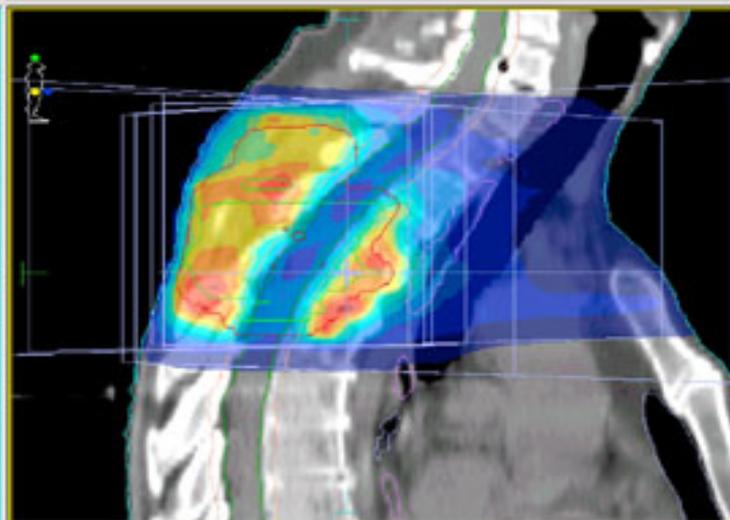
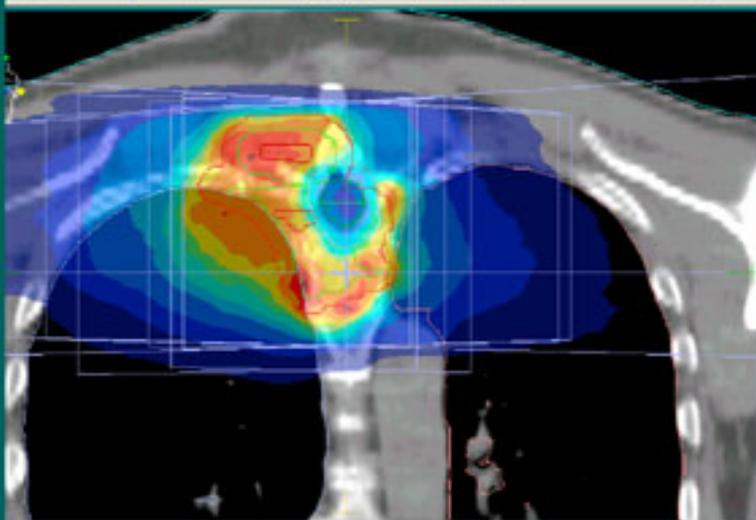
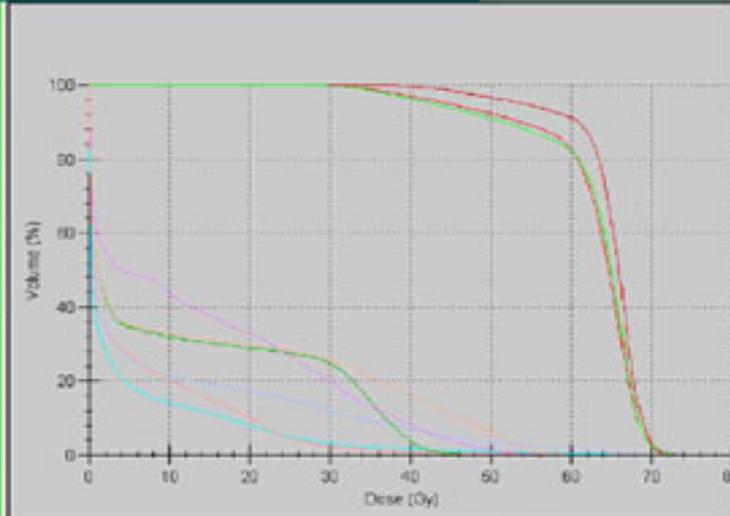
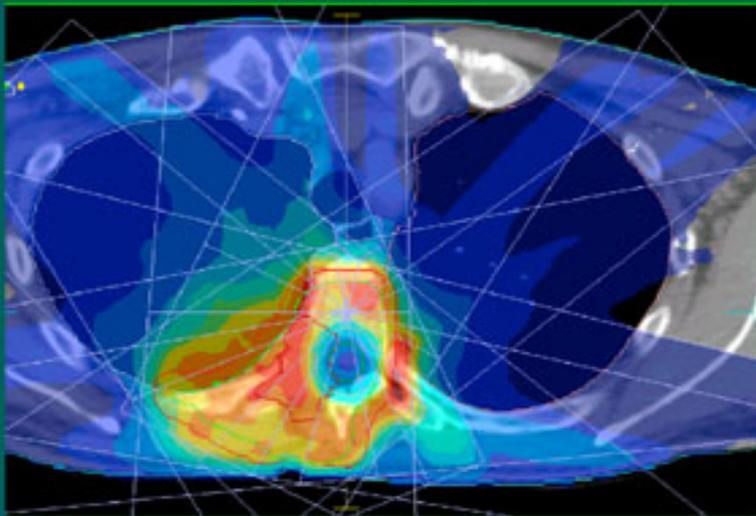


