

Computergestützte Planung zur chirurgischen Korrektur von frühkindlichen Schädel- fehlbildungen (Craniosynostosen)

Autoren _ Dr.-Ing. Stefan Zachow, Dr. rer. nat. Hans Lamecker, Dr. med. Maja Zöckler,
Priv.-Doz. Dr. med. habil. Ernst Johannes Haberl, Berlin

_1. Motivation

Insbesondere bei Säuglingen und Kleinstkindern mit ausgeprägten Schädelfehlbildungen (Abb. 1) erschließt sich die Motivation für eine operative Korrektur unmittelbar. Sie beruht auf dem Wunsch, eine lebenslang bestehende Entstellung der Kopfform zu vermeiden. Aus medizinischer Sicht ergibt sich in einer Minderheit risikobehafteter Fälle die zusätzliche Indikation der Vorbeugung einer für die Entwicklung des zentralen Nervensystems schädlichen intrakraniellen Druckerhöhung.

Weil in der großen Mehrheit der Fälle kein erhöhtes Risiko einer spontanen sekundären Schädigung durch intrakranielle Druckerhöhung besteht, stellt die operative Korrektur angeborener Schädeldeformitäten im ersten Lebensjahr für den Operateur eine besondere Herausforderung dar: Der erforderliche, in der Regel sehr umfangreiche Eingriff mit allen begleitenden Risiken wird ausschließlich zur kosmetischen Formkorrektur durchgeführt. Dies führt zu einer besonders kritischen Bewertung der Operationsrisiken, die von den Sorgeberechtigten des Patienten mitge-

tragen werden müssen. In der klinischen Praxis entscheidet sich allerdings kaum ein Betroffener bzw. seine Familie gegen die operative Korrektur – zu stark ist die Befürchtung, ein Kind den Qualen der gesellschaftlichen Missachtung, der Verspottung und auch des Wettbewerbsnachteils auszusetzen.

_2. Craniosynostosen

Der Begriff Craniosynostosen (CS) bezeichnet den vorzeitigen Verschluss der Schädelnähte in der frühkindlichen Entwicklung mit daraus resultierender Deformierung des Schädels. Virchow postulierte 1851, dass die vorzeitige Verknöcherung einer Schädelnaht das Wachstum senkrecht zu der Naht vermindert und in Richtung der Naht stimuliert (Virchow 1851). Diese Arbeitshypothese eignet sich – auch wenn die tatsächlichen, pathophysiologischen Grundlagen damals noch nicht zur Verfügung standen – gut zur anschaulichen Erklärung der aus einer Synostose resultierenden Verformung (Abb. 2). Die Inzidenz solcher Fehlbildungen wird auf circa 1:2.000 geschätzt (Lajeunie et al., 1995a).

Abb. 1a–d Schädelformausprägungen durch Craniosynostosen.



In den meisten allgemein akzeptierten Klassifikationen wird zwischen einfachen und multiplen CSn unterschieden. Die kraniofaziale Beeinträchtigung ist abhängig von Lage und Umfang der CS. Typische einfache CSn sind: der Skaphozephalus (Kahn-/Langschädel), resultierend aus einer Insuffizienz der Sagittalnaht (Pfeilnaht), der Trigonocephalus (Kiel-/Dreiecksschädel) als Folge einer analogen Störung der Frontalnaht (Stirrnaht), der anteriore Plagiozephalus (vorderer Schiefschädel) als Folge der einseitigen Verknöcherung der Sutura coronalis (Kranznaht) und der eher seltene posteriore Plagiozephalus (Hinterer Schiefschädel) als Ausprägung des einseitigen Verschlusses der Lambdanaht. Bei den multiplen CSn unterscheidet man, orientiert am Erscheinungsbild, zwischen dem Brachycephalus (Kurz-/Breitschädel) und dem Turrizephalus (Turmschädel) mit Verknöcherung der beidseitigen Kranz- und/oder Lambdanaht, sowie dem Oxycephalus (Spitzschädel) mit Verknöcherung der beidseitigen Kranznähte und der Sagittalnaht. Andere Kombinationen der vorgenannten CSn kommen mit geringerer Häufigkeit vor.

