

**3D photogrammetrische Erfassung von kraniellen
Volumenänderungen durch
Kraniosynostosenoperationen**

INAUGURAL-DISSERTATION

**zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
des Fachbereichs Medizin
der Justus Liebig Universität zu Gießen**

**vorgelegt von Szczukowski, Alexander
aus Berlin**

Gießen 2015

**Aus der Poliklinik für Mund- Kiefer-, Gesichtschirurgie
unter Leitung von Prof. Dr. Dr. Hans Peter Howaldt,
des Fachbereichs Medizin der Justus-Liebig-Universität Gießen**

Gutachter: Prof. Dr. Dr. Hans Peter Howaldt

Gutachter: Prof. Dr. Dr. Robert Sader

Tag der Disputation: 16.04.2019

Meinen Eltern gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Einführung.....	2
1.2	Begriffsbestimmung.....	2
1.3	Historischer Überblick.....	3
1.4	Die Entwicklung der Schädelnähte	6
1.4.1	Die Entwicklung des Chondrokraniums	8
1.4.2	Die desmale Ossifikation.....	8
1.4.3	Das Viszerokranium	8
1.4.4	Die Schädelbasis.....	8
1.5	Klassifizierung der Kraniosynostosen	9
1.5.1	Ätiologie und Pathogenese	9
1.5.2	Primäre Kraniosynostose	9
1.5.3	Sekundäre Kraniosynostose.....	10
1.5.4	Einteilung nach der Kopfform	10
1.5.5	Einteilung nach den betroffenen Schädelnähten	11
1.5.6	Symptomatik.....	21
1.6	Therapie	23
1.6.1	Chirurgisches Vorgehen	23
1.6.2	Konservatives Vorgehen	29
1.6.3	Beurteilung einer Therapie	29
1.7	Möglichkeiten der anthropometrischen Datenerhebung.....	31
1.7.1	Zirkelmessung	33
1.7.2	Computertomographie	37
1.7.3	Die 3D Photogrammetrie	39
1.8	Ziel dieser Arbeit.....	42
2	Material und Methoden.....	44
2.1	Patientenerfassung.....	44
2.2	Photogrammetrie	45
2.3	Methoden der Datenauswertung.....	47
2.4	Softwareauswertung	48
2.5	Statistische Begleitung.....	51
2.6	Ethikvotum	54
3	Ergebnisse.....	55

3.1	Allgemeiner Teil.....	55
3.1.1	Skaphozephalus	58
3.1.2	Trigonozephalus.....	63
3.1.3	Plagiozephalus	68
4	Diskussion.....	73
4.1	Patientenkollektiv.....	75
4.2	Größe der Fallzahlen.....	76
4.3	Veränderte Prävalenz bei Trigonozephalie.....	76
4.4	Möglichkeiten der räumlichen Datengewinnung	78
4.4.1	CT	78
4.4.2	MRT.....	79
4.4.3	Dreidimensionale Photogrammetrie.....	80
4.5	Auswertung der Daten	82
4.6	Schlussfolgerung	83
5	Zusammenfassung	85
6	Abstract	87
7	Abkürzungsverzeichnis.....	88
8	Formelverzeichnis	90
9	Literaturverzeichnis	91
10	Abbildungsverzeichniss.....	99
11	Tabellenverzeichnis	104
12	Publikationsverzeichnis	105
13	Erklärung zur Dissertation.....	106
14	Danksagung	107
15	Tabellarischer Lebenslauf	108

1 Einleitung

Frühkindliche, prämatüre Kraniosynostosen stellen in häufigen Fällen eine Indikation für eine chirurgische Intervention dar. Neben der eigentlichen korrekativen OP kommt ein längerer Krankenhausaufenthalt mit vielen apparativen Untersuchungen hinzu. Dieses Procedere bedeutet immer eine erhebliche Belastung für das Kind und natürlich für die ganze Familie. Gründe für eine Operation sind die Entwicklungsbehinderung des kindlichen Gehirns, aber auch die Vermeidung bleibender ästhetischer Stigmatisierungen. Das ästhetische Ergebnis einer korrekativen modellierenden Operation liegt in den Händen der Operateure.

Eine Operation wird in den ersten Lebensmonaten angestrebt, da dies einer Operation im höheren Lebensalter überlegen ist (Scott, JR et al. 2009). Klare Bewertungsrichtlinien, die eine Operationsindikation ableiten lassen oder das postoperative Resultat objektiv zu bewerten in der Lage sind, fehlen bislang.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, wie eine modellierende Kraniosynostoseoperation neben dem wichtigen subjektiven Empfinden auch objektiv beurteilt werden kann.

Dafür wurde zwischen dem 14.04.2008 und dem 11.05.2011 die Entwicklung von 28 Kindern mit nonsyndromalen Nahtsynostosen am Universitätsklinikum der Justus Liebig Universität in Gießen untersucht. Diese ist eine offene, nicht randomisierte Studie, die mittels einer neuen objektiven Darstellungsmethode die Deformierung des kindlichen Schädels vor und nach einer Kraniosynostoseoperation in objektiver Form nachweisen soll.

Die Diagnostik erfolgte mit Hilfe des Photoscanners VECTRA 3D der Firma Canfield (Canfield Scientific, Fairfield, NJ, USA). Die Auswertung erfolgte mit der Software Cranioform Analytics® 3.0 (Cranioform®, Alpnach, Switzerland).

1.1 Einführung

Unter dem Begriff Kraniosynostosen wird ein breites Spektrum von kindlichen Schädeldeformitäten zusammengefasst. Die vorzeitigen Schädelnahtverschlüsse sind nach den Lippen-Kiefer-Gaumen-Segelspalten (Weichert et al. 2012) die zweit häufigsten kraniofazialen Entwicklungsstörungen. In der Regel kommt es hierbei bereits pränatal zu einer Verknöcherung der Schädelnähte. Dabei kann sie sowohl als eine primäre Anomalie, aber auch als ein singuläres Symptom innerhalb einer syndromalen Erkrankung auftreten. Diese können bereits bei Geburt sichtbar sein oder sich innerhalb der ersten Lebensmonate entwickeln (Junker 2002).

Die Symptomatik ist sehr vielschichtig und von verschiedenen Einflüssen abhängig. So kann es durch die veränderte Schädelform zu einer intrakraniellen Raumeinschränkung und damit zu einer Beeinträchtigung des Wachstums und organischen Komplikationen kommen. Die Symptomatik und das klinische Bild sind abhängig von Lokalisation, Anzahl und Schweregrad der Synostosen (Horch und Bier 2007).

1.2 Begriffsbestimmung

Bei einer Nahtverknöcherung sollten bei genauer Betrachtung zwei Begriffe unterschieden werden. Eine Schädeldeformation kann über eine intrakranielle Raumeinschränkung zu einer Hemmung des Schädelwachstums führen. Dabei spricht man von einer Kraniostenose (Delashaw et al. 1989). Hierbei handelt es sich um eine Einengung im Bereich des ZNS. Bei einer Kraniosynostose hingegen besteht nicht unbedingt ein erhöhter Schädelinnendruck.

Im angloamerikanischen Sprachgebrauch wird eine solche Unterscheidung nicht vorgenommen (Lentze et al. 2003). Auch im klinischen Sprachgebrauch werden beide Begriffe oftmals synonym verwendet und häufig auch in klinischen Studien nicht unterschieden. Doch wie Berg et al. herausstellt, muss nicht jede Synostose der Schädelnähte auch zu einer Stenose führen (Berg et al. 1997).

1.3 Historischer Überblick

Die Wissenschaft beschäftigt sich schon seit über zwei Jahrtausenden mit der Form des menschlichen Schädels. Kraniale Deformationen sind auf allen Kontinenten nicht nur als krankhafte Prozesse, sondern auch aus schönheitstypischen Werten bekannt (Tubbs et al. 2006). So wird vermutet, dass die ältesten Schädeldeformationen an Neandertalerschädeln zwischen 45.000 und 60.000 vor Chr. vorgenommen wurden (Trinkaus 1983).

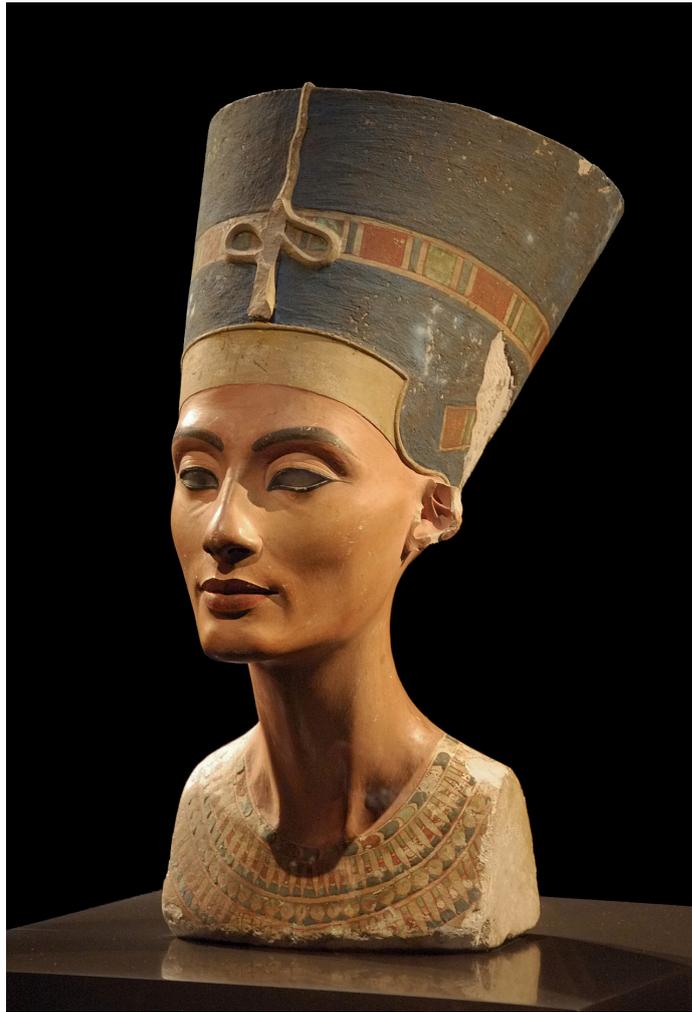
Zu den frühesten Aufzeichnungen zählen die durch den griechischen Arzt Hippocrates im 5. Jahrhundert vor Chr. vorgenommenen. In seinem Werk „De aere, aquis, locis“ beschreibt er ein Volk, welches er nach ihrem Brauch der Formgebung der Schädel als Megakephaloi bezeichnet (Gerszten und Gerszten 1995). Auch im alten Ägypten wurden Köpfe Adelliger bandagiert um einen verlängerten Schädel und ein spitzes Kinn - einen sogenannten Turmschädel - zu provozieren. Das bekannteste Beispiel hierfür ist die Königin Nofretete (Abb. 1).

Auf dem amerikanischen Kontinent wurde bei den Inka, Maya, bei anderen Andenvölkern und auch bei Nordamerikanischen Ureinwohnern aus der Formgebung des Kopfes eine Kunst (Gerszten und Gerszten 1995) (Abb. 2).

All diese absichtlichen Verformungen dienten in erster Linie zum Erreichen eines in der jeweiligen Zeit herrschenden Schönheitsideals und nicht zur Therapie eines krankhaften Geschehens. Aber auch ethnische, religiöse und Standeszugehörigkeiten sollten so verdeutlicht werden (Tubbs et al. 2006).

Die erste Beschreibung in der modernen Medizin erfolgte vor ca. 220 Jahren durch Sömmering im Jahr 1791 (Bischoff, Henle u. a. 1839-45; Berg et al. 1997).

Rudolf Virchow beschrieb erstmals das quer zu den im ersten Lebensjahr noch nicht verknöcherten Suturen stattfindende Schädelwachstum. Dadurch ist eine Unterscheidung zwischen artifiziell deformierten Schädeln und prämaturnen Nahtsynostosen möglich. Virchow nahm die erste Einteilung der Kraniosynostoseformen aufgrund des Erscheinungsbildes vor (Virchow 1851; Zöller 2003).



*Abbildung 1
Büste der Nofretete im neuen Museum, Berlin
(Foto: Philip Pikart)*



*Abbildung 2
Chinook Kind in einem Gerät zur
kraniellen Formgebung (Gerszten und
Gerszten 1995)*

1.4 Die Entwicklung der Schädelnähte

Der Begriff „Sutur“ als Bezeichnung für die Schädelnähte wurde aus dem altgriechischen Wort „Raphe“ (was so viel wie Kleidernaht bedeutet) durch Celsius ins Lateinische übersetzt. 21 Suturen verbinden das aus 22 Knochen bestehende frühkindliche Neurokranium. Es beinhaltet das Gehirn und setzt sich aus Schädelkalotte und Schädelbasis zusammen. Während im Kindesalter die bindegewebige Verbindung ein Schädelwachstum gewährleistet, stellt der Hirnschädel die knöcherne, schützende Hülle für das Gehirn dar. Man unterscheidet die größeren (paarige Sutura coronalis, Sutura sagittalis, paarige Sutura lambdoidea, Sutura metopica) von den kleineren Suturen.

Dabei verbindet die bei Kleinkindern vorkommende Sutura frontalis die beiden getrennten Anteile des Os frontale, während die Sutura coronalis das Os frontale mit den Ossa temporalia et parietalia verbindet. Die Ossa parietalia sind mit dem Os occipitale über die Sutura lambdoidea verbunden und die Sutura sagittalis verbindet die beiden Ossa parietalia miteinander.

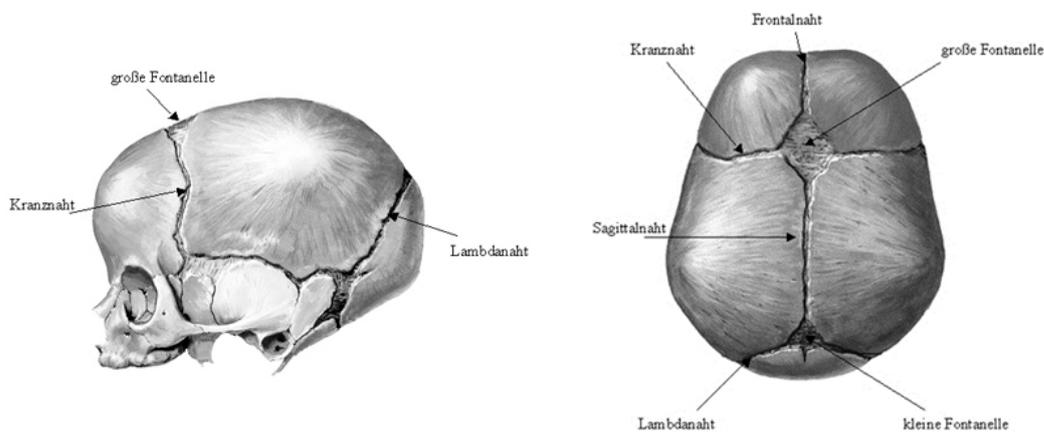


Abbildung 3
Anatomie des Schädels (Azouz 2008)

Das grundlegende Schema zum Aufbau einer Sutur wurde von Pritchard, Scott und Girgis 1956 beschrieben (Pritchard et al. 1956) (Abb. 4). Dieses Schema ist auch heute noch in Anatomiebüchern zu finden.

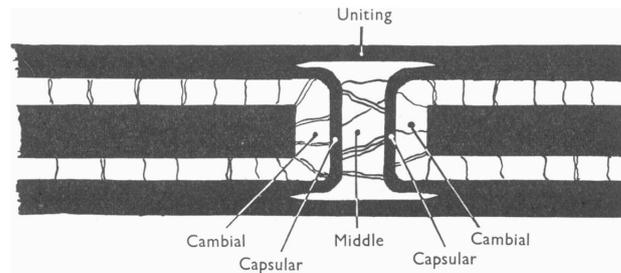


Abbildung 4
Struktur einer Suture nach Pritchard (Pritchard
et al. 1956)

Sie teilten den Aufbau in 5 Zwischen- und 2 Verbindungsschichten, welche von ihnen als Uniting Layers bezeichnet wurden und die Suture sowohl von extra- als auch von intrakraniell überspannen.

Allerdings kann dieses Schema nicht allgemeingültig für alle Suturen und für jedes Lebensalter genutzt werden (Porthun 2010).

Die Nähte der Schädelkalotte sind sogenannte *Suturae serratae*, Zackennähte. Sie verlaufen stark gewunden und greifen ineinander. Während sich bei jungen Kindern an den Knochenrändern noch Knorpelinseln bilden, welche einen gewissen Grad an gelenkiger Beweglichkeit erlauben, bilden sich ab dem dritten Lebensjahr Nahtzacken, welche auf der Außenseite sehr viel deutlicher als auf der Innenseite ausgeprägt sind.

Durch die Nahtverläufe erhält das Schädeldach sein typisches Aussehen. Das Schädelwachstum ist vom Gehirnwachstum primär abhängig (Reinhart 2000). Der Kopf macht bei einem termingerechten Neugeborenen etwa 10-12% (350-400g) seines Körpergewichtes aus. In den ersten Lebensmonaten kommt es zu erheblichen zeitlich dicht gedrängten Veränderungen, so dass nach 6 Monaten eine Verdopplung des Gewichtes des Gehirns auf ca. 660 g verzeichnet werden kann. Damit entspricht es ca. 50% des endgültigen Hirngewichts. Nach dem ersten Lebensjahr verlangsamt sich das Wachstum, da das langsamere Wachstum durch Knochenabbau an der Innenseite der Schädelkalotte und Knochenanlagerung an der Außenseite an Bedeutung gewinnt, bis die endgültige Masse von ~1300g mit 10 bis 12 Jahren erreicht ist. Damit hat das suturale Schädelwachstum etwa nach dem ersten Lebensjahr seinen Abschluss erreicht.

1.4.1 Die Entwicklung des Chondrokraniums

1.4.2 Die desmale Ossifikation

Der Beginn der Entwicklung der ersten Knochenkerne findet in der 7. bis 8. Schwangerschaftswoche in Form einer genetisch determinierten Osteogenese statt. Das Wachstum der Suturen unterliegt hauptsächlich funktionellen Einflüssen. Sie stellen ein sekundäres Wachstumszentrum dar. Den entscheidenden Stimulus für das Wachstum stellt der hydrostatische Druck des Schädelinhalts unabhängig seiner Art dar. Kommt es zu einer gestörten Hirnentwicklung oder unterbleibt diese, ist die Ausdehnung gestört. Das Resultat kann z.B. in einer Makro- oder Mikrozephalie münden. Die membranöse Sutura ist mit einem spezialisierten Periost zu vergleichen. An der Knochenaußenseite findet appositionelles Knochenwachstum statt. Im Gegenzug kommt es auf der Knocheninnenseite zu Knochenresorptionsvorgängen.

1.4.3 Das Viszerokranium

Auch für das Viszerokranium findet in der 7. und 8. SSW die Ausbildung von Knochenkernen statt. Dies ist für eine normale und störungsfreie Entwicklung des Viszerokraniums nötig. Als primäres Wachstumszentrum wird die Nasenkapsel und hier insbesondere das Nasenseptum angesehen. Das endogen gesteuerte Wachstum findet in Form einer antero-kaudalen Rotation aufgrund chondroblastischer Teilungsvorgänge statt.

1.4.4 Die Schädelbasis

Die Basis cranii, als inferiorer Anteil des Neurokraniums, ist die das Viszero- mit dem Neurokranium verbindende Grenzstruktur, auf der das Gehirn aufliegt. Sie bildet sich aus den hintereinander gelagerten Knochen, Siebbein, Keilbein und Hinterhauptsbein, den paarigen Stirnbeinen und den seitlich gelegenen Schläfenbeinen (Waldeyer und Mayet 1993).

Anatomisch wird sie in die drei Schädelgruben Fossa cranii anterior, media und posterior unterteilt. Im klinischen Gebrauch spricht man von der Frontobasis, der vorderen Schädelbasis, und der Laterobasis, der seitlichen Schädelbasis.

1.5 Klassifizierung der Kraniosynostosen

1.5.1 Ätiologie und Pathogenese

Rudolph Virchow sah den Grund einer Schädelnahtverknöcherung in einer isolierten direkten Schädigung der Schädelnähte. Es scheint jedoch, dass das Schädelwachstum vielmehr durch auf die Naht einwirkende Faktoren abhängig ist. So sollte die prämatüre Synostose nicht als Ursache, sondern als Symptom der Erkrankung aufgefasst werden. Die Ursache des Zustandekommens einer Synostose ist bisher nicht geklärt. Es wird davon ausgegangen, dass diese Erkrankung von multiplen Faktoren abhängt. Von Müke werden drei Möglichkeiten als Ursache einer Synostose dargestellt (Müke 1972):

1. *Lokale Ursachen* einer Nahtschädigung [Entzündungen (Rickettsiosen, Lues), Stoffwechsel- und Durchblutungsstörungen, sowie Störungen des Nahtbindegewebes]
2. *Änderung des Schädelinnendrucks und Spannungsänderungen der Schädelkapsel* (Müke und Meyer-Glauner 1977)
3. *Übergeordnete embryonale Störungen*

Neben mütterlichem Rauchen werden auch Medikamente während der Schwangerschaft als Ursache beschrieben (Gardner et al. 1998).

