

Aus der Klinik für Neurochirurgie
der Medizinischen Fakultät der Charité - Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Modellgebundene Cranioplastie

Operationstechnik zur Umformung frühkindlicher Schädeldeformitäten
unter Verwendung dreidimensionaler Standardformmodelle aus MRT-
basierten Rekonstruktionen nicht deformierter Kinder

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)
vorgelegt der Medizinischen Fakultät der Charité – Universitätsmedizin Berlin

von
Maja J. K. Zöckler
aus Berlin

Gutachter: 1. Priv.-Doz. Dr. med. H. Haberl
2. Prof. Dr. med. Dr. med. dent. J. Mühling
3. Prof. Dr. med. W. Mühlbauer

Datum der Promotion: 12.12.2006

VORWORT

Die Operation angeborener und erworbener Schädeldeformitäten des kleinen Kindes stellt auch heute noch eine besondere Herausforderung dar. Um die Risiken des umfangreichen und belastenden Eingriffs zu mindern, wird im Arbeitsbereich Pädiatrische Neurochirurgie der Charité eine neue Operationsmethode entwickelt. Theoretische Vorarbeiten, Planung und Umsetzung in einer ersten Operation sind Gegenstand dieser Dissertation.

Die Arbeit ist als Vorbereitung für eine Weiterentwicklung klassischer Operationsmethoden unter Einbeziehung visueller Planungshilfen und deren Umsetzung in physische Modelle zu sehen. Die Anregung zu dieser Dissertation verdanke ich Herrn PD Dr. med. Hannes Haberl, dem Leiter des Arbeitsbereiches Pädiatrische Neurochirurgie an der Charité. Nach seiner Einschätzung ist die Operation angeborener oder erworbener Schädeldeformationen nach überlieferten chirurgischen Standardmethoden in ausschließlicher Abhängigkeit vom künstlerischen Geschick und der subjektiven Einschätzung respektive Erfahrung des Operateurs nicht mehr zeitgemäß. Objektive Planungskriterien setzten anatomische Referenzdaten voraus, die bisher jedoch nicht existieren. Aufgabe der vorliegenden Studie ist daher die Ermittlung der anatomischen Daten, ihre statistische Analyse und deren Umsetzung in plastische Kunststoffmodelle in Stereolithographie-Technik. Die auf diese Weise entwickelten Modelle dienen somit als konkrete Arbeitsplattform für die Knochenumformung. Durch den neuen operativen Ansatz kann das ästhetische Ergebnis verbessert, die Operationszeit verkürzt und damit das Operationsrisiko gesenkt werden. Gleichzeitig wird die Orientierung an subjektiven, ästhetischen Kriterien bei der Operation kindlicher Schädeldeformationen vermieden und ersetzt. Das Anliegen, ein bisher nicht gelöstes, aber im kinderneurochirurgischen Alltag wesentliches Problem sowohl durch theoretische Planung und Entwicklung neuer Standardkriterien, als auch in der praktischen Umsetzung zu lösen, erforderte es, den theoretischen Hintergrund auszuarbeiten und die praktische Realisierung vorzubereiten. Die Umsetzung der komplexen theoretischen Vorarbeiten in ein operationstaugliches plastisches Modell, sowie dessen erfolgreiche Erstanwendung war eine motivierende Herausforderung. Besonders produktiv war dabei für mich die Kooperation mit der Arbeitsgruppe *Visualization and Data Analysis* des Konrad-Zuse-Zentrums für Informationstechnik Berlin (ZIB), deren Kerntätigkeit die Entwicklung und Anwendung komplexer mathematischer Verfahren auf Anwendungsprobleme der Naturwissenschaften, insbesondere der Biologie und Medizin, ist. Im Rahmen dieses Kooperationsprojektes war es für die Lösung der hier vorgestellten Probleme möglich,

innovative Algorithmen einzusetzen und diese in einer professionellen Softwareumgebung anwenderfreundlich und erfolgreich umzusetzen. Die hier vorgelegte Arbeit ist als Grundlage für eine neue Operationsmethode zu sehen, die eine Weiterentwicklung bisheriger Standardtechniken und gleichzeitig eine elegante Lösung des oben genannten Problems bietet.