Nahtsynostosen treten auch sekundär in Verbindung mit systemischen Erkrankungen, metabolischen (Rachitis, Schilddrüsenüberfunktion), hämatologischen (Thalassämie) oder teratogenen (Fluconazol) Ursprungs oder auch im Rahmen von Mukopolysaccharidosen auf. In der Regel steht bei diesen Patienten die Behandlung der Grundkrankheit im Vordergrund – eine zusätzliche operative Indikation muss im Einzelfall abgewogen werden. Rund 15% aller CSn sind wichtiger oder definierender Bestandteil eines genetischen Syndroms (Renier et al., 2000): Dazu gehören unter anderem der Morbus Crouzon bzw. das Crouzon-Syndrom (Dysostosis craniofacialis) mit einem ausgeprägten Brachycephalus, bis hin zu einer Pansynostosis oder einem Kleeblattschädel, das Pfeiffer-Syndrom (Akrocephalosyndaktylie Typ 5) mit Brachy- oder Turrizephalus und seltener einem Kleeblattschädel, das Saethre-Chotzen-Syndrom (Akrocephalosyndaktylie Typ 3) mit Brachycephalus, in einigen Fällen Plagiozephalus mit Gesichtsskoliose oder zum Teil auch Oxycephalus und das Apert-Syndrom (Akrocephalosyndaktylie Typ 1). Eine detaillierte Beschreibung der Merkmale und Ausprägungen mit ausführlichen Literaturverweisen findet sich in der Dissertation von Maja Zöckler (Zöckler 2006).

3. Chirurgische Korrektur

Die chirurgische Behandlung von CSn strebt eine Korrektur der von der normalen Entwicklung abweichenden Schädelform an. Im Rahmen der Umformung soll das Ausmaß des zu erwartenden Korrekturverlustes durch das postoperativ weiterhin disproportionierende Wachstum des Schädels berücksichtigt werden. Zielvorstellung ist die Annäherung an die normale Anatomie des knöchernen Schädels und der Stirn –

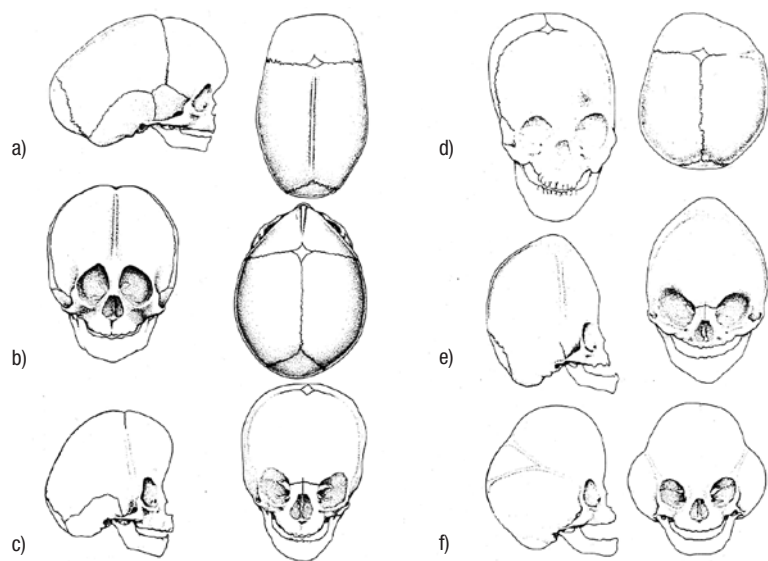


Abb. 2

bei Risikopatienten auch die Gewährleistung eines mechanisch ungehinderten Wachstums des Gehirns (Collmann et al., 1999).

Der optimale Operationszeitpunkt und die geeignete Operationstechnik richten sich nach der Art der CS, ihrer Wachstumsdynamik und dem Alter des Patienten. Chirurgische Ziele müssen für jeden Patienten einzeln nach einer sorgfältigen Risiko-Nutzen-Abwägung definiert werden (Marsh et al., 1991). Unbedingt empfohlen wird die Operation, wenn der Spontanverlauf funktionelle Folgeschäden erwarten lässt (Hayward et al., 1999). In diesem Zusammenhang stellen manifeste Anzeichen eines erhöhten intrakraniellen Druckes eine absolute Operationsindikation dar (Tuite et al., 1996a, b).

In der klinischen Praxis haben sich die von Paul Tessier in den 1970er-Jahren des letzten Jahrhunderts entwickelten und u.a. von Daniel Marchac und Dominique Renier modifizierten Standards etabliert (Tessier 1967; Renier et al., 2000; Marchac und Renier 1980; Marchac und Renier 1979; Jane und Francel 1995; Roddi et al., 1993; Kanev et al., 1995).

