

# Entwicklung von Verfahren zur interaktiven Simulation minimal-invasiver Operationsmethoden

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

angenommen durch die Fakultät für Informatik  
der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg

**von**

Simon Adler, M.Sc.

geb. 12.02.1980 in Bad Oldesloe

**Gutachter:**

Prof. Dr. Bernhard Preim

Prof. Dr. Torsten Kuhlen

Prof. Dr. Thomas Neumuth

**Adler, Simon (M.Sc.)**

*Entwicklung von Verfahren zur interaktiven*

*Simulation minimal-invasiver Operationsmethoden*

Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,

20. Februar 2014

# **Magdeburger Schriften zur Visualisierung**

herausgegeben von  
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Preim  
Institut für Simulation und Graphik,  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Band 7

**Simon Adler**

## **Entwicklung von Verfahren zur interaktiven Simulation minimal-invasiver Operationsmethoden**

Shaker Verlag  
Aachen 2014

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Magdeburg, Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2659-7

ISSN 1865-7397

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Glossar</b>  | <b>6</b>  |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b>                          | <b>8</b>  |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>                          | <b>10</b> |
| <b>Danksagung</b>                                     | <b>13</b> |
| <b>I Hauptteil</b>                                    | <b>15</b> |
| <b>1 Einleitung und Motivation</b>                    | <b>16</b> |
| 1.1 Problemstellung . . . . .                         | 18        |
| 1.2 Zielstellung . . . . .                            | 19        |
| 1.3 Gliederung der Arbeit . . . . .                   | 20        |
| <b>2 Grundlagen</b>                                   | <b>22</b> |
| 2.1 Medizinische Grundlagen . . . . .                 | 22        |
| 2.1.1 Minimal-invasive Chirurgie . . . . .            | 22        |
| 2.1.2 Leber . . . . .                                 | 25        |
| 2.1.3 Gefäße . . . . .                                | 27        |
| 2.1.3.1 Lebergefäße . . . . .                         | 27        |
| 2.1.3.2 Aufbau und Struktur von Blutgefäßen . . . . . | 28        |
| 2.1.4 Blut . . . . .                                  | 30        |
| 2.1.5 Tumoren . . . . .                               | 31        |
| 2.2 Physikbasierte Simulation . . . . .               | 33        |
| 2.2.1 Deformationssimulation . . . . .                | 34        |
| 2.2.1.1 Feder-Masse Modelle . . . . .                 | 36        |
| 2.2.1.2 Finite Elemente Methode . . . . .             | 41        |
| 2.2.2 Kollisionserkennung . . . . .                   | 44        |
| 2.2.3 Anforderungen . . . . .                         | 45        |
| 2.2.4 Verfahren . . . . .                             | 46        |
| 2.3 Modelle anatomischer Strukturen . . . . .         | 48        |
| 2.3.1 Bildverarbeitung . . . . .                      | 51        |
| 2.3.1.1 Segmentierung der Leber . . . . .             | 51        |
| 2.3.1.2 Segmentierung von Gefäßen . . . . .           | 53        |
| 2.3.2 Modellgenerierung . . . . .                     | 55        |
| 2.3.2.1 Oberflächengeometrie . . . . .                | 56        |
| 2.3.2.2 Volumenmodelle . . . . .                      | 56        |
| 2.3.2.3 Mittellinien . . . . .                        | 57        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>3</b> | <b>Trainingssimulatoren in der minimal-invasiven Chirurgie</b> | <b>60</b>  |
| 3.1      | Verfahren und Methoden . . . . .                               | 65         |
| 3.2      | Kommerzielle Simulatoren . . . . .                             | 67         |
| 3.3      | Bibliotheken zur Entwicklung von Chirurgesimulatoren . . . . . | 69         |
| 3.4      | Zusammenfassung . . . . .                                      | 70         |
| <b>4</b> | <b>Anforderungsanalyse für Testumgebungen</b>                  | <b>74</b>  |
| 4.1      | Problemspezifikation . . . . .                                 | 75         |
| 4.2      | Szenariobasiertes Design . . . . .                             | 77         |
| 4.3      | Validierung und Evaluierung von Trainingssystemen . . . . .    | 80         |
| 4.4      | Szenarienbeschreibung für eine Testumgebung . . . . .          | 83         |
| 4.4.1    | Szenario Splenektomie: Entfernen der Milz . . . . .            | 84         |
| 4.4.2    | Szenario Cholezystektomie: Resektion der Gallenblase . . . . . | 86         |
| 4.4.3    | Abstraktion der Szenarien . . . . .                            | 87         |
| 4.4.4    | Konkretisierung der Konzepte . . . . .                         | 89         |
| 4.5      | Zusammenfassung . . . . .                                      | 93         |
| <b>5</b> | <b>Organsimulation</b>   | <b>95</b>  |