Konrad Buchauer

*Temperaturkompensierte Dosisverifikation mit Radiochromem Film*

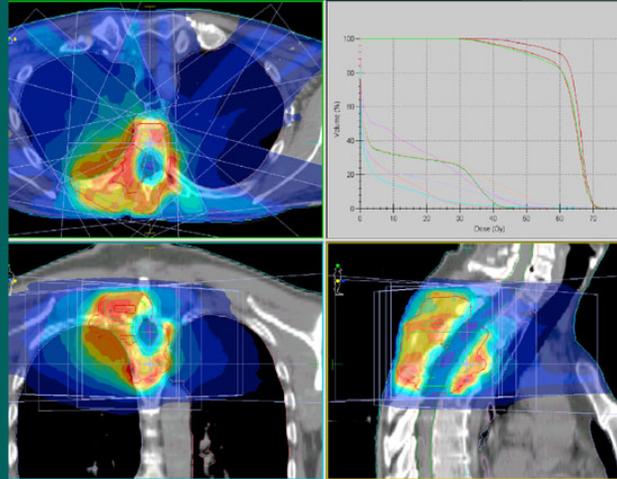
*Qualitätskontrolle neuer Bestrahlungstechniken im Gesamtkonzept der modernen Strahlentherapie*



Konrad Buchauer

*Temperaturkompensierte Dosisverifikation mit Radiochromem Film*

*Qualitätskontrolle neuer Bestrahlungstechniken im Gesamtkonzept  
der modernen Strahlentherapie*



**TEMPERATURKOMPENSIERTE DOSISVERIFIKATION  
MIT RADIOCHROMEM FILM**

**QUALITÄTSKONTROLLE NEUER  
BESTRAHLUNGSTECHNIKEN IM GESAMTKONZEPT  
DER MODERNEN STRAHLENTHERAPIE**

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Philosophiæ Doctor unter der Leitung von

Prim. Univ.- Doz. Dr. med. Alexander de Vries  
Abteilungsleiter für Radio- Onkologie LKH Feldkirch



---

MEDIZINISCHE UNIVERSITÄT  
INNSBRUCK

Mag. rer. nat. Konrad Buchauer  
Kirchstrasse 9b  
6900 Bregenz

Innsbruck, Februar 2012

Eingereicht an der Medizinischen Universität Innsbruck im  
Studienprogramm:

„Image Guided Diagnosis and Therapy - IGDT“

DISSERTATIONSKOMITEE:

