Virtuelle Planung der chirurgischen Korrektur einer Kraniosynostose

Eine Fallstudie

Anamnese

Ein drei Wochen altes Mädchen wurde uns initial mit einer postpartalen pulmonalen Anpassungsstörung, einem Verdacht auf ein Apnoe-Bradykardie-Syndrom und einer auffällig hohen Schädelform mit Beteiligung des Mittelgesichts vorgestellt. Während des stationären Aufenthalts zeigte die kleine Patientin mehrfach stimulationspflichtige Sättigungsabfälle bis 30 %, die v. a. während des Fütterns auftraten und mit einer deutlichen Gesichtszyanose einhergingen.

Klinischer Befund

Bei der klinischen Untersuchung zeigte sich eine deutlich veränderte Schädelform mit Beteiligung des Mittelgesichts. Die Stirn war flach und hoch. Im Profil war ein fast direkter Übergang vom Nasenrücken zur Stirn zu erkennen. Ein Exophthalmus lag nicht vor. Die Fundoskopie zeigte einen ophthalmologisch unauffälligen Befund mit einer beidseits vitalen, randscharfen Papille, einer zentralen Netzhautanlage und regelrechten Gefäßen. Bei der Polysomnographie wurden in Rückenlage obstruktive Apnoen beobachtet, die durch die nachfolgenden Arousals zu keinen signifikanten Abfällen der Sauerstoffsättigung führten, jedoch einen negativen Einfluss auf die Schlafqualität hatten.

Abb. 1 ▲ Computertomographie: sagittaler (a) und koronarer Schnittverlauf (b). Visualisierung der schwelwertbasierten, dreidimensionalen Segmentierung der knöchernen Strukturen: laterale (c) und frontale Ansicht (d)

Abb. 2 ▲ Vergleich der präoperativen knöchernen Situation (a, c) mit der virtuellen Planung der Repositionierung der Segmente (b, d). Die beiden schalenförmigen Kalottenteile (blau) werden dabei um 180° rotiert und medial durchtrennt, um eine laterale Weitung zu ermöglichen. Das frontoorbitale Advancement wird mit der Abhebung des entsprechenden Segments (rot) erreicht, das durch Entlastungsschnitte flexibel modellierbar gemacht wird

Bildgebung

Da die beiden Koronarnähte in der Schädelsonographie nicht eindeutig abgrenzbar waren, erfolgte ein Magnetresonanztomographie des Schädels in Intubationsnarkose. Dabei waren eine atypisch längliche Kopfform in der Seitenansicht und eine deutlich abgeflachte Stirn mit einer kurzen Frontobasis zu erkennen. Es imponierte eine unauffällige Abbildung der Hirnstammstrukturen sowie des Kleinhirns. Auch hier waren die Schädelsturen bei fraglicher Verknöcherung der Suturae coronales schlecht darstellbar, ebenso die Sutura frontalis und Sutura sagittalis.

Da sich unter Wachstum eine Progredienz des klinischen Befunds bei Verdacht auf ein oxyzephalisches Schädelwachstum zeigte, stellten wir die Indikation zur

operativen Korrektur unter Zuhilfenahme einer präoperativen virtuellen Planung.

Weil die computergestützte Operationsplanung auf Basis möglichst aktueller Daten der knöchernen Situation erfolgen sollte, wurde eine Computertomographie des Gesichtsskeletts in Intubationsnarkose im Alter von 4 Monaten veranlasst (6 Wochen vor dem geplanten Eingriff; ▣ Abb. 1a, b). Die Schichtbilddaten wurden anschließend segmentiert (Software ProPlan CMF, Materialise, Leuven, Belgien), um die dreidimensionalen Oberflächen der Kalotte zu erfassen (▣ Abb. 1c, d). Auch in den digitalen Daten der knöchernen Strukturen zeigten sich das starke oxyzephalische Schädelwachstum und die frühzeitige Verknöcherung sowohl der mediofrontalen als auch beider koronaren Suturen sowie die Fehlbil-

dung der Schädelform mit flacher, enger Stirn und stark ausgeprägtem Turmschädel.

