

# Monte Carlo based treatment planning for modulated electron radiotherapy using a photon multileaf collimator

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Henzen, Dominik

**Publication date:**

2014

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010261380>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH No. 21855

**Monte Carlo based treatment planning for  
modulated electron radiotherapy using a  
photon multileaf collimator**

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

**DOMINIK HENZEN**

MSc ETH Physics

born on 11.04.1984  
citizen of Ferden (VS)

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. M.F.M. Stampanoni, examiner  
Prof. Dr. J.V. Siebers, co-examiner  
PD Dr. M.K. Fix, co-examiner  
Dr. P. Manser, co-examiner

2014

# Abstract

The depth dose curves for electron beams show a rapid distal fall-off, which offers potential use for the treatment of superficial tumors while sparing underlying tissue and organs at risk (OARs). However, there are some drawbacks in electron therapy, which limit their clinical application. One issue is that in the clinical routine, the electron dose distributions are shaped laterally using applicators and cut-outs. For each field, the applicators have to be mounted individually together with cut-outs, which in addition, have to be manufactured. Thus, this technique is cumbersome and labor intensive. Furthermore, there is the possibility to modulate the electron dose distributions distally, using a patient specific bolus (BolusECT) or electron beam segments with different energies. The bolus technique again requires a manufacturing process for each patient whereas for the segmented modulated electron beam technique (MERT) collimation systems are proposed, which allow the application of various field shapes. This flexibility becomes even more pronounced if the already available photon multi-leaf collimator (pMLC) is used for collimation, as no additional device has to be mounted or dismounted to the gantry when switching from photon to electron beams. Furthermore, the maintenance of an additional device becomes obsolete.

This thesis investigates MERT using pMLC shaped electron beams. No commercially available treatment planning system (TPS) features MERT routines, as electron beam models and treatment planning possibilities are missing. Thus, in this thesis a Monte Carlo (MC) based electron beam model for pMLC collimated electron beam is developed. In a next step an intuitive forward planning process is defined and implemented. To add additional degrees of freedom to the treatment planning process, in a third step an inverse planning process is developed. These tools are then used to plan MERT for an academic and clinically motivated situations. The results are compared to corresponding standard photon plans used in our clinics and BolusECT plans. Furthermore the results are put into context with already published MERT cases. Not only the missing treatment planning possibilities, but also efficient quality assurance (QA) techniques are a prerequisite for MERT in clinical use. In a final step, the suitability of a standalone amorphous silicon electronic portal imaging device (EPID) as a QA device is tested.

The electron beam model together with a macro MC dose calculation algorithm is tested for different field shapes and electron beam energies. For rectangular and circular patched segments applied to a water phantom an agreement generally within 2% or 2 mm is found comparing calculated and measured dose distributions. The excellent agreement between

diode, film and EPID measurements and calculations suggests that the electron beam model correctly represents the pMLC collimated electron fields. Forward MERT planning is successfully carried out for an academic and two clinically motivated cases (breast boost and whole breast). Using MERT for the breast boost, the integral dose to the body is lower than for the standard plan, without compromising the planning target volume (PTV) coverage. The comparison for the whole breast irradiation shows that using MERT leads to a lower lung volume which receives high dose values ( $> 45\%$  of the prescribed dose) compared to the standard plan, on cost of a less homogenous dose to the PTV and a higher mean dose to the lung. For the BolusECT plans result a very homogenous target coverage but for the whole breast irradiation the dose to the lung is much higher than for the MERT or standard treatment plan. The comparison of the MERT treatment plan with the standard photon plan for the whole breast case reveals the necessity for the use of multiple incident beam angles. Using the developed inverse optimization, an academic and three clinically motivated situations (whole breast, chest wall and squamous cell skin carcinoma) are planned. The use of multiple electron beam angles for the whole breast case leads to superior treatment plans regarding the sparing of the OARs compared to forward planned results, in particular lower mean lung dose. Compared to standard photon plans, MERT plans generally lead to better OAR sparing at the cost of a less homogenous dose distribution in the target. A good reproducibility of the measurements and a linear dose and dose rate response is found for the EPID. Furthermore, the comparison of film, diode and EPID measurements for delivered pMLC shaped segments shows an excellent agreement.

In conclusion, a treatment planning environment (including beam modeling) was successfully established and MERT was explored for an academic and selected clinically motivated situations. The EPID was identified as a possible QA device for MERT. All those encouraging results vindicate and emphasize the need of this developed framework in order to further investigate and identify the benefits of MERT and possibly put it to use in mixed beam treatment.