Erstes Mitglied: Univ.- Prof. Dipl. Ing. Dr. med. Peter  
Lukas

Zweites Mitglied: Univ.- Prof. Dr. rer. nat. Monika  
Ritsch-Marte

Betreuer: Prim. Univ.- Doz. Dr. med.  
Alexander de Vries

INTERNER  
BEGUTACHTER:

Ao. Univ. Prof. Dr. med. univ. Reto  
Bale

EXTERNER BEGUTACHTER:

Univ.- Doz. Dr. rer. nat. Georg  
Stücklschweiger



## KURZFASSUNG

Intensitätsmodulierte Strahlentherapie - IMRT ist die augenblicklich wahrscheinlich beste Möglichkeit, um in der Strahlentherapie von malignen Tumorerkrankungen gesundes Patientengewebe zu schonen. Die Toxizitäten der Behandlung können deutlich verringert werden. Dadurch entsteht die Möglichkeit, den Tumor mit einer höheren Dosis zu bestrahlen oder größere Gebiete bei der Bestrahlung einzuschließen, die einem Risiko der Tumorausbreitung unterliegen. Neben einer besser verträglichen Strahlentherapie birgt die Modulation der Intensität somit das Potential für eine weitere Steigerung der Tumorkontrollraten.

Seit vielen Jahren werden Methoden unter Verwendung von radiografischen<sup>1,2</sup> oder radiochromen<sup>3,4,5</sup> Filmen in der Verifikation von modernen Strahlentherapieanwendungen mit steilen Dosis-gradienten und irregulären Bestrahlungsmustern verwendet. GAFCHROMIC® EBT (GC-EBT) Filmdosimetrie wird als praktische und präzise Methode der Dosismessung eingesetzt<sup>6,7</sup>. Die Hauptvorteile liegen in der geringen Energieabhängigkeit<sup>8,9,10,11</sup>, in der hohen Ortsauflösung<sup>12</sup> und der hohen Gewebeäquivalenz<sup>13</sup>, sowie in der Möglichkeit, die Filme ohne nasschemische Verfahren auszuwerten<sup>14,15</sup>. Kostengünstige Flachbettscanner mit Büroanwendungsqualität können für diesen Zweck verwendet werden. Die Anwendung wird in vielen Dosimetrieprotokollen beschrieben<sup>16,17,18,19</sup>. Ebenfalls wird über eine Reihe von charakteristischen Artefakten berichtet<sup>4,20,21,22,23</sup>. Temperaturartefakte sind schon bei früheren radiochromen Dosismessverfahren

aufgetreten<sup>24,25</sup>. Ob derartige Temperatureffekte in der nun für die Strahlentherapie üblichen GC-EBT Filmdosimetrie auftreten und ob die Effekte auf die Auswertung der Filme am Flachbettscanner Einfluss haben, ist die Fragestellung dieser Arbeit. Weiters werden Art und Größenordnung der gefundenen Effekte bestimmt. Temperaturkontrollierte Photospektrometrie wurde verwendet, um die Ausleseigenschaften des GC-EBT Films zu bestimmen. Um die klinische Auswirkung zu untersuchen, wurden Mehrfachscanstudien mit steigender Temperatur am Flachbettscanner verwendet.

Das gesamte optische Transmissionsspektrum unterliegt im Wellenlängenbereich von 400-700nm einem deutlichen Verschiebungseffekt zu niedrigeren Wellenlängen, wenn die Temperatur erhöht wird. Weiters nimmt die Absorption in der Gegend von Absorptionsmaxima ab und steigt im Bereich der Minima. Auslesedifferenzen von bis zu  $-1\%/^{\circ}\text{C}$  für ein mit 2,7Gy bestrahltes Filmstück wurden bei einer Wellenlänge von 650nm beobachtet. Die temperaturbedingten Ausleseunterschiede hängen stark von der spektralen Charakteristik des verwendeten Lichts ab. Für jeden Farbkanal des Flachbettscanners liegt ein unterschiedliches Verhalten vor. Adaptierte GC-EBT Filmdosimetrierichtlinien werden vorgestellt. Temperaturbedingte Auslesefehler können vermieden werden, wenn die Temperatur als Dosimetrieparameter eingeführt wird.

