

Flüssigkeitsionisationskammern in der Strahlentherapie

J. Engler, IK; J.R. Hörandel, Institut für Experimentelle Kernphysik, Universität Karlsruhe;
G. Hartmann, R. Hofmann, Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Heidelberg

Einführung

Die Strahlentherapie zur Behandlung von Tumoren hat zum Ziel, eine möglichst hohe Strahlendosis im Tumorgewebe zu deponieren. Dabei ist unvermeidlich auch immer das umliegende, gesunde Gewebe mitbetroffen. Um dies zu schonen, dürfen bestimmte Grenzwerte für die Dosis nicht überschritten werden. Besondere Rücksicht ist hierbei auf sogenannte Risikoorgane zu nehmen, deren Toleranzdosen entweder sehr klein sind oder bei denen Komplikationen gravierende Folgen haben.

In den letzten Jahren sind eine ganze Reihe von neuen Bestrah-

lungsmethoden entwickelt worden, um dieses Ziel möglichst weitgehend zu erreichen. Dazu gehören die stereotaktisch geführte Radiochirurgie, Therapien mit beschleunigten geladenen Teilchen wie Protonen oder schweren Ionen, eine dreidimensional geplante Bewegungsbestrahlung oder die Einführung von Lamellenblenden (engl.: Multi-Leaf-Collimator, MLC). Die Anpassung des Bestrahlungsfeldes an die Außenkontur eines Tumors wird als Dosis-Konformation bezeichnet. Insbesondere durch Einführung vom MLCs konnte diese Dosis-Konformation entscheidend verbessert werden.

Die wichtigste Neuentwicklung stellt jedoch die intensitätsmodulierte Strahlentherapie (IMRT) dar, bei der zusätzlich zur Konturanpassung die Strahlungsinintensität innerhalb des Feldes variiert wird. Auf diese Weise lässt sich die Konzentrierung der Strahlendosis auf das Tumervolumen noch einmal beträchtlich steigern. In Abb. 1 sind links ein konventionelles Strahlungsfeld und rechts ein in IMRT-Technik erzeugtes Feld mit gleicher Konturanpassung als Beispiel skizziert. Bei der konventionellen Methode wird mit den Lamellenblenden der Strahlquerschnitt an die Projektionsflächen des Tumorsquerschnitts senkrecht zur Strahlrichtung angepasst. Eine Be-