Folgende Grundtechniken werden bei der chirurgischen Behandlung von CSn angewandt (Collmann et al., 1999):

- Die „passive“ Umformung, die durch Schwächung der knöchernen Schädelhülle ausschließlich die expandierenden Kräfte des wachsenden Gehirns zur Formgebung nutzt. Dieses Prinzip wird bei Streifenkraniektomien und Fragmentierungstechniken eingesetzt.
- Die „aktive“ Umformung durch Verschiebung, Umformung, Neuordnung und Fixierung von Knochenfragmenten zur direkten Volumenvergrößerung. Beispiele sind das frontoorbitale Advancement und die knöcherne Schädelrekonstruktion

Abb. 2 Craniosynostosen schematisch (Thompson und Hayward 1999, 276).

Auswirkungen auf die Schädelform durch die Fusion der jeweiligen Hauptschädelnähte:

a) Skaphozephalus (Sagittalnaht), b) Trigonocephalus (Frontalnaht), c) Brachycephalus (Sutura coronalis beidseitig), d) Anteriorer Plagiozephalus (Sutura coronalis einseitig), e) Oxy- oder Turrizephalus (Suturales coronales mit hohem, konischen Kopf), f) Kleeblattschädel (mehrere Nähte mit Konstriktion in der Fossa Sylvii).

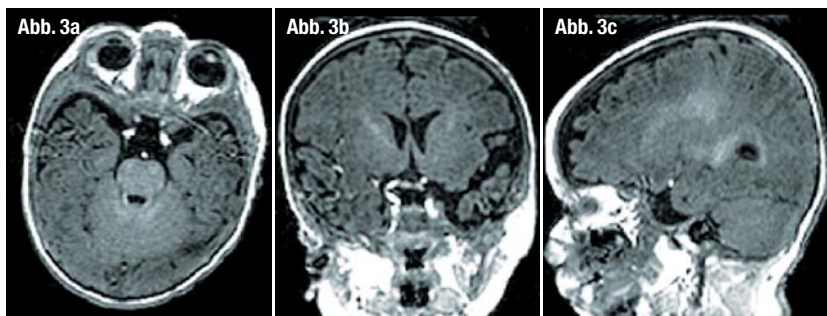


Abb. 3a–c_MRT Datensatz eines Kinderschädels.

durch Multisegmenttechnik, die kombiniert (totale Rekonstruktion des Schädels) oder isoliert durchgeführt werden können.

Auf selten angewandte, alternative Techniken und neuere, noch nicht ausreichend geprüfte operative Ansätze soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Essenziell für alle aktiven Umformungstechniken ist die Zielvorstellung der Schädelumformung. Die Operationsplanung erfolgt derzeit anhand willkürlicher ästhetischer Kriterien unter Respektierung einiger vorgegebener technischer Limitierungen, wie z.B. der Spannung der Haut im Falle einer Volumenvergrößerung, Umfang bzw. Dauer der Operation in Relation zum Alter, der Kreislaufbelastung des Patienten sowie der Festigkeit einzelner Knochenfragmente. Abhängig vom konkreten Befund kann es intraoperativ zu Abweichungen von der vorgesehenen Strategie kommen, falls Platten in bestimmten Positionen nicht fixierbar sind, Knochenfragmente sich als nicht belastbar erweisen oder bestimmte Krümmungswinkel die Elastizität einzelner Fragmente überfordern. Nicht selten stellt der Operateur erst am Ende eines Eingriffs nach Readaptation der Hautlappen fest, dass das erzielte Ergebnis nicht der Wunschvorstellung entspricht. Dann setzt ein mitunter langwieriger Korrekturprozess ein, der unter Opferung zahlreicher Schrauben und Platten schließlich zu einem besseren Ergebnis auf Kosten eines erhöhten Infektionsrisikos, eines erhöhten Blutverlustes und eines ausgeprägten Implantatverschleißes führt.

Abb. 4_Geometrisches Modell eines Kinderschädels.