Definition

Die Ursache des Oxyzephalus ist meist eine vorzeitige Verknöcherung der beidseitigen Koronarnähte. Sind zusätzliche Nähte betroffen, spricht man von einem oxyzephalen Schädelwachstum. Bei dieser Form ist i. d. R. auch das Mittelgesicht beteiligt. Die empfohlene Therapie ist die operative Korrektur der Schädelform durch Kraniotomie in Kombination mit einem sog. frontoorbitalen Advancement, bei dem ein flaches, breites Segment oberhalb der Orbitae abgetrennt wird, das durch mehrere, jeweils anteilige Einschnitte flexibel und damit modellierbar gemacht wird. Das Segment darüber im Bereich der flachen Stirn wird zuerst entnommen und nach der üblichen Empfehlung en bloc um 180° rotiert, da die Krümmung des Anteils, der sich präoperativ im kranialen Bereich befindet, i. d. R. zu einer stimmigen Krümmung der Stirn führt [1, 2]. Falls notwendig kann dieses Segment mittig unterteilt werden, um das intrakranielle Volumen noch stärker zu vergrößern. Da Formen und Ausprägungen bei diesem Krankheitsbild sehr stark individuell variieren, ist eine Standardisierung des operativen Vorgehens kaum möglich und eine patientenindividuelle Operationsplanung normalerweise unumgänglich. Hier können moderne Methoden der computergestützten, virtuellen Planung einen entscheidenden Mehrwert liefern, um die Operationsplanung zu optimieren und mithilfe 3-D-gedruckter Schablonen eine Überführung der geplanten Schnittführung in den Operationssaal zu erreichen.

Präoperative Planung

Basierend auf den 3-D-Daten wurde eine digitale Planung erstellt, die es erlaubt, virtuell Schnitte entlang der Kalotte zu platzieren, sodass eine Unterteilung in mehrere Segmente erzielt werden kann. Im Rahmen der virtuellen Planung werden eine freie Platzierung und Neuordnung dieser Segmente ermöglicht und es können diverse höchst unterschiedliche

Varianten vorab virtuell simuliert und beurteilt werden. Dabei lassen sich die Abstände zwischen den Rändern der Segmente quantifizieren, um zu große Spaltmaße zwischen den Segmenten zu verhindern, da diese im Heilungsverlauf zu Komplikationen führen könnten. Des Weiteren kann algorithmusbasiert die Vergrößerung des Schädelinnenvolumens berechnet werden, was eine entscheidende Zielgröße für die Operation darstellt (implementiert in der Programmiersprache Python und visualisiert mit der Software Blender v2.78, Blender Foundation, Amsterdam, Niederlande).

Durch die Möglichkeit der präoperativen digitalen Planung konnten diverse Varianten virtuell entworfen werden, bei denen komplett unterschiedliche Osteotomien, auch mit mehreren Segmenten und unterschiedlichen Positionierungen, simuliert werden. Nach virtueller Erprobung unterschiedlichster Konfigurationen war es im interdisziplinären Dialog zwischen MKG- und Neurochirurgie möglich, sich auf eine bestimmte Planung festzulegen. Schließlich fiel die Wahl auf eine Variante mit Rotation des Stirnsegments en bloc um 180 ° und mittlerer Teilung in Kombination mit dem oben beschriebenen frontoorbitalen Advancement (■ Abb. 2).

Die besondere Schwierigkeit der operativen Umsetzung liegt in der genauen Schnittführung, die so ausgelegt werden muss, dass mehrere Anforderungen erfüllt werden können. Zunächst muss die Schnittführung so festgelegt werden, dass ein stimmiges Gesamterscheinungsbild realisiert werden kann, insbesondere mit einer Kompensation des hohen Turmschädels (■ Abb. 3). Dabei muss bei der Repositionierung der Segmente darauf geachtet werden, dass die Spalten zwischen den Segmenten nur so groß dimensioniert werden, dass eine knöcherne Heilung der Kalotte stattfinden kann. Und nicht zuletzt muss durch die Operation eine ausreichende Vergrößerung des Schädelinnenvolumens erreicht werden. Die Einbeziehung diverser anatomischer Restriktionen macht einen interdisziplinären Ansatz unumgänglich.

