

5 ZUSAMMENFASSENDE AUSBLICK

Das Ziel der vorliegenden Dissertation war die Erarbeitung und Prüfung einer neuen, modellbasierten OP-Methode zur Behandlung von Craniosynostosen auf der Basis von objektiven Daten knochengesunder Kinder. Hierzu wurde zuerst aus einem Überblick von bestehenden Krankheitsbildern und klassischen sowie neueren Ansätzen zur operativen Therapie die Problematik abgeleitet, dass es weder eine objektive Zielform für die frühkindliche Schädelform als Zielfunktion für die operative Behandlung noch eine technische Unterstützung zur regelmäßigen Erlangung der gewünschten Schädelform für den OP gibt.

In dieser Studie wurde daher die dreidimensionale Darstellung und statistische Analyse der Schädelformvarianten knochengesunder Kinder im ersten Lebensjahr bewerkstelligt. Die Software Amira[®] ermöglichte erstmals die ausschließliche Verwendung kernspintomographischer Schichtbilder aus anderweitig indizierten Untersuchungen. Die Datensätze wurden mittels semiautomatischer Verfahren dreidimensional rekonstruiert, und mit eigens hierzu entwickelten statistischen Verfahren konnte ein mittleres Schädelformmodell erstellt werden.

Zentrales Anliegen der Arbeit war die anschließende prototypische Herstellung eines plastischen Schädelmodells innerhalb des Normkollektivs, individuell angepasst an einen zuvor bestimmten Patienten, um eine Verbesserung und Vereinfachung der operativen Schädelrekonstruktion durch den vorgeschlagenen Lösungsansatz zu demonstrieren.

Aus der statistischen Identifikation repräsentativer Formvarianten sowie den individuellen Daten aus der Vermessung des gewählten Patienten wurde ein mittleres Modell individuell angepasst und in Stereolithographietechnik in einen Prototyp aus Acrylharz umgesetzt. Anschließend zeigt die Arbeit auf, dass die operationstechnischen und handwerklichen Anforderungen sowie die generelle Tauglichkeit der modellgebundenen Operationstechnik erfolgreich erprobt werden konnten.

In der exemplarischen Erstanwendung wurden die fehlgeformten Kalottenabschnitte des Patienten nach erforderlicher Aufbereitung unter Verwendung des Modells rasch umgeformt, mit vorgeformten resorbierbaren Stabilisierungselementen innenseitig versteift und reimplantiert. Der inspektorische Vergleich des postoperativen Ergebnisses mit dem Kunststoffmodell zeigt eine überzeugende Übereinstimmung. Das Aussehen des Kindes zeigt eine deutliche Verbesserung der fehlgebildeten Kalottenabschnitte. Somit konnte gezeigt werden, dass die beschriebene Nutzung eines Stereolithographiemodells die Erlangung eines vorab festgelegten

Operationszieles ermöglicht. Insgesamt ist damit sowohl das Problem der Definition des Formzieles als auch der handwerklichen Umsetzung gelöst. Im Sinne dieser Arbeit ist der *Proof of Concept* der operativen Korrektur von frühkindlichen Schädeldeformitäten durch Verwendung von dreidimensionalen Standardformmodellen auf der Basis von Daten „normaler“, knochengesunder Kinder erbracht.

Um davon ausgehend die Methode als Standard-Operationsvorgehen zu etablieren, wären weitere Erhebungen interessant und sinnvoll.

Verbreiterung der Datenbasis

- Voraussetzung für weitere Untersuchungen der Formenvariabilität der kindlichen Schädelform im ersten Lebensjahr anhand eines dreidimensionalen mittleren Schädelformmodells ist in aller erster Linie eine wesentlich umfangreichere und vielfältigere Datenbasis. Unsicherheiten würden sich hierdurch statistisch relativieren. Zum aktuellen Zeitpunkt können anhand des Modells aus 21 Datensätzen noch keine abschließenden Aussagen über die Formkriterien getroffen werden.
- Die ***Ermittlung der Schädelformkriterien der einzelnen Altersstufen*** zwischen drei und neun Monaten würden bei einer ausreichend großen Datenbasis differenzierter und aussagekräftiger ausfallen.
- Besonders interessant ist bei ausreichend großer Datenbasis das Bilden unterschiedlicher Gruppen nicht nur für die unterschiedlichen Altersstufen, sondern auch für ***Formmerkmalsentitäten***. Auch im Hinblick auf ethnische Unterschiede kann eine entsprechende Datenbasis wichtige statistische Hinweise geben. Als eine elegante Lösung bietet sich hier eine sogenannte ***Clusteranalyse*** an, die aus einem Pool unterschiedlicher Formen ähnliche Formen zu Gruppen zusammenfasst. So könnten sich in der gleichen Gruppe z.B. die Schädel vollkommen unterschiedlicher Ethnien befinden, solange ihre Kopfformen die gleichen Formmerkmale aufweisen.
- Aussichtsreich ist auch die Möglichkeit der vollautomatischen Segmentierung zur Vergrößerung der Datenbasis. Ein vielversprechender Ansatz zur vollautomatischen Segmentierung basiert auf der Nutzung von à priori Wissen in Form von statistischen 3D Modellen (auch Atlas genannt). Der Atlas wird zunächst auf Basis der segmentierten Daten erzeugt. Sobald er sich aber aus einer hinreichend großen Zahl an Modellen zusammensetzt, kann er auch selbst für die Segmentierung eingesetzt werden und somit den Segmentierungsvorgang vereinfachen und beschleunigen. Die ständige Erweiterung