# Zusammenfassung

Die Tiefendosiskiven für Elektronen fallen distal steil ab, was sie zu einem geeigneten Instrument macht um oberflächennahe Tumoren zu bestrahlen und gleichzeitig das darunterliegende Gewebe mit den Risikoorganen zu schonen. In der klinischen Routine werden heutzutage Applikatoren und patientenspezifische Blöcke eingesetzt. Diese Blöcke müssen gegossen und zusammen mit dem Applikator an die Gantry montiert werden, was diese Technik sehr zeitaufwendig und kompliziert werden lässt. Zusätzlich gibt es auch die Möglichkeit einer distalen Modulation der Dosisverteilung. Dafür kann entweder ein spezifischen Bolus (BolusECT Technik) angefertigt werden oder man benutzt Segmente mit verschiedenen Elektronenenergien. Die erste Methode benötigt einen Herstellungsprozess eines patienten-spezifischen Bolus, wohingegen die für die modulierte Elektronen Radiotherapie (MERT) Kollimationssysteme vorgeschlagen wurden, mit denen verschiedene Felder appliziert werden können. Deren Flexibilität zeigt sich besonders wenn der schon vorhandene Photonen „multi-leaf collimator“ (pMLC) verwendet wird und somit keine zusätzlichen Hilfsmittel an der Gantry montiert werden müssen, sobald man von Photonen zu Elektronenfeldern wechselt. Damit entfällt natürlich auch die Wartung eines zusätzlichen Gerätes.

In dieser Dissertation werden die Möglichkeiten von MERT untersucht, wobei der pMLC zur Kollimation der Segmente benutzt wird. Zurzeit ist kein Bestrahlungsplanungssystem („treatment planning system“ TPS) auf dem Markt erhältlich, mittels welchem MERT Pläne generieren werden könnten. Dies liegt auch daran, dass es kein Strahlmodell gibt, welches die Kollimation der Elektronenfelder mit dem pMLC beinhaltet. Somit wird in einem ersten Schritt ein Monte Carlo (MC) basiertes Strahlmodell entwickelt und getestet. Anschliessend wird ein sogenannter ‚forward planning‘ Ansatz definiert. Mit Hilfe dieser Technik werden für eine akademisch und klinische Situationen MERT Pläne erstellt. Um weitere Freiheitsgrade in der Optimierung zu erlauben, wird auch eine inverse Optimierung entwickelt. Für diverse Situationen werden dann invers optimierte Pläne erstellt und mit standard Photonenplänen und BolusECT Plänen verglichen. Für die Implementation von MERT in der Klinik braucht es aber nicht nur eine Planungsumgebung, sondern auch eine Qualitätssicherungsstrategie („quality assurance“ (QA)). Darum wird in einem letzten Teil die Eignung eines amorphen Silizium EPIDs für den Einsatz in der QA untersucht.

Das Strahlmodell wurde zusammen mit einem makro MC Dosisberechnungsalgorithmus für verschiedene Feldformen und Energien getestet. Für rechteckige und runde Felder ist die

Übereinstimmung der gemessenen und gerechneten Dosisverteilungen im Allgemeinen kleiner als 2% oder 2 mm. Diese ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen Dioden, Film und EPID Messungen und den Rechnungen zeigt, dass das Strahlmodell geeignet ist, um Elektronenfelder zu berechnen, bei welchen der pMLC als Kollimator benutzt wird. Für einen akademischen Fall, sowie für einen Brust „boost“ und eine Bestrahlung der ganzen Brust werden MERT Pläne mit Hilfe der „forward-planning“ Strategie erstellt. Verglichen mit dem standard Photonenplan führt die MERT Technik beim „boost“ zu einer reduzierten integralen Körperdosis, ohne die Homogenität in der Tumordosis zu degradieren. Bei der Bestrahlung der ganzen Brust kann mit Hilfe von MERT der Hochdosisbereich (> 45% der verschriebenen Dosis) in der Lunge auf Kosten der Dosis homogenität im Tumor und der durchschnittlichen Lungendosis, gegenüber dem Photonenplan reduziert werden. Die BolusECT Technik liefert sehr homogene Dosisverteilungen im Tumor, jedoch führt sie bei der Bestrahlung der ganzen Brust zu weitaus höheren Dosen in der Lunge als die anderen Techniken. Dieser zweite klinisch motivierte Fall zeigte die Notwendigkeit mehrerer Einstrahlrichtungen für MERT auf. Mit Hilfe der entwickelten inversen Optimierung werden dann wiederum eine akademische und klinisch motivierte Situationen geplant. Im Vergleich mit der vorherigen „forward-planning“ Technik, führte die Möglichkeit mehrere Felder mit verschiedenen Gantrywinkeln aufzusetzen zu einer reduzierten Dosis in der Lunge bei der Bestrahlung der ganzen Brust. Verglichen mit den standard Photonenplänen zeigten die MERT Pläne eine, zum Teil deutliche, Reduktion der Dosis in den Risikoorganen. Dies geschieht aber auf Kosten einer reduzierten Homogenität der Dosis im Zielvolumen. Die Messungen mit dem EPID zeigen reproduzierbare Resultate und einen linearen Dosis und Dosis-Raten Verlauf. Ein Vergleich der EPID Resultate mit Film- und Diodenmessungen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

In dieser Dissertation wurde eine Bestrahlungsplanungsumgebung inklusive eines Strahlmodells entwickelt und MERT anhand einer akademischen und klinischer Situationen untersucht. Das EPID wurde als für QA-Zwecke geeignet empfunden. Die Resultate rechtfertigen und unterstreichen die Notwendigkeit der entwickelten Umgebung um die Vorteile von MERT und zukünftig auch kombinierte (Photonen und Elektronen) Therapien weiter zu untersuchen.