So konnte während der ersten Schwangerschaftsmonate kein, im fortgeschrittenen Stadium der Schwangerschaft jedoch ein moderater Anstieg des Risikos, gerade bei Müttern, die nach dem ersten Trimester weiter rauchten, nachgewiesen werden (Alderman et al. 1995).

1.5.2 Primäre Kraniosynostose

Die primären Kraniosynostosen werden in isolierte, non-syndromale, und mit einem Syndrom vergesellschaftete syndromale Kraniosynostosen unterschieden. Typischerweise ist bei den non-syndromalen Kraniosynostosen eine einzelne Sutura betroffen. Es bestehen hier keine Beteiligungen weiterer Organsysteme (Garza und Khosla 2012; Rachwalski et al. 2013). Seltener können mehrere oder auch alle Suturen betroffen sein. Durch den frühzeitigen Verschluss einer oder auch mehrerer Schädelnähte kommt es je nach synostosierter Naht zu einer unterschiedlichen Ausprägung der Schädeldeformität. Nach David *et al* kommt es zu einer Störung während des Verknöcherungsprozesses der

Schädelnähte, da eine Fehlentwicklung der knochenbildenden Matrix besteht. Die Pathologie liegt in der jeweiligen Suture (David und Simpson 1982). Die Ursachen einer primären Kraniosynostose sind bis heute unbekannt. Allerdings lässt sich darauf schließen, dass es eine genetische Komponente gibt (Zöller 2003; Cohen und MacLean 2000). Eindeutig genetische Defekte konnten für einige syndromale Kraniosynostosen, wie dem M. Crouzon, dem M. Apert und auch dem Pfeiffer Syndrom identifiziert werden (Freudlsperger et al. 2013). Von Garza und Khosla werden genetisch veränderte Transkriptionsfaktoren, Wachstumsfaktorrezeptoren und Zytokine beschrieben, die bei prämaturen Kraniosynostosen identifiziert wurden (Garza und Khosla 2012).

1.5.3 Sekundäre Kraniosynostose

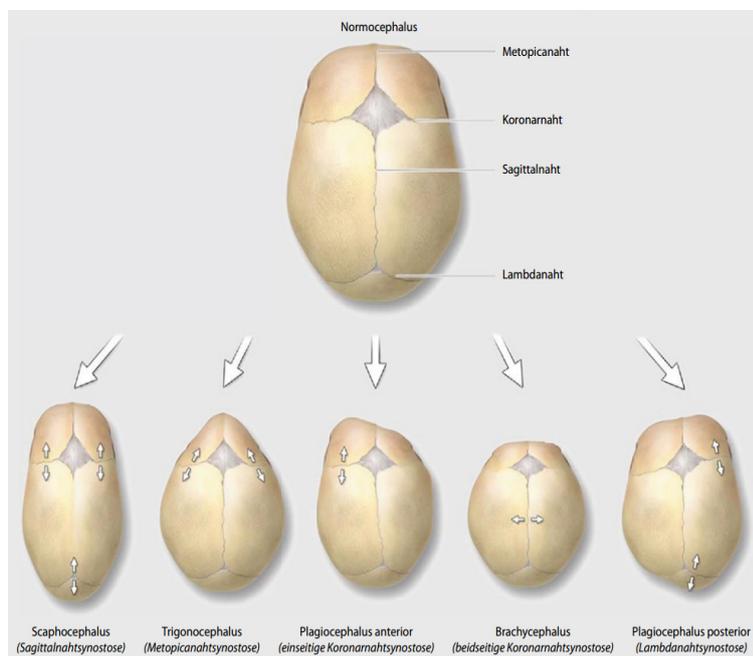
Eine sekundäre Form entwickelt sich auf dem Boden einer verminderten Expansion des Gehirns (David und Simpson 1982). Durch Shillito wurden unter der sekundären Form Entwicklungsstörungen, Hirnatrophie oder „Übershunting“ nach Hydrozephalus zusammengefasst (Shillito, JR 1992).

Eine metabolisch veränderte Stoffwechsellage kann als dritte Form der Grund einer sekundären Kraniosynostose sein. Stoffwechselstörungen sind z.B. eine Hyperthyreose, Hypophosphatasie, Hypercalcämie, Vitamin D-resistente Hypophosphatämie, Mukopolysaccharidose, Mukolipidose oder Rachitis (Collmann et al. 1988; Freudlsperger et al. 2013). Dies kann sich sowohl prä- als auch postnatal entwickeln. So konnte ein Risiko für die Entstehung einer Kraniosynostose bei dem ungeborenen Kind durch mütterliches Rauchen gezeigt werden (Carmichael et al. 2008). Die Ätiopathogenese bleibt meist ungeklärt, eine genetische Komponente ist nur teilweise gesichert.

1.5.4 Einteilung nach der Kopfform

Die erste Einteilung der Kraniosynostose wurde 1851 durch Rudolph Virchow, zu diesem Zeitpunkt an der Universität Würzburg lehrend tätig, vorgenommen. Seine Einteilung richtet sich nach dem Erscheinungsbild und definiert die verschiedenen Schädelformen nach der Lokalisation der synostotisierten Naht. In seinem wissenschaftlichen Werk „Über den Kretinismus namentlich in Franken und über pathologische Schädelformen“ sieht er die vorzeitige Verknöcherung der Schädelnähte als Ursache und unterteilt neun Schädelneubildungen (Virchow 1851/52).

Die Hemmung des Wachstums senkrecht zur Suture durch prämatüre Verknöcherung und der Volumenausgleich durch kompensatorische Expansion der benachbarten, nicht synostotierten Nähte resultiert in einer typischen Kopfform. Diese ist durch die Reihenfolge, den Zeitpunkt und die synostotierte Naht bedingt (Cohen, JR 2009). Durch Marchac und Renier wurde für das operative Vorgehen die Einteilung in fünf typische Schädelformen vorgenommen (Marchac und Renier 1989). Zu diesen fünf (Trigonocephalus, Plagiocephalus, Oxyzcephalus, Brachycephalus und Scaphocephalus) wird heute zusätzlich die echte Lambdanahtsynostose hinzugefügt (Horch und Bier 2007), welche jedoch im Vergleich zu den anderen Kraniosynostosen sehr selten ist.



*Abbildung 5
die aus der Fusion einer oder mehrerer Suturen
resultierenden Kopfformen (Rachwalski et al. 2013)*

1.5.5 Einteilung nach den betroffenen Schädelnähten

Das Wachstum und die Form des Schädels werden in entscheidender Weise von der Stärke der Ausprägung und der betroffenen Naht bestimmt. Die Beeinträchtigung des Wachstums erfolgt senkrecht zur betroffenen Naht, daraus entstehen die entsprechenden charakteristischen Schädelformen.

Tabelle 1

Unterschiedliche Schädeldeformitäten mit betroffenen Schädelnähten

Schädelform	Betroffene Naht
Scaphocephalus	Sutura sagittalis
Trigonocephalus	Sutura metopica, Sutura frontalis
anteriorer Plagiocephalus	Sutura coronalis
posteriorer Plagiocephalus	Sutura lambdoidea

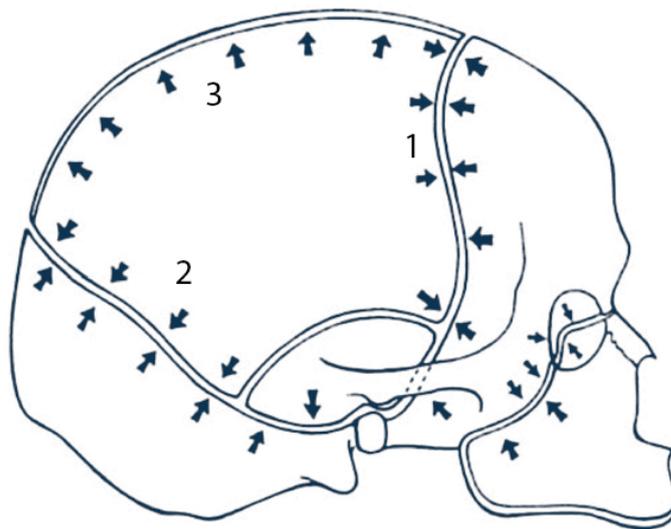


Abbildung 6

Die drei Suturensysteme (verändert nach J. H. Scott und A. D. Dixon). Die Pfeile zeigen die Richtung der Wachstumsschübe an (Fanghänel 2004).

1: Koronales Suturensystem

2: Lambdanaht Suturensystem

3: Sagittales Suturensystem

Sutura sagittalis

Der Skaphozephalus betrifft die Pfeilnaht zwischen den Parietalknochen. Bei 40 – 55% aller prämaternen Nahtsynostosen handelt es sich um isolierte prämatere Verknöcherungen der Sagittalnaht (van der Meulen et al. 2009a; Garza und Khosla 2012). Das typische Erscheinungsbild der Sagittalnahtsynostose ist eine in anterior-posteriore Richtung verlängerte und in biparietale Richtung schmalere Kopfform. Das Resultat des kompensatorischen Wachstums ist das frontale bossing, sowie der occipitale knob.

Das frontale bossing fällt bei der Untersuchung durch ein Hervortreten der Stirn auf. Es besteht ein prominenter Augenbrauenkamm. Diese Symptome können in der Kindheit mild ausgeprägt sein und mit dem Älterwerden deutlicher hervortreten. Der occipital knob beschreibt einen in der Mittellinie gelegenen knöchernen Schädelvorsprung am Hinterkopf, der durch den lamdaförmigen Verlauf der occipitalen Schädelnähte entsteht.

Bei der Geschlechterverteilung sind 3½-mal häufiger Jungen als Mädchen betroffen (Lajeunie et al. 1996). Bedingt durch die Synostose findet ein vermehrtes Wachstum in der Länge statt, wohingegen das Breitenwachstum in der Entwicklung gehemmt wird. Durch die in einem sehr steilen Winkel zueinander stehenden Parietalknochen kommt es zu dem charakteristischen Kahnschädel (Hopf 1999).

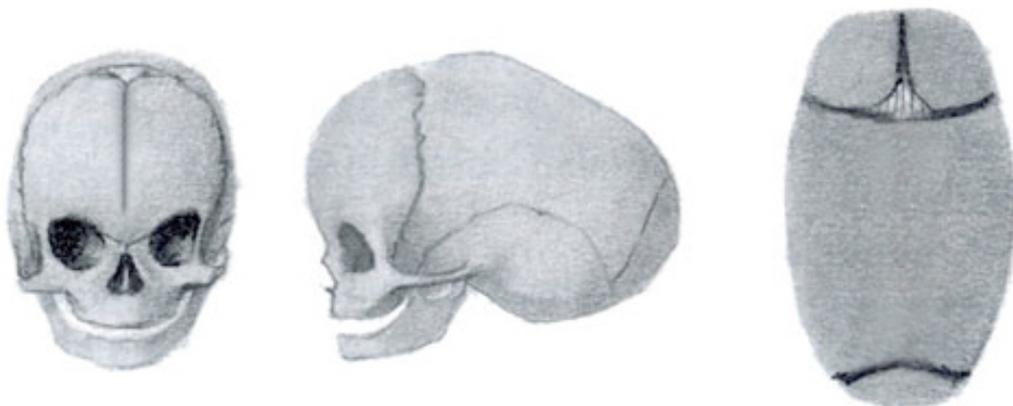


Abbildung 7
Schematische Darstellung eines Skaphozephalus, verursacht durch die Synostose der Sagittalnaht, modifiziert nach (Zöller 2003)



*Abbildung 8
Fotographische Dokumentation des klinischen Bildes eines Skaphozephalus*

Sutura frontalis

Zu einer Verknöcherung der Frontalnaht, wie die Sutura metopica auch genannt wird, kommt es in etwa 5 - 15% der Fälle (van der Meulen et al. 2009a). Die Folge ist ein gehemmtes Breitenwachstum in der Frontalregion. Die Stirn wird kielförmig verformt und zeigt in der Stirnmitte Aufwulstungen, die besonders ausgeprägt in der Region der Glabella sind. Die Kompensation besteht in einer Ausbuchtung des Scheitel- und Hinterhauptbereichs. Dadurch kommt es zu der typischen Dreiecksform mit Abflachung der beiden Stirnseiten und dem mittigen Vorspringen der Stirn. Der Hinterkopf wirkt dadurch breiter. Die Kranznaht wandert nach vorn, der obere äußere Augenrand wird nach hinten versetzt. Da das transversale Wachstum gehemmt ist, entsteht ein Hypotelorismus und die Orbitae sind häufig tropfenförmig nach oben ausgezogen.

Diese Entwicklung tritt oft schon sehr früh, zum Teil intrauterin, ein und ist dann bei Geburt erkennbar (van der Meulen et al. 2009a; Kolar 2011). Eine Mitbeteiligung des Mittelgesichtes und des Unterkiefers ist in der Regel nicht zu finden.

Es wird eine genetische Ursache diskutiert (Hennekam und van den Boogaard 1990). In den letzten 2 Jahren wurde diese Form der Synostose deutlich gehäufiger beobachtet (van der Meulen et al. 2009a).

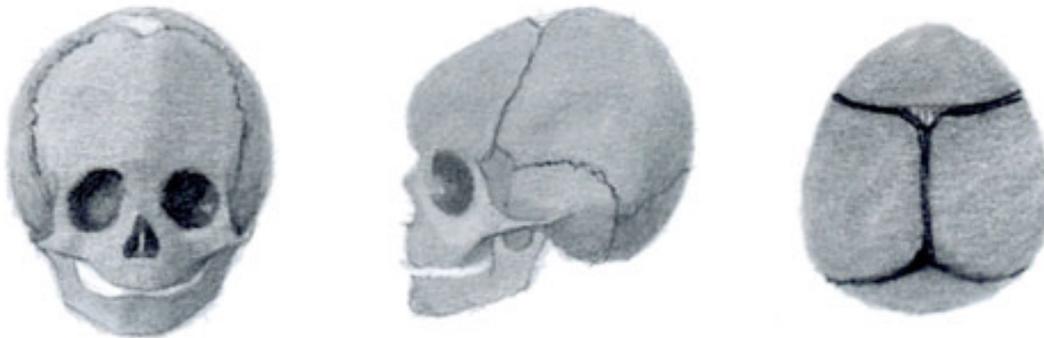


Abbildung 9
Schematische Darstellung eines Trigonozephalus, verursacht durch die Synostose der Sutura metopica, modifiziert nach (Zöller 2003)



Abbildung 10
Fotographische Dokumentation des klinischen Bildes eines Trigonozephalus

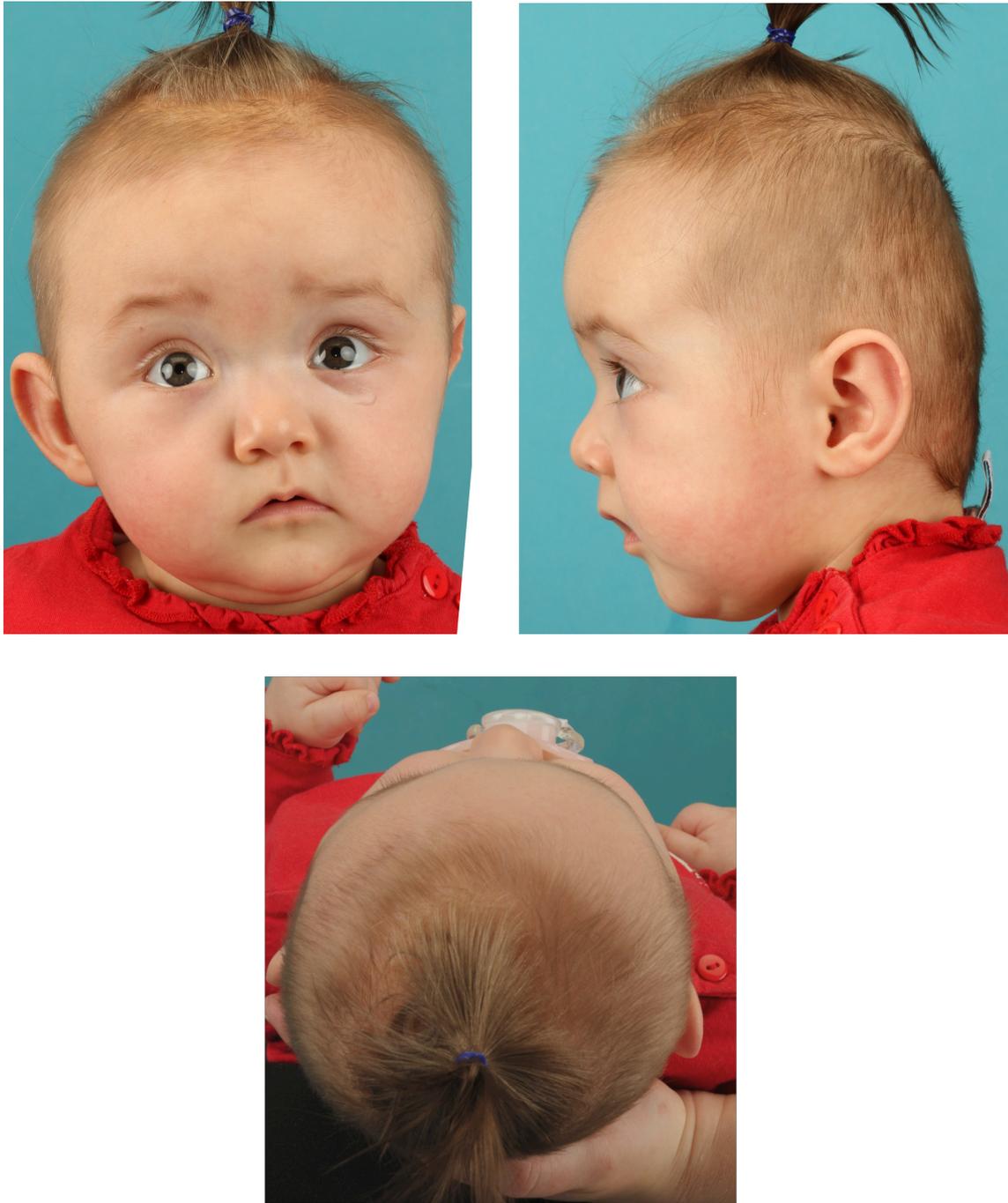
Sutura coronalis

Bei der Verknöcherung der Sutura coronalis ist ebenfalls ein knöcherner Grat über der entsprechenden Naht tastbar. Bei unilateraler Synostose kommt es zu einer verminderten Ausdehnung des ipsilateralen Stirnbeins. Im Gegensatz zum abgeflachten Stirnbein sind das gleichseitige Schläfenbein und die gegenseitige Stirn vorgewölbt. Das sogenannte Harlekinzeichen der Orbitatrichter ist in der anterior-posterioren Röntgenaufnahme des Schädels zu erkennen. Es ist durch die hoch ausgezogenen Keilbeinflügel bedingt. Die Orbitatrichter sind verkürzt, die Orbita ist zusätzlich nach kranial verlagert und tropfenförmig nach kranial-lateral in Richtung der Synostose ausgezogen. Das Ohr auf der betroffenen Seite ist nach vorne versetzt, die Nasenwurzel divergiert. Es kommt zu einer Gesichtsskoliose. Diese Form der Synostose kommt nach Kolar in etwa 20 - 25% der Fälle vor (van der Meulen et al. 2009a; Kolar 2011).

Der Gesichtsschädel wird von der Wachstumshemmung mit beeinflusst. Auch kann die Okklusionsebene auf der betroffenen Seite nach kaudal verschoben sein. Durch kompensatorisches Wachstum ist die Okklusion jedoch in der Regel nicht gestört.