eines solchen Atlanten ist erforderlich, um mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit Aussagen über die generelle Form eines Objektes treffen zu können.

Verfeinerung der Operationsmethodik

- Offen und diskussionsbedürftig ist noch das endgültige Procedere der spezifischen Modellauswahl, also der Weg vom deformierten, operationsbedürftigen Patienten zum individuell passenden Normmodell im Operationssaal.

Auf den ersten Blick mag man versucht sein, eine präoperative MRT-Untersuchung mit anschließender exakter Berechnung der zu diesem Datensatz am besten konvenablen „gesunden“ Schädelform aus dem Normkollektiv anzustreben. Anschließend stünde dann ein perfekt angepasstes Modell zur Umformung im OP bereit. Bei eingehender Betrachtung und sorgfältiger Abwägung scheinen jedoch die Belastung des Patienten und der Kostenaufwand durch die MRT-Untersuchung unverhältnismäßig. Eine andere Variante, die eine präoperative MRT-Untersuchung umgeht, besteht darin, am kranken Kind bestimmte Parameter konventionell zu messen und dann anhand dieser Werte ein Modell zu berechnen und maßgeschneidert anfertigen zu lassen. Diese Variante wurde zur prototypischen Demonstration des vorgeschlagenen Lösungsansatzes in dieser Arbeit verfolgt.

Die Autorin vertritt in Übereinstimmung mit dem Arbeitsbereich pädiatrische Neurochirurgie der Charité und dem ZIB die Ansicht, dass auch mit einer nicht individuell angepassten Kollektion von altersentsprechenden und formvariieren Standardmodellen eine deutliche Verbesserung gegenüber einer Operation ohne formgebende Hilfsmittel erzielt werden kann. Als Vergleich sollte hier nicht das theoretische Optimum sondern die gängige Praxis stehen, die völlig ohne Ausweitung der Belastung des Patienten und der Kostenbasis verbessert werden soll. Das geeignete Modell würde dann anhand konventioneller Vermessung des Patienten aus dem vorhandenen Modell-Set bestimmt. Das am besten passende Modell wird nach der Altersstufe und den ermittelten Messwerten aus der Kollektion ausgewählt. Die pathologisch deformierte Schädelform wird dann an die am besten passende Standardform angeglichen. Wie diese Auswahl anhand zweidimensional messbarer Parameter aus dem Modell-Set dreidimensionaler Edelstahlschädelmodelle in der Praxis vonstatten gehen soll, und wie umfangreich die Kollektion sein muss, ist noch genauer zu definieren.

- Anstelle der konventionellen Vermessung am Patienten oder einer präoperativen MRT-Aufnahme könnte ein *optischer 3D-Oberflächenscan* eine dreidimensionale Bildgebung - ohne Strahlenbelastung und ohne Sedierung - des kindlichen Schädels zur Operationsplanung und Modellauswahl ermöglichen. In der kraniofazialen Sprechstunde der Charité wurde bereits eine solche 3D-Scanaufnahme erprobt.

Weitergehende Nutzung der Projekt-Methode

Bei der Betrachtung und Diskussion der Ergebnisse ergibt sich eine bedeutende, bisher ungeklärte Frage: *Wie sieht die charakteristische physiologische Formänderung des knöchernen Schädels im ersten Lebensjahr aus?*

Anhand einer Altersgruppierung des Datenpools könnten anatomische und entwicklungsseigene Charakteristika identifiziert werden.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Nutzung von dreidimensionalen Standardformmodellen auf der Basis von Daten „normaler“, knochengesunder Kinder zur operativen Korrektur von frühkindlichen Schädeldeformitäten möglich ist und sowohl Zielformdefinition als auch handwerkliche Umsetzung gestattet. Darüber hinaus eröffnet sich die Option einer quantitativen Kontrolle der Operationsergebnisse.