## ABSTRACT

Intensity Modulated Radiation Therapy - IMRT is currently the treatment option with the most expedient possibility to spare healthy tissue in therapy of patients suffering from malignant tumor. Treatment toxicities can be reduced considerable. That offers the possibility to further increase dose or expand treatment volume to more regions with risk of tumor spread. Beside reduced side effects IMRT therefore bears the potential of further increased tumor control rates.

Film dosimetry procedures with different types of radiographic<sup>1,2</sup> and radiochromic<sup>3,4,5</sup> films have been used for modern steep dose gradient and highly irregular irradiation techniques for many years. GAFCHROMIC® EBT (GC-EBT) type radiochromic film dosimetry is used as a precise and practical dosimetry system<sup>6,7</sup> with the main advantages of low energy dependence<sup>8,9,10,11</sup>, high spatial resolution<sup>12</sup>, near-tissue equivalence<sup>13</sup> and processor-less handling of films<sup>14,15</sup>. The use of an inexpensive consumer quality flat bed scanner is established in many dosimetry protocols<sup>16,17,18,19</sup>. Various artifacts are reported<sup>4,20,21,22,23</sup>, and particularly temperature artifacts are well known from former radiochromic film dosimeters<sup>24,25</sup>. Whether GC-EBT type radiochromic film is subject to temperature artifacts and how this would affect flat bed film readout is emphasis of this work. In addition, this thesis focuses on determining the readout wavelengths and bandwidths that are affected by temperature artifacts in GC-EBT dosimetry, as well as the magnitude of the effect. Temperature controlled photo spectrometry was used to assess temperature related readout changes in GC-EBT type film dosimetry. For

observing clinical impact of findings multiple scan studies with rising flat bed scanner temperature were performed.

The whole optical spectrum of GC-EBT film in the observed wavelength range of 450-700nm shows a distinct spectrum shift linear with temperature towards lower wavelengths when readout temperature is increased. In Addition absorption decreases in maximum regions and increases in minimum regions of the absorbance spectrum. Absorption readout differences of  $-1\%/^{\circ}\text{C}$  for a 2,7Gy irradiated film piece at a readout wavelength of approximately 650nm can be found. The readout difference is strongly dependent on readout light spectral characteristic, irradiation dose and temperature. Readout difference can be positive or negative. Characteristic temperature behavior patterns are present for each color channel of a flat bed scanner.

When using unsuitable readout light careful control of the readout temperature is necessary in order to obtain consistent and accurate results. Adapted GC-EBT type film dosimetry guidelines are presented. Temperature dependent readout differences on a flat bed scanner can be avoided when using scannerbed temperature as a fixed dosimetry parameter.

# INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung

Abstract

Zielsetzung

Struktur dieser Arbeit

Krebstherapie mit ionisierender Strahlung

Aufbau und Wirkung des Linearbeschleunigers

Onkologische Bildgebung zur Festlegung des

Bestrahlungsgebietes

Bestrahlungsplanung

Durchführung der Strahlentherapie

Intensitätsmodulierte Strahlentherapie - IMRT

Inverse Therapieplanung

Biologische Optimierung

Klinische Bedeutung von konkaven Dosisverteilungen

Qualitätsmerkmale der IMRT

Medizinische Aspekte

Spezifische Qualitätskontrolle am Linearbeschleuniger

Patientenweise Qualitätskontrolle

Gafchromic EBT Filmdosimetrie

Filmtypen: EBT - EBT2 - EBT3

Management der Artefakte

Klinische Anwendung

Nachdruck Medical Physics 36 (11) November 2009 5044-5051

„GAFCHROMIC® EBT photo- spectral dose response dependence on temperature and implications for flat bed scanning“