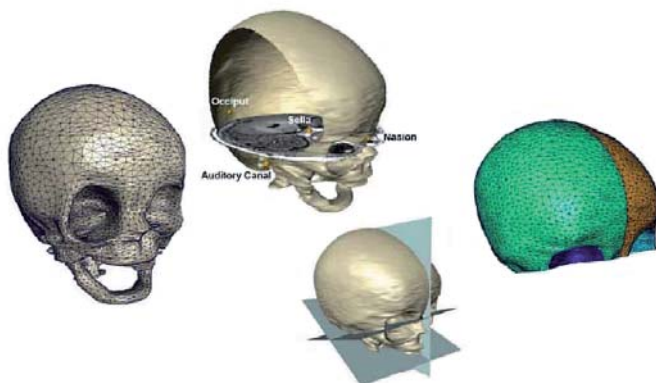


Abb. 4

4. Operationsplanung

Eine gründliche präoperative Planung des Eingriffs unter Berücksichtigung aller erforderlicher Kriterien würde helfen, die Operationsdauer und das Operationsrisiko möglichst gering zu halten und die Notwendigkeit von Sekundäroperationen zu reduzieren. Insbesondere bei ausschließlich kosmetisch begründeten Schädelformkorrekturen verschärft sich der Erfolgsdruck für den Operateur. Er muss einerseits verhindern, dass einem eigentlich gesunden Kind aufgrund einer operativen Komplikation bleibender Schaden zugefügt wird. Andererseits soll ein bestmögliches und vor allem bleibendes Korrekturergebnis unter Berücksichtigung des oft nicht unerheblichen Aufwands und Risikos erzielt werden. Dieses Anforderungsprofil wirft ein besonderes Licht auf die ästhetischen Schwächen der seit über 40 Jahren nur unwesentlich modifizierten, traditionellen Operationsmethoden, deren Ergebnisse mangels Erfolgskriterien nie quantifiziert wurden. Weder eine quantifizierte Dokumentation der postoperativen Formentwicklung im Rahmen des weiteren Spontanverlaufes, mit seiner unbekannten individuellen Schwankungsbreite, einschließlich der Korrekturverluste, noch eine Einschätzung der ästhetischen Qualität der Ergebnisse liegen vor. Eine Individualprognose ist auch heute noch kaum möglich. Die allgemein übliche Praxis der Operationsplanung und Durchführung, welche allein auf der Erfahrung und des „künstlerisch modellierenden“ Geschicks des Operateurs beruht, erscheint nicht mehr zeitgemäß.

Eine Erstellung ästhetischer Kriterien hingegen erscheint vor dem Hintergrund der europäischen Geschichte der letzten 300 Jahre kaum möglich: Seit dem Beginn wissenschaftshistorisch ernst zu nehmender Forschung über Kopf- und Gesichtsformen, die auf Arbeiten von Johannes Lavater, dessen Assistenten Johann Wolfgang von Goethe und einer beeindruckenden Ahnenreihe von Physiologen wie z.B. Petrus Camper (1722–1789), Georges Cuvier (1769–1832) und Johann Friedrich Blumenbach (1752–1840) beruht, kam es in regelmäßigen Abständen zu einer rassistisch oder ideologisch geprägten Instrumentalisierung der erhobenen Daten. Im Dritten Reich erreichte dieser Missbrauch mit dem Versuch des Genozids des jüdischen Volkes seinen Höhepunkt. Noch heute fällt bei der Lektüre einschlägiger chirurgischer Publikationen eine durch die geschilderte Vorgeschichte belastete Zurückhaltung bei der Beschreibung der (ästhetischen) Operationsziele auf. Andererseits sind in diesem Gebiet tätige Chirurgen gezwungen, im operativen Alltag ästhetische Entscheidungen zu treffen.

Ohne brauchbare (objektive) Kriterien ist davon auszugehen, dass Operationsergebnisse ausschließlich von der Erfahrung und vom „Geschmack“ bzw. dem Formgefühl eines Chirurgen abhängen – eine aus unserer Sicht für einen Eingriff dieser Größenordnung, der in Deutschland von jedem Kieferchirurgen,

Neurochirurgen oder plastischen Chirurgen ohne Nachweis einer speziellen Expertise durchgeführt werden darf, für die betroffenen Patienten unzumutbare Situation.