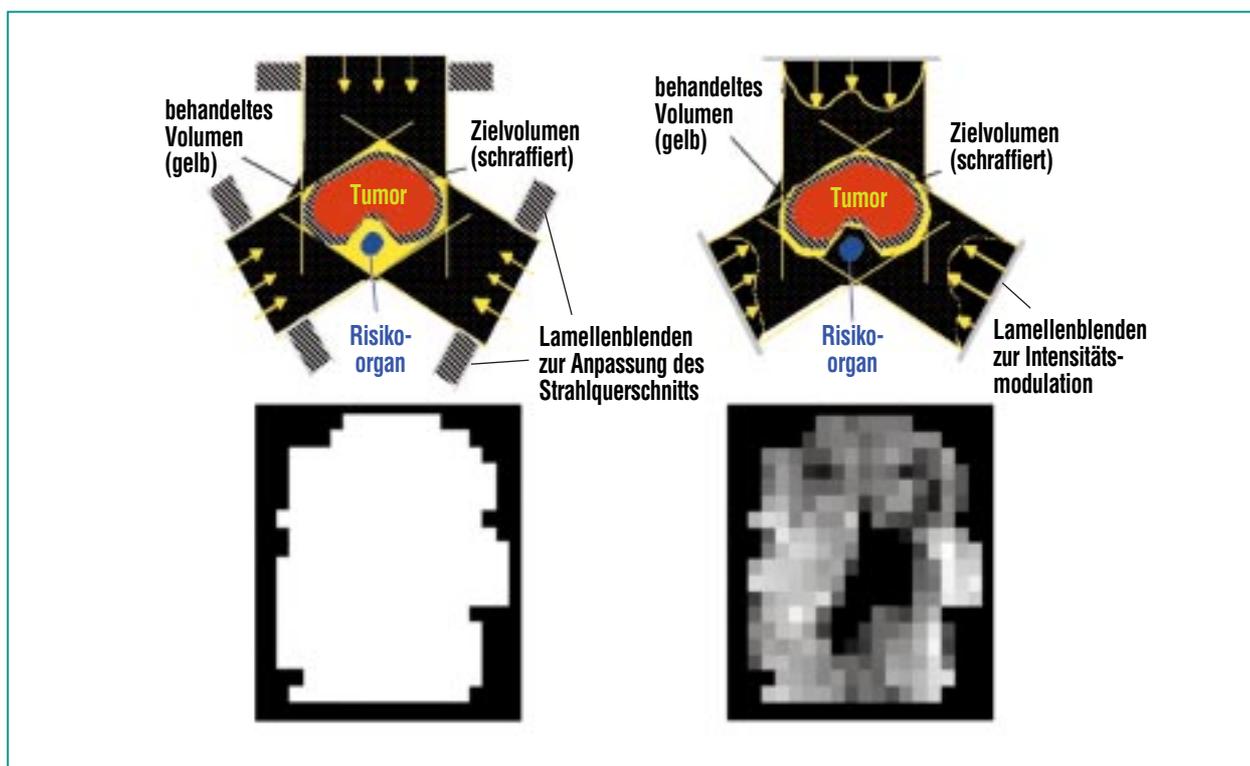


Abb. 1: Konformation mit konventioneller Bestrahlungstechnik (links) und mit intensitätsmodulierter Strahlentherapie (rechts); oben: Schnittbilder einer Zielregion mit eingestrahelten Dosisprofilen; unten: Beispiele für die Intensitätsverteilungen der verwendeten Felder. Die Intensität in einer Schnittebene durch die Zielregion ist in Graustufen kodiert.

strahlung des skizzierten Risikoorgans ist mit dieser Methode unvermeidbar.

Die Methode der IMRT ist eng mit dem Konzept der inversen Planung verknüpft. Bei der konventionellen Strahlentherapie wird die Dosisverteilung im Körper von solchen Strahlungsfeldern erzeugt, die zwar individuell auf den Patienten abgestimmt sind, jedoch nur durch Erfahrung gewonnen wurden. Im Gegensatz dazu wird bei der inversen Planung die gewünschte Dosisverteilung im Patienten vorgegeben und danach berechnet, wie die einzustrahlenden Felder gestaltet werden müssen. Die so berechneten Felder sind in der Regel in ihrer Intensität nicht mehr homogen, wie im gezeigten Beispiel zu sehen ist. Für einzelne Segmente des Strahlquerschnittes werden unterschiedliche Belichtungszeiten gewählt, im Beispiel ist dies

durch die verschiedenen langen Pfeile angedeutet. Eine Bestrahlung des gezeigten Risikoorgans kann dadurch vermieden werden.

Die unteren Teilbilder zeigen die resultierende Intensitätsverteilung in einer Schnittebene durch die Zielregion. Mittels der konventionellen Technik wird die gesamte Zielregion homogen bestrahlt, dagegen erlaubt die intensitätsmodulierte Strahlentherapie eine abgestufte Bestrahlung einzelner Segmente.

Die Intensitätsmodulation der Felder kann mit verschiedenen Techniken erreicht werden, zwei davon sind in Abb. 2 skizziert.

1. Bei der „Step-and-shoot-Technik“ werden mit Hilfe der Lamellen eines MLC nacheinander verschiedene Feldformen eingestellt. Mit einer feststehenden Feldform wird bis zum Erreichen der erforderlichen Dosis für diese Feldform be-

strahlt; dann wird die Bestrahlung unterbrochen, eine neue Feldform zur Überlagerung der vorherigen eingestellt und die Bestrahlung wieder aufgenommen.