*Abbildung 11
Schematische Darstellung eines linksseitigen anterioren Plagiozephalus,
verursacht durch die Synostosierung der linken Koronarnaht, modifiziert nach
(Zöller 2003)*



*Abbildung 12
Fotographische Dokumentation des klinischen Bildes eines anterioren linksseitigen
Plagiozephalus aufgrund der Synostose der Sutura coronalis links*

Sutura lambdoidea

Zwischen dem Os occipitale und dem Os parietale befindet sich die Sutura lambdoidea. Bei einem von hinten auf den Schädel gerichteten Blick erscheint dieser asymmetrisch. Auf der abgeflachten Hinterkopfseite ist das Ohr nach unten verschoben. Der Parietalbereich erscheint auf der gegenüberliegenden Seite vermehrt ausgebuchtet und steht höher. Beim von oben gerichteten Blick zeigt sich eine trapezförmige Deformation. Es entsteht eine deutliche Ausbuchtung im Bereich des Mastoids, der sogenannte mastoidale bulge.

Nach Hopf kommt es in etwa 5% der Fälle zu einer Verknöcherung (Hopf 1999). Eine beidseitige Synostose wird als Platiozephalus bezeichnet (Lütsch G. 1997).



Abbildung 13

Schematische Darstellung eines posterioren linksseitigen Plagiozephalus durch einseitige Synostosierung der Sutura lambdoidea links modifiziert nach (Zöller 2003)



*Abbildung 14
Fotographische Dokumentation des klinischen Bildes eines posterioren
Plagiozephalus aufgrund einseitiger Synostose der Sutura Lambdoidea
rechts*

1.5.6 Symptomatik

Die Symptomatik der prämaternen Schädelnahtsynostose kann sehr vielschichtig sein und ist durch ihre Anzahl, durch ihre Lokalisation und den Schweregrad, aber auch durch die Kompensationsfähigkeit noch nicht verschlossener Schädelnähte bestimmt. Es bestehen sowohl leichtere, nicht operationswürdige Formen, als auch schwerste Ausprägungen mit extremer Beeinträchtigung. Oft wird die Diagnose einer Kraniosynostose erst spät gestellt, da die Symptomatik häufig nur diskret ist oder als Geburtstrauma fehlgedeutet wird. Immer aber wird die Abschätzung des Schweregrades einer Kraniosynostose anhand des klinischen Bildes getroffen.

Da auch ein gestörtes Wachstum keinen statischen Zustand, sondern einen dynamischen Prozess darstellt, ist eine frühe Diagnosestellung zur Verhinderung irreparabler Schäden wichtig. Andernfalls muss damit gerechnet werden, dass sich Symptome als organische Komplikation wie Hirndruckerhöhung oder Beteiligung der Sehnerven darstellen und eine kosmetisch und funktionell korrigierende operative Intervention (Renier et al. 2000) nicht im günstigen Intervall des ersten Lebensjahres stattfindet, sondern sich die Symptomatik im Wachstumsverlauf verstärken kann (Mühling 2000).

Die symptomale Spannbreite reicht über eine Einschränkung der Funktion und Ästhetik bis zu einer Verschiebung der Proportionen von Neurokranium und Viszerokranium.

Die Folgen einer prämaternen Schädelnahtsynostose können anhand ihrer Lokalisation unterteilt werden. Nachfolgend sind die Symptome entsprechend der Wachstumsbehinderung des Neurokraniums und Viszerokraniums dargestellt (Horch und Bier 2007). Diese Komplikationen sind in erster Linie nur bei schwerster Ausprägung der Synostosen zu erwarten.

*Tabelle 2**Mögliche Folgen prämaturer Schädelnahtsynostosen (Horch und Bier 2007)*

Wachstumsbehinderung des Neurokraniums	<ul style="list-style-type: none">- Chronisch erhöhter intrakranieller Druck- Verminderung der zerebralen Durchblutung (evtl. Grenzzoneninfarkt)- Hirnatrophie mit irreversiblen Ausfällen- Ausbildung von Umgehungskreisläufen über die Emissarvenen der Schädelkalotte- Behinderung der Liquorzirkulation mit Gefahr eines Hydrozephalus- Schädigung des N. opticus mit Visusverschlechterung; in Extremfällen mit Erblindung- Beeinträchtigung der psychomotorischen Entwicklung
Wachstumsbehinderung des Viszerokranium	<ul style="list-style-type: none">- Flache Orbitatrichter mit Protrusio bulbi, chronische Keratokonjunktivitis und Hornhauterosion- Mittelgesichtshypoplasie mit Behinderung der Nasenatmung (chronische Atemwegsinfektionen, ernsthafte Gedeihstörung der Kinder, Rechtsherzbelastung)- Fehllage der Kiefer mit Beeinträchtigung des stomatognathen Systems (Kaufunktion und Sprache)

1.6 Therapie

1.6.1 Chirurgisches Vorgehen

Die Therapie der Wahl bei einer Kraniosynostose stellt die chirurgische Korrektur dar. Die Indikation zu einer Operation ist in der Regel funktioneller und kosmetischer Natur. Sie beruht auf wichtigen klinischen Hinweisen, wie palpable Knochengratbildungen oder tastbaren Bewegungseinschränkungen zwischen den Schädelknochen. Häufig ist ebenso eine charakteristische Deformation zu erkennen, welche in der Regel mit der Zeit deutlicher in Erscheinung tritt. Bei der Synostose der Sutura metopica sollte z.B. die klassische Trias aus einer schmalen Stirn mit biparietaler Erweiterung, einem Hypotelorismus sowie dem palpablen metopischen Grat bestehen, bevor die Entscheidung für eine operative Korrektur getroffen wird.

Die Therapie von Kraniosynostosen, verursacht durch eine Hyperthyreose oder eine Thyreotoxikose, stellt eine Ausnahme dar. Hier sollte primär, z.B. durch den Einsatz von Thyreostatika oder eine eventuelle Dosisreduktion von Thyroxin die metabolische Ursache behoben werden.

Eine Operation strebt in erster Linie eine funktionelle Verbesserung und damit eine Reduktion der Gefahr von bleibenden Komplikationen an, die z.B. durch eine Hirndrucksteigerung verursacht werden können. Sind multiple Suturen betroffen, kann in bis zu 40% der Fälle eine Steigerung des intrakraniellen Druckes eintreten (Sharma 2013).

Durch diese auch kosmetische Korrektur kann die mit dieser Erkrankung verbundene psychosoziale Belastung, der das Kind ausgesetzt ist, reduziert werden (Freudlsperger et al. 2013). Es konnte ebenso eine direkte Verbesserung des IQ durch eine Operation nachgewiesen werden (Renier et al. 1987; Mühling 2000).

Zur Festlegung des optimalen Operationszeitpunktes herrscht zwischen den einzelnen Zentren Uneinigkeit. Das optimale Operationsalter hängt insbesondere von der gewählten Operationsmethode ab. Diese richtet sich wiederum nach der synostosierten Naht. Die Angaben zum optimalen Operationszeitpunkt schwanken bei den einfachen Kraniosynostosen zwischen dem 1. und 12. Lebensmonat. Ein bei der Operation jüngeres Kind ist im Gegensatz zu einem älteren Kind einem höheren allgemeinen Risiko bei einem chirurgischen Eingriff ausgesetzt, insbesondere durch das geringere Blutvolumen und die Empfindlichkeit auf Veränderungen des Elektrolyt- und Wasserhaushaltes. In der zweiten Hälfte des ersten Lebensjahres ist ein solcher Eingriff

für das Kind risikoärmer als in den ersten Lebensmonaten. Die knöchernen Strukturen sind noch biegsam und können so immer noch leichter den Erfordernissen entsprechend geformt und angepasst werden, als es im Gegensatz dazu bei älteren Kindern möglich ist. Auch bestehen in diesem Alter günstigere Voraussetzungen für die Ossifizierung kleinerer knöcherner Defekte, da der Schädel noch eine hohe osteoplastische Kapazität besitzt (Di Rocco et al. 1996; Sharma 2013). Im Allgemeinen wird der günstigste Zeitpunkt zwischen dem 4. und 12. Lebensmonat gesehen (Ghali et al. 2002).

Freudlsperger sieht das Ziel einer operativen Korrektur in „einer sicheren und adäquaten Behandlung durch ein möglichst einzeitiges Verfahren“ (Freudlsperger et al. 2013).

Als Pionier in der kraniofazialen Chirurgie gilt Sir Harold Gillies. Er verlagerte im Jahr 1952 das Mittelgesicht einer Patientin mit Morbus Crouzon, schränkte den operativen Erfolg jedoch dahingehend ein, da eine solche Operation nicht ohne eine massive Schädigung des Patienten zu erreichen ist. (Marchac 2005). Paul Tessier jedoch war der Innovator in der Entwicklung neuer operativer Techniken. Er vollzog eine plastische Rekonstruktion durch Mobilisation der Stirn und des Orbitadaches (Tessier 1971; Schaaf et al. 2010b).

Die Operationsmethoden der linearen Kraniektomie der Fragmentation der gesamten Schädelkalotte und die bis auf das Orbitadach ausgedehnte totale Kraniektomie durch Marie Lannelongue (Lannelongue 1890) und Lane (Lane 1892), sind mittlerweile als historisch anzusehen (Marchac und Renier 1989).

Bei der ehemals verlassenen Technik der einfachen Suturektomie sollte durch Eröffnung oder Entfernung der betroffenen Naht ein regelrechtes Wachstum ermöglicht werden (Shillito, JR und Matson 1968). Als minimal invasives Verfahren in Form der endoskopischen Suturektomie in Kombination mit einer Kopforthesentherapie oder federunterstützten Distraction wurde dieses als frühes endoskopisches Verfahren zur Behandlung der Sagittalnahtsynostose in den 1990er Jahren aufgegriffen. Neben diesem frühen endoskopischen Verfahren (Ridgway et al. 2011; Freudlsperger et al. 2013) gilt weiterhin das offene chirurgische Vorgehen im Sinne des „cranial vault remodelling“ als Standardeingriff, welches in der Regel zwischen dem 4. und 12. Lebensmonat durchgeführt wird. (Freudlsperger et al. 2013).

Die Operationstechniken werden in passive und eine aktive Umformungen unterschieden.

Bei der *passiven Umformung* wird dem heranwachsenden und damit expandierenden Gehirn die Ausformung des Schädels möglich gemacht. Um dies erreichen zu können,

muss die knöcherne Struktur des Schädels entsprechend geschwächt werden. Bei der *Suturektomie* erfolgt beispielsweise die Eröffnung bzw. Entfernung der betroffenen Naht, um ein regelrechtes Wachstum zu gewährleisten (Shillito, JR und Matson 1968).

Bei der *totalen* oder *subtotalen Kraniektomie nach Powiertowski (1974) (Krayenbühl et al. 1974)* hingegen werden Teile des Schädelknochens reseziert. Der Umfang der Operation wird hier primär von der Schädelform bestimmt.

Im Gegensatz zur passiven Umformung erfolgt die *aktive Umformung* durch Verschiebung und Fixierung von Knochenfragmenten. Dies ist ein Vorteil bei sehr ausgeprägten Deformitäten. Es besteht weiterhin keine Abhängigkeit von einer passiven Ausformung durch die Expansion des wachsenden Gehirns (Freudlsperger et al. 2013).

Eine Kombination aus passiver Umformung und aktiver Remodellierung (Vollmer et al. 1984; Jane et al. 2007) ist die „squeeze procedure“ oder auch π -Plastik. Die Namensgebung erfolgte aufgrund des Aussehens des entnommenen Knochens, der der Gestalt des griechischen Buchstabens π ähnelt. Diese Form kommt durch zwei bis in die Regio occipitalis reichende paramediane Kraniektomien zustande. Diese beiden bilden die Schenkel. Eine quere Kraniektomie, die bis in die Temporalregion reicht, stellt den horizontalen Balken des Schriftzeichens dar. Ein Annähen und damit auch eine Annäherung des mittleren Knochenstückes an den frontalen Knochen führt zu einer Verkürzung der Schädellänge. Kompensatorisch kommt es zu einer Verbreiterung im Bereich der parietalen Kraniektomie (Azouz 2008; Zöckler 2006) (Abb. 15). Die parietalen Defekte werden durch lockere Auflagerung der seitlichen Knochenfragmente auf die Dura verschlossen (Jane et al. 2007; Collmann et al. 1999).

Das frontoorbitale Advancement gilt als das Standardverfahren, um im Bereich der vorderen Schädelgrube und der Orbita eine aktive intrakranielle Zunahme des Volumens zu erreichen. Bei dieser Korrektur wird die Stirn in zwei separaten Abschnitten betrachtet und behandelt.

Es können sowohl symmetrische als auch asymmetrische frontale Deformierungen direkt operativ behandelt werden (Collmann et al. 1999). Durch Rotation und Austausch des linken mit dem rechten osteotomierten frontalen Knochens kann in der Mehrzahl der Fälle ein gutes funktionelles und auch ästhetisches Ergebnis erzielt werden (Technical Aspects and Results of Surgery for Craniosynostosis 2004; Mühling 2000). Um das trotz eingreifender korrigierender Operation weiterhin stattfindende abnorme Wachstum zu berücksichtigen, sollte eine Überkorrektur berücksichtigt werden.

Um in die Vielfalt der operativen Vorgehensweisen eine Systematik zu bringen, wurde

am Universitätsklinikum Würzburg ein standardisiertes Osteotomieschema für das *standardisierte frontoorbitale Advancement* konzipiert. Das Vorgehen beruht auch hier auf der Osteotomie, Entnahme und Ausformung des Knochens. Des Weiteren erfolgt eine Vorverlagerung der frontoorbitalen Region. Da bei dieser standardisierten Prozedur die Osteotomielinien an den Schädelnähten entlang geführt werden, wird so eine Trennung der synostosierte Nähte erreicht. Das Ziel ist eine Korrektur der pathologischen Schädelform und zugleich eine Vermehrung des intrakraniellen Volumens. Das standardisierte frontoorbitale Advancement kann bei allen Schädelformen angewendet werden. Die Unterschiede im Vorgehen bei den unterschiedlichen Schädelformen liegen in der Ausformung und Positionierung der entnommenen Knochensegmente (Mühling 2000; Zöller 2003).

Tabelle 3
Operationsmethode in Relation zum Patientenalter und betroffener Suture
(Haberl et al. 2004)

Alter Synostoseform	< 6 Monate	6 -10 Monate	>10 Monate
Sagittalnahtsynostose	Biparietale Kraniektomie	Biparietale Kraniektomie und floating bone flaps	Komplette Umformung
Einseitige Synostose der Sutura coronalis	Frontoorbitale Umformung	→	→
Beidseitige Synostose der Sutura coronalis	Frontoorbitale Umformung	→	Komplette Umformung
Sutura metopica Synostose	Frontoorbitale Umformung	→	Komplette Umformung
Synostose der Sutura lambdoidea	Occipitales Advancement	→	Parieto-okzipitale Umformung
Synostose multipler Suturen	Komplette Umformung	→	→

Zur Korrektur einer Synostose der Lambdanaht wurde auf der Basis des frontoorbitalen Advancement das *okzipitale Advancement* entwickelt. Es basiert ebenso auf einer Osteotomie und Entfernung der entsprechenden Knochenstücke. Zur Erreichung einer harmonischeren Kopfform werden diese angepasst und wieder replaziert. Durch die

Schaffung von artifiziellen Suturen kann das intrakranielle Volumen vermehrt werden und sich als Konsequenz daraus ein normaler intrakranieller Druck einstellen. Bei Erfordernis kann dieses Vorgehen bis zum Foramen Magnum erweitert werden, um eventuell eine Einklemmung der Kleinhirntonsillen beheben zu können (Cinalli et al. 1998).

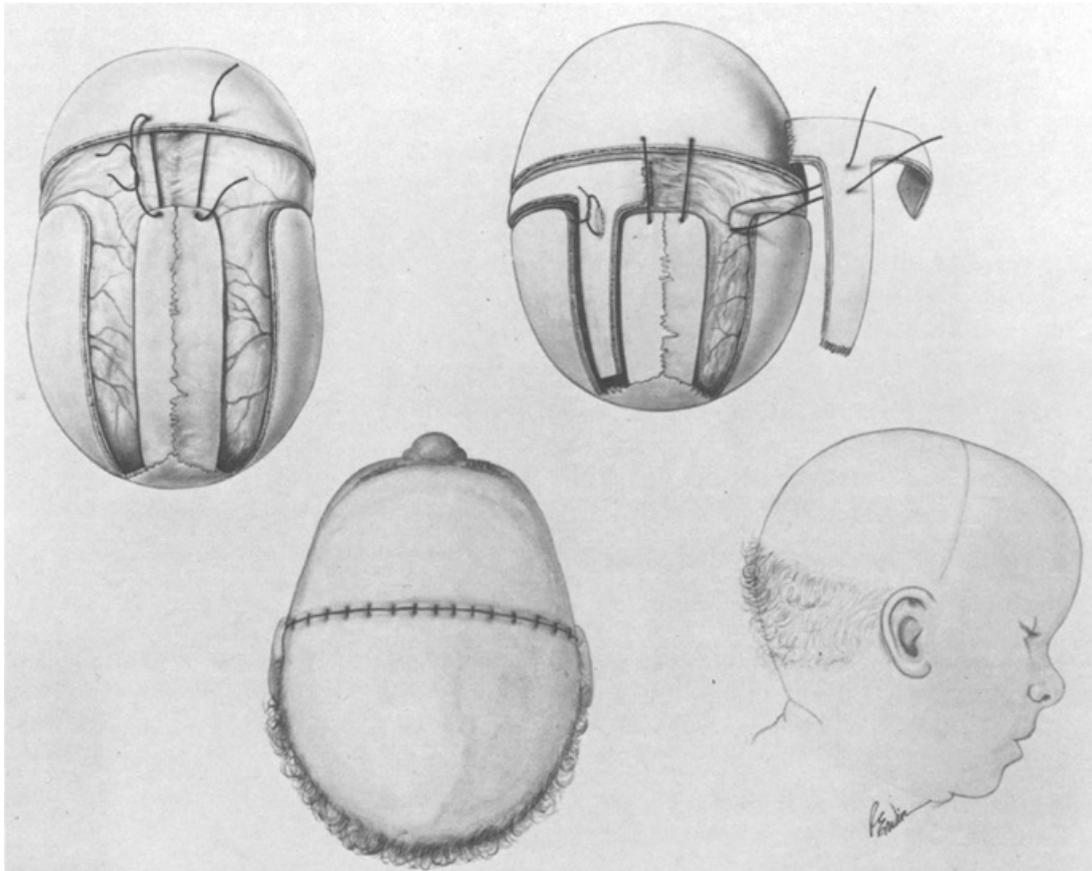


Abbildung 15
Schematische Darstellung des Vorgehens bei operativer Korrektur einer
Sagittalnahtsynostose mittels π -Prozedur (Jane et al. 1978)

Die an der Universitätsklinik Gießen durchgeführten Operationen werden nach dem Verfahren des standardisierten bilateralen remodelings und dem fronto-orbitalen Advancement unter Benutzung der tongue-in-groove Technik durchgeführt (Fearon 2003; Zöller 2003; Posnick 1996; Tessier 1967). Durch die Fixierung der Schädelanteile mit Polydioxanfäden wird hier eine semirigide Osteosynthese angestrebt, im Gegensatz zur starren Verbindung, der rigiden Osteosynthese, unter Verwendung von Miniplatten. Die dadurch verbleibende Restbeweglichkeit nicht synostosierter Schädelplatten imitiert

die sonst physiologisch vorhandene Beweglichkeit gesunder Kinder. Vorteile dieser semirigid Operationstechnik sind der Wegfall eines notwendigen Zweiteingriffs zur Metallentfernung sowie der Wegfall von mit Implantaten einhergehenden Risiken, wie der Transmigration der Miniplatten oder sterilen Abszessen, da hier resorbierbares Nahtmaterial Verwendung findet.

Das primäre Ziel einer Kraniosynostoseoperation besteht im Lösen der frühzeitig verknöcherten Naht. Durch eine Um- bzw. Neuformung werden eine physiologische Schädelform und eine physiologische Wachstumsrichtung angestrebt. Mit dieser Ummodellierung des kindlichen Schädels wird ausreichend Platz zur Hirnreifung geschaffen.

Eine Operation ist bereits in den ersten Lebensmonaten erforderlich. Zum einen findet in den ersten Lebensmonaten ein rasches Wachstum statt, zum anderen erhöht sich mit zunehmendem Alter die Komplikationsrate. Ebenfalls nimmt mit zunehmendem Lebensalter die Stärke der knöchernen Mineralisation zu. Dies bedingt eine intraoperativ schlechtere Verformbarkeit und führt zu einer Verlängerung der Operationsdauer und erhöhtem Blutverlust. Die Reossifikationstendenz nimmt ab. Kommt es etwa um das erste Lebensjahr zur Ausbildung des Sinus frontalis, muss auch die Operationstechnik geändert werden.