Basierend auf dieser individuellen Planung wurde eine Osteotomieschablone

MKG-Chirurg 2021 · 14:125–129 <https://doi.org/10.1007/s12285-021-00303-8>
© Der/die Autor(en) 2021

S. Raith · N. Lautner · H. Clusmann · F. Hölzle · A. Modabber

Virtuelle Planung der chirurgischen Korrektur einer Kraniosynostose. Eine Fallstudie

Zusammenfassung

Kraniosynostosen sind schwerwiegende kongenitale Komplikationen, die das physiologische Schädelwachstum behindern. Um die dadurch entstehenden Fehlstellungen zu therapieren und eine normale Entwicklung der Schädelform zu ermöglichen, ist oftmals die chirurgische Korrektur unausweichlich. Da Formen und Ausprägungen bei diesem Krankheitsbild sehr stark variieren, ist eine patientenindividuelle Operationsplanung notwendig. Bei dem vorgestellten Fall handelt es sich um die Operationsplanung und -durchführung bei einem 6 Monate alten Mädchen, das mit einer Verknöcherung sowohl der mediofrontalen als auch beider koronalen Suturen geboren wurde, was zu einer Fehlbildung der Schädelform mit flacher, enger Stirn und stark ausgeprägtem Turmschädel führte. Basierend auf computertomographischen Daten wurde eine digitale Planung erstellt, bei der diverse Varianten virtueller Osteotomien vorab am Computer erprobt und beurteilt werden konnten. Dabei lassen sich die Abstände zwischen den Segmenten quantifizieren,

um zu große Spaltmaße zu verhindern, die zu Komplikationen führen könnten. Des Weiteren kann mit einem eigens entwickelten Algorithmus die Vergrößerung des Schädelinnenvolumens als Zielgröße berechnet werden. Schließlich wurde eine 3-D-gedruckte Osteotomieschablone aus Polyamid hergestellt, die intraoperativ eine passgenaue Überführung der geplanten Schnittführung ermöglichte. Die Segmente konnten nach Vorgabe platziert werden, sodass sich harmonische Proportionen ergaben. Das gemessene Schädelinnenvolumen wurde gemäß der digitalen Planung um 5,5 % erhöht. Die erfolgreiche Umsetzung der Methode zeigt, dass computergestützte Planung einen relevanten Mehrwert für die patientenindividuelle Behandlung von Kraniosynostosen haben kann.

Schlüsselwörter

Kraniofaziale Fehlbildungen · Schädelnaht · 3-D-Druck · Computersimulation · Computerunterstützte Chirurgie

Virtual planning of surgical correction of craniosynostosis. A case study

Abstract

Craniosynostosis is a severe congenital complication that hinders the physiological growth of the skull. Surgical correction is often unavoidable to treat the resultant abnormalities and enable normal development of skull shape. The types and severity of symptoms vary widely, and surgery must be planned on an individual basis. The current case study describes planning and performance of surgery in a 6-month-old baby girl born with ossification of the mediofrontal as well as both coronal sutures. This had led to an abnormally shaped skull with a flat, narrow forehead and pronounced oxycephaly. Based on CT data, a digital plan was created in which diverse variations of virtual osteotomies could be tested and evaluated on the computer. This enabled the separation distances between the segments to be quantified to avoid overly large gaps, which could lead to complications.

Moreover, using a custom algorithm, the enlargement of the internal volume of the skull can be calculated as the target variable. Finally, a 3D-printed polyamide osteotomy template was fabricated to enable exact intraoperative transfer of the planned incisions. The segments could be positioned as planned and resulted in harmonious proportions. In line with digital planning, the internal volume of the skull was increased by 5.5%. The successful application of this method demonstrates that computer-assisted planning can have a relevant benefit for individualized treatment of craniosynostosis.

