0,097	5,724 ± 0,411	2,673 ± 0,117	6,012 ± 0,493
Zelle Nr. 615 (1. Austrittsfläche +X Satz)	0,208 ± 0,047	0,375 ± 0,091	0,011 ± 0,005	0,018 ± 0,010

Fortsetzung auf nächster Seite ...

## C.2 Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter

Markierendes Element	Normierte mittlere Dosis außerhalb der geom. Feldgrenzen ( $\overline{OFD}$ ) [%]			
	Cross-Plane		In-Plane	
	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm
Zelle Nr. 616 (2. Austrittsfläche +X Satz)	0,095 ± 0,030	0,102 ± 0,035	0,003 ± 0,003	0,004 ± 0,004
Zelle Nr. 617 (3. Austrittsfläche +X Satz)	0,001	0,005 ± 0,007	0,001 ± 0,002	0,001 ± 0,003
Zelle Nr. 618 (Austrittsfläche Strl.-Feld)	2,282 ± 0,078	5,146 ± 0,387	2,649 ± 0,117	5,968 ± 0,494
Zelle Nr. 614 (Austrittsfläche -X Satz)	0,011 ± 0,005	0,035 ± 0,052	0,018 ± 0,010	0,028 ± 0,012
Summe	2,596 ± 0,096	5,663 ± 0,403	2,682 ± 0,117	6,019 ± 0,494
Zelle Nr. 619 (wirksame Kante +X Satz)	1,969 ± 0,057	4,144 ± 0,324	0,122 ± 0,008	0,240 ± 0,019
Zelle Nr. 620 (wirksame Kante -X Satz)	0,084 ± 0,015	0,137 ± 0,016	0,135 ± 0,013	0,250 ± 0,031
Summe	2,053 ± 0,059	4,281 ± 0,324	0,257 ± 0,015	0,490 ± 0,037
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Zellen unmittelbar oberhalb des Wasserphantoms</b>				
Zelle 630 (Strahlenfeld)	1,950 ± 0,053	4,416 ± 0,348	1,920 ± 0,052	4,551 ± 0,437
Zelle 631 (X-Richtung, Strahlenfeld-nächste)	0,394 ± 0,065	0,939 ± 0,139	--	--
Zelle 632 (X-Richtung)	0,151 ± 0,038	0,231 ± 0,080	--	--
Zelle 633 (X-Richtung)	0,068 ± 0,018	0,063 ± 0,026	--	--
Zelle 634 (X-Richtung, Strahlenfeld-fernste)	0,002 ± 0,001	0,002	--	--
Summe	2,565 ± 0,094	5,652 ± 0,384	--	--
Zelle 635 (Y-Richtung, Strahlenfeld-nächste)	--	--	0,498 ± 0,087	1,105 ± 0,122
Zelle 636 (Y-Richtung)	--	--	0,164 ± 0,043	0,222 ± 0,046
Zelle 637 (Y-Richtung)	--	--	0,065 ± 0,019	0,040 ± 0,009
Zelle 638 (Y-Richtung, Strahlenfeld-fernste)	--	--	0,002	0,002 ± 0,001
Summe	--	--	2,647 ± 0,111	5,921 ± 0,456

## C Tabellarische Zusammenstellung der Ergebnisse

### C.2.3 Feldgröße 5 cm × 5 cm

**Tabelle C.6:** Normierte mittlere Dosen außerhalb des geometrischen Strahlenfeldes ( $\overline{\text{OfD}}$ ) verursacht durch das gesamte Strahlungsfeld bzw. einzelne Strahlungsfeldkomponenten bei **nicht eingebautem Ausgleichsfilter** und einer Feldgröße von **5 cm × 5 cm**. Die Normierung erfolgte auf den Dosiswert der Strahlenfeldachse in betreffender Wassertiefe.