Unspezifische Komplikationen entsprechen den allgemeinen kinderchirurgischen Komplikationen, wie Infektion, gestörte Wundheilung und auch Blutungen. Des Weiteren kann es zu einem erneuten Verschluss einer Naht kommen. Dies ist auch nach Jahren noch beschrieben und kann sowohl operierte Suturen, als auch vormals nicht synostosierte Schädelnähte betreffen (Norwood et al. 1974; Greene, C S Jr 1998; Hudgins et al. 1998).

Als häufigste intraoperative Komplikation gilt der transfusionspflichtige Blutverlust (Vercauteren et al. 1985; Whitaker et al. 1987). Der Anteil der Patienten beträgt bis zu 90%, bei einem durchschnittlichen Blutverlust von 240ml (Meyer et al. 1993). Als weitere Komplikation wird die Luftembolie mit einer Häufigkeit zwischen 14,6% und 66% angegeben (Junker 2002).

1.6.2 Konservatives Vorgehen

Als Alternative zur operativen Korrektur einer prämaturnen Schädelnahtsynostose kommt lediglich das nichtoperative Vorgehen ohne chirurgischen Eingriff in Frage.

Gerade auch, da die Mechanismen, die zu einer Einzelnahtsynostose führen, nicht hinreichend geklärt und verstanden sind, sind die Auswirkungen einer ausbleibenden Korrektur von Schädelnahtsynostosen unklar.

Unbehandelte prämaturne Synostosen führen zu einem klinisch relevanten Risiko des Auftretens von Entwicklungsverzögerungen (Da et al. 2012). Durch die Wachstums- hemmung kommt es unweigerlich zu einer dysmorphen Entwicklung des Schädels. Die sich daraus ergebenden Probleme, auch im sozialen Umfeld, können immens sein.

Des Weiteren wäre eine nicht durchgeführte Operation im Säuglingsalter nicht aufgehoben, sondern in vielen Fällen lediglich aufgeschoben und macht eine OP im Erwachsenenalter notwendig, welche zu einem solchen Zeitpunkt ausgedehnter und deutlich komplizierter ist (Marchac et al. 2008).

Studien zu diesem Thema existieren jedoch nicht. Aufgrund ethischer Gesichtspunkte sind diese auch nicht durchführbar.

1.6.3 Beurteilung einer Therapie

Die Operation einer prämaturnen Synostose stellt einen großen Eingriff mit Risiken und potentiellen Komplikationen dar. Eine angemessene Evaluation des chirurgischen Resultates ist auch hier, wie bei jedem operativen Eingriff, wichtig. In der Vergangenheit haben sich schon einige Autoren mit diesem Thema beschäftigt. Das Problem bisher ist in der Regel die Verwendung von nicht vollständig objektivierbaren Parametern (Bottler 2007).

Um das ästhetische Resultat nach einer Operation zu evaluieren hat Whitaker *et al.* eine Einteilung vorgenommen, die im Verlauf von vielen Autoren übernommen wurde (McCarthy et al. 1995a, 1995b; Engel et al. 2012a).

Er klassifizierte entsprechend einem Schulnotensystem von 1 bis 4 das ästhetische Resultat. Als Kriterium wurde die Notwendigkeit einer zweiten Operation im Sinne einer chirurgischen Korrektur zugrunde gelegt. Es erfolgt eine Zuordnung in eine von vier Kategorien. So beschreibt Kategorie 1 ein Ergebnis, welches keiner Verfeinerung oder chirurgischen Korrektur bedarf, bis hin zu Kategorie 4, bei der ein erneuter kraniofazialer Eingriff oder eine Wiederholung in erweitertem Umfang der ersten

Operation ratsam ist (Whitaker et al. 1987).

Tabelle 4

Klassifikation des chirurgischen Resultates nach Whitaker (Whitaker et al. 1987)

Kategorie 1	Verfeinerungen oder chirurgische Verbesserungen nicht ratsam oder notwendig
Kategorie 2	Weichteil oder wenig knöcherner Korrektur, die ambulant oder mit maximal 2 Tagen Krankenhausaufenthalt durchzuführen ist
Kategorie 3	Eine alternative Osteotomie oder Knochentransplantation ist ratsam, jedoch nicht so ausgedehnt wie bei der ersten Operation
Kategorie 4	Großer kraniofazialer Eingriff ratsam, Wiederholung oder auch Erweiterung der ursprünglichen Operation

Der Vorteil dieser Methode liegt auf dem Fokus wichtiger Aspekte, wie dem Aussehen des Patienten und einer notwendigen Zweitoperation. Modifizierte subjektive Methoden basierend auf der Einteilung und Beurteilung kleinerer Einheiten des Gesichtes zeigen gute Objektivität (Versnel et al. 2007). Dennoch handelt es sich um eine subjektive Evaluation, welche vom Beobachter abhängig ist.

Weiterhin beschreiben die Kategorien 2 bis 4 dieser Klassifizierung Patienten, die alle einen erneuten operativen Eingriff über sich ergehen lassen müssen. Im Gegensatz dazu beschreibt lediglich die Kategorie 1 ein Resultat, welches ohne erneute OP auskommt. Dabei bleibt jedoch eine Unterscheidung von z.B. guten und exzellenten operativen Ergebnissen unberücksichtigt (Sloan et al. 1997).

Es ist ein schwer zu erreichendes Ziel anhand von subjektiven Empfindungen ein objektives Ergebnis zu erhalten (Anand et al. 2013).

Mit Hilfe der drei-dimensionalen Photogrammetrie als indirektes anthropometrisches Verfahren mit hoher Genauigkeit (Schaaf et al. 2010a; Wong et al. 2008) besteht die Möglichkeit objektiv Deformationen zu registrieren und das postoperative Ergebnis zu evaluieren.

1.7 Möglichkeiten der anthropometrischen Datenerhebung

Anthropometrische Messungen des menschlichen Körpers reichen viele Jahrhunderte zurück. Johann Sigismund Elsholtz war einer der Ersten, der Vermessungen am lebenden menschlichen Körper vornahm. In seiner Promotionsarbeit „Anthropometrie“ (1654) ist das erste bekannte Bild eines Anthropometron enthalten, ein Gerät zur Messung der Körperhöhe.

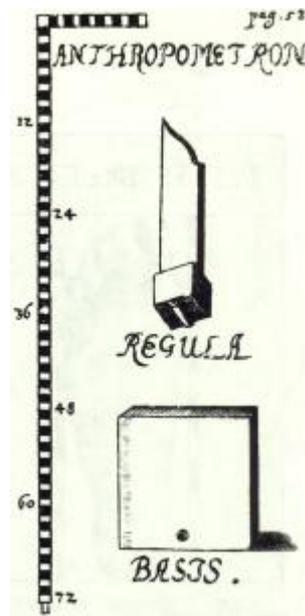


Abbildung 16
Anthropometron nach Elsholtz (Porter
2005)

Um einen Körper räumlich zu erfassen, bedient man sich unterschiedlicher Geräte. Bis zur heutigen Zeit haben sich die Technik und die Möglichkeiten von Messungen deutlich weiter entwickelt.

Eine Möglichkeit stellen mechanische Messsysteme dar, wie der DigiGraph (Dolphin Imaging System, USA), der mit Hilfe eines Handstücks, Lautsprecher und Mikrofonen über Laufzeitdifferenzen (ähnlich dem Prinzip eines Echolots) Koordinaten direkt vom Gesicht des Patienten nimmt und diese mit einem Videobild überlagert. Ein weiteres mechanisches System ist das MicroScribe-3DXL-System, welches über einen fünf-Gelenk-Arm eine eindeutige Positionsbestimmung ermöglicht und mit Hilfe eines angeschlossenen PC weitere kephalometrische Auswertungen zulässt (Steinhäuser

1995).

Bei der klinischen Diagnostik von Kraniosynostosen ist jedoch eine Beurteilung des Schädel- und Gehirnwachstums, sowie das sich daraus ergebende Schädelvolumen wichtig. Die bisher genannten Messverfahren sind hier nicht mehr ausreichend.

Eine direkte Volumenmessung des menschlichen Schädels ist prinzipiell nur post-mortem möglich.

Für den klinischen Einsatz in der Untersuchung von Patienten mit Kraniosynostosen kommen nur indirekte Verfahren in Betracht. Diese untergliedern sich in anthropometrische Messmethoden und in die bildgebenden Messmethoden wie Röntgendiagnostik und Schnittbildverfahren.

Bei den anthropometrischen Messmethoden mit Maßband und Messzirkel erfolgt eine Abmessung der Schädelhöhe, der Schädelbreite und der Schädelhöhe. Davon ausgehend entstanden Formeln für die Berechnung intrakranieller Volumina.

Eine Errechnung der Volumina von pathologischen Schädelformen ist allerdings nur bedingt möglich, da zum Einen keine lineare Beziehung zwischen dem Umfang und den Veränderungen des intrakraniellen Volumens, z.B. bei einem Hydrozephalus, besteht, zum Anderen es sich bei einem Schädel um einen mathematisch nur schwer fassbaren ellipsoiden räumlichen Körper handelt.

Die Schnittbildverfahren sind bisher ein entscheidender Faktor in der Gewinnung dieser Daten. Neben der Magnetresonanztomographie (MRT) kommt in erster Linie die kraniale Computertomographie (CCT) zum Einsatz. Beide Verfahren bieten Vorteile. Die CCT gilt als Goldstandard in der Ermittlung des kranialen Volumens (McKay et al. 2010). In der präoperativen Planung gewinnt man Informationen über die intrakranielle Anatomie. Es können Weichteile, wie das Ventrikelsystem, Gefäßverläufe und das Gehirn beurteilt werden. Postoperativ können sowohl die Knochenheilung und etwaige bestehende Defekte, als auch neben dem Ergebnis der modellierenden Operation, der Verlauf dokumentiert werden (McKay et al. 2010). Als wesentlicher Nachteil gilt die Invasivität. Durch die erhebliche Strahlenbelastung besteht ein potentiell erhöhtes Lebenszeitrisko, an einem Malignom zu erkranken (Brenner et al. 2001).

Die Magnetresonanztomographie, basierend auf dem Prinzip der Kernspinresonanz (NMR), arbeitet mit sehr starken Magnetfeldern und magnetischen Wechselfeldern. Röntgenstrahlung bzw. ionisierende Strahlung kommt hier nicht zur Anwendung. Jedoch sind Untersuchungen bei kleinen Kindern aufgrund der längeren Untersuchungszeit oft nicht möglich. Die Kinder müssen wie bei einer CT i.d.R. sediert oder in eine

Kurzzeitnarkose versetzt werden (Barkovich 2005). Sie dürfen sich bei der Untersuchung nicht bewegen, da dies zu Bildunschärfen führt (Zöller 2003).

1.7.1 Zirkelmessung

Mit der kranialen Zirkelmessung steht ein einfaches und kostengünstiges Verfahren zur Vermessung des Schädels zur Verfügung. Mit ihr kann in geübter Hand auf schnelle Art der Grad einer Asymmetrie bestimmt werden.

Die interessierenden Werte sind:

1. *Schädelbreite*: Gemessen wird 1cm oberhalb des Otobasis superior Punktes, welcher den höchsten Punkt der Verbindung des äußeren Ohres mit dem Kopf darstellt. Es muss strikt horizontal gemessen werden.



*Abbildung 17
Messung der Schädelbreite per Messzirkel
mit radialer Skalierung. Die Breite wird 1cm
oberhalb des otobasis superior Punktes strikt
horizontal gemessen (Wilbrand et al. 2011).*

2. *Schädellänge*: Es wird parallel zur Frankfurter Horizontalen von der Glabella zum Opisthocranium gemessen.



Abbildung 18
Messung der Schädel­länge mit Messzirkel und radialer Skalierung, gemessen wird von der Glabella zum Opisthocranium parallel zur Frankfurter Horizontalen (Wilbrand et al. 2011)

3. *Diagonale*: Es muss strikt horizontal von frontotemporal zum kontralateralen lambdoidea Punkt gemessen werden. Dieser stellt den Kreuzungspunkt von Kopfumfang und Sutura lambdoidea dar.



Abbildung 19
Messung der Schäeldiagonale mit Messzirkel und radialer Skalierung. Gemessen wird strikt horizontal vom ipsilateralen punctum fronto-temporal zum kontralateralen lambdoidea Punkt, dem Schnittpunkt der Sutura lambdoidea mit dem Kopfumfang (Wilbrand et al. 2011).

Die größte Schwierigkeit dieser Untersuchungsmethode besteht in der Tollerierung durch das zu untersuchende Kind. Dafür sitzt es auf dem Schoß eines Elternteils, welches die Schultern des Kindes festhält. Eine weitere Assistenz fixiert vor dem Kind kniend den Kopf mit den Daumen im Bereich der Protuberantia zygomatica und Mittelfinger im Bereich des Nacken des Kindes.

Eine ruhige Position ist essentiell, um objektive und reproduzierbare und damit verlässliche Ergebnisse zu erhalten.

Leider ist es mit dieser Untersuchungsmethode nicht möglich, die dritte Dimension zu berücksichtigen. Es ist nicht möglich das intrakranielle Volumen zu bestimmen (Wilbrand et al. 2011).



*Abbildung 20
Fixierung des kindlichen Kopfes mit dem
Daumen im Bereich der Protuberantia
zygomatica und Mittelfinger/Zeigefinger im
Bereich des Nackens durch Assistenz
(Wilbrand et al. 2011)*

1.7.2 Computertomographie

Mit der Computertomographie besteht schon seit einigen Jahrzehnten eine erprobte Bildgebung. Sie gilt als Goldstandard bei der Berechnung von intrakraniellen Volumina (McKay et al. 2010). In vielen Fällen wurde und wird sie routinemäßig prä- und auch postoperativ durchgeführt. Diese Tatsache macht sich die meshbased Methode (MBM) zunutze. Bei dieser Methode wird ein polygonales Gitternetz computergestützt erstellt. Dieses wird auf die Innenfläche des knöchernen Schädels projiziert und erlaubt so eine Berechnung des intrakraniellen Volumens (Ritvanen et al. 2013) (Abb. 21).

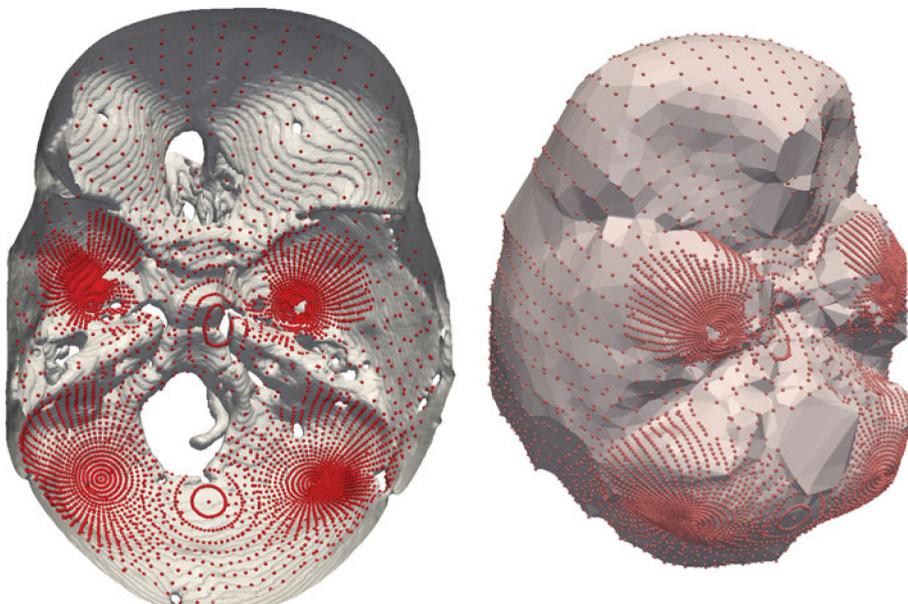


Abbildung 21

links: Die Kraniobasis ist mit registrierten und überlagerten Oberflächenpunkten dargestellt;

rechts: Wiedergabe der rekonstruierten komplexen Oberflächenstrukturen durch das polygonale virtuelle Netz (Ritvanen et al. 2013)

Anomalien, wie z.B. einen Hydrozephalus, kongenitale Malformationen aber auch andere Gründe für ein asymmetrisches Kopfwachstum (z.B. subdurale Blutungen, Hirnatrophie) können im Rahmen der CT-Diagnostik im Vorfeld erkannt werden.

Es ist sowohl der knöcherne Schädel, als auch das Hirnparenchym beurteilbar. Es ist ebenso möglich, die Suturen zu begutachten. Durch eine dreidimensionale

Rekonstruktion stellt dieses Verfahren bei der Planung des chirurgischen Vorgehens eine gute Hilfe dar. Der präoperative Nutzen ist somit als hoch einzuschätzen (Hopf 1999). Allerdings muss die hohe Strahlenbelastung der kleinen Patienten und das damit verbundene erhöhte Lebenszeitrisiko für maligne Neoplasien in Betracht gezogen werden. Manche Autoren empfehlen inzwischen, dass bei einfachen Synostosen keine CT Aufnahmen mehr notwendig seien (Fearon et al. 2007).

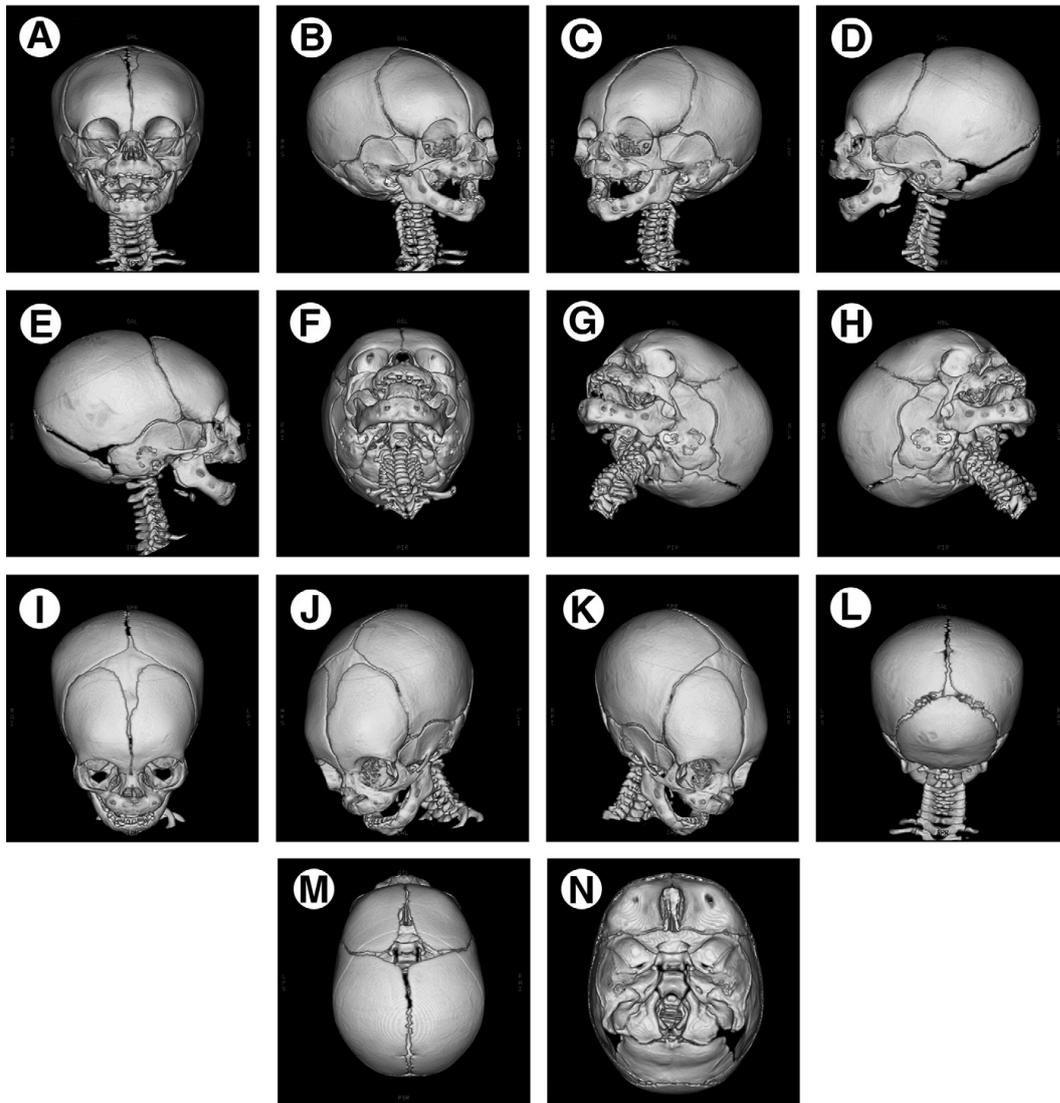


Abbildung 22
Dreidimensional rekonstruiertes Schädel CT (Branson und Shroff 2011)

1.7.3 Die 3D Photogrammetrie

Die 3D Photogrammetrie ist ein junger Teilbereich der photogrammetrischen Messmethode. Sie besitzt gegenüber der klassischen Zirkelmessung einige Vorteile. Die Aufnahme erfolgt schnell, ist einfach durchführbar und kann ebenso schnell wiederholt werden. Da die Auswertung am PC erfolgt, können Landmarken an einem statischen Bild gesetzt werden. Das führt zu einer genaueren Bestimmung und Reproduzierbarkeit als an einem sich bewegenden Kleinkind (Weinberg et al. 2006; Wong et al. 2008; Schaaf et al. 2010b).

