

Monte-Carlo-Simulation von Multileafkollimatoren mit gekrümmten Lamellenenden*

F. Haryanto,¹ M. Fippel,¹ W. Laub², F. Nüsslin¹

¹ Abteilung für Medizinische Physik, Radioonkologische Universitätsklinik, Universität Tübingen

² Department of Radiation Oncology, William Beaumont Hospital, Royal Oak, Michigan, USA

Zusammenfassung

An der Radiologischen Universitätsklinik Tübingen wurde ein Modell zur Simulation der Strahlerköpfe zweier identischer Linearbeschleuniger mit Hilfe des BEAM-Programmes (entwickelt am National Research Council of Canada) entworfen. Diese Linearbeschleuniger besitzen Multileafkollimatoren (MLCs) und Backup-Blenden (y-Richtung) mit gekrümmten Lamellenenden. Die entsprechenden Beschleunigerkopfmodelle wurden in zwei Komponenten unterteilt. Der erste Anteil besteht aus Target, Primärkollimator, Ausgleichsfilter, Monitorkammer und Spiegel. Die Phasenraumeigenschaften unterhalb des Spiegels wurden nach der Monte-Carlo-Simulation dieser Bauteile in einer Datei gespeichert und für den zweiten Teil des Strahlerkopfes (Blende, MLC) als Quelle verwendet. Das Beschleuniger-Austrittsfenster wurde als Parallelquelle mit Gaußscher Energieverteilung angenommen. Damit ergab sich zwischen gemessenen und simulierten Tiefendosisverteilungen in Wasser eine Übereinstimmung von besser als 2%. Ein neues Modul für das BEAM-Programm wurde entworfen, um die Backup-Blenden zu modellieren. Die gekrümmten Lamellenenden der MLCs konnten dagegen mit dem mitgelieferten Modul MLCQ simuliert werden. Aufgrund der gekrümmten Lamellenenden des MLC und der Backup-Blenden sind die y-Profile im Bereich bzw. in der Nähe der Feldränder im Vergleich zu MLCs mit rechteckigen Lamellenenden erhöht.

Schlüsselwörter: BEAM-Programm, Linearbeschleuniger, Multileafkollimatoren mit gekrümmten Lamellenenden, Monte-Carlo-Verfahren

Abstract

A model for the simulation of the accelerator heads of two identical linear accelerators was designed at the University Hospital of Tübingen, using the BEAM program developed at the National Research Council of Canada. Both linear accelerators are equipped with multileaf collimators (MLCs) and backup jaws (y-direction) with curved leaf-ends. The accelerator models were divided into two parts. The first part consisted of target, primary collimator, flattening filter, monitor chamber, and mirror. After the Monte Carlo simulation of these parts, the phase-space characteristics below the mirror were stored in a file and used as source for the second part of the accelerator head (jaw, MLC). The electron source was assumed to deliver a gaussian energy spectrum, with parallel direction to the beam axis. With this electron source, there was good agreement between the measured and simulated depth dose curves in water, with difference < 2%. A new module was created for the BEAM program to simulate backup jaws, while the standard MLCQ module from BEAM was used to simulate a MLC with curved leaf-ends. As a result, MLCs and backup jaws with curved leaf-ends make the shoulder of the y-profile higher than the straight-end MLCs.

Keywords: BEAM program, linear accelerator, multileaf-collimator with curved leaf-ends, Monte Carlo methods

* Auszugsweise vorgetragen während der DGMP/DEGRO-Tagung in München 2000

Einleitung

Um intensitätsmodulierte Strahlentherapie betreiben zu können, sind Multileafkollimatoren (MLCs) oder Kompensatoren zur Erzeugung der Fluenzprofile erforderlich. Neben gewöhnlichen rechteckigen Bestrahlungsfeldern ermöglichen MLCs auch irreguläre Feldkonturen. Durch Superposition (Step-and-Shoot-Technik) sind dann beliebige Intensitätsverteilungen applizierbar. Idealerweise sollten die einzelnen Lamellen in beiden Ebenen fokussieren. MLCs älterer Bauart sind jedoch nur in einer Richtung fokussierend. Dadurch ist die Halbschattenbreite der Lamellen von deren Position abhängig, was die Bestrahlungsplanung komplizierter gestaltet. Eine Lösung, um diese Schwierigkeiten zu vermeiden, bieten schon seit langem MLCs mit gekrümmten Lamellenenden [6, 13].