I. Introduction

II. Materials and Methods

III. Results and Discussion

IV. Conclusion

Acknowledgements

Kongressbeitrag ÖGRO 2009

„Klinische Relevanz der photospektralen  
Eigenschaften von GAFCHROMIC® EBTx in  
Abhängigkeit der Temperatur“

Kongressbeitrag DGMP 2010

„Photospektrale Dosisantwort von GAFCHROMIC®  
EBTx in Abhängigkeit der Temperatur und  
Auswirkungen für die klinische Dosimetrie am  
Flachbettscanner“

Anhang

Referenzen

Abbildungsverzeichnis

Danksagung

Lebenslauf Buchauer Konrad

## ZIELSETZUNG

Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Strahlentherapie in den letzten Jahren macht neue, angepasste und verbesserte Methoden zur Qualitätskontrolle notwendig. Die Anschaffung von zwei Linearbeschleunigern und die Einführung der Intensitätsmodulierten Strahlentherapie (IMRT) am Akademischen Lehrkrankenhaus Feldkirch (LKHF), Abteilung für Radio- Onkologie, im Jahr 2008 war der Grund für die vorliegende, praxisnahe wissenschaftliche Fragestellung. Es war notwendig geeignete neue Therapieverifikationsmethoden zu finden bzw. bestehende Methoden zu verbessern. So war es Teil der Vorbereitungen, die zur Verifikation der IMRT notwendige Filmdosimetrie im Rahmen eines Schwerpunktprojekts des Instituts für Medizinische Physik am LKHF im Jahr 2007 für die klinische Anwendung zu erarbeiten.

Dosimetrie mit Filmen bildet traditionell, nicht nur in der Strahlentherapie, die Möglichkeit zur Dosismessung mit der höchsten Ortsauflösung<sup>26</sup>. Hohe Ortsauflösung ist gerade in der Kommissionierung eines IMRT Systems von zentraler Bedeutung. Risikostrukturen in der Größe des Sehnervs (2mm) müssen zuverlässig geschont werden können. Dies ist ein Bestandteil der klinischen Anforderungen an die IMRT Technik. In [Abbildung 1](#) aufgeführte übliche Mittel zur Dosismessung weisen eine Ortsauflösung von 2mm bei der Anwendung in anthropomorphen Messphantomen auf. Die Filmdosimetrie ist in der Lage, Strahlenwirkung mit einer Genauigkeit von kleiner als 0,2mm darzustellen. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Methode der Gafchromic EBT Filmdosimetrie zu untersuchen, wenn möglich zu optimieren und dann in der klinischen Routine zu etablieren.