Einen Ausweg aus dem Dilemma der mangelnden Datenlage bietet die Etablierung statistischer anstelle ästhetischer Kriterien. Analog zur allseits bekannten Kopfumfangskurve – einer anerkannt zuverlässigen Maßzahl für das physiologische Größenwachstum des Schädels – soll aus der Erhebung dreidimensionaler Messwerte in einem Normalkollektiv die statistische Variationsbreite räumlicher Merkmale für operationsrelevante Altersstufen definiert werden. Eine hierfür notwendige Sammlung anatomischer Daten von bezüglich des Schädelwachstums gesunden Kindern im ersten Lebensjahr wurde zwar schon von einigen Arbeitsgruppen diskutiert, eine für unsere Fragestellung klinisch nutzbare Datenbasis existiert nach unserem Wissen jedoch noch nicht. Ein erster Schritt besteht deshalb in der Etablierung einer Datenbank physiologischer Schädelformen gesunder Kinder in der betroffenen Altersgruppe. Im zweiten Schritt müssen diese Daten in einer durch Computer verarbeitbaren Form verfügbar gemacht werden, die die Errechnung von statistischen Durchschnitts- oder Mischformen aus dem Bestand der individuellen (anatomische) Merkmale erlaubt. Im Ergebnis wäre damit eine auf einen zu operierenden Patienten abgestimmte Umsetzung der geplanten Schädelform in ein Kunststoffmodell mittels dreidimensionaler Herstellungsverfahren (Rapid Prototyping) möglich. Über eine entsprechende Adaptierung der Operationstechnik könnte dann die geplante Vorgabe intraoperativ umgesetzt werden.

5. Computergestützte Planung

Die Arbeitsgruppe Medical Planning am Zuse-Institut Berlin (ZIB) beschäftigt sich seit Jahren mit Fragestellungen der computergestützten Therapieplanung – insbesondere in der Chirurgie. Durch die Kombination der im Bereich der Kopfchirurgie gewonnenen

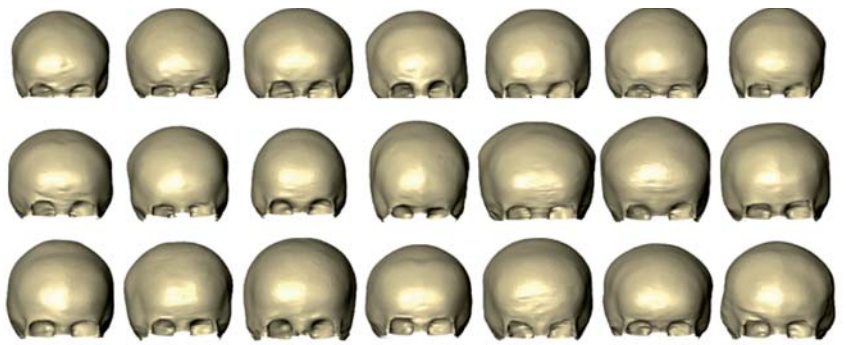


Abb. 5

Erkenntnisse (Zachow 2005) mit innovativen Verfahren der dreidimensionalen Formanalyse (Lamecker 2008) wurde die Grundlage für eine computer-beziehungsweise modellgestützte Planung von chirurgischen Schädelumformungen auf Basis statistischer Formmerkmale geschaffen. Dazu wurde begonnen, eine Datenbank physiologischer Schädelformen gesunder Kinder im ersten Lebensjahr zu erstellen, diese bezüglich der auftretenden Formvariabilität zu analysieren und aus dem Datenbestand eine individualisierte Formvorgabe zu generieren, die in die statistisch signifikante Variationsbreite fällt und für den chirurgischen Umformungsprozess herangezogen werden kann.

5.1 Aufbau einer Datenbank

Das Ziel beim Aufbau einer Datenbank ist es, eine möglichst große Zahl von physiologischen Schädelformen knochengesunder Kinder im Alter von bis zu etwa einem Jahr zu erfassen. Da auf diesen Daten die spätere statistische Analyse der Formen basiert, muss die Auswahl sorgfältig getroffen werden. In Kooperation mit der Kinderradiologie der Charité Berlin (Prof. Dr. Stöver) wurden im ersten Schritt 21 geeignete magnetresonanztomografische (MRT) Datensätze von Kindern im Alter zwischen 14 und 42 Wochen ausgewählt und anonymisiert in die

Abb. 5 _ Unterschiedliche Schädelformen in der Datenbank.