Bei dem von uns eingesetzten System handelt es sich um ein digitales Nahbereichs 3D photogrammetrisches Verfahren. Zum Einsatz kam das Vectra-360-four-pod System der Firma Canfield (Canfield Scientific, Fairfield, NJ, USA). Bei diesem System handelt es sich um ein vollautomatisiertes digitales Photogrammetriegerät. Es besteht aus fünf digitalen Kameras, die computergestützt synchron auslösen. Die Erfassungszeit liegt bei 1,5ms. Die Auflösung beträgt 10 Megapixel bei einer geometrischen Genauigkeit von unter 0,3 mm. Durch die schnelle Erfassung und die hohe Auflösung ergibt sich eine hohe Qualität des Bildes mit einer genauen Wiedergabe der Oberflächengeometrie und realistischer Farbdarstellung. Die Bildgenerierung erfolgt durch die Mirror® Software (Canfield Scientific, Fairfield, NJ, USA). Die Auswertung und die weitere Datenverarbeitung wurde mit Hilfe der Software Cranioform Analytics® 3.0 (Cranioform®, Alpnach, Switzerland) durchgeführt.

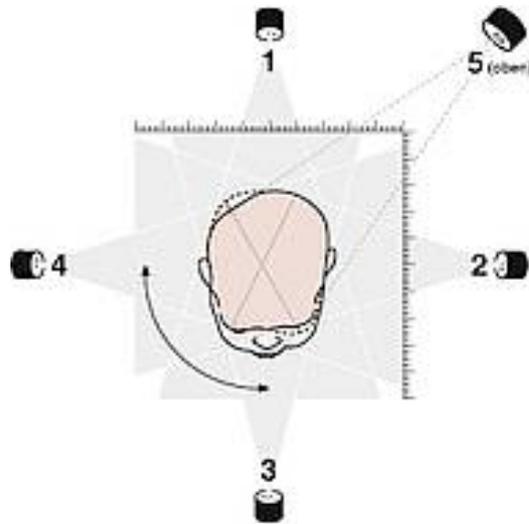


Abbildung 23
Schematische Darstellung der Apparatur zur
dreidimensionalen photogrammetrischen Erfassung
mit Hilfe von 5 synchronisierten Kameras



Abbildung 24
Ergebnis eines 3 dimensionalen photogrammetrischen Scans
aus verschiedenen Richtungen dargestellt bei Kraniosyn-
ostose (Metopicasynostose)

1.8 Ziel dieser Arbeit

Die allgemeine medizinische Ansicht bei Vorliegen des Krankheitsbildes eines prämaturen Schädelnahtverschlusses bei Säuglingen ist relativ einheitlich. Deutliche Dyskranien müssen chirurgisch behandelt werden, die verschlossenen Suturen müssen eröffnet werden, dem kindlichen Gehirn muss ausreichend Platz für seine weitere Entwicklung gegeben werden und die Kopfform soll dem kraniofazialen „normalen“ entsprechen.

Bislang wird die Indikation für oder gegen eine solche operative Korrektur rein anhand subjektiver Kriterien gestellt. Es existiert kein Algorithmus, der dem Behandler die Entscheidung für- oder gegen eine Kranioplastik erleichtert. Auch die postinterventionellen Verlaufsbeobachtungen werden bislang rein anhand des optischen Bildes und eventuell auftretender funktioneller Defizite fest gemacht. Wünschenswert wären in diesem Zusammenhang objektivierbare numerische Parameter, an denen prä- und postoperatives Wachstum, Volumenzunahme des Kopfes und Symmetrie bei den kleinen Patienten reproduzierbar Dargestellt werden könnten. Goldstandard für die genaue Erfassung dieser Parameter ist die computertomographische radiologische Untersuchung, welche insbesondere vor einem chirurgischen Eingriff bei den betroffenen Kindern durchgeführt wird. Die Durchführung eines postoperativen CTs wird mancherorts propagiert, verbietet sich jedoch aus Strahlenschutzgründen den zumeist sehr jungen Patienten gegenüber.

Eine neue Methode der dreidimensionalen Erfassung der Körperoberfläche ist die 3D-Photogrammetrie, welche anhand multipler, in festen Winkeln zueinander positionierten Kameras eine strahlenfreie Abbildung (auch) der Kopfform erlaubt. Die Anwendbarkeit dieser neuartigen Technologie in der kraniofazialen Chirurgie wurde bislang nicht untersucht. Deshalb soll diese Arbeit dazu dienen, mittels prä- und postoperativen dreidimensionalen Photographien die genaue Veränderung der Kopfform und verschiedenen Volumina und Symmetrieparametern bei Kindern mit prämaturen Kraniosynostosen halbautomatisiert und damit Untersucherunabhängig zu evaluieren. Dazu wurden 28 Kinder, die am Gießener Universitätsklinikum interdisziplinär durch Neuro- und Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgen operiert wurden, in die Untersuchung inkludiert. Dreidimensionale Photoscans prä- und postoperativ wurden mit einer speziellen Vermessungssoftware analysiert, nachdem Altersschwankungen und Unterschiede im Abstand zwischen Operation und Photoscan mathematisch

herausgerechnet wurde. Hiermit sollte die Anwendbarkeit des dreidimensionalen Photoscans zur Erstdiagnostik und zur objektiven Verlaufsbeobachtung bei Kindern mit Kraniosynostosen erstmals umfassend beschrieben und untersucht werden.

2 Material und Methoden

2.1 Patientenerfassung

In einem Zeitraum von drei Jahren, zwischen April 2008 und Mai 2011, sind 56 Patienten an der Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie und Neurochirurgie des Universitätsklinikums Gießen aufgrund einer Kraniosynostose interdisziplinär operativ behandelt worden. Aus dieser Gruppe konnten 28 Patienten mit unterschiedlichen prämaternen Kraniosynostosen aufgrund adäquater prä- und postoperativer dreidimensionaler photogrammetrischer Erfassung in dieser Studie eingeschlossen werden.

Bei allen Kindern bestand eine der vier folgenden Synostosen: Sagittalnahtsynostose, Frontalnahtsynostose, Koronarnahtsynostose, Lambdanahtsynostose. Die Patienten dieser Studie stellten sich entweder aus eigenem Antrieb (Eltern) oder mit Überweisung im Rahmen der Cranio-Sprechstunde vor. Die Angaben zu den Patienten sind anonymisiert worden. Die Art der Synostosen und auch das Geschlecht sind in ihrer Reihenfolge rein zufällig.

Die Befunde zum Zeitpunkt vor der Operation stellen wir den Befunden zum Zeitpunkt nach der Operation gegenüber.

2.2 Photogrammetrie

Die grundlegende Voraussetzung um eine Messung vorzunehmen, ist genügend Raum für das benötigte Equipment bereitzustellen. Idealerweise sollte ein eigenes Zimmer zur Verfügung stehen.

Für die dreidimensionale photogrammetrische Erfassung der Daten benutzen wir das Canfield Vectra-3D-four-pod Systems (Canfield Scientific, Fairfield, NJ, USA) (Abb. 25).



*Abbildung 25
Vectra 3D Imaging System, Apparatur zur dreidimensionalen
photogrammetrischen Erfassung bestehend aus 5
synchronisierten Kameras*

Die Steuerung des Messsystems erfolgte mit Hilfe der Mirror Software der Firma Canfield (Canfield Scientific, Fairfield, NJ) auf einem handelsüblichen Personalcomputer unter dem Betriebssystem Microsoft® Windows XP (Microsoft Corp., USA). Bei diesem System handelt es sich um eine vollautomatisierte digitale 3D Photogrammetrieapparatur, die in hoher Auflösung die Oberfläche in Echtfarbdarstellung erfasst.

Die dreidimensionale optische Erfassung der Gesichtsoberfläche wurde in einem eigens dafür eingerichteten Raum durchgeführt. Das zu untersuchende Kind wird in einem Kindersitz mittig in der Apparatur positioniert. Eine Kontrolle der Position erfolgte mit Hilfe der live-view Darstellung verzögerungsfrei am PC Monitor.

Um einen optimalen Scan zu erhalten werden die Schultern des Kindes von einer helfenden Person gehalten. So ist ein sicherer und ruhiger Ablauf der Aufnahme gewährleistet worden. Eine Artefaktbildung durch abstehende Haare wurde mit einer eng anliegenden Nylon-Mütze vermieden. Eine Aufnahmezeit von 1,5ms ermöglicht i.d.R. bei der ersten Aufnahme eine von Bewegungsartefakten freie Datengenerierung.

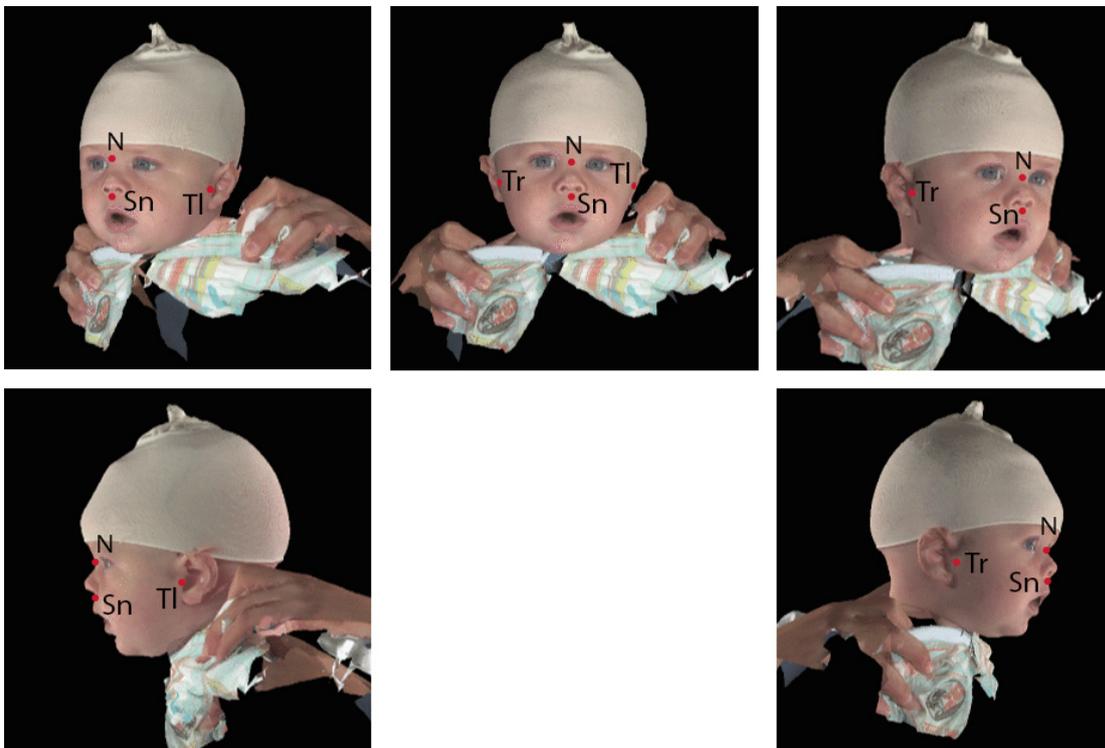


Abbildung 26
3D Scan mit Messpunkten: Nasion (N), Subnasale (Sn), Tragus rechts (Tr),
Tragus links (Tl)

2.3 Methoden der Datenauswertung

Die Auswertung der Daten erfolgte in mehreren Schritten. Zunächst wurden die gewonnenen Daten anonymisiert in einer elektronischen Datei erfasst. Für die Datenverarbeitung wurde die Software Microsoft Excel 2010® (Microsoft Corp., USA) verwendet.

Die statistischen Auswertungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für medizinische Biometrie der Justus Liebig Universität Gießen durchgeführt.

Um sowohl das individuelle Alter eines jeden Patienten als auch die verschiedenen Zeitpunkte der jeweiligen prä- und postoperativen Untersuchungen miteinander vergleichbar und damit auswertbar zu machen, benutzten wir die statistische Kovarianzanalyse des gemischten Modells. Unter Verwendung dieser statistischen Methode konnte die Kovariate (Alter) in die Berechnung eingehen. Das bedeutet, der Einfluss des Alters wird adjustiert. Es erfolgte also eine Altersbereinigung der Daten. Diese Berechnungen ermöglichten uns das Herausrechnen des physiologischen perioperativen kraniellen Wachstums. Nach Adjustierung des Alters erfolgte der Vergleich zwischen den präoperativen und den postoperativen Scans und die Berechnung der Änderungen des Cranial Index (CI), der anterioren Symmetry Ratio (ASR), der posterioren Symmetry Ratio (PSR) und des Volumens (Q).

Die gewonnenen Daten wurden in anonymisierter Form computergestützt ausgewertet. Zum Einsatz kam dafür die Software IBM SPSS Statistics® in der Version 20.0 der Firma IBM.

2.4 Softwareauswertung

Die Auswertung der photogrammetrischen Daten erfolgte durch die Cranioform Analytics 3.0® Software. Mit Hilfe dieser Software wurden die prä- und postoperativen Bilder übereinander gelagert. Dies geschah anhand der anthropometrischen Landmarken Nasion, Subnasale, Tragus rechts und Tragus links. Diese spiegeln etwa den Bereich des Mittelgesichts und der vorderen Schädelbasis wider und werden sowohl durch die Kraniosynostoseoperation als auch durch das physiologische Schädelwachstum kaum bis gar nicht beeinflusst.

Die Cranioform Software erstellte ein dreidimensionales Koordinatensystem. Dabei beziehen sich die drei räumlichen Achsen auf den Mittelpunkt eines Dreiecks, welches durch die Traguspunkte und den Punktum subnasale gebildet werden.

Von der uns nun gegebenen Ausgangsebene 0 ausgehend, der Fläche des Dreiecks (Tragus rechts - Tragus links - Subnasale), werden in elf zueinander parallelen Ebenen, von denen die elfte Ebene den Vertex (Scheitelpunkt) des Schädels tangiert, die folgenden Parameter errechnet.

- a) Umfang: Gemessen wird die Strecke in cm um den Kopf auf Höhe einer jeden Ebene
- b) Länge: Strecke durch den Mittelpunkt, gemessen in cm für jede Ebene, entspricht der y-Achse
- c) Breite: Die kraniale Breite wird durch den Mittelpunkt auf der x-Achse auf jeder Ebene in cm gemessen
- d) Diagonale mod A und Diagonale mod B: Die größte Distanz der transkraniellen Diagonalen von rechter und linker Seite
- e) Quadranten Volumina: Die Volumina errechnen sich über alle 11 Ebenen und werden in ccm ausgegeben.
 - a. Q1: Volumen des vorderen linken Quadranten
 - b. Q2: Volumen des vorderen rechten Quadranten
 - c. Q3: Volumen des hinteren rechten Quadranten
 - d. Q4: Volumen des hinteren linken Quadranten

Das anteriore Schädelvolumen, die Summe aus Q1 und Q2, ist bei der Diagnose Trigonocephalie von Bedeutung.

- f) ASR: die Anterior Symmetry Ratio beschreibt das Verhältnis des größeren vorderen Quadrantenvolumens zum kleineren vorderen Quadrantenvolumen:

$$ASR = \frac{Q_{max}}{Q_{min}}$$

Sie ist von Bedeutung bei dem anterioren Plagiozephalus. Auf diese Weise ist es möglich, die Symmetrie, unabhängig von der betroffenen Seite, mathematisch auszudrücken. Eine optimale Symmetrie ergibt sich aus dem Verhältnis:

$$ASR = 1$$

- g) PSR: Die posterior Symmetry Ratio beschreibt das Verhältnis des größeren hinteren Quadrantenvolumens zum kleineren hinteren Quadrantenvolumen:

$$PSR = \frac{Q_{max}}{Q_{min}}$$

So wie die ASR beschreibt auch die PSR die Symmetrie eines Plagiozephalus, in diesem Fall eines hinteren Plagiozephalus bei Synostose der Lambdanaht. Ein PSR von 1 entspricht einer optimalen Symmetrie.

- h) Nasion - Tragus rechts / links: dieser Parameter ist die Strecke zwischen Nasion und rechtem Tragus bzw. Nasion und linkem Tragus. Die Strecke ist bei der Trigonozephalie von Bedeutung.
- i) CBW: Die Strecke zwischen dem rechten und linken Tragus entspricht der Breite der Schädelbasis. Eine Änderung im Sinne einer Verlängerung der Strecke als Zeichen einer Verbreiterung findet beim physiologischen kranialen Wachstum statt. Dieser Wert besitzt eine hohe Relevanz beim Vergleich prä- und postoperativer Scans.
- j) Schädelhöhe: Die Höhe des Schädels wird gemessen vom Mittelpunkt der Ebene 0 ausgehend bis zum Scheitelpunkt des Schädels. Die Strecke wird in mm gemessen.
- k) CI: Der Cranial Index beschreibt das Verhältnis von maximaler Länge zu maximaler Breite auf einer Ebene ($\frac{Craniale_Breite}{Craniale_Länge} * 100$). Dieser Wert ist bei der Analyse der Sagittalnahtsynostose von Bedeutung.



*Abbildung 27
schematische Darstellung der Ebenen 0 – 11;
hervorgehoben ist die Messebene 5 parallel zur
Referenzebene 0*

2.5 Statistische Begleitung

Zwischen den Scans konnte nicht immer der gleiche Zeitraum von einem Tag vor der Operation und 10 Tage nach der Operation eingehalten werden. Die dreidimensionale Erfassung erfolgte im Mittel 5,9 Tage präoperativ (1 - 14 Tage) und 39,4 Tage postoperativ (10 Tage – 56 Tage). Es resultierte hieraus ein unterschiedliches Ausmaß des physiologischen Kopfwachstums, welches zunächst eine vergleichende Untersuchung nicht zuliess.

Um dieses physiologische Schädelwachstum, welches zwischen den unterschiedlichen Untersuchungszeiträumen stattfand, bei unserer Auswertung zu berücksichtigen, führten wir eine statistische Kovarianzanalyse nach dem gemischten Model durch. Dafür nutzten wir die zur softwaregestützten Auswertung notwendigen Landmarken Tragus rechts (Tr), Tragus links (Tl) und Nasion (N). Das anatomische Korrelat, dargestellt durch das Dreieck, welches durch diese drei Punkte (Tr, Tl, N) gegeben ist, erfährt durch die Operation keine Veränderung. Der zeitliche Abstand zwischen den Scans und die registrierte Veränderung des Dreiecks entspricht damit dem physiologischen Wachstum.

Ziel war daher die Kovariante Wachstum als unabhängigen Faktor zu behandeln. Die Operation als das die äußere Form verändernde Ereignis kann so als abhängige Variable genutzt werden, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Patienten herzustellen. Die statistische Auswertung unserer Daten erfolgte in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Medizinische Statistik Gießen (Leiter: Hr. Dr. Pons-Kühnemann, Heinrich-Buff-Ring 44, Gießen).

Bei der Operation handelt es sich um eine Korrektur des Schädels, zum Teil mit fronto-orbitalem Advancement. Die photogrammetrisch erhobenen Daten wurden zunächst in eine Datenbank (Microsoft Excel 2010®) aufgenommen. Von besonderer Bedeutung war die Schädelbreite (SB), die Schädellänge (SL), der sich daraus ergebene Cranial Index (CI), die anteriore Symmetry Ratio (ASR), die Volumina der 4 Schädelquadranten (Q1-Q4) und die Fläche des Dreiecks, gebildet durch die Punkte Nasion und Tragus des rechten und linken Ohres.

