

Aus dem Institut für Medizinische Informatik, Biometrie und Epidemiologie  
des Universitätsklinikums Benjamin Franklin  
der Freien Universität Berlin  
Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Thomas Tolxdorff

**Ein Meßsystem zur präoperativen Planung und  
intraoperativen Kontrolle von Dysgnathieoperationen**

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Grades Doctor rerum medicarum  
des Fachbereichs Humanmedizin  
der Freien Universität Berlin

vorgelegt von Dipl.-Ing. Dirk Siebert aus Berlin

Referent: Prof. Dr. Thomas Tolxdorff

Korreferent: Prof. Dr. Dr. Bodo Hoffmeister

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs Humanmedizin der  
Freien Universität Berlin

Promoviert am: 13.12.2002



## **Danksagung**

Diese Arbeit wurde möglich durch die angenehme Atmosphäre am Institut für Medizinische Informatik, Biometrie und Epidemiologie des Universitätsklinikums Benjamin Franklin. Für seine Unterstützung der Arbeit möchte ich zunächst dem Institutsleiter Prof. Dr. Thomas Tolxdorff herzlich danken. Auch den vielen Mitarbeitern des Instituts, die durch fruchtbare Diskussionen zum Fortschritt der Forschungsarbeit beigetragen haben, möchte ich meinen Dank aussprechen. PD Dr. Dr. Johannes Bernarding danke ich für die zahlreichen fachlichen Anmerkungen und das hilfreiche Korrekturlesen der Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Christian Lwowsky, Bernhard Naber, Patrick Neumann und Dr. Gabriele von Voigt für die Zusammenarbeit in den Projekten, die zur Anfertigung dieser Arbeit unerlässlich war.

Der Klinik für Kieferchirurgie und Plastische Gesichtschirurgie des Universitätsklinikums Benjamin Franklin danke ich für die stets hervorragende Zusammenarbeit. Besonders möchte ich Prof. Dr. Dr. Bodo Hoffmeister, Dr. Dr. Thomas Plath und Christian Marks danken, die jederzeit bereit waren, die Forschungsarbeiten zu unterstützen und voranzubringen.

## **Kurzfassung**

Die gegenwärtigen Verfahren zur operativen Korrektur von dysgnathen Kieferstellungen beinhalten keine zahlenmäßige intraoperative Kontrollmöglichkeit der aktuellen Relation der Kieferanteile zum Schädelskelett. Zur Lösung dieser Aufgabe bietet sich der Einsatz eines intraoperativen Navigationssystems an. Zunächst wurde daher das kommerzielle, kieferchirurgisch und zahnmedizinisch einsetzbare Navigationssystem „Virtual Patient System“ evaluiert. Die Genauigkeit des im Navigationssystem verwendeten Trackingsystems wurde in der Labor- und Operationsumgebung untersucht und Maßnahmen zur Erhöhung der Genauigkeit entwickelt. Anschließend wurde eine Patientenuntersuchung in Form einer Pilotstudie mit 17 Patienten durchgeführt, bei denen eine Oberkieferverlagerung mit oder ohne weitere Segmentierung im Rahmen einer mono- oder bimaxillären Osteotomie vorgenommen wird. Das Navigationssystem wurde in dieser Studie zur Überprüfung der klinischen Ergebnisse genutzt. Basierend auf den Ergebnissen dieser Evaluation wurde ein neuartiges Verfahren zur Bestimmung der Verschiebungswerte in der Operationsplanung entwickelt und mathematisch beschrieben. Das Verfahren orientiert sich an den Kauebene und dient gleichermaßen der präoperativen Bestimmung der Verschiebungswerte und der intraoperativen Kontrolle und Zielführung anhand der Zielgrößen. Die Übertragung der Planungsdaten kann dadurch standardisiert und objektiviert und somit unabhängig vom bedienenden Personal werden. Die softwaretechnische Realisierung des neuen Verfahrens unter Einbeziehung der Untersuchungen des Navigationssystems gewonnenen Ergebnisse erfolgt plattformunabhängig und schließt eine schnell, intuitiv und übersichtlich zu bedienende Benutzeroberfläche ein. Abschließend wird die Verifikation des Verfahrens in Form von Genauigkeitsstudien im Vergleich zwischen Labor- und Operationsumgebung und im zweiten Schritt beim intraoperativen Einsatz mit 12 Patienten beschrieben.

## **Abstract**

Current techniques for the surgical correction of dysgnathic jaw positions do not regularly include numerical control of the actual relation of the jaw to the skull. This represents a typical task for an intraoperative navigation system. The „Virtual Patient System“, a commercially available navigation system designed for applications in maxillofacial surgery and orthodontics, has therefore been evaluated in respect to its practicability. The accuracy of the tracking system integrated in the navigation system was evaluated in laboratory and surgical environments, resulting in considerable enhancements. Subsequently, a pilot study was conducted with 17 patients which underwent a Le Fort I osteotomy during a mono- or bimaxillary osteotomy with or without further segmentation of the maxilla. The navigation system used in this study served to verify the clinical results. Based on the results of this study, a new approach for determining the displacement values in the operation planning has been developed and described in mathematical terms. This approach refers to the occlusal plane and is suitable both for the preoperative determination of the displacement values and for their intraoperative controlling and guidance. The transfer of the planning results to the operation room is thus standardized and nearly independent of user variations. The software implementation of the approach utilizes the results of the navigation system evaluation. It is platform independent and includes a readily learnable, intuitive and clear user interface. The method has been verified firstly by a comparative accuracy study in laboratory and surgical environments and secondly by an intraoperative application study with a group of 12 patients.