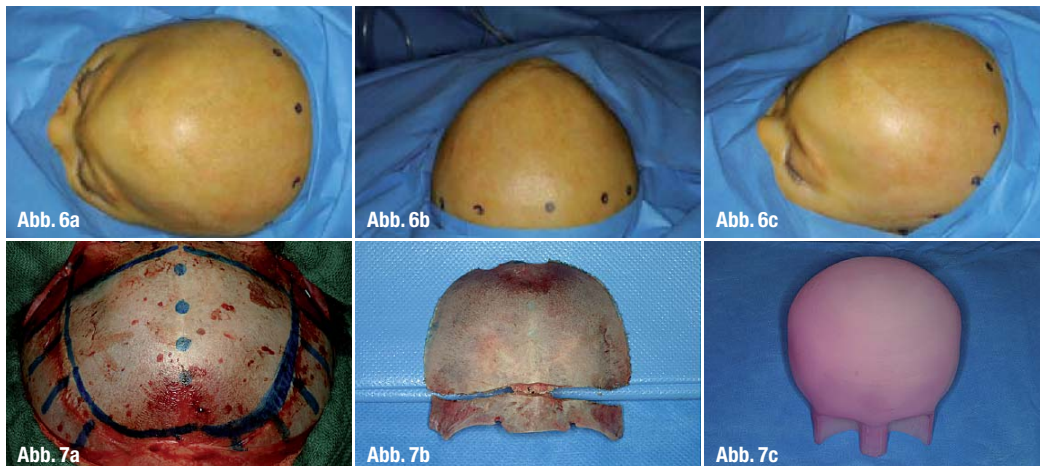
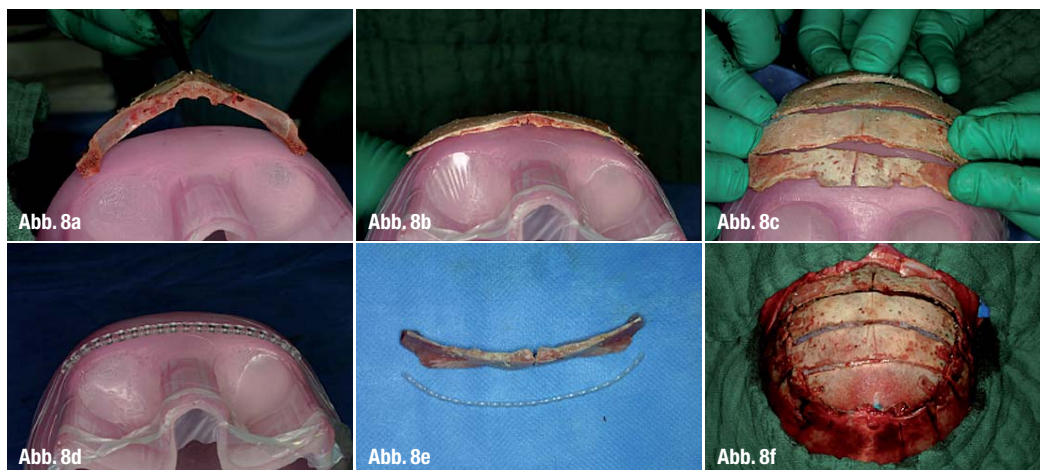


Abb. 6a–c _ Säugling mit Frontalnaresynostose.
Abb. 7a–c _ Individualisiertes Formmodell.

Abb. 8a–f Modellierung der Knochenstreifen.



Datenbank aufgenommen. Abbildung 3 zeigt drei unterschiedliche Schnitte eines exemplarischen Datensatzes.

In einem weiteren Schritt wurden aus den Bilddaten geometrische Modelle des für die spätere klinische Anwendung relevanten Schädelareals in Form einer digitalen Oberflächenbeschreibung erzeugt. In den so berechneten Oberflächen wurden lediglich die Teile in die Datenbank überführt, die oberhalb der durch Okziput, Nasion und den Eingängen zu den knöchernen Gehörgängen definierten Ebenen liegen (Abb. 4). Diese Region wurde zum Zwecke der Korrespondenzbetrachtung in vier Subregionen unterteilt: Linke und rechte Hemisphäre sowie linke und rechte Augenhöhle. Alle Datensätze wurden in vergleichbarer und konsistenter Art und Weise in geometrische Schädelformbeschreibungen überführt (Abb. 5) und in die Datenbank aufgenommen.

5.2 Statistische Formmodelle

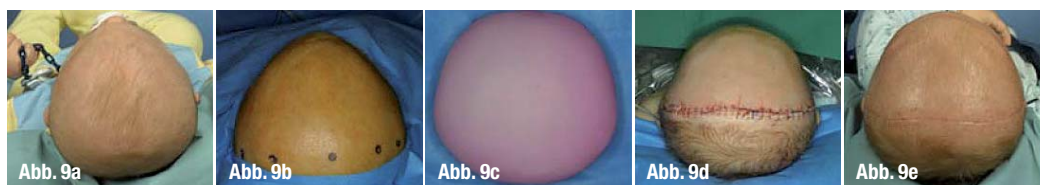
Durch ein am ZIB entwickeltes Verfahren zur statistischen Analyse dreidimensionaler Formen können die aufbereiteten Daten aus der Datenbank so in Beziehung zueinander gesetzt werden, dass ein detaillierter Formvergleich möglich wird (Lamecker 2008). So lassen sich zum Beispiel Abweichungen zwischen den einzelnen Formen und ein Mittelwert aus allen Formen berechnen. Die hier angewendete Methode ist die sogenannte Hauptmodenanalyse. Deren Ziel ist es, die Verformungen um den Mittelwert, welche innerhalb der Datenbank auftreten, nach ihrer Wichtigkeit (z.B. der Größe der Varianz entlang charakteristischer Hauptvariationsrichtun-