Da bei dem Dreieck alle Seiten gegeben sind, kann der Flächeninhalt mit Hilfe des Satzes des Heron wie folgt berechnet werden:

$$F = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$$

$$s = \frac{a+b+c}{2}, a = N - Tr\ li, b = N - Tr\ re, c = Tr\ li - Tr\ re$$

F entspricht dabei der zu errechnenden Fläche und s der halben Seitenlänge (a + b + c). Dieses Dreieck ist nötig, da es die Schädelbasis widerspiegelt, die durch eine korrektive Operation unbeeinflusst bleibt. Eine Zunahme der Fläche F entspricht damit dem kindlichen Wachstum zwischen den beiden Scans. Durch mathematische Berechnungen (mixed model, Kovarianzanalyse) ist es möglich, die Änderung desjenigen Volumens, welches ausschließlich durch die Operation begründet ist, darzustellen. Auf diese Weise wird das individuelle Alter eines jeden Patienten zum Zeitpunkt der Untersuchungen und des physiologischen Wachstums zwischen den Scans berücksichtigt und ausschließlich die durch die Operation hervorgerufene Formänderung dargestellt.

Bei der Korrektur des Trigonozephalus ist insbesondere die Zunahme des anterioren Schädelvolumens (AVG) von Bedeutung. AVG zeigt das Verhältnis des präoperativen anterioren Volumens zum postoperativen anterioren Volumen und errechnet sich wie folgt: $AVG = \frac{Q1pr\ddot{a}+Q2pr\ddot{a}}{Q1post+Q2post}$.

Für den Skaphozephalus ist der Cranial Index (CI) wichtig. Er beschreibt das Verhältnis von Länge zu Breite: $CI = \frac{Craniale_Breite}{Craniale_L\ddot{a}nge} * 100$.

Der anteriore Plagiozephalus wird mit Hilfe der anterior symmetry ratio (ASR) prä- und postoperativ verglichen. Die ASR beschreibt das Verhältnis vom größeren anterioren Volumen (Q_{max}) zum kleineren anterioren Volumen (Q_{min}).

Der posteriore Plagiocephalus wird mit Hilfe der posterior symmetry ratio (PSR) prä- und postoperativ verglichen. Die PSR beschreibt das Verhältnis vom größeren posterioren Volumen (Q_{max}) zum kleineren posterioren Volumen (Q_{min}).

Die statistische Bearbeitung wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für medizinische Statistik der Justus Liebig Universität Gießen durchgeführt.

Tabelle 5

Wachstumsabhängige Parameter (Meyer-Marcotty et al. 2013)

Parameter	Definition
Umfang	Größter Umfang auf Höhe der Messebene
Breite	Maximale Breite auf Höhe der Messebene
Länge	Maximale Länge des Kopfes auf Höhe der Messebene
Cranial Index	Relation der größten Breite zur größten Länge auf Höhe der Messebene x100 [%]
Scheitelhöhe	Höhe des Schädels gemessen vom Mittelpunkt der Ebene 0 ausgehend bis zum Scheitelpunkt des Schädels
Volumen	die Volumina errechnen sich über alle 11 Ebenen [ccm]

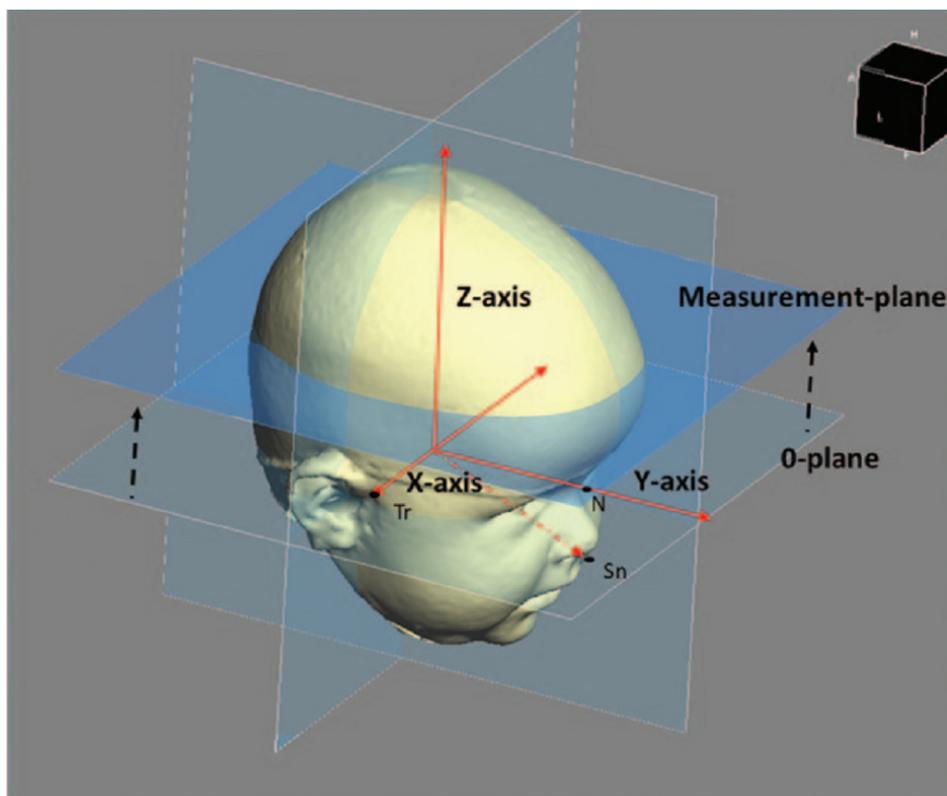


Abbildung 28

Illustration 3D Scan, Ebene 0 gegeben durch die Punkte Nasion, Tragus rechts, Tragus links, sowie der Messebene parallel zur Ebene 0 auf Höhe der größten occipitalen Krümmung (Meyer-Marcotty et al. 2013)

2.6 Ethikvotum

Die Einwilligung wurde sowohl zur Durchführung der Bildgebung als auch zu deren Verwendung zur Veröffentlichung von den Bezugspersonen/Erziehungsberechtigten eingeholt. Die Studie ist ebenfalls von dem Ethikkomitee der Justus Liebig Universität Gießen unter der Bearbeitungsnummer 180/11 am 18.08.2011 genehmigt worden.

3 Ergebnisse

3.1 Allgemeiner Teil

Wir konnten anhand dieser Beobachtungsstudie die Ergebnisse von insgesamt 28 Kindern darstellen, die alle eine isolierte Kraniosynostose hatten.

Das Alter der Kinder lag zum Zeitpunkt der Operation zwischen 3 Monaten und 23 Monaten. Das mediane Alter bei Operation war 6 Monate (3,8 - 23 Monate). Wir diagnostizierten in 8 Fällen einen Skaphozephalus (28,6%), in sieben Fällen einen anterioren Plagiozephalus (25%), einen Fall mit einer Lambdanahtsynostose (3,6%) und bei 12 Patienten einen Trigonozephalus (42,9%).

Im Geschlechtervergleich präsentieren sich männliche Patienten in einer Überzahl. Von den vorstelligen 28 Patienten waren 19 Jungen und 9 Mädchen. Das Verhältnis männlich zu weiblich beträgt 2,1:1. Entsprechend enthält die Studienkohorte 68% männliche, und 32% weibliche Patienten.

Tabelle 6
Durchschnittliches Alter aller untersuchten Kinder zum Zeitpunkt der OP in Monaten; MW=Mittelwert in Monaten

	n	[%]	MW
männlich	19	67,86	8,1
weiblich	9	32,14	7
gesamt	28	100	7,96

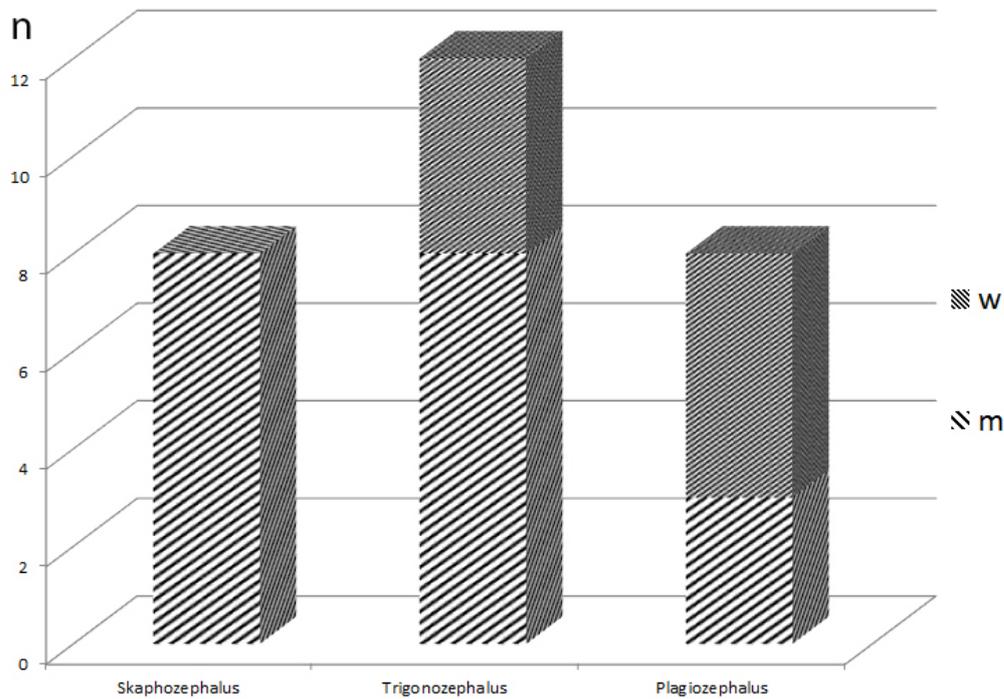


Abbildung 29
Gesamtzahl der Patienten, nach Diagnosen sortiert mit Darstellung des männlichen und weiblichen Anteils

Tabelle 7
Prozentualer Anteil der vier Kraniosynostoseformen am Gesamtgut, sowie Verhältnis von weiblichen zu männlichen Patienten

	Anteil [%]	Gesamt [n]		
			w : m	[Ratio]
Scaphozephalus	28,6 [%]	8	0 : 8	[0:8]
Trigonozephalus	42,9 [%]	12	4 : 8	[1:2]
Anteriorer Plagiozephalus	25 [%]	7	5 : 2	[2,5:2]
Posteriorer Plagiozephalus	3,6 [%]	1	0 : 1	[0:1]
Total	100 [%]	28	9 : 19	[1:2,1]

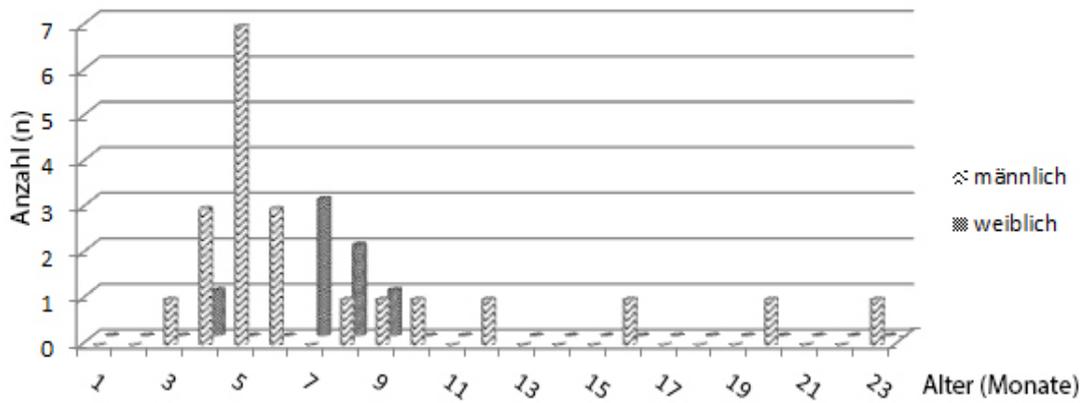


Abbildung 30
Anzahl der Patienten nach Alter in Monaten und Geschlecht zum Zeitpunkt der Operation

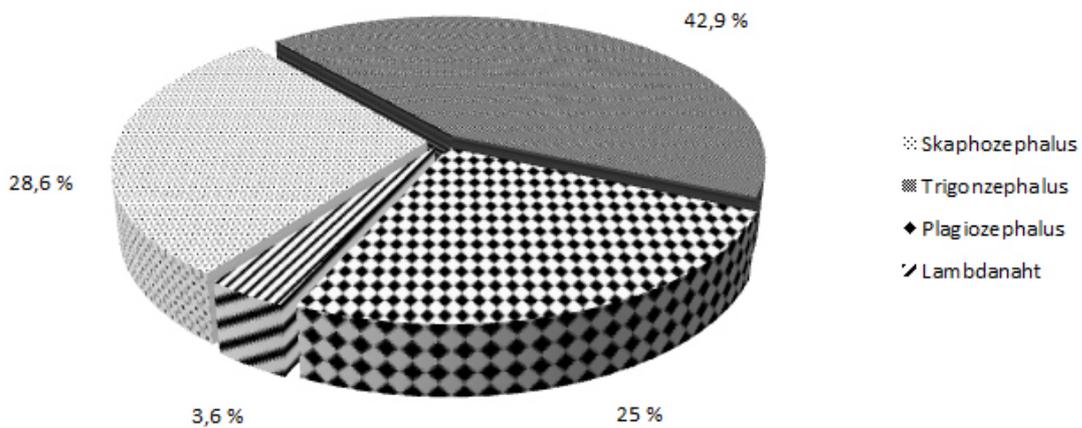


Abbildung 31
Häufigkeitsverteilung der vier Synostosen im untersuchten Patientenkollektiv

3.1.1 Skaphozephalus

In unserer Studie wurden 8 Kinder mit der Diagnose Skaphozephalus untersucht. Dabei handelte es sich ausschließlich um männliche Kinder. Das mediane Alter bei Operation betrug 5 Lebensmonate. Der jüngste Patient war zum Zeitpunkt der Operation 3 Monate, der Ältteste 12 Monate alt.

Die initialen unkorrigierten Mittelwerte für den Cranial Index betragen präoperativ 75,1% (65,9% - 97,8%) und postoperativ 77,4% (69,4% - 97,2%). Durch Korrektur der Daten mit Hilfe der Kovarianzanalyse zeigte sich tendenziell eine Verbesserung des Cranial Index.

Ein statistisch signifikanter Unterschied des Cranial Index konnte zwischen den prä- und postoperativen Werten nicht gezeigt werden.

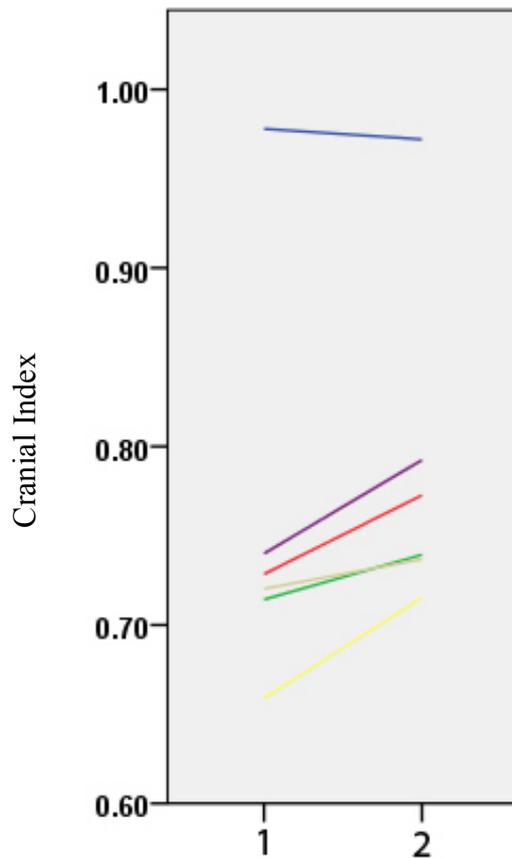


Abbildung 32
Cranial Index (CI) bei den Patienten mit Skaphozephalie ($n=8$) zum Zeitpunkt vor chirurgischer (Scan 1) und nach chirurgischer Korrektur (Scan 2), die unterschiedlichen Linien entsprechen jeweils einem Patienten (teilweise überlagert)

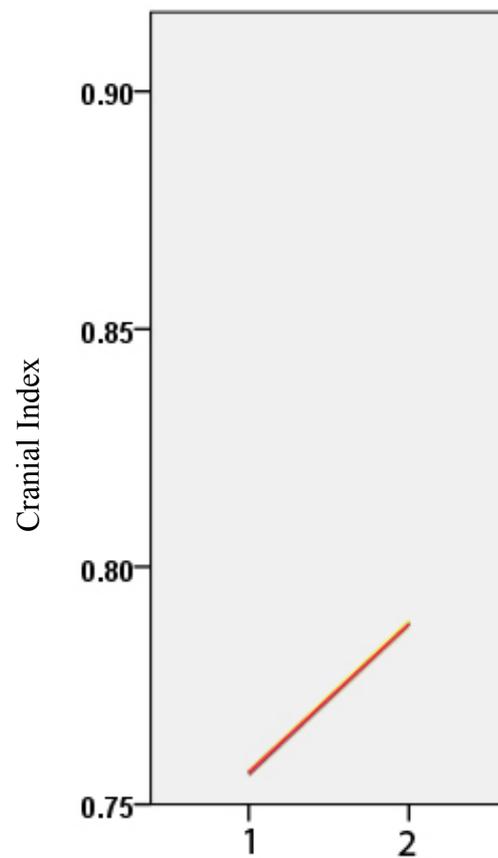


Abbildung 33
Mit statistischer Kovarianzanalyse vergleichbar gemachter, korrigierter Cranial Index (CI) der Patienten mit Skaphozephalie ($n=8$) zum Zeitpunkt vor der chirurgischen (Scan 1) und nach der chirurgischen Korrektur (Scan 2)

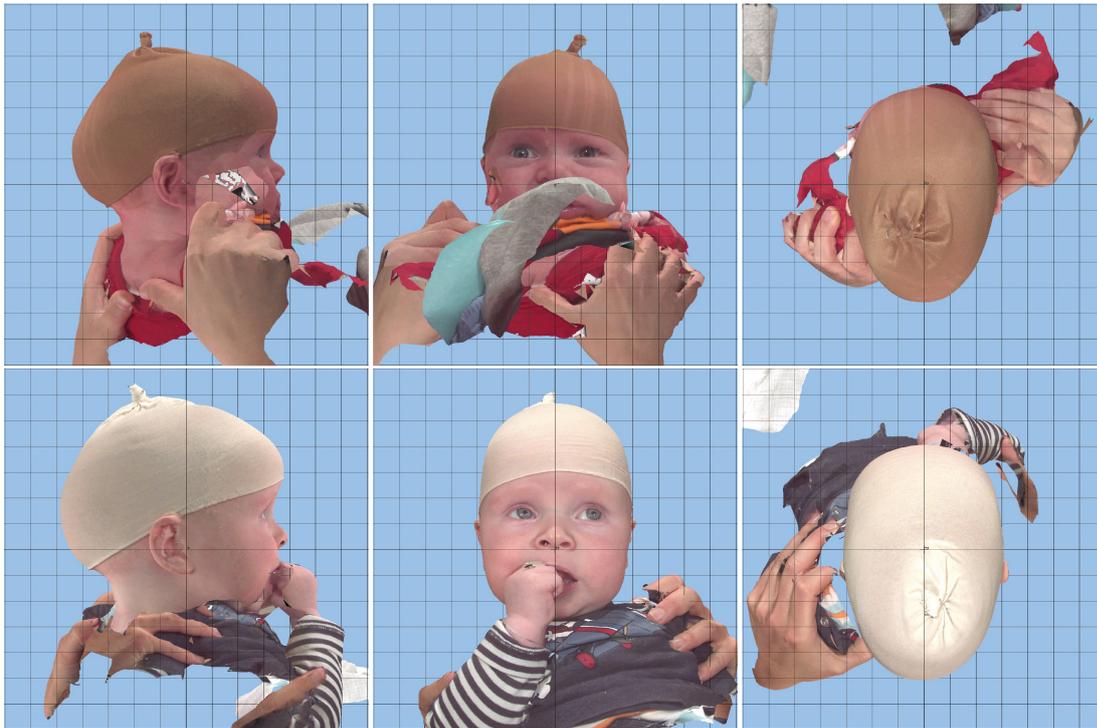


Abbildung 34
Skaphozephalus:
oben: präoperativ
unten: postoperativ

patient name	capture date											report date		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		03.06.11
Slice	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Circumference	45,2	44,5	44,4	42,5	42,3	41,4	39,8	36,9	32,4	27,6	18,8	3,0	CBW	10,5
Width	10,6	10,6	11,0	11,0	10,8	10,4	9,9	9,2	8,2	6,4	2,5	--	N-Tr L	8,8
Length	15,1	16,2	15,4	15,3	15,4	15,1	14,4	13,4	11,7	8,9	6,1	--	N-Tr R	8,7
CI Index	70,2	65,4	71,4	71,9	70,1	68,9	68,8	68,7	70,1	71,9	41,0	100,0	Ear Offset	0,2
30° Diagonal A	14,0	13,8	13,7	14,0	14,0	13,9	13,4	12,4	10,7	8,1	4,8	--	Vertex Height	10,4
30° Diagonal B	14,1	14,1	14,0	14,1	14,4	14,1	13,6	12,6	11,1	8,6	5,2	3,8	ASR	0,953
30° Diagonal Δ	0,1	0,3	0,3	0,1	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4	0,5	0,4	--	PSR	0,932
30° CVAI	0,7	2,2	2,2	0,7	2,9	1,4	1,5	1,6	3,7	6,2	8,3	-100,0	ACAI	4,9
Diagonal mod A	14,6	14,9	14,5	15,1	15,2	14,9	14,3	13,3	11,3	8,8	6,2	--	PCAI	7,3
Diagonal mod B	14,7	15,0	14,6	15,1	15,3	15,0	14,4	13,3	11,7	9,7	5,7	3,9	Q1 Volume	264,0
Diagonal mod Δ	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,4	0,9	0,5	--	Q2 Volume	251,6
CVAI mod	0,7	0,7	0,7	0,0	0,7	0,7	0,7	0,0	3,5	10,2	8,8	-100,0	Q3 Volume	285,4
RSI	23,1	17,6	13,4	16,8	9,5	9,8	8,3	7,8	13,8	16,1	29,4	--	Q4 Volume	306,2