INHALTSVERZEICHNIS

<i>Vorwort</i>	<i>iii</i>
<i>Inhaltsverzeichnis</i>	<i>v</i>
<i>Abkürzungsverzeichnis</i>	<i>vii</i>
<i>Abbildungsverzeichnis</i>	<i>ix</i>
<i>Tabellenverzeichnis</i>	<i>x</i>
1 Einleitung	1
1.1 Überblick	1
1.2 Krankheitsbilder	3
1.2.1 Isolierte Craniosynostosen	5
1.2.1.1 Skaphozephalus (Kahn-/Langschädel)	5
1.2.1.2 Trigonocephalus (Kiel-/Dreiecksschädel).....	7
1.2.1.3 Anteriorer Plagiocephalus (Vorderer Schiefschädel).....	8
1.2.1.4 Posteriorer Plagiocephalus (Hinterer Schiefschädel)	9
1.2.2 Multiple Craniosynostosen.....	10
1.2.2.1 Brachycephalus (Kurz-/Breitschädel)/Turricephalus (Turmschädel)	10
1.2.2.2 Oxycephalus (Spitzschädel)	11
1.2.2.3 Seltenerer Typen	12
1.2.3 Sekundäre Craniosynostosen	12
1.2.3.1 Crouzon Syndrom (Dysostosis craniofacialis)	12
1.2.3.2 Pfeiffer-Syndrom (Akrocephalosyndaktylie Typ 5).....	14
1.2.3.3 Saethre-Chatzen-Syndrom (Akrocephalosyndaktylie Typ 3).....	16
1.2.3.4 Apert-Syndrom (Akrocephalosyndaktylie Typ 1)	17
1.3 Aktuelle Praxis der Kopfumformung	20
1.3.1 Beschreibung der klassischen Operationstechniken	22
1.3.1.1 Kraniektomie	22
1.3.1.2 Pi-procedure	23
1.3.1.3 Fragmentierungstechnik (Morcellierungstechnik)	24
1.3.1.4 Frontoorbitales Advancement.....	25
1.3.1.5 Schädelrekonstruktion durch Multisegmenttechnik.....	27
1.3.1.6 Komplette Umformung.....	29
1.3.1.7 Posteriore Expansion des Schädels	29
1.3.2 Operationstechnik bezogen auf das jeweilige Krankheitsbild	31
1.3.2.1 Einfache Craniosynostosen	31
1.3.2.2 Multiple Schädelnahtsynostosen	34
1.3.3 Neue Ansätze zur Schädelumformung.....	35
1.3.3.1 Endoskopisch assistierte Streifenkraniektomie.....	35
1.3.3.2 Distractionstechniken (Feder-Technik und Fixateur externe).....	36
1.3.3.3 Getherapeutischer Ansatz	41
1.4 Problemdefinition	43
1.5 Lösungsansatz	45
2 Material und Methoden	49
2.1 Entwicklung eines Normkollektivs	49
2.1.1 Datenmaterial.....	49
2.1.1.1 Patienten.....	49
2.1.1.2 MRT-Sequenzen.....	49
2.1.2 Computergestützte Datenverarbeitung	51
2.2 Methodik der statistischen Formanalyse	53
2.2.1 Überblick	53
2.2.2 Korrespondenzfindung.....	53
2.2.3 Hauptkomponentenanalyse (PCA)	55

