

# Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	2
<b>2 Identifikation von Handlungsbedarfen in der Strahlentherapie .....</b>	<b>5</b>
2.1 Grundlegende Aspekte der Strahlentherapie .....	5
2.1.1 Übergeordneter klinischer Ablauf .....	5
2.1.2 Einflussfaktoren auf die Dosisverteilung .....	7
2.1.3 Aufbau eines Strahlentherapiegeräts .....	11
2.1.4 Bestrahlungssapplikationen und Trends .....	14
2.2 Analyse des Workflows in der Strahlentherapie .....	16
2.2.1 Klärung allgemeiner Anforderungen und Begrifflichkeiten .....	18
2.2.2 Beschreibung und qualitative Analyse des klinischen Workflows .....	20
2.2.3 Klinische Workflowdaten aus Patientensicht .....	24
2.2.4 Auswertung der Teilprozess- und Gantrypositionierungszeiten .....	25
2.3 Ableiten des Forschungsbedarfs .....	29
2.3.1 Maßnahmen mit Einfluss auf das Therapiegerätekonzept .....	30
2.3.2 Maßnahmen im Umfeld des Therapiegeräts .....	31
2.3.3 Ganzheitliche Übertragung von Technologien, Simulationswerkzeugen und Methoden aus der Produktionstechnik auf das klinische Umfeld .....	33
<b>3 Flexibles, universell einsetzbares und workflowgerechtes Therapiegerätekonzept .....</b>	<b>37</b>
3.1 Anforderungen an den mechatronischen Aufbau und aktuelle Entwicklungen .....	37
3.1.1 Mindestanforderungen an Strahlerzeugung, -formung und Bildgebung .....	37
3.1.2 Randbedingungen für die Entwicklung des mechatronischen Geräteaufbaus .....	38
3.1.3 Stärken und Schwächen der kinematischen Strukturen etablierter Therapiegerätekonzepte .....	43
3.2 Modulares, flexibles und universell einsetzbares Linearkinematikkonzept .....	47
3.2.1 Grundkonzept und Konzeptvarianten .....	47
3.2.2 Mathematische Beschreibung der Kinematik .....	52

3.2.3	Modulare Gerätestruktur durch hochintegrierte Strahlerkopfeinheit.....	54
3.2.4	Prototypisch realisierter Linearkinematikdemonstrator.....	56
3.2.5	Effektive und effiziente Bildgebungssysteme.....	58
3.3	Verbesserte Abläufe und medizinische Applikationen durch das Linearkinematikkonzept.....	63
3.3.1	Erweiterte Applikationsmöglichkeiten durch virtuelles Isozentrum.....	63
3.3.2	Variabler Abstand zwischen Strahlaustrittspunkt und dem Isozentrum ..	66
3.3.3	Ganzkörperbestrahlung in Translationstechnik.....	68
3.3.4	Reduzierte Positionierzeiten durch Ausnutzung des Bewegungsraums ..	69
3.3.5	Zusammenfassende Bewertung des Linearkinematikkonzepts .....	71
4	<b>Verbesserung der Behandlungsqualität durch Absolutgenauigkeitssteigerung der Gerätekinematiken .....</b>	<b>77</b>
4.1	Herausforderungen und Grundlagen der absolutgenauen Positionierung .....	77
4.1.1	Grundlagen und Defizite klassischer Verfahren zur Genauigkeitssteigerung.....	77
4.1.2	Sensorsysteme zur Posemessung.....	79
4.2	Kosteneffizientes Stereokamerasystem zur raumintegrierten Posemessung der Patientenliege .....	82
4.2.1	Genauigkeitssteigerung durch Posemessung und -regelung des Patiententischs .....	82
4.2.2	Voruntersuchungen zur Genauigkeit des Posemesssystems .....	85
4.3	Realisierung der Poseregelung einer robotergeführten Patientenliege .....	87
4.3.1	Roboterzelle zur Untersuchung der Gesamtpositioniergenauigkeiten .....	87
4.3.2	Fehlervektorberechnung zur Ansteuerung des Roboters .....	89
4.3.3	Untersuchungen zur Absolutgenauigkeit der Poseregelung .....	92
4.4	Maßnahmen zur Genauigkeitssteigerung flexibler Therapiegerätekinematiken	95
4.4.1	Tragstrukturoptimierung mittels Finite-Elemente-Methode.....	96
4.4.2	Wiederholgenauigkeit des Linearkinematikdemonstrators .....	97
4.4.3	Kosteneffizientes Stereokamerasystem zur regelmäßigen Posemessung der Therapiegerätekinematik .....	100
5	<b>3D-Monitoringsystem zur kollisionsfreien Bewegungsplanung und Kontrolle der Patientenlage.....</b>	<b>103</b>
5.1	Sensorbasiertes Patienten- und Therapiegerätemonitoring.....	103
5.1.1	Strategien der Kollisionsvermeidung.....	103
5.1.2	Überwachung von Patientenbewegungen .....	105
5.1.3	Verfahren zur Gewinnung von Tiefeninformationen .....	107
5.1.4	Räumliches Patientenmonitoring mittels ToF-Kamera .....	110

5.2 Automatische Kollisionsvermeidung und Überwachung der Patientenlage .....	112
5.2.1 Anbringung des Sensorsystems für die Anwendung in der Strahlentherapie.....	112
5.2.2 Konzept der integrierten Kollisionsvermeidung und Patientenlageüberwachung .....	113
5.3 Räumliche Objekterfassung auf Basis von Time-of-Flight Sensordaten .....	115
5.3.1 Maßnahmen zur Reduktion von Fehlereinflüssen .....	116
5.3.2 Charakterisierung und Parametrisierung der verwendeten ToF-Kamera .....	118
5.3.3 Preprocessing der 3D-Sensordaten .....	122
5.4 Objekterkennung und Hüllkörpermodellierung des Patienten .....	123
5.4.1 Segmentierung des Patienten.....	124
5.4.2 Gewinnung der Körperstruktur des Patienten .....	126
5.4.3 Repräsentation des Patienten mittels Oriented Bounding Boxes .....	128
5.5 Effizienter Anlagenbetrieb durch modellbasierte Bewegungsplanung .....	130
5.5.1 Kinematische und geometrische Modellierung des Therapiegeräts .....	131
5.5.2 Planung effizienter, kollisionsfreier Bewegungsabläufe .....	132
5.5.3 Sichere, effiziente Bestrahlungsdurchführung durch Online- Kollisionsvermeidung .....	135
5.6 Detektion von Patientenverlagerungen während der Behandlung .....	137
<b>6 Optimierungspotential des integrierten Behandlungssystems .....</b>	<b>141</b>
6.1 Modellierung und Simulation klinischer Workflows mittels Ablaufsimulation....	141
6.2 Kürzere Gesamtbelegdauer durch Erhöhung des Parallelisierungsgrads im Workflow .....	143
6.2.1 Simulation des klassischen Strahlentherapie workflows .....	144
6.2.2 Simulationsbasierte Bewertung von Parallelisierungsmaßnahmen .....	145
6.3 Effizienzsteigerungspotential der entwickelten Automatisierungslösungen .....	147
6.4 Gesamtpotential zur Effizienzsteigerung in der Strahlentherapie.....	149
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>151</b>
<b>Summary .....</b>	<b>153</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>155</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>169</b>