Den Einfluß dieser Lamellenenden auf Photonendosisverteilungen kann man mit Monte-Carlo-Verfahren (MC) untersuchen. Heutzutage gibt es viele Standard-MC-Programmpakete, mit denen Elektronen und Photonen in beliebigen Materialien und Geometrien simuliert werden können [1, 2, 4, 5, 11, 12]. In der vorliegenden Arbeit wurden die Strahlerköpfe zweier in der Universitätsklinik Tübingen vorhandener Linearbeschleuniger der Firma Elekta (Linac A und Linac G) mit Hilfe des BEAM-Programmes [11] modelliert. BEAM wurde gewählt, weil es auf dem bekannten und genauen EGS4-Programm [9] basiert und die Eingabe der geometrischen Parameter über vorgefertigte Module ermöglicht [13, 14]. Damit das Modell verlässlich ist, benötigt man nicht nur die Abmessungen der einzelnen im Beschleuniger-Strahlerkopf eingebauten Teile, sondern auch deren Materialien. Außerdem ist die Energie- und Winkelverteilung der auf das Target treffenden Elektronen hierfür von Bedeutung.

Zur Validierung des Strahlerkopf-Modells wurden die in einem Wasserphantom mit dem Monte-Carlo-Verfahren EGS4 [9] berechneten Tiefendosisverteilungen und Querprofile mit gemessenen Daten verglichen.

Material und Methode

Beschreibung des MLCs

An der Radiologischen Universitätsklinik Tübingen stehen zwei mit MLCs ausgestattete Elekta SL15 Linearbeschleuniger zur Verfügung. Die 7,5 cm dicken Kollimatoren bestehen aus 40 parallel verlaufenden Lamellen, die opponierend zueinander angeordnet sind und gekrümmte Lamellenenden besitzen. Gekrümmte Lamellenenden heißt, daß die Stirnflächen der Lamellen abgerundet sind, wobei der Krümmungsradius $R = 15$ cm beträgt. Projiziert auf das Isozentrum, hat jede Lamelle eine Breite von 1 cm. Alle Lamellen können 12,5 cm über die Zentralachse hinaus bewegt bzw. 20 cm von der Zentralachse weg zurückgezogen werden [6].

Neben MLCs sowie Block-Blenden in x-Richtung sind die Linearbeschleuniger mit y-Backup-Blenden ausgestattet. Die

3 cm dicken Blenden mit gekrümmten Lamellenenden verwendet man, um die Leckstrahlung zwischen den Lamellen zu verringern. Die gekrümmten Vorderkanten der Backup-Blenden beeinflussen die Halbschatten-Breite, wie dies auch die Lamellenenden der MLCs tun.

Modellierung des Beschleunigerkopfes

In dieser Arbeit wurden zwei aus identischen Komponenten aufgebaute SL15 Linearbeschleuniger für den Betrieb mit 6 MV Photonenstrahlung modelliert. Das Beschleunigerkopfmodell besteht aus zwei Komponenten. Der erste Anteil simuliert Target, Primärkollimator, Ausgleichsfilter, Monitorkammer und Spiegel (Abb. 1). Das Beschleuniger-Austrittsfenster wurde als Parallelquelle mit Gaußscher Energieverteilung angenommen. Das heißt, der Elektronenstrahl trifft senkrecht auf das Target, wobei sein Durchmesser 2 mm beträgt. Die mittlere Energie dieser Verteilung beträgt 6,8 MeV und die Standardabweichung des Gaußschen Energiespektrums 1 MeV [3]. Diese Zahlenwerte wurden auf der Basis einer gemessenen Tiefendosisverteilung im Versuch- und -Irrtum-Verfahren bestimmt. Zuerst wurde die mittlere Energie geändert, damit die Dosismaxima von Simulation und Messung in gleicher Tiefe (1,5 cm) liegen. Danach wurde die Standardabweichung des Gaußschen Energiespektrums geändert, um eine bessere Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation im Abfallbereich der Tiefendosisverteilung zu erreichen. Die Veränderung der Standardabweichung des Gaußschen Energiespektrums führte dabei nur zu einer

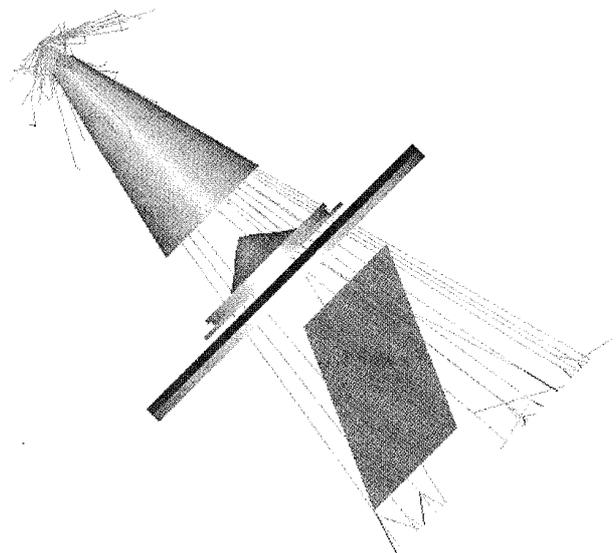


Abbildung 1 Oberer Bauteil des simulierten Linearbeschleunigerkopfes mit Target, Primärkollimator, Ausgleichsfilter, Monitorkammern und Spiegel. Die Linien verdeutlichen Photon- und Elektronenbahnen.

sehr kleinen Änderung der Position der Dosismaxima. Sie konnte deshalb vernachlässigt werden. Die Phasenraumeigenschaften unterhalb des Spiegels wurden einmalig nach der MC-Simulation dieser Bauteile in einer Datei gespeichert und für den zweiten Teil des Strahlerkopfes (Blende, MLC) als Quelle verwendet. Diese Datei enthielt 100 Millionen Teilchen.