| 5.1      | Punkt- oder voxelbasierte Simulation . . . . .                 | 97         |
| 5.2      | Simulation mit Oberflächenmodellen . . . . .                   | 98         |
| 5.3      | Simulation mit Volumenmodellen . . . . .                       | 100        |
| 5.3.1    | Modellstrukturen . . . . .                                     | 101        |
| 5.3.1.1  | Raumpartitionierung . . . . .                                  | 101        |
| 5.3.1.2  | Objektpartitionierung . . . . .                                | 107        |
| 5.3.2    | Simulationsverfahren . . . . .                                 | 109        |
| 5.3.2.1  | Feder-Masse Modell . . . . .                                   | 111        |
| 5.3.2.2  | Anisotrope Feder-Masse Modelle . . . . .                       | 115        |
| 5.3.2.3  | FEM Simulation . . . . .                                       | 118        |
| 5.3.2.4  | Multigrid Hexaeder-Simulation . . . . .                        | 119        |
| 5.3.2.5  | Weitere Simulationsverfahren . . . . .                         | 120        |
| 5.4      | Übertragung auf Szenarien . . . . .                            | 122        |
| 5.4.1    | Organsimulation im Szenario „Splenektomie“ . . . . .           | 122        |
| 5.4.2    | Organsimulation im Szenario „Cholezystektomie“ . . . . .       | 123        |
| 5.4.3    | Organsimulation der prototypischen Umsetzungen . . . . .       | 124        |
| 5.5      | Zusammenfassung und Diskussion . . . . .                       | 128        |
| <b>6</b> | <b>Gefäßsimulation</b>   | <b>131</b> |
| 6.1      | Generierung von Gefäßmodellen . . . . .                        | 131        |
| 6.1.1    | Anforderungen an Oberflächenmodelle . . . . .                  | 132        |
| 6.1.2    | Marching Tetrahedron . . . . .                                 | 135        |
| 6.1.3    | 3D Seedgrowing . . . . .                                       | 138        |
| 6.1.3.1  | Initialisierung . . . . .                                      | 139        |
| 6.1.3.2  | Expansion . . . . .  | 139        |
| 6.1.3.3  | Ergebnisse . . . . .   | 141        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 6.2       | Simulation dynamischer Querschnittsänderungen . . . . .          | 145        |
| 6.2.1     | Anforderungen . . . . .  | 145        |
| 6.2.2     | Simulation mit einfachen Feder-Masse Modellen . . . . .          | 147        |
| 6.2.3     | Initialisierung und Parametrierung . . . . .                     | 149        |
| 6.2.4     | Aktualisierung . . . . .   | 154        |
| 6.3       | Simulation von Biege- und Torsionskräften . . . . .              | 162        |
| 6.4       | Synchronisation des Oberflächenmodells . . . . .                 | 164        |
| 6.4.1     | Optimierung der Mittellinie und des Oberflächenmodells . . . . . | 164        |
| 6.4.2     | Aktualisierung von Oberflächeneckpunkten . . . . .               | 166        |
| 6.5       | Ergebnisse . . . . .   | 167        |
| 6.6       | Zusammenfassung . . . . .  | 171        |
| <b>7</b>  | <b>Simulierte Exploration des Interventionsgebietes</b>          | <b>172</b> |
| 7.1       | Festlegen von Zugängen . . . . .                                 | 172        |
| 7.1.1     | Interaktive instrumentengeführte CT-Schnittebenen . . . . .      | 173        |
| 7.1.2     | Interaktive Visualisierung von Schnittbildern . . . . .          | 174        |
| 7.1.3     | Überlagerung interaktiv definierbarer Landmarken . . . . .       | 175        |
| 7.1.4     | Prototyp 1: Unterstützung der Exploration von CT-Daten . . . . . | 177        |
| 7.1.5     | Prototyp 2: Vergleich von Zugängen . . . . .                     | 178        |
| 7.2       | Risikovisualisierung für Navigationsaufgaben . . . . .           | 181        |
| 7.2.1     | Verteilung der Abstandsdetektion . . . . .                       | 183        |
| 7.2.2     | Abstandsdetektion für Organe . . . . .                           | 185        |
| 7.2.3     | Abstandsdetektion für Gefäße . . . . .                           | 186        |
| 7.2.4     | Ergebnisse der Abstandsberechnung . . . . .                      | 188        |
| <b>8</b>  | <b>Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick</b>                  | <b>191</b> |
| 8.1       | Zusammenfassung . . . . .  | 191        |
| 8.2       | Diskussion . . . . .   | 193        |
| 8.3       | Ausblick . . . . .   | 194        |
|           | <b>Literaturverzeichnis</b>                                      | <b>196</b> |
| <b>II</b> | <b>Anhang</b>  | <b>209</b> |
| <b>A</b>  | <b>Beispiele</b>   | <b>210</b> |
| A.1       | Beispiel 1: Feder-Masse, explizit Euler . . . . .                | 210        |
| A.2       | Beispiel 2: Feder-Masse, implizit Euler . . . . .                | 213        |
| <b>B</b>  | <b>Feder-Masse Strain Tensoren</b>                               | <b>216</b> |
| <b>C</b>  | <b>Elementanzahl bei Raumpartitionierungen</b>                   | <b>218</b> |