

Bernhard Rhein
Dr. sc. hum.

Physikalisch Technische Qualitätssicherung und –Management in der intensitätsmodulierten Strahlentherapie IMRT mit hochenergetischen Photonen

Geboren am 12.03.1959 in Plankstadt

Diplom der Fachrichtung Strahlenschutz am 1.10.1985 an der Berufsakademie Karlsruhe

Promotionsfach: DKFZ (Deutsches Krebsforschungszentrum)

Doktorvater: Prof. Dr. rer. nat. W. Schlegel

Im Jahr 1998 wurde am Deutschen Krebsforschungszentrum die Intensitätsmodulierte Strahlentherapie (IMRT) mit hochenergetischen Photonen mit Linearbeschleunigern der Fa. Siemens nach der Multisegmentfeld (MSF) Methode eingeführt. Bis heute wurden ca. 1500 Patienten mit Tumoren im Kopf- Hals- und im Körperstammbereich bestrahlt.

Bei konkav geformten Zielvolumina mit in der Konkavität lokalisierten Risikostrukturen ist es selbst mit modernen 3D konformalen Bestrahlungstechniken (3D-CRT) oft nicht möglich, den Tumor mit der notwendigen Dosis zu bestrahlen, ohne gleichzeitig die Toleranzdosis der Risikostruktur zu überschreiten. Durch die Modulation der Photonenfluenz innerhalb der Bestrahlungsfelder bei der IMRT wird dieses Problem in den meisten Fällen gelöst.

Für die Medizinische Physik ergibt sich hierbei folgendes Problem. In der 3D-CRT können die pro Bestrahlungsfeld mit dem Bestrahlungsplanungssystem berechneten und am Linearbeschleuniger einzustellenden Dosismonitoreinheiten relativ einfach auf Plausibilität geprüft werden. Dies ist bei der IMRT aufgrund der Modulation der Photonenfluenz innerhalb der Bestrahlungsfelder nicht mehr möglich. Ein Lösungsansatz bietet hier die Methode der dosimetrischen Verifikation, bei der jeder IMRT-Bestrahlungsplan rechnerisch in ein Verifikationsphantom übertragen und mit geeigneten Detektoren nachgemessen wird.

In dieser Arbeit wird ein Qualitätssicherungsprogramm für die IMRT am DKFZ beschrieben, welches sich an den Vorgaben der nationalen und internationalen Normen und Richtlinien orientiert. Die daraus abgeleiteten und neu definierten Qualitätssicherungsmaßnahmen werden unterschieden in die Bereiche der Patienten bezogenen und der Beschleuniger bezogenen Qualitätssicherungsmaßnahmen. Für jeden Teilbereich wurden Standard Operation Procedures (SOPs) definiert, in denen die QA- Prozeduren, Toleranzkriterien und Maßnahmen bei Toleranzüberschreitung festgelegt sind.

Als Patienten bezogene Qualitätssicherung wird am DKFZ die Methode der dosimetrischen Verifikation eingesetzt. Hierzu wurden seit Einführung der IMRT am DKFZ unterschiedliche dosimetrische Verifikationsverfahren optimiert. Es wurden Verifikationsverfahren für die Filmverifikation mit radiografischen Filmen in einem Film-, Body- oder Mamma- Phantom, die gleichzeitige Messung mit 5 zylindrischen Ionisationskammern in einem Matrix-Phantom und die Verifikation mit einem 2D-Array mit 729 Ionisationskammern in einem Zylinderphantom entwickelt. Die verwendeten zylindrischen Ionisationskammern und das 2D-Array werden vom Hersteller absolut in der Einheit Wasserenergiedosis bezogen auf die Referenzstrahlenqualität ^{60}Co unter geometrischen Referenzbedingungen kalibriert. Bei der IMRT nach der MSF-Methode mit hochenergetischen Photonen wird allerdings hiervon zum Teil erheblich abgewichen. Besonderes Augenmerk wurde daher auf die Genauigkeit der eingesetzten Verifikationsverfahren bei der IMRT gelegt.

Die Abweichung berechneter- und im Verifikationsphantom gemessener Dosisverteilungen hängt nicht allein von dem Fehler eingesetzten Verifikationsmethode ab, sondern auch von

den Fehlern der Dosisberechnungsalgorithmen und der zu deren Erzeugung benutzen dosimetrischen Basisdaten über den kompletten Feldgrößenbereich (0.5x0.5cm² bis 40x40cm²). Die Messfehler und der Einsatzbereich der zur Basisdosimetrie eingesetzten Detektoren wurden untersucht. Folgende Detektoren kamen zum Einsatz: Ionisationskammern unterschiedlichen Messvolumens, ein Diamantdetektor und Dioden mit und ohne Energiekompensation.