Tabelle 8

Skaphozephalus: Tabellarische Darstellung der präoperativen Analyse mit der Software Cranioform Analytics 3.0

patient name	capture date											report date		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		03.06.11
Slice	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Circumference	48,8	49,1	47,2	46,1	46,1	46,0	45,3	43,6	40,7	35,7	30,6	18,9	CBW	10,8
Width	10,8	11,0	11,5	11,8	11,7	11,6	11,3	10,8	10,1	8,9	7,1	4,0	N-Tr L	9,1
Length	16,1	17,2	16,7	16,4	16,6	16,7	16,5	15,8	14,7	12,9	10,5	6,3	N-Tr R	9,2
CI Index	67,1	64,0	68,9	72,0	70,5	69,5	68,5	68,4	68,7	69,0	67,6	63,5	Ear Offset	0,1
30° Diagonal A	14,6	14,6	14,6	14,6	15,3	15,4	15,3	14,8	13,7	12,0	9,4	5,4	Vertex Height	11,4
30° Diagonal B	15,2	15,2	15,1	15,1	15,5	15,6	15,4	14,9	13,8	12,1	9,3	5,0	ASR	0,999
30° Diagonal Δ	0,6	0,6	0,5	0,5	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	PSR	0,983
30° CVAI	4,1	4,1	3,4	3,4	1,3	1,3	0,7	0,7	0,7	0,8	1,1	8,0	ACAI	0,1
Diagonal mod A	15,7	16,0	15,7	15,8	16,3	16,5	16,3	15,7	14,7	12,9	10,1	7,0	PCAI	1,7
Diagonal mod B	15,8	16,2	15,8	15,9	16,5	16,5	16,4	15,7	14,6	12,7	10,1	5,8	Q1 Volume	319,8
Diagonal mod Δ	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	1,2	Q2 Volume	320,1
CVAI mod	0,6	1,2	0,6	0,6	1,2	0,0	0,6	0,0	0,7	1,6	0,0	20,7	Q3 Volume	400,1
RSI	9,2	3,6	6,9	8,7	11,2	12,9	12,1	7,5	4,0	2,0	5,5	33,5	Q4 Volume	407,0

Tabelle 9

Skaphozephalus: Tabellarische Darstellung der postoperativen Analyse mit der Software Cranioform Analytics 3.0

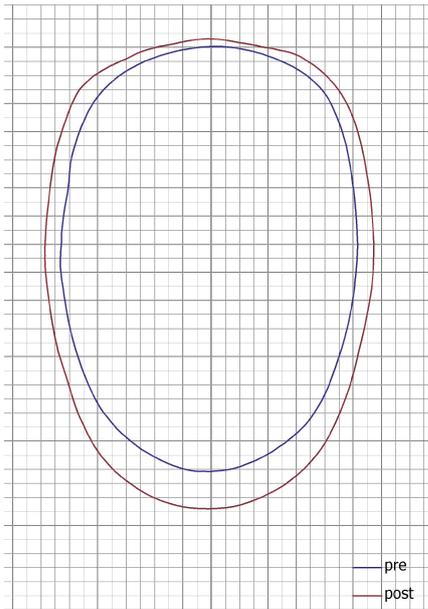


Abbildung 35
Auswertung und Darstellung des präoperativen (innerer Kreis) und postoperativen (äußerer Kreis) Kopfumfangs auf Höhe der Messebene bei Skaphozephalie



Abbildung 36
Überlagerung des präoperativen und postoperativen Scans mit Blickrichtung von kranial bei Skaphozephalie

3.1.2 Trigonocephalus

Einen Trigonocephalus hatten n=12 Kinder. Dies entsprach 43% der Gesamtzahl. Die Relation von Jungen zu Mädchen betrug 2:1 (m:w). Das mediane Lebensalter bei Operation betrug 7 Lebensmonate. Der jüngste Patient war zum Zeitpunkt der Operation 4 Monate, der älteste Patient 20 Monate alt.

Der hier wichtige Wert ist das anteriore Schädelvolumen. Das mittlere anteriore Schädelvolumen betrug präoperativ 528,267ml (395,1 – 598,8 ml). Die postoperative Messung ergab einen mittleren Wert von 601,375 ml (458,6 – 665,2 ml). Die anhand der Kovarianzanalyse korrigierten Werte zeigten eine Tendenz zu postoperativ verbesserten Werten des anterioren Volumens. Ein statistisch signifikanter Unterschied des anterioren Schädelvolumens konnte nicht bestätigt werden.

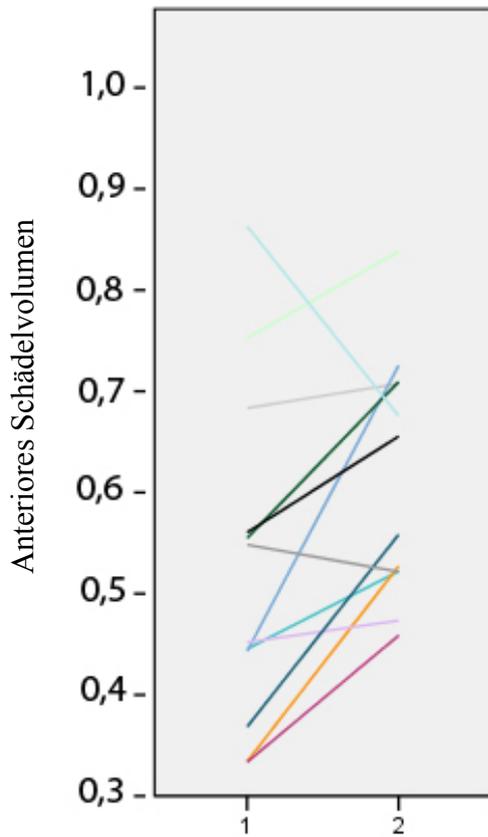


Abbildung 37
 Anteriores Schädelvolumen (ASV) bei Patienten mit Trigonocephalie ($n=12$), zum Zeitpunkt vor chirurgischer (Scan 1) und nach chirurgischer Korrektur (Scan 2), die unterschiedlichen Linien entsprechen jeweils einem Patienten

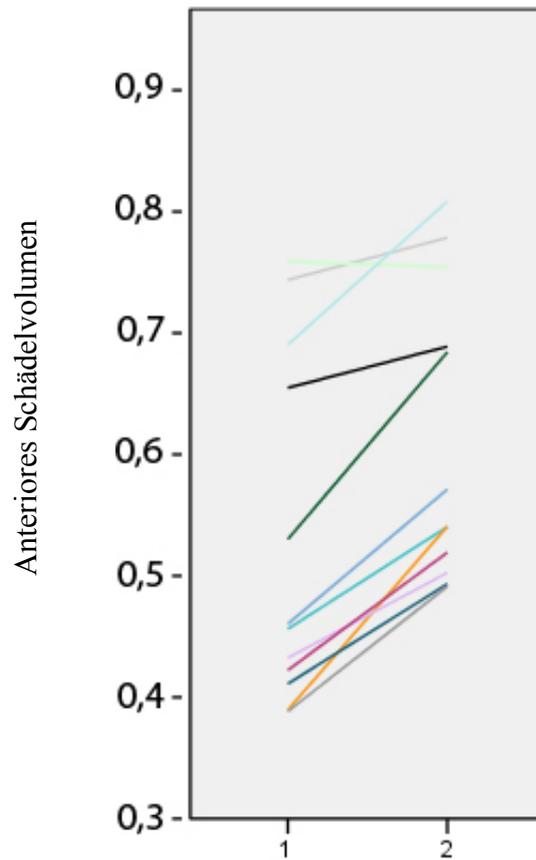


Abbildung 38
 mit statistischer Kovarianzanalyse vergleichbar gemachtes, korrigiertes anteriores Schädelvolumen (ASV) bei den Patienten mit Trigonocephalie, ($n=12$), zum Zeitpunkt vor der chirurgischen (Scan 1) und nach der chirurgischen Korrektur (Scan 2)

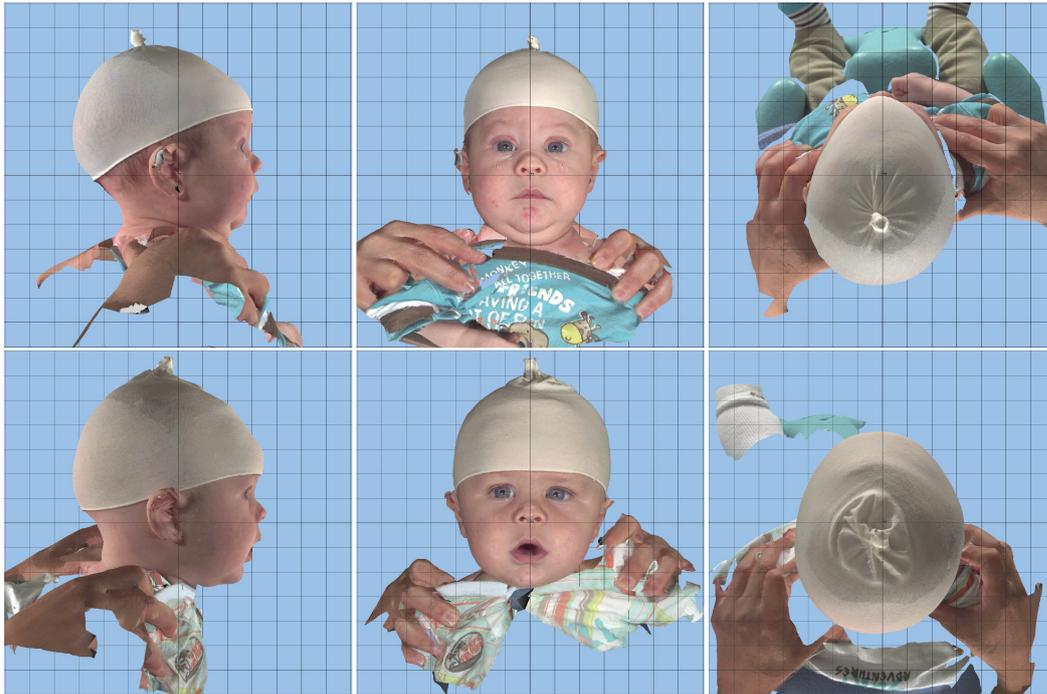


Abbildung 39
Trigonozephalus:
oben: präoperativ
unten: postoperativ

patient name	capture date											report date		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	21.10.10	
Slice	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Circumference	44,1	45,9	41,9	40,3	40,4	40,0	39,1	36,7	32,4	26,1	16,3	3,9	CBW	9,9
Width	9,7	10,1	10,8	10,7	10,6	10,4	10,1	9,6	8,6	6,7	2,8	--	N-Tr L	8,2
Length	13,3	14,8	14,3	14,3	14,5	14,4	13,9	12,9	11,2	8,8	5,2	3,8	N-Tr R	7,9
CI Index	72,9	68,2	75,5	74,8	73,1	72,2	72,7	74,4	76,8	76,1	53,8	--	Ear Offset	0,4
30° Diagonal A	12,6	12,7	12,7	13,2	13,1	12,9	12,6	11,8	10,4	8,2	4,8	--	Vertex Height	10,3
30° Diagonal B	13,1	13,3	13,4	13,7	13,6	13,4	13,0	12,2	10,8	8,6	4,8	--	ASR	0,980
30° Diagonal Δ	0,5	0,6	0,7	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0	PSR	0,929
30° CVAI	4,0	4,7	5,5	3,8	3,8	3,9	3,2	3,4	3,8	4,9	0,0	0,0	ACAI	2,1
Diagonal mod A	12,9	13,8	13,6	13,6	14,2	14,1	13,7	12,7	11,0	8,7	5,2	--	PCAI	7,7
Diagonal mod B	13,4	13,9	13,7	14,1	14,3	14,2	13,8	12,9	11,1	8,9	5,5	3,7	Q1 Volume	182,3
Diagonal mod Δ	0,5	0,1	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3	--	Q2 Volume	186,1
CVAI mod	3,9	0,7	0,7	3,7	0,7	0,7	0,7	1,6	0,9	2,3	5,8	-100,0	Q3 Volume	321,3
RSI	3,7	0,4	15,3	14,5	13,3	15,4	14,6	11,9	7,0	0,9	10,7	--	Q4 Volume	346,0

Tabelle 10

Trigonocephalus: Tabellarische Darstellung der präoperativen Analyse mit der Software Cranioform Analytics 3.0

patient name	capture date											report date		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	21.10.10	
Slice	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Circumference	44,0	45,7	46,3	43,6	44,4	44,5	44,0	41,8	39,1	36,5	29,6	21,1	CBW	10,7
Width	10,6	11,3	12,4	12,5	12,7	12,7	12,5	12,2	11,5	10,3	8,5	5,8	N-Tr L	8,6
Length	13,1	14,8	14,5	14,8	15,3	15,4	15,0	14,1	12,9	11,6	9,5	6,7	N-Tr R	8,4
CI Index	80,9	76,4	85,5	84,5	83,0	82,5	83,3	86,5	89,1	88,8	89,5	86,6	Ear Offset	0,2
30° Diagonal A	12,7	12,9	13,1	14,4	14,6	14,7	14,3	13,6	12,6	11,4	9,2	6,7	Vertex Height	11,3
30° Diagonal B	13,3	13,6	13,7	14,6	14,8	14,8	14,5	13,8	12,9	11,6	9,9	6,5	ASR	0,918
30° Diagonal Δ	0,6	0,7	0,6	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,7	0,2	PSR	0,868
30° CVAI	4,7	5,4	4,6	1,4	1,4	0,7	1,4	1,5	2,4	1,8	7,6	3,1	ACAI	8,9
Diagonal mod A	12,9	13,8	13,9	14,4	15,3	15,3	14,9	13,9	12,8	11,5	9,2	6,8	PCAI	15,2
Diagonal mod B	13,5	14,1	14,1	14,7	15,3	15,4	15,1	14,2	13,0	11,7	9,9	6,6	Q1 Volume	291,1
Diagonal mod Δ	0,6	0,3	0,2	0,3	0,0	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,7	0,2	Q2 Volume	267,3
CVAI mod	4,7	2,2	1,4	2,1	0,0	0,7	1,3	2,2	1,6	1,7	7,6	3,0	Q3 Volume	388,3
RSI	5,7	13,9	3,5	32,3	39,9	50,3	54,5	56,3	61,3	61,4	46,7	83,9	Q4 Volume	447,3

Tabelle 11

Trigonocephalus: Tabellarische Darstellung der postoperativen Analyse mit der Software Cranioform Analytics 3.0

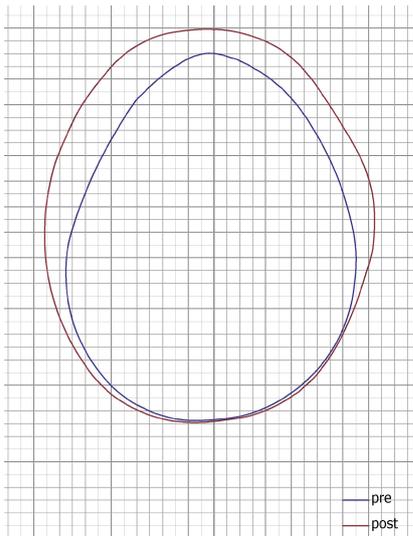


Abbildung 40
Auswertung und Darstellung
des präoperativen (innerer
Kreis) und postoperativen
(äußerer Kreis) Kopfumfangs
auf Höhe der Messebene bei
Trigonocephalie

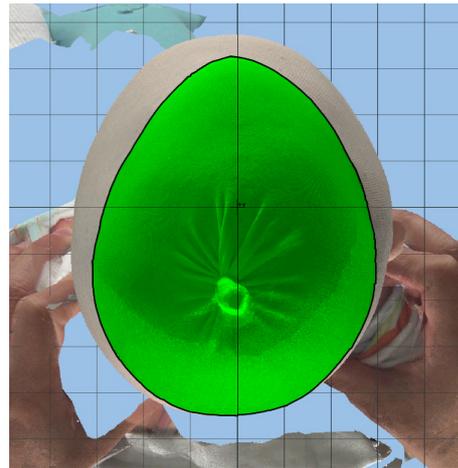


Abbildung 41
Überlagerung des präoperativen
(innerer Kreis) und pos-
toperativen (äußerer Kreis)
Kopfumfangs auf Höhe der
Messebene bei Trigonocephalie

3.1.3 Plagiozephalus

In unserer Studiengruppe hatten 8 Kinder (28,5%) einen Plagiozephalus. Das Verhältnis von Jungen zu Mädchen betrug 3:5 (m:w).

Koronarnahtsynostose: Insgesamt 7 Kinder wurden aufgrund einer Koronarnahtsynostose operiert. Das mediane Alter betrug 8 Monate. Das Verhältnis Jungen zu Mädchen betrug 2:5 (m:w). Der jüngste Patient war zum Zeitpunkt der Operation 4 Monate, der älteste Patient 23 Monate alt.

Die mittlere anterior Symmetry Ratio (ASR) betrug präoperativ 0,943 (0,878 – 0,999) und veränderte sich postoperativ auf 0,949 (0,913 – 0,995). Der Einsatz der Kovarianzanalyse zur Korrektur der Ergebnisse ließ keine Signifikanz feststellen.

Lambdanahtsynostose: Ein männlicher Patient wurde im Alter von 5 Monaten operiert. Bei dem einzigen Fall der Lambdanahtsynostose änderte sich die präoperative PSR von 0,733 auf postoperativ 0,808.

