

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung und Motivation</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung der Arbeit . . . . .	1
1.2	Eigener Ansatz . . . . .	2
1.3	Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Dimensionelles Messen mit CT - Stand der Technik</b>	<b>4</b>
2.1	Aufbau industrieller 3D-CT-Systeme . . . . .	4
2.2	Prozesskette dimensionelles Messen . . . . .	5
2.2.1	Aufnahme von Röntgenprojektionen . . . . .	6
2.2.2	Rekonstruktion . . . . .	7
2.2.3	Artefakt-Reduktion . . . . .	8
2.2.4	Segmentierung und Oberflächenbestimmung . . . . .	9
2.2.5	Koordinatenmessung . . . . .	12
2.2.6	Bestimmung und Angabe der Messunsicherheit . . . . .	14
2.3	Stand der Normen und Richtlinien . . . . .	15
2.4	Messunsicherheit . . . . .	16
2.4.1	Zum Konzept Messunsicherheit . . . . .	16
2.4.2	Einflussgrößen in der CT . . . . .	17
2.4.3	Messunsicherheitsbestimmung nach GUM . . . . .	22
2.5	Messunsicherheitsabschätzung durch Simulation . . . . .	25
2.5.1	Erzeugung von Pseudozufallszahlen . . . . .	26
2.5.2	Ermittlung von Werten der Eingangsgrößen . . . . .	26
2.5.3	Korrelierte Eingangsgrößen . . . . .	27
2.5.4	Erwartungswert und erweiterte Unsicherheit . . . . .	27
2.5.5	Anzahl an Simulationen und Test auf Konvergenz . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Theorie und Grundlagen der 3D-Computertomographie</b>	<b>31</b>
3.1	Physik der Röntgenstrahlung . . . . .	31
3.1.1	Erzeugung von Röntgenstrahlung . . . . .	31
3.1.2	Wechselwirkung mit Materie . . . . .	34
3.1.3	Detektion von Röntgenstrahlung . . . . .	35
3.2	Bildrekonstruktion . . . . .	37
3.2.1	Gefilterte Rückprojektion . . . . .	39
3.2.2	Feldkamp-Algorithmus . . . . .	41
3.2.3	Voxelkantenlänge und räumliche Abtastung . . . . .	43
3.3	Bildartefakte und Störgrößen . . . . .	46
3.4	Beurteilung der Bildqualität . . . . .	52
3.4.1	Rauschgrößen . . . . .	53
3.4.2	Rauschleistungsspektrum . . . . .	54
3.4.3	Hochkontrastauflösung . . . . .	56
3.4.4	Die 3D-CT als Signalübertragungssystem . . . . .	61

<b>4</b>	<b>Physikalische Charakterisierung des CT-Systems</b>	<b>63</b>
4.1	Das Mikro-CT System <i>Tomolibri</i> <sup>®</sup> . . . . .	63
4.2	Charakterisierung der Röntgenröhre . . . . .	64
4.2.1	Brennfleckgröße . . . . .	64
4.2.2	Fokusdrift . . . . .	68
4.3	Charakterisierung des Flachdetektors . . . . .	70
4.3.1	Modulationsübertragung . . . . .	70
4.3.2	Rauschleistungsspektrum . . . . .	74
4.3.3	Signal-Varianz-Kennlinie . . . . .	78
4.3.4	DQE-Messung . . . . .	78
4.3.5	Zeitliche Trägheit . . . . .	80
4.3.6	Charakteristik des Dunkelbildes . . . . .	81
4.4	Abbildungseigenschaften im Messfeld . . . . .	82
4.4.1	Punktverbreitungsfunktion und Auflösungsvermögen . . . . .	82
4.4.2	Rauschen . . . . .	85
4.5	Temperaturverlauf im Messfeld . . . . .	87
<b>5</b>	<b>Modellierung und Simulation der CT</b>	<b>89</b>
5.1	<i>Scorpius XLab</i> <sup>®</sup> . . . . .	89
5.2	Modellierung der Röntgenquelle . . . . .	89
5.2.1	Simulation von Röntgenspektren . . . . .	89
5.2.2	Brennflecksimulation . . . . .	90
5.2.3	Modell der Fokusdrift . . . . .	92
5.3	Simulation von Quantenrauschen . . . . .	93
5.4	Strahlverfolgung . . . . .	94
5.5	Modell des Röntgendetektors . . . . .	95
5.5.1	Seriell-lineares Kaskadensystemmodell . . . . .	95
5.5.2	Einfallendes Röntgenspektrum . . . . .	95
5.5.3	Absorptionseffizienz . . . . .	96
5.5.4	Generierung und Emission optischer Photonen . . . . .	97
5.5.5	Streuung optischer Photonen . . . . .	98
5.5.6	Optische Koppeleffizienz . . . . .	98
5.5.7	Verstärkung des Detektorsignals . . . . .	98
5.5.8	Dunkelstromsignal und Bias . . . . .	99
5.5.9	Elektronikrauschen . . . . .	99
5.5.10	Erwartetes Signal . . . . .	99
5.5.11	Simulation der Rauschübertragung . . . . .	100
5.5.12	Simulation der zeitlichen Trägheit . . . . .	101
5.5.13	Hell-Dunkelbild-Korrektur . . . . .	101
5.6	Simulation von Objektstreustrahlungsintensitäten . . . . .	102
5.7	Modell der Wärmeausdehnung . . . . .	103
5.8	Validierung der Simulation . . . . .	103
5.8.1	Modulationsübertragung . . . . .	104
5.8.2	Rauschübertragung . . . . .	104
5.8.3	Signalübertragung . . . . .	106
5.9	Rechenzeittechnische Aspekte . . . . .	107
<b>6</b>	<b>Messunsicherheitsabschätzung mittels Monte Carlo Methode</b>	<b>109</b>
6.1	Ablaufprinzip . . . . .	109
6.2	Messobjekt und Messaufgabe . . . . .	110

6.3	Aufnahme- und Simulationsplanung . . . . .	111
6.4	Test auf Vergleichbarkeit . . . . .	112
6.5	Auswahl von Einflussgrößen . . . . .	114
6.6	Wertebereiche und Verteilungsfunktionen . . . . .	115
<b>7</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>118</b>
7.1	Vorverarbeitung der CT-Datensätze . . . . .	118
7.2	Auswertestrategie und dimensionelle Messungen . . . . .	119
7.3	Simulationsergebnisse . . . . .	122
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>126</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	126
8.2	Ausblick . . . . .	127
	<b>Anhang A</b>	<b>132</b>
	<b>Anhang B</b>	<b>134</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>III</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IV</b>
	<b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>VII</b>