gen) zu sortieren. Jede Originalform lässt sich dann aus der gemittelten Form durch eine Kombination der voneinander unabhängigen, charakteristischen Verformungen rekonstruieren. Darüber hinaus lässt diese Art der Formbeschreibung auch Formen zu, die sich aus einer Kombination mehrerer Formmerkmale ergeben und die somit selbst nicht direkt in der Datenbank enthalten sind. Die Menge aller charakteristischen Verformungen wird als ein statistisches Formmodell bezeichnet.

5.3 Individualisierte Planungsmodelle

Wie vorab beschrieben lassen sich auch Formen konstruieren, die selbst nicht direkt in der Datenbank vorliegen, indem man Kombinationen der charakteristischen Verformungen erzeugt, die nicht durch eine einzelne Schädelform, sondern durch verschiedene Formen repräsentiert sind. Bleibt diese Kombination in einem gewissen Rahmen (d.h. der Variationsbreite des Datenbestandes), so erhält die neue Form die charakterisierenden Merkmale der ursprünglichen Datenbank. In unserem Fall bedeutet das, dass es sich bei der neuen Form um eine Kopfform handelt, die sich in der natürlichen Variationsbreite physiologischer Schädelformen befindet. Diese Eigenschaft ist der Schlüssel zur Individualisierung eines statistischen Formmodells. Denn die Frage bei der chirurgischen Umformung lautet ja: Wie lässt sich eine pathologische Schädelform in eine gesunde/normale Form überführen? Das statistische Formmodell liefert dabei einen zulässigen Formenraum. Aus diesem wird diejenige Form ausgewählt, die den individuellen Gegebenheiten des Patienten möglichst gut angepasst ist. Zum

Abb. 9a–e Zustand zwei Monate und unmittelbar präoperativ, durch das Planungsmodell vorgegebene Zielform und postoperativer Zustand unmittelbar nach dem Eingriff und drei Wochen postoperativ. Der Vergleich des prä- und postoperativen Zustandes in Relation zum Planungsmodell zeigt die erfolgreiche Umsetzung der Planungsvorgabe.



Beispiel wäre ein Kriterium, die Übergänge zu Regionen, die beim chirurgischen Eingriff unangetastet bleiben, möglichst passgenau zu gestalten. Dieses Kriterium lässt sich mathematisch erfassen, und so kann die Individualisierung eines Formmodells als mathematisches Optimierungsproblem mit entsprechenden Randbedingungen beschrieben und gelöst werden. Auf diese Weise ist der Chirurg einer subjektiven, ästhetischen Einschätzung der Zielform entbunden. Er legt lediglich die (objektiven) Kriterien für den Individualisierungsvorgang fest.

_6. Anwendung des Verfahrens

Der Arbeitsbereich Pädiatrische Neurochirurgie der Charité – Universitätsmedizin Berlin testet zusammen mit dem Zuse-Institut Berlin (ZIB), an dem die dreidimensionale Formanalyse und die Erstellung statistischer Formmodelle sowie die erforderliche Planungssoftware entwickelt und eine Datenbank für Schädelformen erstellt wird, den Einsatz modellbasierter Operationsmethoden, die eine schnelle und exakt dem Planungsmodell entsprechende Umformung ermöglichen sollen.

Anhand eines exemplarischen Beispiels wird das Potenzial verdeutlicht, welches individualisierte statistische Formmodelle für die chirurgische Rekonstruktion bieten. Für ein sieben Monate altes Kind mit Frontalnahtsynostose (Trigonocephalus) war eine frontoorbitale Modellierung vorgesehen. Der zu modellierende Bereich der Stirn bis zum markierten Teils des Schädels ist in Abbildung 6 verdeutlicht.