Die untersuchten Linearbeschleuniger besitzen MLCs und Backup-Blenden (y-Richtung) mit gekrümmten Lamellenenden. Die gekrümmten Lamellenenden des MLCs konnten mit dem mitgelieferten Modul (MLCQ) simuliert werden. Dieses Modul ist aber nicht geeignet, um die Backup-Blenden ausreichend genau zu modellieren, da sich die Eigenschaften der Blenden unserer Beschleuniger von den Eigenschaften des MLCQ-Moduls unterscheiden. Deswegen wurde ein entsprechend modifiziertes Modul für das BEAM-Programm entworfen. Abbildung 2 zeigt die Eigenschaften dieses Moduls. Der Geometrieparameter Z_BLENDE bezeichnet den Abstand zwischen Target und Zentrum des Kreises, der die gekrümmten Lamellenenden der Lamellen beschreibt. Der Abstand zwischen Target und Oberfläche der Backup-Blenden wird durch den Geometrieparameter ZMIN repräsentiert. Die Positionen der Lamellen und der Blenden sind dabei von den Feldgrößen abhängig. Die in 90 cm Abstand vom Target re-

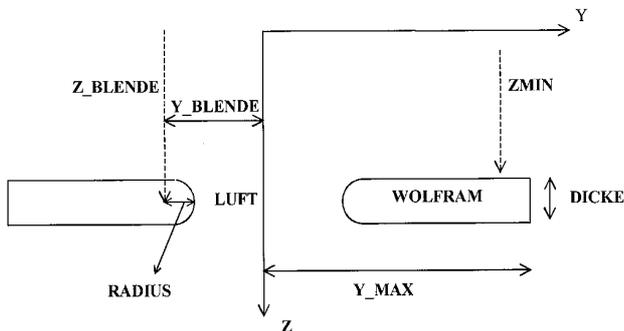


Abbildung 2 Technische Darstellung des neuen BEAM-Moduls zur Modellierung der Backup-Blenden mit gekrümmten Lamellenenden.

sultierenden Phasenraumeigenschaften wurden nach jeder MC-Simulation des zweiten Anteils gespeichert. Die Zahl der Teilchen in den Phasenraum-Dateien hängen dabei ebenfalls von den Feldgrößen ab, z. B. 10 Millionen Teilchen bei $10 \times 10 \text{ cm}^2$.

Um die Genauigkeit der Geometrie der runden Lamellenenden zu ermitteln, wurden zu Vergleichszwecken auch Multileafkollimatoren mit rechteckigen Lamellenenden modelliert.

Simulationsrechnungen im Wasserphantom

Für die Simulationsrechnungen im Wasserphantom wurde das DOSXYZ-Modul verwendet [8]. Hierzu wurde die Geometrie des Wasserphantoms in Form von kleinen quadratischen Volumenelementen (Voxel) mit verschiedenen Materialien und Größen definiert. Die Größe der Voxel hängt von den Feldgrößen und ihren Positionen ab. Tabelle 1 zeigt die detaillierte Größe der Voxel für verschiedene Feldgrößen.

Messungen

Sämtliche Messungen erfolgten in einem MP3-Wasserphantom (PTW Freiburg) bei einem Fokus-Oberflächen-Abstand (FOA) von 90 cm und verschiedenen Feldgrößen. Damit eine möglichst optimale Ortsauflösung erreicht werden konnte, wurde ein Diamantdetektor verwendet. Der Diamantdetektor besitzt ein sensitives Volumen von ca. $3,0 \text{ mm}^3$. Dieses besteht aus einer $0,32 \text{ mm}$ dicken Diamantkristallplatte mit einer annähernd kreisförmigen Fläche von $9,4 \text{ mm}^2$ [7].

Die Tiefendosisverteilung entlang des Zentralstrahls sowie Querprofile in verschiedenen Tiefen bei Feldgrößen von $2 \times 2 \text{ cm}^2$ und $10 \times 10 \text{ cm}^2$ wurden gemessen. Eine andere Messung erfolgte für ein unregelmäßiges Feld, das aus einem Feld von $15 \times 15 \text{ cm}^2$ Größe durch Verschieben einer mittleren Lamelle bis auf $0,5 \text{ cm}$ an die Zentralachse gebildet wurde (Abb. 3). Bei diesem Feld wurden x- und y-Querprofile in 10 cm Tiefe gemessen. Die Messungen der Querprofile parallel zur y-Achse erfolgten mit einem x-Offset von $-0,5 \text{ cm}$ relativ zum Zentralstrahl, Die Messungen der x-Querprofile erfolgten in 3 cm Abstand zu den Lamellenenden

Tabelle 1 Die Größe der Voxel für verschiedene Feldgrößen.