2. Bei der „Sweeping-Window-Technik“ wird die vom Lamellenkollimator erzeugte Feldform während der laufenden Bestrahlung kontinuierlich variiert. Der MLC erzeugt hierbei eine Art Schlitzblende, die durch Bewegung der Lamellen verschoben und verformt wird. Für jede feststehende Feldform wird nacheinander die erforderliche Dosis eingestrahlt, die gewünschte Dosisverteilung durch Überlagerung mehrerer Bestrahlungen erzeugt. Feldform und -position sind also zeitabhängig. Über Bereichen, die eine größere Dosis erhalten sollen, bleibt der Kollimator länger geöffnet, d.h. die Blende wird in diesem Bereich langsamer bewegt bzw. verbreitert. Diese Technik wird auch als dynamische IMRT bezeichnet. Die Vorteile liegen in kürzeren Behandlungszeiten (keine Unterbrechungen während der Bestrahlung) und in der Möglichkeit, fließende Dosisgradienten zu erzeugen.

Allen diesen Bestrahlungstechniken ist gemeinsam, dass die erzeugten Dosisverteilungen dreidimensional und komplex sind und deshalb überprüft werden müssen. Hinzu kommt, dass die technischen Abläufe zur Erzeugung dieser Dosisverteilungen eine Reihe von möglichen Fehlfunktionen haben können, deren negative Auswirkungen auf den Patienten mit großer Sicherheit ausge-

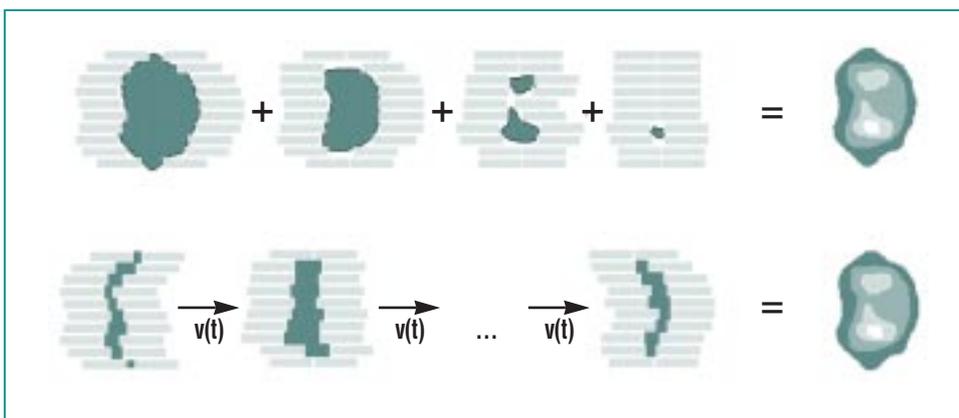


Abb. 2: Techniken zur Erzeugung intensitätsmodulierter Felder; oben: „Step-and-shoot“ Technik; unten: „Sweeping-window“ Technik. Die horizontalen Balken deuten die verschiebbaren Absorberstreifen (Lamellen) an, mit deren Hilfe die Kontur des durchtretenden Strahlenbündels (dunkle Flächen) eingestellt werden kann. Im unteren Bild werden die Lamellen individuell programmiert verschoben, so dass die gewünschte Intensitätsmodulation erzielt wird. Die jeweils resultierende Intensitätsverteilung ist rechts angedeutet.

geschlossen werden müssen. Daraus ergibt sich, dass bei den innovativen Bestrahlungstechniken die Qualitätssicherung, insbesondere die dreidimensionale Messung von Dosisverteilungen, zunehmend wichtiger wird. Man kann sich hier – im Gegensatz zu konventionellen Techniken – nicht auf Erfahrungswerte stützen.