Da für diese Behandlung keine tomografische Bildgebung infrage kommt, wurde das statistische Formmodell an externe anatomische Landmarken angepasst, die genau bestimmt und präzise vermessen werden konnten. Im Anpassungsvorgang wurden die Relationen dieser Landmarken erhalten, alle anderen Bereiche der Zielregion hingegen resultieren aus dem Formmodell und der darin gespeicherten Formvariation. Das so individualisierte Formmodell wurde mittels stereolithografischer Fertigungstechnik in Originalgröße aus Kunststoff gefertigt (Abb. 7).

Die Operation wurde wie bei einer aktiven frontoorbitalen Schädelumformung begonnen. Eine genaue Vorgehensbeschreibung findet sich in Zöckler 2006. Der Modellierungsprozess des Schädelknochens sowie der resorbierbaren Stützkonstruktion erfolgte allerdings direkt auf dem sterilisierten und zusätzlich mit einer sterilen Folie bedeckten, individualisierten Planungsmodell (Abb. 8).

Nach abgeschlossener Formgebung wurden die Knochenfragmente mit den formidentisch gehärteten Stützelementen verschraubt und die so entstandenen Kombinationsimplantate en bloc eingesetzt.

Der Vergleich des prä- und postoperativen Zustandes in Relation zum Planungsmodell (Abb. 9) zeigt die erfolgreiche Umsetzung der Planungsvorgabe.

_7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch den neuen, modellgestützten operativen Ansatz kann zusammenfassend das gewünschte ästhetische Ergebnis der Operation unter Verwendung ausschließlich statistisch erhobener Daten sichergestellt, die Operationszeit verkürzt und damit das Operationsrisiko gesenkt werden. Die vorgestellte Methode vermeidet zudem den Rückgriff auf zweifelhafte und subjektive ästhetische Kriterien.

Mit wenigen einfachen Distanzmessungen am Kopf des Patienten bis hin zu berührungslosen optisch/fotogrammetrischen Verfahren kann aus dem Abgleich der Messungen mit dem Formenpool der Datenbank ein passendes Modell bestimmt und dreidimensional gefertigt bzw. bei vorhandener Modellauswahl resterilisiert und wiederverwendet werden. Die immer wieder geäußerte Befürchtung, die Verwendung genormter Modelle würde auch zu stereotypen Operationsergebnissen führen, erscheint gegenstandslos, weil mit dem Tag der Operation das sehr individuelle weitere Wachstum einsetzt und mittelfristig erkennbare Ähnlichkeiten verhindert.

Kritisch bleibt die Auswahl der relevanten Formmerkmale für die Erstellung statistischer Formmodelle sowie die Limitierung der Datenbank unter ethnischen Aspekten. Eine entsprechende Erweiterung für abweichende Schädelformen anderer ethnischer Gruppen bzw. eine Kategorisierung nach Geschlecht und Altersgruppen ist durch Erweiterung der Datenbank jedoch problemlos möglich. Gleiches gilt für die Erstellung von Datenbanken für andere anatomische Formen bis hin zur Formvorgabe für individualisierte Implantate unter Berücksichtigung von anatomischen Variationsbreiten.

Der Weiterentwicklung der Operationsmethoden fehlte mit der technisch kaum durchführbaren Quantifizierung operativ erzielter oder wachstumsbedingter dreidimensionaler Formveränderungen bisher eine wichtige Grundlage. Insuffiziente Operationsergebnisse oder spätere Korrekturverluste wurden nicht objektiv bewertet, Verbesserungsbedarf wurde nicht erkannt und ein Lerneffekt blieb aus. Die Bereitstellung und Nutzung eines dreidimensionalen Modells ermöglicht erstmals eine exakte metrische Definition der durch die Operation erreichten Formveränderung und im weiteren Verlauf die Quantifizierung spontaner Veränderungen. Auch wenn die Folgen einer effektiven Qualitätskontrolle, z.B. die Konzentration von Eingriffen dieser Art in wenigen Kompetenzzentren, nicht uneingeschränkt auf positive Resonanz stoßen werden, hat sich das hier vorgestellte Projekt – neben dem Zeitgewinn durch den Wegfall der Korrekturphase – die Ergebnisabsicherung zur vordringlichen Aufgabe gemacht.

Eine Literaturliste ist beim Verlag erhältlich.

_Kontakt	face
Dr.-Ing. Stefan Zachow	
Leiter der Arbeitsgruppe Medical Planning am Zuse-Institut Berlin (ZIB) E-Mail: zachow@zib.de www.zib.de/visual/medical	