	2 cm x 2 cm			10 cm x 10 cm			unregelmäßig		
	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
Tiefendosisverteilung	1	1	1 / 0,2*	1	1	1/0,2*	–	–	–
X-Profile	0,1	1	1	1/ 0,25*	1	1	1/ 0,2*	0,5	1
Y-Profile	1	0,1	1	1	1/ 0,25*	1	0,5	1/ 0,5*	1

* in Gebieten mit steilem Dosisgradienten

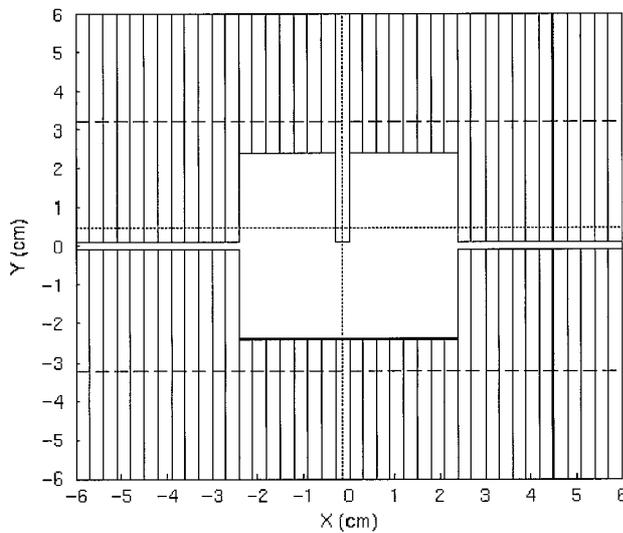


Abbildung 3 Die MLC-Geometrie, Backup-Geometrie, die Simulationenlinien und die Meßlinien zur Untersuchung der Einflüsse der gekrümmten Lamellenenden einer Lamelle (auf MLC-Ebene). Die gestrichelten Linien verdeutlichen die Kanten der Backup-Blenden. Die gepunkteten Linien bezeichnen die Simulationen- und Meßlinien. Y-Achse ist die Richtung der Lamellenbewegung.

unter der Lamelle (siehe Abb. 3). Durch diese Querprofile konnte sowohl der Einfluß der gekrümmten Lamellenenden wie auch der Breite der einzelnen Lamellen festgestellt werden, ohne daß die Messung durch Streueinflüsse von anderen Lamellen wesentlich beeinflusst wurde.

Ergebnisse und Diskussion

Vergleich von Simulationsrechnungen mit Messungen

Obwohl die beiden Linearbeschleuniger identischer Bauart sind und gleich eingestellt wurden, sind die Meßergebnisse nicht identisch. Insbesondere die Querprofile, die für den einen Linearbeschleuniger (Linac-G) bei $10 \times 10 \text{ cm}^2$ Feldgröße in 10 cm Tiefe aufgenommen wurden, weisen einen Dosisenbruch in der Umgebung des Zentralstrahls auf. Die Abweichung zwischen den Messungen an beiden Linearbeschleunigern liegt unterhalb 2 %. Deswegen wurden die Meßergebnisse an beiden Linearbeschleunigern gemittelt, bevor sie mit der Simulation verglichen wurden.

Es ergab sich zwischen gemessenen und simulierten Tiefendosisverteilungen im Wasserphantom eine Übereinstimmung von besser als 2 % bzw. maximal 1 mm in Gebieten mit steilem Dosisgradienten. In Abbildung 4 und Abbildung 5 sind die gemessenen und simulierten Tiefendosisverteilungen bei $2 \times 2 \text{ cm}^2$ und $10 \times 10 \text{ cm}^2$ Feldgröße dargestellt. In beiden

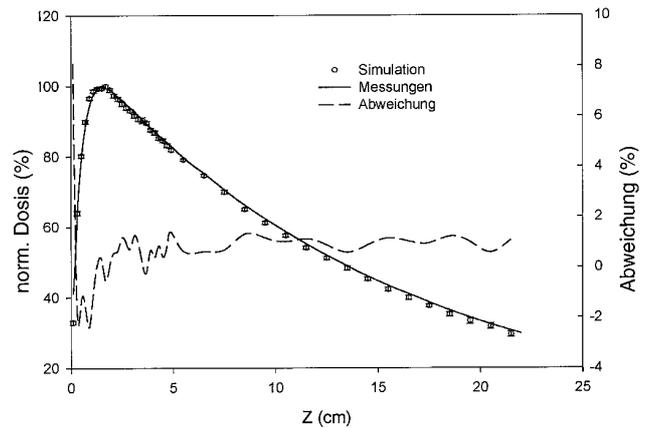


Abbildung 4 Tiefendosisverteilung aus Simulation und Messungen bei Feldgröße $2 \times 2 \text{ cm}^2$ (linke Skala) sowie die Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Tiefendosisverteilungen (rechte Skala).