2.2.4	<i>Leave-one-out</i> -Test	56
2.3	Realisierungskonzept (Modellbau).....	56
2.4	Operationsplanung und -technik.....	57
3	Ergebnisse	59
3.1	Segmentierung (Oberflächengitter).....	59
3.2	Statistische Formanalyse	59
3.2.1	Das mittlere Schädelmodell aus 21 Datensätzen.....	59
3.2.2	Visualisierung der Hauptmoden	60
3.2.3	Kompaktheit	61
3.2.4	Vollständigkeit durch <i>leave-one-out</i> -Test	62
3.2.5	Schädelmodelle für drei verschiedene Altersgruppen.....	63
3.2.6	Größennormiertes Schädelmodell aus 21 Datensätzen.....	65
3.3	Prototyp Stereolithographiemodell	65
3.4	Erstanwendung des Prototyps	66
3.4.1	Patient	66
3.4.2	Vorbereitungen zur operativen Schädelumformung	68
3.4.3	Durchführung der modellgebundenen Schädelmodellierung.....	68
3.4.3.1	Eröffnung der Schädelkalotte und Entnahme des fehlgeformten Knochens	68
3.4.3.2	Modellierung des Schädelknochens anhand des Prototyps.....	70
3.4.4	Verlaufskontrollen.....	73
3.4.5	Endergebnis	74
4	Diskussion	77
4.1	Datenbasis	77
4.1.1	Einflüsse im Normkollektiv	77
4.1.2	MRT als Grundlage der Datenbasis.....	77
4.1.3	Einordnung der Methode in den Zusammenhang mit anderen neuen Ansätzen	78
4.1.3.1	Endoskopisch assistierte Streifenkraniektomie.....	78
4.1.3.2	Distractionstechniken (Feder-Technik und Fixateur externe).....	79
4.2	Ergebnisse aus den Segmentierungen.....	81
4.3	Angewandte Methodik zur Modellerstellung	81
4.4	Operationstechnik.....	82
4.5	Beurteilung des Stellenwertes des vorgestellten neuen Ansatzes	84
5	Zusammenfassender Ausblick	85
	<i>Anhang I - Hauptkomponentenanalyse</i>	<i>I</i>
	<i>Anhang II - Maße zum 3D Formvergleich</i>	<i>V</i>
	<i>Anhang III - Videoanimation der Hauptmoden</i>	<i>VI</i>
	<i>Literaturverzeichnis</i>	<i>VII</i>
	<i>Lebenslauf</i>	<i>XXII</i>
	<i>Danksagung</i>	<i>XXIII</i>
	<i>Erklärung über Selbstständigkeit</i>	<i>XXIV</i>

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

°C	Grad Celsius
3D	dreidimensional
a.a.O.	an anderem Ort
bzw.	beziehungsweise
CT	Computertomographie/Computertomogramm
d.h.	das heisst
ebd.	ebenda
ED	Einzeldosis
eigtl.	eigentlich
f	femininum
gr.	griechisch
i.d.R.	in der Regel
KG	Körpergewicht
lat.	lateralis
m	masculinum
Med.	Medizin
MR	Magnetresonanz
MRT	Magnetresonanztomographie/Magnetresonanztomogramm
nlat.	neulateinisch
od.	oder
OP	Operationssaal/Operation
STL	Stereolithographie
u.	und
u.a.	unter anderen/unter anderem
z.B.	zum Beispiel
ZIB	Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin
ZNS	Zentrales Nervensystem