Keywords

Craniofacial abnormalities · Cranial suture · 3D printing · Computer simulation · Computer-assisted surgery

Abb. 3 ▲ Virtuelle Darstellung der Hautoberfläche basierend auf präoperativer Computertomographie. **a, c** Darstellung der präoperativen Situation mit offensichtlich deformierter Schädelform. **b, d** Visualisierung der simulierten postoperativen Weichteilsituation mit sehr viel harmonischeren Proportionen und Erhöhung des Schädelinnenvolumens

Abb. 4 ▲ **a, b** Anhand der geplanten Schnittführung entlang der Segmentgrenzen wird eine individuelle Schnittschablone modelliert (weiß), die auf der virtuellen Knochenoberfläche aus der Computertomographie modelliert wird. Die Geometrie kann für einen medizinisch zertifizierten 3-D-Druck exportiert werden, um so die computergestützte Planung hochgenau im Operationssaal umsetzen zu können

zunächst virtuell so modelliert, dass sie direkt auf der Kalotte aufliegt und die geplante Schnittführung direkt vorgeben kann (**Abb. 4**). Für den intraoperativen Einsatz wurden die Schablonen mit einem pulverbettbasierten 3-D-Druckverfahren aus Polyamid in einem für den medizinischen Einsatz zertifizierten Prozess hergestellt (FIT Productions GmbH, Lupburg, Deutschland).

Ergebnisse

Die osteoplastische computergestützte (CAD/CAM-Verfahren) Kranioplastik im Sinne eines frontoorbitalen Advancement konnte wie geplant gemeinsam mit den Kollegen der Neurochirurgie durchgeführt werden (**Abb. 5**). Die individuelle Schablone ermöglichte eine passgenaue Überführung der geplanten Schnittführung. Die Segmente ließen sich wie vorgegeben platzieren und mit resorbierbarem Osteosynthesematerial (Sonic Weld®, KLS Martin, Tuttlingen) verplatten. Dadurch gelang es, harmonische Proportionen herzustellen. Das gemessene Schädelinnenvolumen konnte bezugnehmend auf die digitale Planung um 5,5% erhöht werden (von 688 cm³ auf 726 cm³).

Postoperativer Verlauf

Die kleine Patientin wurde eine Nacht postoperativ auf der Kinderintensivstation überwacht und konnte kardiopulmonal stabil anschließend auf die Kinderstation verlegt werden. In den postoperativen Verlaufskontrollen gestaltete sich die Wundheilung regelrecht und die Schädelform wies gegenüber den präoperativen Vorbefunden eine deutliche Harmonisierung der anatomischen Schädelform auf.

Fazit für die Praxis

- Die computergestützte Planung bringt Vorteile für die patientenindividuelle Behandlung von Kraniosynostosen.
- Präoperativ kann eine optimale Veränderung der Schädelform mit ausreichender Genauigkeit, auch in Bezug auf die angestrebte Vergröße-

Abb. 5 ◀ Operative Umsetzung. **a** Öffnung des Operationssitus durch Bügelschnitt im Bereich der behaarten Kopfhaut. **b** Schnittführung entlang der individuellen Osteotomieschablone. **c** Abhebung und Repositionierung der losgelösten Segmente. **d** Modellierung der neuen Schädelform durch Platzierung der einzelnen Segmente für die nachfolgende Verplattung

rung des Schädelvolumens, simuliert werden.

- Durch die computergestützten (CAD/CAM) Schablonen werden Planungs- und Entscheidungsprozesse der eigentlichen Operation vorangestellt; damit lässt sich die Operationszeit verringern und das ästhetische Erscheinungsbild verbessern.

Korrespondenzadresse

Dr.-Ing. S. Raith
Klinik und Poliklinik
für Mund-, Kiefer-
und Gesichtschirurgie,
Universitätsklinikum RWTH
Aachen
Pauwelsstr. 30, 52074 Aachen,
Deutschland
sraith@ukaachen.de

Funding. Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. S. Raith, N. Lautner, H. Clusmann, F. Hölzle und A. Modabber geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Für diesen Beitrag wurden von den Autoren keine Studien an Menschen oder Tieren durchgeführt. Für die aufgeführten Studien gelten die jeweils dort angegebenen ethischen Richtlinien. Für Bildmaterial oder anderweitige Angaben innerhalb des Manuskripts, über die Patienten zu identifizieren sind, liegt von ihnen und/oder ihren gesetzlichen Vertretern eine schriftliche Einwilligung vor.

Open Access. Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Schwenzer N, Ehrenfeld M (Hrsg) (2010) Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie. Thieme, Stuttgart
2. Eufinger H, Kübler A, Schliephake H (Hrsg) (2011) Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie Operationslehre und -atlas, 4. Aufl. Springer, Berlin