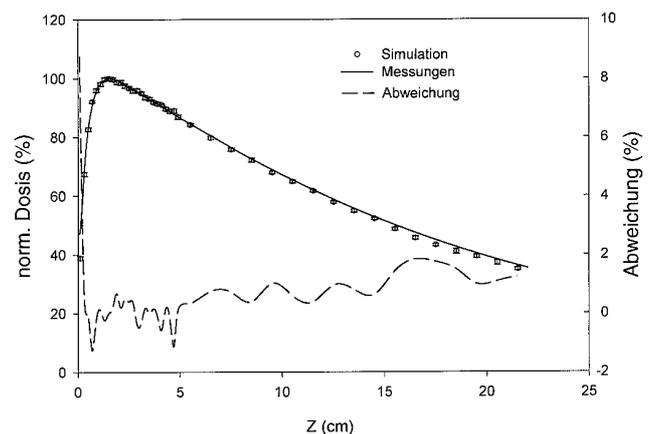


Abbildung 5 Tiefendosisverteilung aus Simulation und Messungen bei Feldgröße $10 \times 10 \text{ cm}^2$ (linke Skala) sowie die Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Tiefendosisverteilungen (rechte Skala).

Abbildungen ist eine leichte systematische Abweichung zwischen Messung und Simulation im Abfallbereich der Tiefendosisverteilung zu erkennen, die wahrscheinlich auf die nicht ganz exakte Parameterisierung des Elektronenspektrums zurückzuführen ist.

In Abbildung 6 ist der Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Querprofilen bei $10 \times 10 \text{ cm}^2$ Feldgröße in 10 cm Tiefe zu sehen. Sowohl die gemessenen als auch die simulierten Querprofile wurden dabei im Isozentrum ($x = 0, y = 0$) normiert. Abweichungen von mehr als 2 % bzw. 1 mm zwischen gemessenen und simulierten Querprofilen bei $10 \times 10 \text{ cm}^2$ Feldgröße befinden sich in der Nähe der Flanken der Querprofile, was möglicherweise auf die Größe der

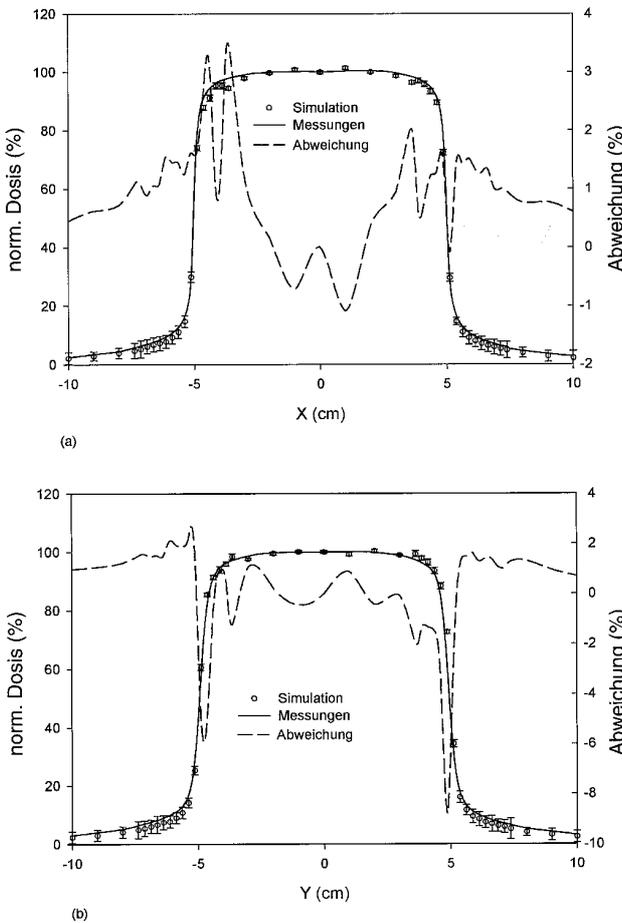


Abbildung 6 Gemessene und simulierte Querprofile, (a) in X-Richtung und (b) in Y-Richtung bei $10 \times 10 \text{ cm}^2$ Feldgröße in 10 cm Wassertiefe (linke Skala) sowie die Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Querprofilen (rechte Skala).