Weiterhin wirken sich Ungenauigkeiten der IMRT – Applikation am Beschleuniger, wie z.B. die MLC Positioniergenauigkeit, die Feldgrößengenauigkeit, oder Abweichungen von der Dosis- Monitor- Linearität, auf das Verifikationsresultat aus. Diese vom Beschleuniger verursachten Fehler werden durch die Beschleuniger bezogenen Qualitätssicherungsmaßnahmen berücksichtigt. Für jedes zu prüfende Qualitätsmerkmal wurden wiederum SOPs mit der Festlegung von Toleranzgrenzen und Aktionen bei deren Überschreitung definiert.

Zum Beispiel wurde für die Festlegung der Toleranzgrenze für die MLC-Positionier- und Feldgrößengenauigkeit gefordert, dass der durch ungenaue MLC-Positionierung resultierende dosimetrische Fehler maximal $\pm 5\%$ betragen darf. Dies bedeutet für den in der neuesten Generation der Siemens Beschleuniger “ARTISTE“ integrierten MLC 160TM eine Toleranzgrenze bezüglich der Positioniergenauigkeit von $\pm 0.4\text{mm}$.

Unter Berücksichtigung aller bei der IMRT-Verifikation beitragenden Einzelfehler (Linearbeschleuniger, Dosisberechnungsalgorithmus, Verifikationsdosimeter), wurde für die IMRT Verifikation mit 5 zylindrischen Ionisationskammern im Matrix-Phantom und dem 2D-Array ein Kriterium zur Akzeptanz eines IMRT-Bestrahlungsplanes von maximal $\pm 5\%$ Abweichung zwischen der Dosisberechnung und dem Ergebnis der Verifikationsdosimetrie definiert. Für die Filmdosimetrie beträgt das Akzeptanzkriterium maximal $\pm 8\%$.

Gemäß der DIN 6870-1 (Qualitätsmanagement in der medizinischen Radiologie – Strahlentherapie) werden alle Verifikationsresultate aufgezeichnet. Durch regelmäßige retrospektive Auswertungen der Verifikationsergebnisse sollen Veränderungen und systematische Abweichungen frühzeitig erkannt, die Gründe hierfür analysiert und Korrekturmaßnahmen durchgeführt werden. Diese regelmäßige retrospektive Analyse führte in der Vergangenheit zur Anpassung der Dosisberechnungsalgorithmen im Bereich kleinster Felder. Weiterhin konnten systematische Veränderungen der Verifikationsresultate, obwohl innerhalb der Toleranzkriterien, aufgrund eines Beschleunigerwechsels unterschiedlicher Bauart zum Vorgängerbeschleuniger, frühzeitig detektiert werden.

Die Minimierung des zeitlichen Gesamtaufwandes bei der dosimetrischen Verifikation war bei der Entwicklung des physikalischen IMRT-Qualitätssicherungsprogramms von besonderer Bedeutung, weil heute im Rahmen der bildgestützten Strahlentherapie nicht wenige Patienten während des Fraktionierungsschemas 2 oder mehr IMRT Pläne erhalten. Bei 30 IMRT-Patienten pro Tag mit durchschnittlich 30 Fraktionen pro Bestrahlungsserie und zusätzlichen Planadaptionen können bis zu 10 dosimetrische Verifikationen pro Woche anfallen.

Daher werden heute zur weiteren Minimierung des Gesamtaufwandes alle neuen IMRT-Bestrahlungspläne in eine einzige Verifikationssitzung pro Woche zusammengefasst. Im ungünstigsten Fall erfolgt die Verifikation erst nach der fünften Bestrahlungsfraktion. Bis dahin werden die berechneten Monitoreinheiten neuerdings mit einem kommerziellen Programm zur unabhängigen Monitoreinheiten-Berechnung auf Plausibilität geprüft. Diese Plausibilitätsprüfung ist zum Ausschluss grober Fehler geeignet und kann kein Ersatz für die in dieser Arbeit vorgestellten Verifikationsverfahren sein.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass im DKFZ ein physikalisches QA-Programm innerhalb der Strahlentherapie etabliert wurde, das den routinemäßigen Einsatz komplexer Bestrahlungstechniken, wie der IMRT, auch unter den wirtschaftlichen Zwängen

der heutigen Zeit erlaubt. Seit Einführung der IMRT am DKFZ wurde der Zeitbedarf von anfänglich 12 Stunden kontinuierlich bis heute im Mittel auf 10 Minuten pro IMRT-Verifikation reduziert. Deswegen finden Teile der in dieser Arbeit vorgestellten Patientenbezogenen und Beschleunigerbezogenen IMRT-Qualitätssicherungsverfahren auch in der Radioonkologischen Klinik der Universität Heidelberg Anwendung.