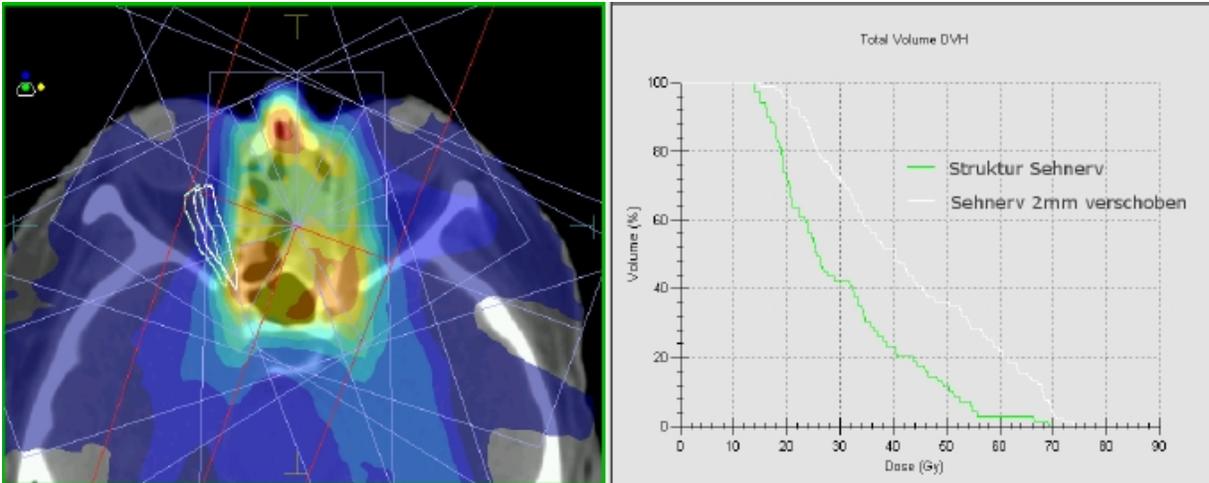


Abbildung 1: An einer kleinen Struktur wie dem optischen Nerv steigt die mittlere Dosis bei einem örtlichen Messfehler von 2mm von 30Gy auf 42Gy.

Parallel zur Routinearbeit am Schwerpunkt Krankenhaus LKH Feldkirch wurde in den Jahren 2005 bis 2011 im Studienprogramm „Image Guided Diagnosis und Therapy – IGDT“ an der Medizinischen Universität Innsbruck die wissenschaftliche Grundlage für die hochpräzise Dosisverifikation der IMRT Technik mit Gafchromic EBT Filmdosimetrie erarbeitet. Es stellte sich heraus, dass die gefundenen Zusammenhänge über die bis dahin unbekannte Temperaturabhängigkeit der Gafchromic EBT Filme von internationalem wissenschaftlichen Interesse sind. So konnten die Ergebnisse der Untersuchungen 2009 im führenden Fachjournal für Medizinphysik „Medical Physics“ veröffentlicht werden. Dies unterstreicht das hohe Niveau unserer Untersuchungen und der am Landeskrankenhaus in Feldkirch umgesetzten Maßnahmen zur optimalen Qualitätskontrolle.

## **STRUKTUR DIESER ARBEIT**

Die Struktur der vorliegenden Arbeit weicht bewusst von der üblichen Form einer Dissertation ab. Es wurde für einen Leser im klinischen Umfeld der Strahlentherapie geschrieben. Dieser „klinische Leser“ kann zum Beispiel Strahlentherapiepatient oder Angehöriger sein, kann Radiologietechnologe, kann Medizintechniker oder ein Arzt sein. Damit soll die Arbeit einer breiteren Leserschicht zugänglich werden. Der Sinn der medizinphysikalischen Abläufe als Teil einer wirkungsvollen Strahlentherapie soll dargestellt werden. Therapieverifikation stellt einen der wichtigen Zusammenhänge zwischen Medizin und Physik im Krankenhaus dar. Es kann den am Umfeld der Entstehung der Arbeit interessierten Personen ein genaueres Verständnis für die Therapieverifikation vermittelt werden. Damit wird versucht, für den klinischen Leserkreis eine Brücke von der konventionellen Strahlentherapie zu den neuen, klinisch relevanten Bestrahlungstechniken mit hochindividueller Intensität und deren modernen Verifikationsmethoden zu bauen. Die detailreichen Untersuchungsergebnisse über Temperaturabhängigkeit der Gafchromic EBT Filmdosimetrie stehen im Bereich der ersten Kapitel im Kontext zur Krebstherapie und können somit vom Leser in einen aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik der Strahlentherapie eingeordnet werden.

|                       | <i>Aufwand</i> | <i>Ortsauflösung</i> | <i>Dichte</i> | <i>Absolutdosis</i> | <i>Flexibel 2D</i> |
|-----------------------|----------------|----------------------|---------------|---------------------|--------------------|
| Ionisationsmesskammer | ●              | ●                    | ●             | ●                   | ●                  |
| Kammerarray           | ●              | ●                    | ●             | ●                   | ●                  |
| TLD                   | ●              | ●                    | ●             | ●                   | ●                  |
| MV Epid               | ●              | ●                    | ●             | ●                   | ●                  |
| FilmDOSimetrie        | ●              | ●                    | ●             | ●                   | ●                  |