Voxel im Halbschatten-Bereich zurückgeführt werden kann. Die Größe der Voxel im Halbschatten-Bereich ist größer als die Ortsauflösung des für die Messungen verwendeten Detektors. Deswegen ist die Ortsauflösung in diesem Bereich bei den Simulationen unzureichend. Die zwischen 1 % und ca. 7 % bzw. 1 mm betragenden Abweichungen an den Rändern der Querprofile bei $2 \times 2 \text{ cm}^2$ Feldgröße sind in Abbildung 7 zu sehen. In den Simulationen wurden nicht alle Bauteile der Linearbeschleuniger modelliert, insbesondere nicht das Gehäuse. Das hat zur Folge, daß für alle Querprofile unter den Blenden tendenziell zu wenig Dosis simuliert wurde.

Tabelle 2 zeigt die Halbschattenbreite ($r(80\%) - r(20\%)$) für alle Querprofile in 10 cm Tiefe, wobei der Unterschied zwischen gemessenen und simulierten Querprofilen innerhalb 1 mm liegt. Alle Halbschattenbreiten wurden durch Interpolation der Querprofile erzeugt.

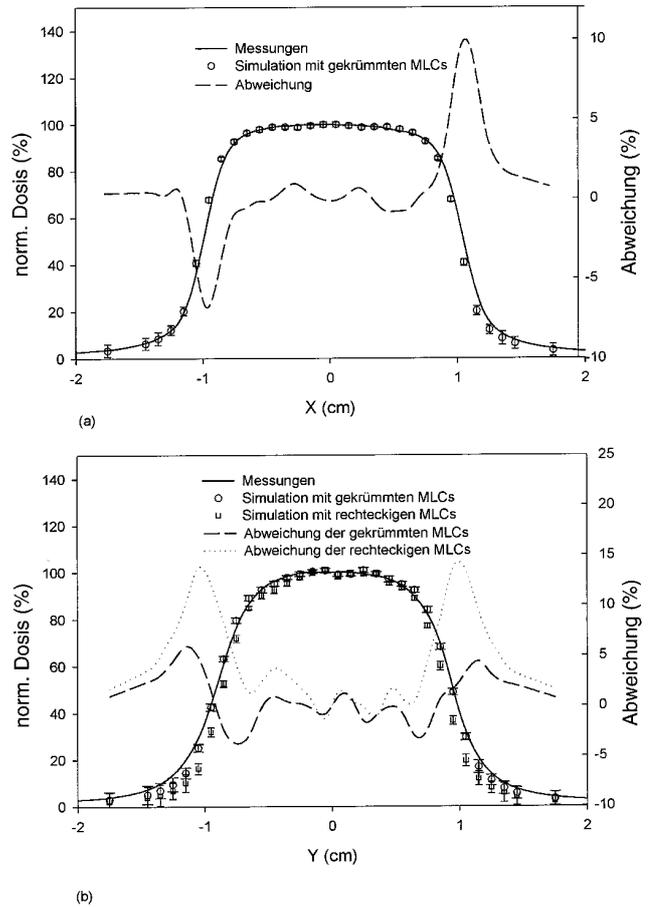


Abbildung 7 Gemessene und simulierte Querprofile, (a) in X-Richtung und (b) in Y-Richtung bei $2 \times 2 \text{ cm}^2$ Feldgröße in 10 cm Wassertiefe (linke Skala) sowie die Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Querprofilen (rechte Skala).

Die Genauigkeit der Geometrie der gekrümmten Lamellenenden einer Lamelle kann besonders gut anhand des unregelmäßigen Feldes von Abbildung 3 untersucht werden. Die modellierten Querprofile eines gekrümmten MLCs zeigen sowohl in x- als auch in y-Richtung gute Übereinstimmung mit den gemessenen Querprofilen. In Abbildung 8 wird deutlich, daß diese Abweichungen bei beiden Profilen ca. 2 % bzw. 1 mm betragen. Diese Ergebnisse zeigen, daß die Breite der einzelnen Lamellen wie auch die Geometrie der gekrümmten Lamellenenden bei der Simulation richtig modelliert wurden.

Vergleich zwischen gekrümmten und rechteckigen Lamellenenden

Ein Unterschied zwischen den modellierten Querprofilen eines MLCs mit rechteckigen Lamellenenden und eines mit gekrümmten Lamellenenden ergibt sich nur bei $2 \times 2 \text{ cm}^2$ und

Tabelle 2 Die Halbschattenbreite ($r(80\%) - r(20\%)$) für alle Querprofile in 10 cm Tiefe.