Markierendes Element	Normierte mittlere Dosis außerhalb der geom. Feldgrenzen ( $\overline{\text{OfD}}$ ) [%]			
	Cross-Plane		In-Plane	
	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm
<b>Gesamtes Strahlungsfeld ohne Einschränkung auf eine Komponente</b>				
keine Markierung	2,044 ± 0,103	3,479 ± 0,258	1,944 ± 0,088	3,485 ± 0,282
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Targetsystem, Primärblende, Ausgleichsfilter</b>				
Fläche Nr. 8 (Austrittsfläche Targetsystem)	1,937 ± 0,096	3,382 ± 0,288	1,804 ± 0,079	3,341 ± 0,314
Fläche Nr. 9 (Einfassung Fläche Nr. 8)	0,102 ± 0,045	0,096 ± 0,021	0,138 ± 0,047	0,142 ± 0,035
Summe	2,039 ± 0,106	3,477 ± 0,289	1,942 ± 0,092	3,483 ± 0,316
Zelle Nr. 20 (Primärblende)	0,102 ± 0,059	0,089 ± 0,026	0,130 ± 0,047	0,131 ± 0,041
Zelle Nr. 30 (Hülle Ausgleichsfilter)	2,036 ± 0,107	3,470 ± 0,293	1,935 ± 0,094	3,477 ± 0,322
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Winkelanalysescheibe</b>				
Zelle Nr. 500 ( $\sphericalangle$ Strl.-feldachse: 0°-1°)	0,523 ± 0,020	1,066 ± 0,122	0,520 ± 0,019	1,098 ± 0,143
Zelle Nr. 501 ( $\sphericalangle$ Strl.-feldachse: 1°-2°)	0,896 ± 0,036	1,640 ± 0,169	0,891 ± 0,030	1,748 ± 0,215
Zelle Nr. 502 ( $\sphericalangle$ Strl.-feldachse: 2°-3°)	0,153 ± 0,020	0,236 ± 0,034	0,173 ± 0,048	0,233 ± 0,040
Zelle Nr. 503 ( $\sphericalangle$ Strl.-feldachse: 3°-4°)	0,092 ± 0,030	0,105 ± 0,022	0,063 ± 0,016	0,072 ± 0,016
Zelle Nr. 504 ( $\sphericalangle$ Strl.-feldachse: 4°-5°)	0,062 ± 0,014	0,080 ± 0,022	0,075 ± 0,024	0,088 ± 0,028
Zelle Nr. 505 ( $\sphericalangle$ Strl.-feldachse: 5°-6°)	0,067 ± 0,023	0,076 ± 0,019	0,103 ± 0,041	0,093 ± 0,034
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Zellen / Flächen an der Blockblende</b>				
Zelle Nr. 600 (Eintrittsfläche -Y Block)	0,034 ± 0,033	0,037 ± 0,019	0,064 ± 0,032	0,085 ± 0,030
Zelle Nr. 601 (Eintrittsfläche +Y Block)	0,041 ± 0,045	0,042 ± 0,021	0,150 ± 0,031	0,221 ± 0,045
Zelle Nr. 602 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	1,961 ± 0,090	3,392 ± 0,288	1,723 ± 0,081	3,176 ± 0,310
Summe	2,037 ± 0,106	3,472 ± 0,289	1,936 ± 0,092	3,481 ± 0,314
Zelle Nr. 603 (Austrittsfläche -Y Block)	0,022 ± 0,033	0,017 ± 0,007	0,008 ± 0,004	0,014 ± 0,006
Zelle Nr. 604 (Austrittsfläche +Y Block)	0,012 ± 0,009	0,016 ± 0,007	0,170 ± 0,033	0,285 ± 0,060
Zelle Nr. 605 (Austrittsfläche Strl.-Feld)	1,989 ± 0,100	3,427 ± 0,291	1,755 ± 0,086	3,174 ± 0,306
Summe	2,023 ± 0,106	3,459 ± 0,291	1,933 ± 0,092	3,473 ± 0,312
Fläche Nr. 203 (wirksame Kante +Y Block)	0,121 ± 0,044	0,186 ± 0,026	1,338 ± 0,040	2,486 ± 0,260
Fläche Nr. 253 (wirksame Kante -Y Block)	0,113 ± 0,011	0,193 ± 0,027	0,103 ± 0,032	0,157 ± 0,032
Summe	0,234 ± 0,045	0,379 ± 0,037	1,441 ± 0,051	2,643 ± 0,262
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Zellen / Flächen an der Lamellenblende</b>				
Zelle Nr. 610 (Eintrittsfläche -X Satz)	0,045 ± 0,014	0,055 ± 0,018	0,025 ± 0,008	0,038 ± 0,013
Zelle Nr. 611 (Eintrittsfläche +X Satz)	0,365 ± 0,065	0,461 ± 0,107	0,032 ± 0,016	0,031 ± 0,008
Zelle Nr. 613 (Eintrittsfläche Strl.-Feld)	1,605 ± 0,081	2,918 ± 0,257	1,852 ± 0,088	3,381 ± 0,319
Summe	2,015 ± 0,105	3,434 ± 0,279	1,909 ± 0,090	3,450 ± 0,319
Zelle Nr. 615 (1. Austrittsfläche +X Satz)	0,341 ± 0,070	0,460 ± 0,105	0,015 ± 0,010	0,018 ± 0,005