Tabelle 1: Übersicht über Möglichkeiten zur zweidimensionalen Qualitätskontrolle für IMRT

Im ersten Kapitel „Krebstherapie mit ionisierender Strahlung“ wird ein allgemeiner, einführender Einblick in die Therapie mit intensitätsmodulierter, ionisierender Strahlung gegeben. Als Grundlage dafür wird die geschichtliche Entwicklung der konventionellen Strahlentherapie umrissen. Weiters werden neben medizinischen Aspekten die technischen physikalischen Rahmenbedingungen dargestellt. Dazu zählen unter anderem epidemiologische Informationen über den Stellenwert der Strahlentherapie, die Funktion des Linearbeschleunigers und die Therapiekette. Eine ökonomische Bewertung wird anhand von zwei populärwissenschaftlichen Artikeln österreichischer Zeitschriften angerissen. Im Unterkapitel „Aufbau und Wirkung des Linearbeschleunigers“ werden allgemeine Grundlagen der Strahlentherapie besprochen. Beschleunigertechnik, Volumenkonzepte, eine Übersicht über Bestrahlungsplanung und die Therapiekette in der Strahlentherapie führen zur IGRT. Die bildgeführte Strahlentherapie „Image Guided Radiation Therapy - IGRT“ wird als Basis für die Intensitätsmodulation im Kapitel „Durchführung der Strahlentherapie“ vorgestellt. Bildüberlagerung, Bildfusion, Registrierungs- und

Konturierungsalgorithmen sind wichtige Hilfstechnologien und werden ebenfalls in diesem Kapitel vorgestellt.

Der Bereich „Intensitätsmodulierte Strahlentherapie - IMRT“ erklärt das Prinzip der Segmentmodulation mit statischen Segmenten als Standardfall einer modulierten Bestrahlung. Klinische Vorteile werden beleuchtet und die Bedeutung von konkaven Dosisverteilungen für den Patienten dargestellt. Mit den komplexen Techniken untrennbar verbunden ist die Weiterentwicklung der Qualitätskontrolle. Der Linearbeschleuniger im Zusammenspiel mit einer umfangreichen Computer- und Netzwerkstruktur ist der menschlichen Wahrnehmung zur Überprüfung nur noch bedingt zugänglich.

Im Kapitel „Qualitätsmerkmale der IMRT“ wird beschrieben, welche klinischen Qualitätsmerkmale bei der IMRT erfüllt sein müssen. Es wird gezeigt, welche Eigenschaften des Linearbeschleunigers zusätzlich zur Qualitätskontrolle bei der konventionellen Strahlentherapie geprüft werden. Qualitätskontrolle für den Linearbeschleuniger selbst wird in „Spezifische Qualitätskontrolle am Linearbeschleuniger“ beschrieben. Im Gegensatz zur konventionellen Strahlentherapie ist bei der Intensitätsmodulation eine individuelle Kontrollmessung von Bestrahlungsplänen von Patienten vor Bestrahlungsbeginn üblich. Die geplante Dosisverteilung wird dabei durch Messungen der Bestrahlungsdosis und der Dosisverteilung überprüft.

Die neue, patientenspezifische Verifikation (QA) von IMRT Bestrahlungsplänen ist der zentrale Teil dieser Dissertation. Im Abschnitt „Patientenweise Qualitätskontrolle“ wird begründet, warum geeignete Prozeduren zur zweidimensionalen Dosimetrie benötigt werden. Die in Tabelle 1 gegenübergestellten und weitere mögliche Verfahren werden dargestellt. Im Kapitel „Gafchromic EBT Filmdosimetrie“ geht es um die Entwicklung einer Methode