Feldgröße		Messungen		
		Linke Halbschattenbreite (mm)	Rechte Halbschattenbreite (mm)	Simulation
10 x 10	X	3,9	4,0	4,9
	Y	6,2	5,7	5,6
2 x 2	X	2,9	3,0	2,8
	Y	4,3	4,3	4,0

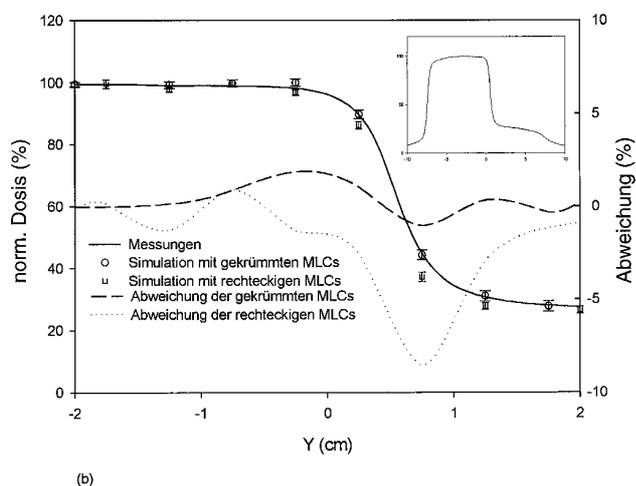
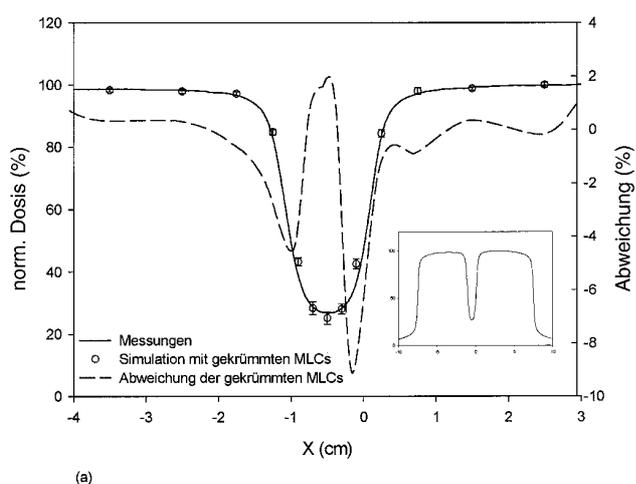


Abbildung 8 Gemessene und simulierte Querprofile, (a) in X-Richtung und (b) in Y-Richtung bei unregelmäßigen Feldgrößen in 10 cm Wassertiefe für Linac A (linke Skala) sowie Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Querprofilen (rechte Skala).

unregelmäßigem Feld. In Abbildung 7b ist an den Rändern der Querprofile des $2 \times 2 \text{ cm}^2$ -Feldes die Verbesserung durch die Simulation mit gekrümmten MLCs zu sehen. Der Unterschied zwischen gemessenen und simulierten Querprofilen ist zum Teil darauf zurückzuführen, daß die Positionierungsgenauigkeit von MLCs und Backup-Blenden bei kleinen Feldgrößen einen erheblichen Einfluß hat. Abb. 8b zeigt, daß unter der Blende bei den modellierten Querprofilen eines rechteckigen MLCs weniger Dosis als bei den Querprofilen eines gekrümmten MLCs simuliert wurde. Die Ursache für den Unterschied liegt nicht nur in der Positionierungsgenauigkeit der MLCs, sondern auch in der Geometrie der Lamellenenden. Aus diesen Ergebnissen ist ersichtlich, daß die Genauigkeit der Geometrie von MLCs und Backup-Blenden für die intensitätsmodulierte Radiotherapie (IMRT) besonders wichtig ist, weil bei der IMRT kleine und unregelmäßige Felder oft verwendet werden [10].

Schlußfolgerungen

Obwohl diese Arbeit bereits eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Daten zeigte, wird das Modell des Linearbeschleunigers gegenwärtig noch überprüft. Um das Modell zu verbessern, müssen noch einige Arbeiten durchgeführt werden. So soll das realistische Energiespektrum des Elektronenstrahls verwendet werden. Auch die Effekte der Lamellenquerschnitte (Nut und Feder) sollen analysiert werden.

Danksagung

Diese Arbeit wurde vom Deutschen Akademischen Austauschdienst unterstützt.

Literatur

[1] Baró, J., J. Sempau, J.M. Fernández-Varea und F.Salvat: PENELOPE : An algorithm for Monte Carlo Simulation of the Penetration and energy loss of electrons and positrons in matter. Nucl. Instrum. Methods **100** (1995) 31–46.
 [2] Briesmeister, J.F. : MCNP-A general Monte Carlo N-Particle transport code. Los Alamos National Laboratory, 1993, Report No. LA-12625-M.