Messtechnik

Eine mögliche Vorgehensweise bei der Qualitätssicherung besteht darin, ein sogenanntes Phantom, das aus einem dem menschlichen Gewebe möglichst äquivalenten Material und Messsonden besteht, entsprechend dem Bestrahlungsplan eines Patienten zu bestrahlen. Die erwartete Dosisverteilung kann anschließend mit der im Phantom gemessenen Energiedeposition verglichen werden.

Die Eigenschaft der Gewebeäquivalenz bezieht sich auf die Absorptions- und Streueigenschaften des Materials in bezug auf die verwendete Strahlung. Mit einem Wasserphantom lässt sich lebendes Gewebe ausreichend simulieren. Auch die Sonden in einem Phantom sollten dem Gewebe äquivalent sein. Deshalb sind Gase als sensitives Medium für die zu verwendenden Ionisationskammern ungeeignet. Eine gute Gewebeäquivalenz besitzen dagegen flüssige Kohlenwasserstoffe wie Isooktane oder Isononane.

Für das Experiment KASCADE wurden solche Ionisationskam-

mern entwickelt (siehe auch den Beitrag von J. Engler et al. in diesem Heft), bei denen in einer Flüssigkeit die elektrischen Signale an den Elektroden durch die Bewegung freier Elektronen beeinflusst werden. Als Flüssigkeiten wurden u.a. 2,2,4,4-Tetramethylpentan und 2,2,4-Trimethylpentan verwendet, in dem ionisierende Strahlung einen relativ hohen Anteil an freien Elektronen erzeugt [1, 2]. Beide Kohlenwasserstoffe sind unpolar, so dass freie Elektronen nicht durch Coulomb-Kräfte an die Moleküle gebunden werden und sich daher unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes in der Flüssigkeit etwa 10^5 mal schneller bewegen als positive oder negative Ionen. Dementsprechend lassen sich schnelle und hohe Signalimpulse auskoppeln. Voraussetzung für die hohe Beweglichkeit der Elektronen ist allerdings, dass die Kohlenwasserstoffe frei von polaren Verun-

reinigungen sind, und zwar im Bereich von einigen ppb¹. Auch die Kammeroberflächen müssen sorgfältig gereinigt werden. Gegenüber Trimethylpentan hat Tetramethylpentan den Vorteil einer höheren Signalausbeute, so dass mit kleineren Dosisleistungen gearbeitet werden kann. In gut gereinigtem Zustand ermöglichen geringe Restströme auch die Auflösung feiner Strukturen.

Für eine Prototypkammer wurde eine Elektrodenkonfiguration gewählt, wie sie in Abb. 3 skizziert ist. Die Anordnung besteht aus parallelen Keramikplatten, bei der die Kathoden in Quadrate mit 2.5 mm Seitenlänge segmentiert sind, die jedes getrennt durch einen Stromverstärker ausgelesen werden. Die Signale werden über Multipolglasdurchführungen aus dem Flüssigkeitsvolumen herausgeführt. Der Elektrodenabstand beträgt 2.5 mm, so dass