*Fortsetzung auf nächster Seite ...*

## C.2 Betriebsweise ohne Ausgleichsfilter

Markierendes Element	Normierte mittlere Dosis außerhalb der geom. Feldgrenzen ( $\overline{OFD}$ ) [%]			
	Cross-Plane		In-Plane	
	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm	Wassertiefe: 10 cm	Wassertiefe: 20 cm
Zelle Nr. 616 (2. Austrittsfläche +X Satz)	0,046 ± 0,022	0,032 ± 0,029	0,003 ± 0,003	0,004 ± 0,004
Zelle Nr. 617 (3. Austrittsfläche +X Satz)	0,002 ± 0,002	0,004 ± 0,006	0,001 ± 0,001	0,001 ± 0,001
Zelle Nr. 618 (Austrittsfläche Strl.-Feld)	1,609 ± 0,074	2,904 ± 0,254	1,891 ± 0,092	3,420 ± 0,320
Zelle Nr. 614 (Austrittsfläche -X Satz)	0,018 ± 0,011	0,026 ± 0,016	0,016 ± 0,006	0,022 ± 0,005
Summe	2,016 ± 0,105	3,426 ± 0,276	1,926 ± 0,093	3,464 ± 0,320
Zelle Nr. 619 (wirksame Kante +X Satz)	1,382 ± 0,053	2,465 ± 0,228	0,102 ± 0,013	0,230 ± 0,155
Zelle Nr. 620 (wirksame Kante -X Satz)	0,070 ± 0,009	0,112 ± 0,016	0,102 ± 0,007	0,170 ± 0,018
Summe	1,452 ± 0,054	2,577 ± 0,228	0,204 ± 0,014	0,400 ± 0,156
<b>Strahlungsfeldkomponenten generiert durch Zellen unmittelbar oberhalb des Wasserphantoms</b>				
Zelle 630 (Strahlenfeld)	1,326 ± 0,038	2,491 ± 0,228	1,297 ± 0,036	2,475 ± 0,256
Zelle 631 (X-Richtung, Strahlenfeld-nächste)	0,422 ± 0,076	0,574 ± 0,071	--	--
Zelle 632 (X-Richtung)	0,174 ± 0,055	0,238 ± 0,099	--	--
Zelle 633 (X-Richtung)	0,035 ± 0,014	0,016 ± 0,013	--	--
Zelle 634 (X-Richtung, Strahlenfeld-fernste)	0,000	0,001	--	--
Summe	1,956 ± 0,103	3,320 ± 0,259	--	--
Zelle 635 (Y-Richtung, Strahlenfeld-nächste)	--	--	0,452 ± 0,077	0,725 ± 0,119
Zelle 636 (Y-Richtung)	--	--	0,099 ± 0,025	0,133 ± 0,038
Zelle 637 (Y-Richtung)	--	--	0,017 ± 0,008	0,006 ± 0,005
Zelle 638 (Y-Richtung, Strahlenfeld-fernste)	--	--	0,000	0,001
Summe	--	--	1,865 ± 0,089	3,340 ± 0,285