- [3] Chetty, I., J.J. DeMarco and T.D. Solberg : *A virtual source model for Monte Carlo modeling of arbitrary intensity distributions*. Med. Phys. **27** (2000) 166–172.
- [4] Halbeib, J. A. and T. A. Mehlhorn : *ITS: The Integrated Tiger Series of Coupled Electron/Photon Monte Carlo Transport Codes*. Sandia Laboratories, 1992. Report No. SAND-84-0073.
- [5] Hendricks, J. S.: *A Monte Carlo Code for Particle Transport*. Los Alamos Science **22** (1994) 30–43.
- [6] Jordan, T. J. and P.C. Williams: *The design and performance characteristics of a multileaf collimator*. Phys. Med. Biol. **39** (1995) 231–251.
- [7] Laub, W. U., T. W. Kaulich and F. Nüsslin: *A diamond detector in the dosimetry of high-energy electron and photon beams*. Phys. Med. Biol. **44** (1999) 2183–2192.
- [8] Ma, C. M., P. Reckwerdt, M. Holmes, D. W. O. Rogers, B. Geiser and B. Walters : *DOSXYZ users Manual*. National Research Center of Canada, 1996. Report PIRS-0509B.
- [9] Nelson, W. R., H. Hirayama and D. W. O. Rogers: *The EGS4 Code System*. SLAC Report No. SLAC-265, 1985.
- [10] Palmans, H., F. Verhaegen, M. Buffa, G. D. Valdez and C. Mubata: *A consideration for modelling MLCs with Monte Carlo techniques*. In : XIII International Conference on the Use of Computer in Radiation Therapy, Heidelberg, Germany (2000), p. 458–460.
- [11] Roger, D. W. O., B. A. Faddegon, G. X. Ding, C. M. Ma, J. Wie and T.R. Mackie: *BEAM: A Monte Carlo code to simulate radiotherapy treatment units*. Med. Phys. **22** (1995) 503–524.
- [12] Seltzer, S. M. : *An Overview of ETRAN Monte Carlo methods*. In : Monte Carlo Transport of Electrons and Photons, edited by T. M. Jenkins, W. R. Nelson and A. Rindi. Plenum Press New York, 1988.
- [13] Vlamynck, K. De, H. Palmans, F. Verhaegen, C. De Wagter, W. De Neve and H. Threirens : *Dose measurements compared with Monte Carlo simulations of narrow 6 MV multileaf collimator shaped photon beams*. Med. Phys. **26** (1999) 1874–1882.
- [14] Zee, W. van der and J. Wellewerd: *Calculating photon beam characteristics with Monte Carlo technique*. Med. Phys. **26** (1999) 1883–1892.

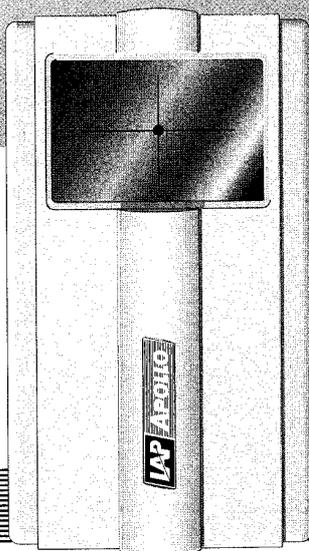
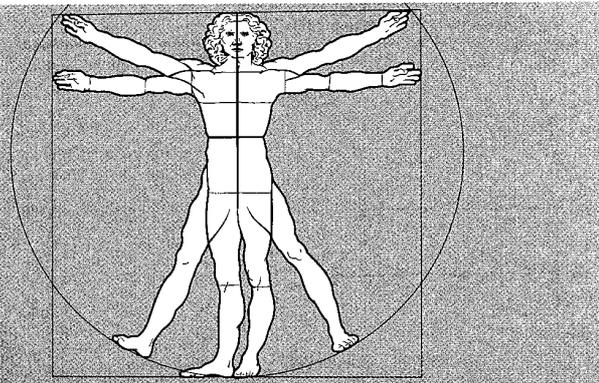
Eingegangen am 20. 11. 2000; zum Druck angenommen am 23.05. 2001.

Korrespondenzanschrift:

Freddy Haryanto
Abteilung für Medizinische Physik
Radioonkologische Universitätsklinik
Hoppe-Seyler-Straße 3
D-72076 Tübingen

ANZEIGE

**Laser-Systeme
zur Patienten-
Positionierung**



NEU
»APOLLO«
**Justierung
mit
Fernbedienung**

Für Linac, Simulator, CT, MR
Laser-Systeme zur CT Simulation
– Kreuze, Linien, Punkte – einfache Montage
– rot oder grün – 6-Achsen-Einstellsystem
– feinste Linien – präzise Justierung

Wir stehen Ihnen jederzeit zur Verfügung.
Mit Rat und Tat – und viel Know-how.
LAP GmbH, Zeppelinstraße 23, D-21337 Lüneburg
Telefon (0 41 31) 95 11 95, Fax (0 41 31) 95 11 96
Internet: www.LAP-Laser.com, E-mail: info@lap-laser.com

... immer einen Schritt voraus

**LASER
APPLIKATIONEN**