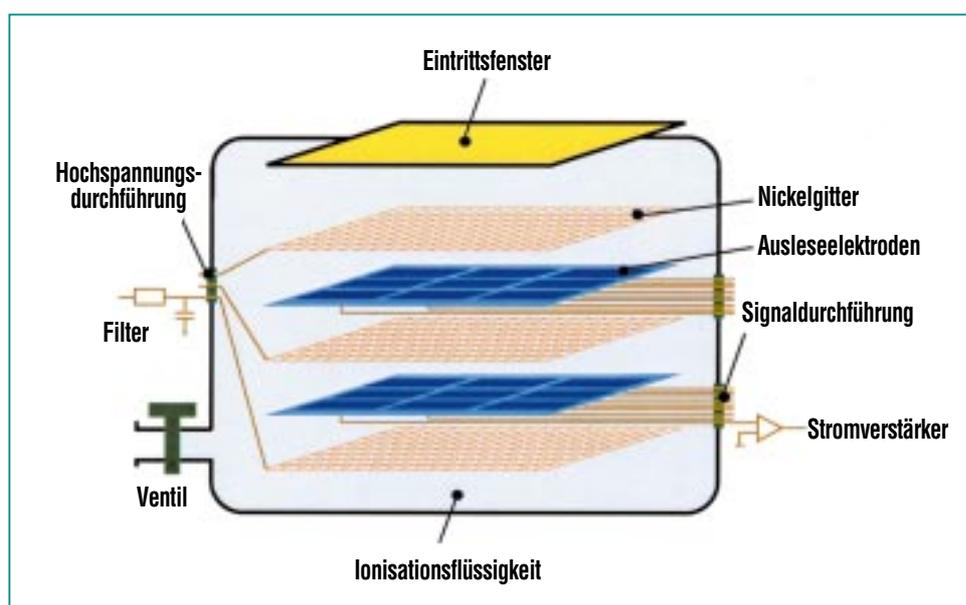


Abb. 3: Schematische Ansicht der Flüssigkeitsionisationskammer.

¹) 1 ppb = 1 Teil in 10^9 Teilen (molares Mischungsverhältnis)



Abb. 4: Photographie des Prototyps der Flüssigkeitsionisationskammer. Die Multipoldurchführungen befinden sich in den rechteckigen Vertiefungen im Deckel, das Aluminiumkästchen mit Koaxialkabelanschluss beinhaltet das Filter für die Hochspannungsversorgung, im Vordergrund das Ventil zum Befüllen der Kammer.

das zu untersuchende Volumen in Würfel von 2.5 mm Kantenlänge unterteilt wird. Die Hochspannung von ca. 1000 Volt wird über ein fast masseloses Nickelgitter, das auf einen Keramikrahmen gespannt ist, angelegt. Die Kammer wird vollständig mit Flüssigkeit befüllt, ein elastisches Strahleintrittsfenster aus dem Kunststoff VECTRA sorgt dafür, dass thermische Volumenänderungen abgefangen werden. Alle verwen-

deten Materialien wie VECTRA, Tetramethylpentan und Keramik besitzen ausreichende Gewebeäquivalenz und beeinflussen die räumliche Dosisverteilung in einem Phantom minimal. Abb. 4 zeigt eine Photographie der Versuchskammer mit vier Multipol-durchführungen und einem Filter für die Hochspannungszuführung. In der Mitte befindet sich das Strahleintrittsfenster.

Mit dieser Kammer werden zur Zeit Messungen mit Tetramethylpentan als Flüssigkeit an der ^{60}Co -Quelle im DKFZ in Heidelberg durchgeführt. Erste Ergebnisse bestätigen die erwartete hohe Empfindlichkeit und eine – verglichen mit Isooktan – gute Signalausbeute (ca. $8 \mu\text{C}/\text{Gray} \times (2.5 \text{ mm})^3$). Auch die Reproduzierbarkeit ist ausgezeichnet, so dass sich längere Messreihen durchführen lassen.

Zusammenfassung und Ausblick

Für die neue Methode der intensitätsmodulierten Strahlentherapie stellen Flüssigkeitsionisationskammern geeignete Monitorgeräte zur Messung der Dosisverteilung dar. Mit moderner Verstärker- und Ausleseelektronik können viele Kanäle gleichzeitig erfasst und registriert werden. Man erhält dadurch ein zeitlich und räumlich hoch aufgelöstes Bild des Bestrahlungsfeldes, was eine wirkungsvolle Kontrolle des Bestrahlungsvorgangs gestattet. In zukünftigen Untersuchungen sollen für verschiedene Anwendungsgebiete am besten geeignete Flüssigkeiten und Elektrodenkonfigurationen ermittelt werden.

Literatur

[1] Göran Wickmann, Hakan Nyström, Phys. Med. Biol. 37 (1992) 1789

[2] Joachim Engler, J. Phys. G Nucl. Part. Phys. 22 (1996) 1