## Publikationen

### Beiträge auf nationalen Konferenzen

GRACHTRUP, CHRISTIAN, THOMAS KUHNT UND ULRICH WOLF: „Dekomposition des Strahlungsfeldes eines medizinischen Elektronenlinearbeschleunigers zur Ermittlung der Strahlungsfeldkomponenten und deren Anteil an der Dosis außerhalb geometrischer Feldgrenzen anhand von Monte-Carlo-Simulationen mit dem Code MCNP6 “. *51. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Medizinische Physik*. 2020.



## Erklärung über die eigenständige Abfassung der Arbeit

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unzulässige Hilfe oder Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Ich versichere, dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar eine Vergütung oder geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, und dass die vorgelegte Arbeit weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zweck einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt wurde. Alles aus anderen Quellen und von anderen Personen übernommene Material, das in der Arbeit verwendet wurde oder auf das direkt Bezug genommen wird, wurde als solches kenntlich gemacht. Insbesondere wurden alle Personen genannt, die direkt an der Entstehung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren. Die aktuellen gesetzlichen Vorgaben in Bezug auf die Zulassung der klinischen Studien, die Bestimmungen des Tierschutzgesetzes, die Bestimmungen des Gentechnikgesetzes und die allgemeinen Datenschutzbestimmungen wurden eingehalten. Ich versichere, dass ich die Regelungen der Satzung der Universität Leipzig zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis kenne und eingehalten habe.

Datum

Unterschrift



## Curriculum Vitae

Aus Gründen des Datenschutzes entfernt.



## Danksagung

Bis zum Abschluss dieser Arbeit war es ein sehr langer Weg. Ohne die Unterstützung zahlreicher Personen hätte sie in der vorliegenden Form nicht realisiert werden können. Hierfür möchte ich mich herzlich bedanken.

Herrn Prof. Dr. med. Rolf-Dieter Kortmann danke ich für die Möglichkeit der Anfertigung der Arbeit an seiner Klinik.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Dr. rer. nat. Ulrich Wolf. Ich danke ihm herzlich für die zahlreichen, mit viel Verständnis geführten konstruktiven Diskussionen.

Herrn Professor Dr. med. Thomas Kuhnt danke ich herzlich für die zusätzliche Übernahme der Betreuung meiner Arbeit.

Für die konstruktiven Diskussionen in Bezug auf die Bauelemente des Linearbeschleunigers sowie deren Vermessung danke ich Herrn Dipl.-Ing. Thomas Wilhelm und Herrn Stefan Fischer.

Herrn Professor Dr. Josten, Herrn Dr. Jacob und Herrn Professor Dr. Fleig danke ich für die Zustimmung zur Durchführung der Promotionsarbeit.

Herrn Professor Dr. Osama Sabri, Herrn PD Dr. Jürgen Petzold und Herrn Prof. Dr. Ing. Bernhard Sattler danke ich dafür, dass ich im Jahr 2006 die Möglichkeit erhalten habe, die Nuklearmedizin kennenzulernen. Dieser Einstieg hat mir meinen weiteren Werdegang am UKL geebnet, der eben auch zur Anfertigung der vorliegenden Dissertation geführt hat.

Meiner lieben Frau Sabine danke ich für die unendliche Geduld mit mir. Sie hat mich in schweren Zeiten motiviert und jederzeit unterstützt.

Möglich wurde die Anfertigung dieser Arbeit erst durch den erfolgreichen Abschluss des Studiums zum Diplom-Physiker. Hierfür danke ich von ganzem Herzen meinen Eltern und meiner Schwester.

