

# Inhaltsverzeichnis

1	Einführung .....	1
1.1	Klinische Problemstellung .....	1
1.2	Technische Problemstellung .....	4
1.3	Zielsetzung der Arbeit.....	5
2	Stand der Technik.....	7
2.1	Einführung in die Kegelstrahl-Computertomographie .....	7
2.1.1	Grundlagen der Computertomographie .....	7
2.1.2	Entwicklung der Kegelstrahl-Computertomographie.....	8
2.1.3	3D-Rekonstruktion eines Volumens.....	11
2.1.4	Bildqualität in der Kegelstrahl-Computertomographie .....	13
2.2	Intraoperative 3D-Röntgensysteme für die Kegelstrahl-Computertomographie.....	16
2.2.1	Computertomographen .....	16
2.2.2	C-Bögen.....	17
2.2.3	Zusammenfassung .....	20
2.3	Bildaufnahmetrajektorien für die intraoperative Kegelstrahl-CT .....	20
2.3.1	Vollständigkeit von Bildaufnahmetrajektorien.....	21
2.3.2	Planare Bildaufnahmetrajektorien .....	21
2.3.3	Nicht-planare Bildaufnahmetrajektorien .....	22
2.3.4	Winkelbeschränkte Bildaufnahmetrajektorien .....	24
2.3.5	Verfahren zur Bewertung oder Anordnung von Röntgenquellenpositionen ..	24
2.3.6	Zusammenfassung .....	25
2.4	Verfahren zur Bestimmung der Projektionsgeometrie in der Kegelstrahl-CT .....	26
2.4.1	Kalibrierung von planaren Bildaufnahmetrajektorien .....	29
2.4.2	Kalibrierung von nicht-planaren Bildaufnahmetrajektorien.....	31
2.4.3	Kalibrierung von beliebigen Trajektorien mit festem Isozentrum.....	32
2.4.4	Zusammenfassung .....	34
2.5	Zusammenfassung der bestehenden Probleme .....	35
3	Ein offenes 3D-Röntgensystem für die intraoperative Kegelstrahl-CT .....	37
3.1	Eigener Ansatz .....	37
3.2	Abgrenzung.....	38
4	Konzeption und Entwurf .....	41
4.1	Entwurf des offenen 3D-Röntgensystems .....	41
4.1.1	Systemkonzept.....	41
4.1.2	Kinematisches Systemmodell.....	42
4.1.3	Anwendung des Systems .....	43
4.1.4	Darstellung der geometrischen Zusammenhänge.....	45
4.1.5	Komponenten des Systemkonzepts .....	48

4.1.6	Diskussion der Obertischanordnung der Röntgenquelle.....	52
4.2	Entwurf von Trajektorien mit unabhängiger Bewegung von Quelle und Detektor .....	53
4.2.1	Schritt 1: Patientennahe Trajektorie des Röntgendetektors .....	55
4.2.2	Schritt 2: Nicht-planare Trajektorie der Röntgenquelle.....	57
4.2.3	Schritt 3: Neigung der Röntgenquelle.....	58
4.3	Bewertung von Bildaufnahmetrajektorien .....	60
4.3.1	Betrachtung der Bestimmbarkeit von Dichteänderungen .....	60
4.3.2	Entwurf einer Qualitätsbewertungsfunktion .....	62
4.3.3	Visualisierung der Qualitätsbewertungsfunktion .....	63
4.4	Bestimmung der Projektionsgeometrie von Bildaufnahmetrajektorien .....	65
4.4.1	Planung der Projektionsgeometrie zur Ausführung von Trajektorien .....	66
4.4.2	Kalibrierung von vordefinierten Bildaufnahmetrajektorien.....	66
4.4.3	Konzept für Bildaufnahmetrajektorien mit variablen Isozentren.....	68
5	Realisierung des offenen 3D-Röntgensystems .....	71
5.1	Systemaufbau .....	71
5.2	Realisierung von Bildaufnahmetrajektorien.....	72
5.2.1	Betrachtung der Vollständigkeitsbedingung.....	74
5.2.2	Betrachtung der Geometrietreue .....	75
5.2.3	Betrachtung des Einflusses auf Metallartefakte.....	76
5.2.4	Betrachtung des bestrahlten Volumenbereichs .....	79
5.3	Qualitätsbewertung winkelbeschränkter Bildaufnahmetrajektorien .....	82
5.4	Kalibrierung der Projektionsgeometrie für beliebige Projektionsrichtungen.....	87
5.4.1	Kalibrierphantom mit identischen Kugelmarkern.....	87
5.4.2	Markerdetektion und -zuordnung im Projektionsbild .....	89
5.4.3	Berechnung der Projektionsgeometrie .....	91
5.4.4	Behandlung von Überlagerungen.....	95
5.4.5	Realisierung des Kalibrierkörpers.....	97
5.5	Kalibrierung des Systemaufbaus .....	99
5.5.1	Bestimmung der Lagebeziehung zwischen den Robotersystemen .....	99
5.5.2	Bestimmung der Lage von Röntgenquelle und Röntgendetektor .....	107
6	Evaluiert und Bewertung .....	111
6.1	Qualitätsbewertung von Bildaufnahmetrajektorien.....	111
6.2	Genauigkeit des Kalibrierverfahrens zur Bestimmung der Projektionsgeometrie .....	118
6.2.1	Simulative Untersuchung .....	118
6.2.2	Untersuchung der Genauigkeit des Kalibrierkörpers.....	130
6.2.3	Experimentelle Untersuchung .....	131
6.3	Genauigkeit der Positionierung von Röntgenquelle und Röntgendetektor .....	135
6.4	Genauigkeit der Systemkalibrierung.....	138
6.4.1	Genauigkeit der Kalibrierung der Lage des Positionssensors.....	139
6.4.2	Genauigkeit der Kalibrierung der Lage des Detektorlokalisators.....	140
6.4.3	Genauigkeit der Lagebeziehung zwischen den Robotersystemen .....	141
6.4.4	Diskussion der Ergebnisse .....	142
6.5	Experimentelle Untersuchung der Bildqualität .....	143
6.5.1	Methode.....	143

6.5.2	Homogenität .....	146
6.5.3	Kontrast-Rausch-Verhältnis .....	149
6.5.4	CT-Wert-Linearität .....	151
6.5.5	Ortsauflösung.....	153
6.5.6	Geometrietreue .....	154
6.5.7	Bildqualität an anatomischen Phantomen.....	158
6.5.8	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	162
6.6	Zusammenfassende Bewertung.....	164
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	167
8	Notation, Abkürzungen, Bezeichner und statistische Kenngrößen .....	171
9	Bildnachweis .....	175
10	Literatur .....	177
10.1	Literaturverzeichnis .....	177
10.2	Gesamtdarstellung eigener Publikationen.....	186
11	Anhang .....	189
11.1	Betrachtung der Bestimmbarkeit von Dichteänderungen (Fächerstrahlgeometrie)...	189
11.2	Betrachtung der Genauigkeit des verwendeten Positionsmesssystems .....	191