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<i>Abbildung 1: Craniosynostosen schematisch</i>	3
<i>Abbildung 2: Skaphozephalus</i>	5
<i>Abbildung 3: Anatomische Landmarken und Winkel schematisch</i>	6
<i>Abbildung 4: Trigonocephalus</i>	7
<i>Abbildung 5: Anteriorer Plagiocephalus</i>	8
<i>Abbildung 6: Posteriorer Plagiocephalus</i>	9
<i>Abbildung 7: Brachycephalus und Turricephalus</i>	11
<i>Abbildung 8: Crouzon-Syndrom</i>	14
<i>Abbildung 9: Pfeiffer-Syndrom</i>	16
<i>Abbildung 10: Saethre-Chatzjen-Syndrom</i>	17
<i>Abbildung 11: Apert-Syndrom</i>	19
<i>Abbildung 12: Biparietale Kraniektomie mit floating bone flaps</i>	23
<i>Abbildung 13: Pi-procedure</i>	24
<i>Abbildung 14: Frontoorbitales Advancement</i>	27
<i>Abbildung 15: Multisegmenttechnik</i>	29
<i>Abbildung 16: Posteriore Expansion des Schädels</i>	30
<i>Abbildung 17: Helmtherapie bei posteriorem Plagiocephalus</i>	33
<i>Abbildung 18: Feder</i>	40
<i>Abbildung 19: Darstellung der MRT-Schichten (axial, koronal, sagittal)</i>	50
<i>Abbildung 20: Segmentierung im Image Segmentation Editor und Oberflächengenerierung aus dem labelfield</i>	52
<i>Abbildung 21: Auffindung korrespondierender Punkte</i>	53
<i>Abbildung 22: Darstellung der Landmarken</i>	54
<i>Abbildung 23: Darstellung der Schnittebenen und der Patches</i>	55
<i>Abbildung 24: Stabilisierungselemente und Knochenfragmente in Position auf dem Formmodul</i>	58
<i>Abbildung 25: 3D-Schädeloberfläche als Ergebnis aus der Segmentierung eines MRT-Datensatzes</i>	59
<i>Abbildung 26: Mittleres Modell aus 21 Datensätzen verschiedener Altersstufen</i>	60
<i>Abbildung 27: 21 individuelle Einzelschädeloberflächen dem Alter nach angeordnet</i>	60
<i>Abbildung 28: Minimale und maximale Formgewichtung in der ersten Hauptmode</i>	61
<i>Abbildung 29: Kumulative relative Varianz des Schädelformmodells</i>	62
<i>Abbildung 30: Ergebnis des leave-one-out-Testes</i>	62
<i>Abbildung 31: Mittleres Schädelmodell für die Altersstufe 3-4 Monate</i>	64
<i>Abbildung 32: Mittleres Schädelmodell für die Altersstufe 5-7 Monate</i>	64
<i>Abbildung 33: Mittleres Schädelmodell für die Altersstufe 8-10 Monate</i>	65
<i>Abbildung 34: Stereolithographie-Modell</i>	66
<i>Abbildung 35: 5 Monate alter männlicher Säugling mit Frontalnahtsynostose (Trigonocephalus)</i>	67
<i>Abbildung 36: 6,5 Monate alter, männlicher Säugling mit Frontalnahtsynostose präoperativ</i>	68
<i>Abbildung 37: Sieben Monate alter Säugling mit Frontalnahtsynostose intraoperativ</i>	68
<i>Abbildung 38: Koronaler Hautschnitt und Ablösen des Skalps vom Knochen</i>	69
<i>Abbildung 39: Markierung und Entnahme des fehlgeformten Knochens</i>	69
<i>Abbildung 40: Herauslösen des bifrontalen Knochenfragmentes</i>	69
<i>Abbildung 41: Schutz der Bulbi oculi von außen mit einem Spatel während der intraorbitalen Dissektion</i>	70
<i>Abbildung 42: Bifrontales Knochenfragment und Frontoorbitales Band, Vergleich mit der gewünschten Form</i>	70
<i>Abbildung 43: Zerlegen des Knochens in gleichmäßige Streifen</i>	71
<i>Abbildung 44: Ausdünnen eines Knochenstreifens</i>	71
<i>Abbildung 45: Formgebung der resorbierbaren Stützelemente auf dem Modell</i>	71
<i>Abbildung 46: Modellierung der Knochenstreifen an die durch das Modell vorgegebene Form</i>	72
<i>Abbildung 47: Geformte Knochenfragmente und resorbierbare MacroporTM-Platten der Firma MedtronicTM</i>	72
<i>Abbildung 48: Einsatz der Kombinationsimplantate und Anpassen an die verbliebene Schädelkalotte</i>	73

Abbildung 49: Patient intraoperativ nach abgeschlossener Schädelmodellierung..... 73
Abbildung 50: Patient bei Entlassung sechs Tage postoperativ..... 74
Abbildung 51: Patient drei Wochen postoperativ 74
Abbildung 52: Endergebnis 75

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Wahl der Operationstechnik in Abhängigkeit vom Alter und Typ der Craniosynostose..... 22
Tabelle 2: Parameter und Einstellungen der gewählten MRT-Sequenz..... 50
Tabelle 3: Präoperativ vermessene Längen..... 67

LEBENS LAUF

„Mein Lebenslauf wird aus Datenschutzgründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht mit veröffentlicht.“