# Inhalt

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>EINLEITUNG.....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1      | ÜBERBLICK.....   | 1         |
| 1.2      | ZIELSETZUNG DER ARBEIT .....                                       | 2         |
| <b>2</b> | <b>THEORETISCHE UND TECHNISCHE GRUNDLAGEN .....</b>                | <b>4</b>  |
| 2.1      | NAVIGATION IN DER MEDIZIN .....                                    | 4         |
| 2.1.1    | Das Lokalisationsproblem.....                                      | 4         |
| 2.1.2    | Historische Entwicklung .....                                      | 5         |
| 2.1.3    | Rahmengebundene Stereotaxie.....                                   | 6         |
| 2.1.4    | Intraoperative Navigation.....                                     | 8         |
| 2.1.5    | Navigationssysteme.....  | 10        |
| 2.1.6    | Grenzen der Navigationstechnik .....                               | 13        |
| 2.2      | TRACKINGSYSTEME.....   | 14        |
| 2.2.1    | Einführung.....  | 14        |
| 2.2.2    | Kriterien zur Beurteilung der Leistung eines Trackers.....         | 14        |
| 2.2.3    | Elektromechanische Tracker .....                                   | 15        |
| 2.2.4    | Akustische Tracker.....  | 16        |
| 2.2.5    | Optische Tracker .....   | 17        |
| 2.2.6    | Elektromagnetische Tracker.....                                    | 19        |
| 2.2.7    | Der elektromagnetische Tracker Fastrak der Firma Polhemus Inc..... | 20        |
| 2.3      | REGISTRIERUNG UND KALIBRIERUNG.....                                | 23        |
| 2.3.1    | Kamerakalibrierung.....  | 24        |
| 2.3.2    | CCD-Kameras .....  | 26        |
| 2.3.3    | Kameramodelle .....  | 27        |
| 2.3.4    | Die Direkte Lineartransformation .....                             | 31        |
| 2.3.5    | Das Kalibrierungsverfahren nach Tsai .....                         | 32        |
| 2.3.6    | Referenzmarkersysteme .....  | 38        |
| 2.4      | PROGRAMMIERSPRACHE JAVA.....                                       | 39        |
| 2.5      | KIEFERCHIRURGISCHE BEHANDLUNG VON DYSGNATHIEN .....                | 42        |
| 2.5.1    | Dysgnathien.....   | 42        |
| 2.5.2    | Diagnostik .....   | 45        |
| 2.5.3    | Chirurgische Therapie .....  | 48        |
| 2.5.4    | Navigationsorientierte kieferchirurgische Planung .....            | 51        |
| <b>3</b> | <b>KLINISCHE EVALUIERUNG DES ARTMA-NAVIGATIONSSYSTEMS.....</b>     | <b>52</b> |
| 3.1      | METHODEN.....  | 52        |
| 3.1.1    | Hard- und Softwarekomponenten des Artma-Navigationssystems .....   | 52        |
| 3.1.2    | Entwicklung des Arbeitsablaufs.....                                | 54        |
| 3.1.3    | Kalibrierungsprozedur .....  | 56        |
| 3.1.4    | Entwicklung der Koordinatenstruktur .....                          | 59        |
| 3.1.5    | Entwicklung einer intraoperativen Navigationsprozedur .....        | 60        |
| 3.1.6    | Methodik zur Bestimmung der Genauigkeit.....                       | 62        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.2      | ERGEBNISSE.....  | 63        |
| 3.2.1    | Genauigkeit .....  | 63        |
| 3.2.2    | Klinischer Einsatz.....  | 66        |
| 3.3      | DISKUSSION.....  | 67        |
| <b>4</b> | <b>NEUENTWICKLUNG EINER SOFTWARE ZUR VERMESSUNG DER KAUEBENE .....</b>         | <b>70</b> |
| 4.1      | METHODEN.....  | 71        |
| 4.1.1    | Elektromagnetischer Tracker.....   | 71        |
| 4.1.2    | Meßverfahren .....   | 71        |
| 4.1.3    | Meßprogramm.....   | 74        |
| 4.1.4    | Meßanordnung für die Gipsmodelle.....  | 76        |
| 4.1.5    | Genauigkeitsuntersuchung .....   | 77        |
| 4.1.6    | Patientenstudie.....   | 77        |
| 4.2      | ERGEBNISSE.....  | 78        |
| 4.2.1    | Genauigkeitsuntersuchung .....   | 78        |
| 4.2.2    | Patientenstudie.....   | 79        |
| 4.2.3    | Zeitablauf im Operationssaal.....  | 80        |
| 4.3      | DISKUSSION.....  | 80        |
| 4.3.1    | Genauigkeit im Vergleich zwischen Gleich- und Wechselfeldsystemen .....        | 81        |
| 4.3.2    | Intraoperative Genauigkeit von Trackingsystemen .....                          | 83        |
| 4.3.3    | Vergleich von Genauigkeit im Labor und OP für elektromagnetische Tracker ..... | 83        |
| 4.3.4    | Schlußfolgerung .....  | 84        |
| <b>5</b> | <b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>                                       | <b>86</b> |
| <b>6</b> | <b>LITERATUR .....</b>   | <b>88</b> |