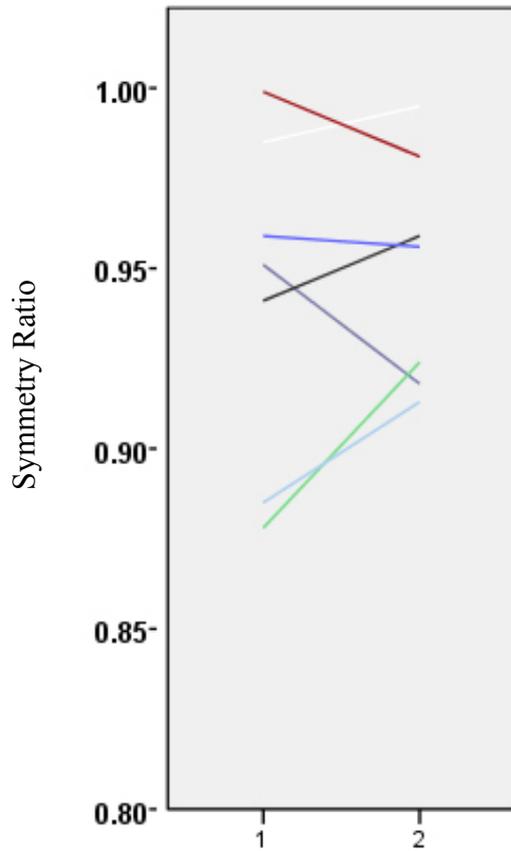


Abbildung 42

Symmetry ratio bei den Patienten mit Plagiozephalie ($n=8$), zum Zeitpunkt vor chirurgischer (Scan 1) und nach chirurgischer Korrektur (Scan 2), die unterschiedlichen Linien entsprechen jeweils einem Patienten, Rohdaten

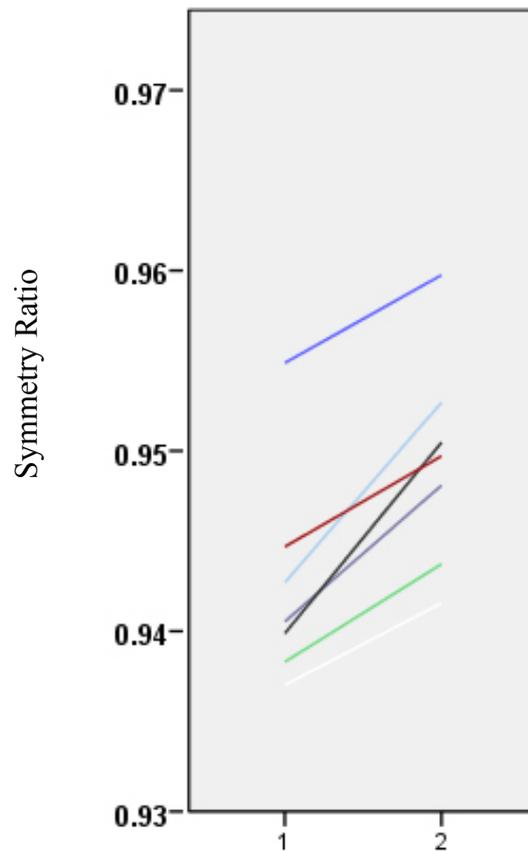


Abbildung 43

Mit statistischer Kovarianzanalyse vergleichbar gemachte, korrigierte symmetry ratio bei den Patienten mit Plagiozephalie, ($n=8$), zum Zeitpunkt vor der chirurgischen (Scan 1) und nach der chirurgischen Korrektur (Scan 2)

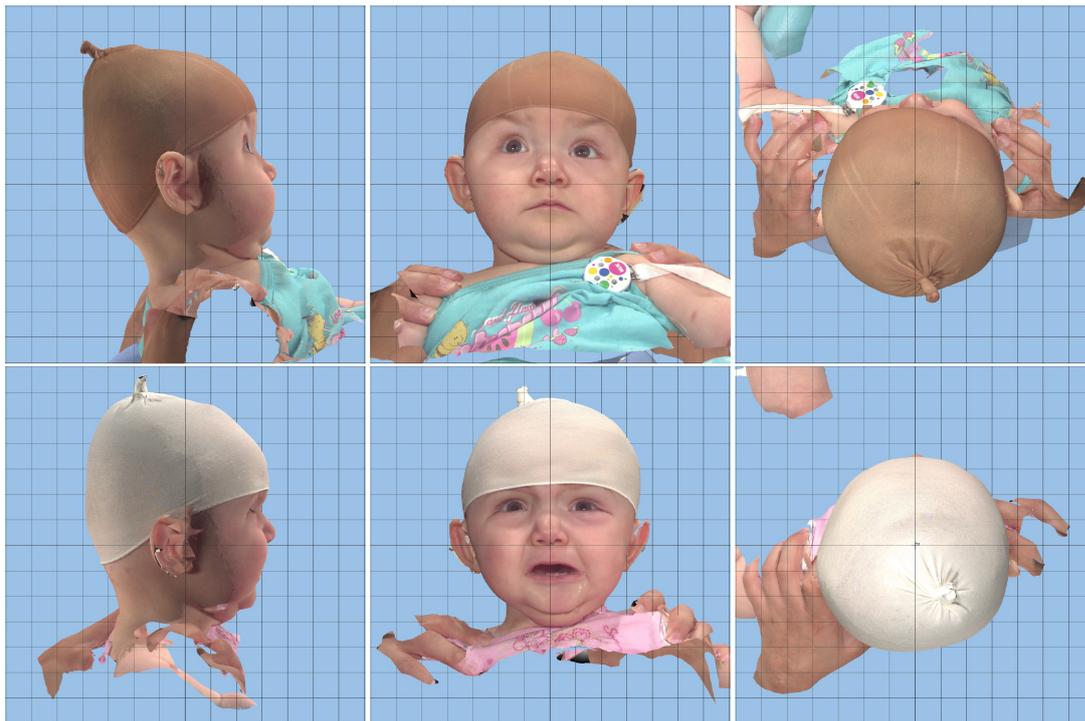


Abbildung 44
anteriöer Plagiozephalus:
oben: präoperativ
unten: postoperativ

patient name	capture date											report date		
												21.10.10		
Slice	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Circumference	52,3	55,0	52,7	43,0	43,3	43,5	43,2	42,1	39,7	36,1	30,9	22,3	CBW	11,4
Width	11,4	12,1	13,1	13,2	13,3	13,3	13,2	12,8	12,0	10,5	8,2	4,1	N-Tr L	8,9
Length	13,3	14,4	14,0	13,3	13,5	13,6	13,6	13,4	12,8	11,9	10,4	7,5	N-Tr R	8,6
CI Index	85,7	84,0	93,6	99,2	98,5	97,8	97,1	95,5	93,8	88,2	78,8	54,7	Ear Offset	0,0
30° Diagonal A	13,9	13,6	13,7	13,4	13,6	13,9	14,0	13,7	12,8	11,6	10,1	7,0	Vertex Height	11,3
30° Diagonal B	13,9	13,7	13,7	13,3	13,3	13,6	13,7	13,5	12,8	11,6	9,8	6,9	ASR	0,971
30° Diagonal Δ	0,0	0,1	0,0	0,1	0,3	0,3	0,3	0,2	0,0	0,0	0,3	0,1	PSR	0,987
30° CVAI	0,0	0,7	0,0	0,8	2,3	2,2	2,2	1,5	0,0	0,0	3,1	1,4	ACAI	2,9
Diagonal mod A	12,4	13,0	13,2	13,7	13,9	14,3	13,8	13,5	12,7	11,8	10,5	7,9	PCAI	1,3
Diagonal mod B	14,5	14,2	14,9	13,6	13,6	13,9	13,7	13,5	13,0	12,0	10,4	7,6	Q1 Volume	287,9
Diagonal mod Δ	2,1	1,2	1,7	0,1	0,3	0,4	0,1	0,0	0,3	0,2	0,1	0,3	Q2 Volume	279,6
CVAI mod	16,9	9,2	12,9	0,7	2,2	2,9	0,7	0,0	2,4	1,7	1,0	3,9	Q3 Volume	423,7
RSI	41,5	38,6	32,8	20,7	3,1	16,2	27,9	29,7	31,0	37,1	43,6	53,5	Q4 Volume	429,2

Tabelle 12
anteriorer Plagiozephalus: Tabellarische Darstellung der präoperativen
Analyse mit der Software Cranioform Analytics 3.0

Slice	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Circumference	51,3	49,6	48,0	44,5	45,1	45,2	44,8	43,6	41,4	37,9	32,8	25,8	CBW	11,7
Width	11,9	12,4	13,1	13,6	13,9	13,9	13,6	13,2	12,4	11,2	9,4	6,3	N-Tr L	9,4
Length	13,1	14,4	14,2	13,7	14,2	14,3	14,1	13,9	13,1	12,0	10,5	8,6	N-Tr R	8,3
CI Index	90,8	86,1	92,3	99,3	97,9	97,2	96,5	95,0	94,7	93,3	89,5	73,3	Ear Offset	1,4
30° Diagonal A	13,8	13,8	13,9	13,5	14,2	14,5	14,3	14,1	13,4	12,3	10,7	8,3	Vertex Height	11,8
30° Diagonal B	14,0	14,0	14,0	13,6	14,4	14,6	14,6	14,3	13,5	12,3	10,7	8,3	ASR	0,979
30° Diagonal Δ	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	PSR	0,956
30° CVAI	1,4	1,4	0,7	0,7	1,4	0,7	2,1	1,4	0,7	0,0	0,0	0,0	ACAI	2,1
Diagonal mod A	12,6	13,8	14,0	14,2	14,4	14,6	14,3	14,1	13,4	12,3	10,6	8,5	PCAI	4,6
Diagonal mod B	14,3	14,0	14,1	14,3	14,7	14,7	14,6	14,3	13,5	12,3	10,7	8,6	Q1 Volume	321,8
Diagonal mod Δ	1,7	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1	0,1	Q2 Volume	315,1
CVAI mod	13,5	1,4	0,7	0,7	2,1	0,7	2,1	1,4	0,7	0,0	0,9	1,2	Q3 Volume	437,0
RSI	25,1	28,7	8,6	5,1	4,0	5,5	15,5	24,2	36,2	50,1	55,3	48,9	Q4 Volume	457,3

Tabelle 13
anteriorer Plagiozephalus: Tabellarische Darstellung der postoperativen Analyse
mit der Software Cranioform Analytics 3.0

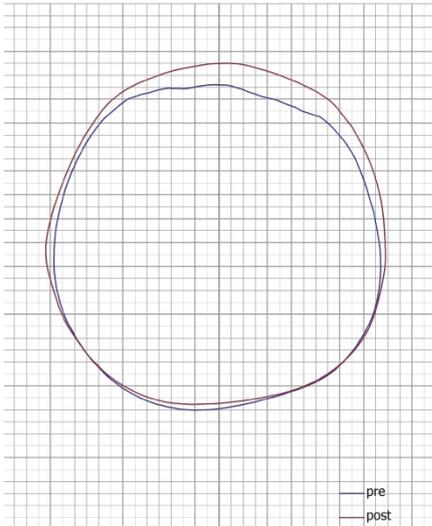


Abbildung 45
Auswertung und Darstellung des präoperativen (innerer Kreis) und postoperativen (äußerer Kreis) Kopfumfangs auf Höhe der Messebene bei Plagiozephalie

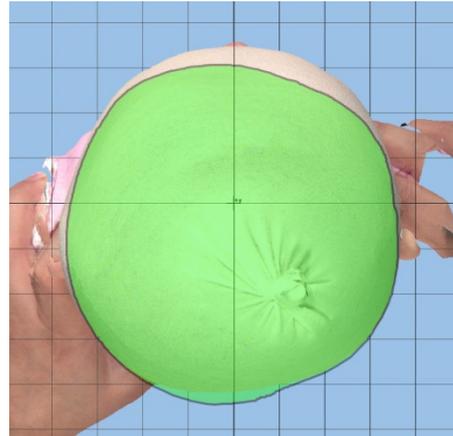


Abbildung 46
Überlagerung des präoperativen und postoperativen Scans mit Blickrichtung von kranial bei Plagiozephalie

4 Diskussion

Die nonsyndromalen Kraniosynostosen stellen eine seltene Schädelfehlbildung dar und kommen mit einer Inzidenz von etwa 0,4 bis einem Fall auf 1000 Geburten vor (Patriquin et al. 1977; Lajeunie et al. 1996; Kolar 2011). Sie beruhen auf einer vorzeitigen Verknöcherung von einer einzelnen oder auch mehreren Schädelnähten. Dies kann zu einer Beeinträchtigung der normalen skelettalen Schädelentwicklung führen. In der Folge kann es zu einem ansteigenden intrakraniellen Druck kommen (Freudlsperger et al. 2013). Die Klinik wird meist durch diesen permanenten intrakraniellen Druckanstieg verursacht. Aufgrund der dadurch bedingten hirmorphologischen Veränderungen kann dies in ausgeprägten Fällen schon frühzeitig zu irreversiblen Hirnschäden und damit zu neurokognitiven Defiziten führen (Mühling 2000; Da et al. 2012).

Grundsätzlich kann jede Schädelnaht betroffen sein. Die betroffene Naht bestimmt das Erscheinungsbild. Die Frühsymptome werden unter anderem mit Unruhe, häufigem Weinen, Schlafstörungen, Erbrechen und Trinkschwäche beschrieben. Auch zerebrale Anfälle können auftreten (Nitsche 2003; Horch und Bier 2007). Diese nicht sehr spezifischen Symptome in Kombination mit der Seltenheit des Auftretens machen es für Kinderärzte und bei den im Umgang mit diesen Kindern nicht geübten Personen schwer, die richtige Diagnose zu stellen.

Die Indikation zu einer Operation wird häufig auch bei fehlenden Symptomen allein anhand des klinischen Bildes gestellt. Neben dem Ziel den steigenden Hirndruck zu verhindern bzw. zu senken, will man eine bestehende Schädeldeformität beseitigen und eine normale Schädelform erreichen. Des Weiteren kann durch eine Operation die psychosoziale Belastung des Patienten reduziert werden (Freudlsperger et al. 2013). Ebenso konnte eine Verbesserung des IQ gezeigt werden (Renier et al. 1987; Mühling 2000).

Der optimale Zeitpunkt einer Operation wird im ersten Lebensjahr gesehen. In diesem Zeitraum findet ein starkes Größenwachstum des Gehirns statt. Aus diesem Grund besteht das Ziel in der Beseitigung der knöchernen Einengung, um dadurch dem Gehirn die Möglichkeit einer normalen Entwicklung zu ermöglichen (Azouz 2008).

Mit steigendem Alter erhöht sich der knöcherne Mineralisationsgrad und damit einhergehend verschlechtert sich wiederum die Verformbarkeit und damit die Möglichkeit der intraoperativen Formgebung der Kalotte. Die Reossifikationspotenz

nimmt ab. Daraus ergibt sich eine verlängerte Operationsdauer mit einer höheren Komplikationsrate (Di Rocco et al. 1996; Nitsche 2003; Sharma 2013).

Um keine Zeit bis zum Beginn der Therapie zu verlieren und den momentan für optimal eingeschätzten Operationszeitraum nicht zu verpassen, ist aus den genannten Gründen eine frühzeitige Diagnosestellung wichtig.

Die Therapie erfolgt in enger interdisziplinärer Zusammenarbeit von Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie, Neurochirurgie, Hals-Nasen-Ohren Heilkunde, Kinderheilkunde und Radiologie.

Das Ziel jeder einzelnen Operation ist die Verbesserung des präoperativen Zustandes. Das Ziel aus der Summe vieler Operationen sollte die Minimierung der Risiken bei gleichzeitiger Optimierung des Ergebnisses sein.

Um dieses Ziel verfolgen zu können, ist eine suffiziente Evaluation nötig. Diese muss objektiv erfolgen. Mit der dreidimensionalen Photogrammetrie besteht die Möglichkeit einer objektiven Erfassung und Beurteilung des prä- und postoperativen Zustandes.

4.1 Patientenkollektiv

Die Häufigkeitsverteilung der Geschlechter liegt bei 68%:32% (19:9) zu Gunsten der männlichen Kinder. Dies entspricht einem Verhältnis von 2,1:1. Auch in Studien mit großen Fallzahlen (Kolar 2011) konnte das häufigere Auftreten von Jungen mit sehr ähnlichen Zahlen (2:1) bestätigt werden.

Die im Allgemeinen am häufigsten betroffene Naht ist in etwa 45% der Fälle die Sagittalnaht. Die Metopicanah- und die einseitige Koronarnahtsynostose treten in einer Häufigkeit von jeweils etwa 25% auf. Die seltenste Form ist die einseitige Lambdanahtsynostose (Garza und Khosla 2012).

In dieser Studie beträgt die Häufigkeitsverteilung der Synostosen 8:12:7:1 (Skaphozephalus: Trigonozephalus: anteriorer Plagiozephalus: posteriorer Plagiozephalus). Da es sich um kleine Fallzahlen handelt, sind diese nur bedingt als repräsentativ zu bewerten.

Wie Kolar 2011 und van der Meulen 2012 feststellten, verändert sich die Prävalenz des Trigonozephalus. Stand er in seiner Häufigkeit nach dem Skaphozephalus und dem Plagiozephalus bisher an dritter Stelle, zeigen aktuelle Studien einen Anstieg der Prävalenz und er scheint nun die zweithäufigste Kraniosynostose darzustellen (van der Meulen et al. 2009a; Kolar 2011; van der Meulen 2012).

Die deskriptive Bezeichnung des Plagiozephalus als Schiefschädel, findet nicht nur bei der isolierten Synostose der Sutura coronalis Anwendung. Auch bei Beteiligung der Sutura lambdoidea benutzt man diesen Terminus (Hansen und Mulliken 1994; Bottler 2007). In unserer Studie gab es nur ein Kind mit einer einseitigen Lambdanahtsynostose.

4.2 Größe der Fallzahlen

In unserem Untersuchungszeitraum wurden an der Uniklinik Gießen etwa 19 Kinder im Jahr an einer prämaternen Kraniosynostose operiert. Diese Fallzahl ist in erster Linie in dem geringen Auftreten dieser Erkrankung begründet. Entsprechend ergibt sich daraus eine Studienpopulation in der vorliegenden Größe, mit den daraus resultierenden Limitierungen. Der posteriore Plagiozephalus ist lediglich mit nur einem Fall vertreten. Aus dieser Studiengröße ist zwar eine Tendenz zu erkennen, dennoch sind die Ergebnisse mit Vorsicht zu bewerten. Mit einer größeren Fallzahl sind eventuell auch statistisch signifikantere Ergebnisse zu erwarten.

Eine größere Fallzahl wäre wünschenswert, ist jedoch aufgrund des relativ seltenen Auftretens nur durch eine Verlängerung der Datenrekrutierungszeit oder durch einen multizentrischen Ansatz zu erreichen. Beides ist durchaus denkbar. Da die Datengewinnung unabhängig vom jeweiligen Untersucher erfolgen kann, besteht keine Abhängigkeit von einem Untersuchungsteam. Weiterhin erfolgt die Datengewinnung und Speicherung durchweg in digitalisierter Form. Damit ist auch hier ein kostengünstiger und schneller Abgleich sowie eine ortsunabhängige Auswertung zwischen kooperierenden Zentren denkbar.

4.3 Veränderte Prävalenz bei Trigonocephalie

In der klassischen Literatur wird der Trigonocephalus als dritthäufigste singuläre Nahtsynostose mit einer Häufigkeit zwischen 1:7000 und 1:15000 (Alderman et al. 1997; Lajeunie et al. 1998b) angegeben.

In neueren Veröffentlichungen wird ein deutlicher Anstieg des Auftretens beschrieben (Kolar 2011). Eine große paneuropäische Studie beschreibt sowohl einen Anstieg der absoluten Zahlen als auch des prozentualen Anteils. So lag der Anteil im Zeitraum von 1997 bis 2001 bei durchschnittlich 20,1% und in den Jahren 2001 bis 2005 bei durchschnittlich 25,5% (van der Meulen et al. 2009b; van der Meulen 2012).

Die Gründe dafür scheinen noch unklar zu sein. So werden sowohl ein höheres mütterliches (Selber et al. 2008) als auch ein höheres väterliches Alter, sowie auch mütterliche metabolische Störungen als mögliche Ursache vermutet (Bottero et al. 1998). Bis zum jetzigen Zeitpunkt gibt es jedoch keine aktuellen Studien, die diese Annahmen bestätigen können (Kolar 2011).

Aufgrund des kleinen Patientenumfangs ist der prozentuale Anteil von 42,9% am Gesamtumfang unseres Patientenkollektivs nicht als repräsentativ einzustufen und entspricht damit nicht den aktuelleren publizierten Häufigkeiten. Das häufigere Auftreten von Jungen ist in der Literatur bekannt. So gibt Kolar ein Verhältnis von 2,8:1 (m:w) an (Kolar 2011). Die bezüglich des Patientenguts derzeit größte Studie beschreibt ein Verhältnis von 3,3:1 (m:w) (Lajeunie et al. 1998a). Das Verhältnis von Jungen zu Mädchen von 2:1 aus unserer Studie ist damit in Einklang zu bringen.

4.4 Möglichkeiten der räumlichen Datengewinnung

Um einen objektiven Vergleich der Situationen vor und nach einer Operation zu erhalten, kann man sich verschiedene Möglichkeiten zu Nutze machen, um dreidimensionale kraniale Daten zu gewinnen.

4.4.1 CT

Im Verlauf der letzten Dekaden hat sich die Computertomographie zu einer wichtigen Untersuchungstechnik in der Diagnostik der Kraniosynostosen entwickelt. In den meisten Zentren wird diese Untersuchung durchgeführt und zählt nach wie vor zu den wichtigsten diagnostischen Hilfsmitteln. Mit dieser Untersuchung bekommt man in einem Untersuchungsgang die Möglichkeit das Gehirn, den Schädel, die Suturen und unter Kontrastmittelgabe auch die Gefäße beurteilen zu können. Auch Anomalien wie einen Hydrozephalus, angeborene Malformationen und weitere Ursachen eines asymmetrischen Schädelwachstums können im Vorfeld einer Operation erkannt werden. Die dreidimensionale Rekonstruktion stellt eine gute Hilfe in der Planung des chirurgischen Vorgehens dar (Nagaraja et al. 2013). Neben dem intrakraniellen Raumangebot kann sowohl das Volumen des ventrikulären Raumes als auch das eigentliche Gehirnparenchym berechnet (Koszlat 2002; Dufresne et al. 1987) und bei dreidimensionaler Rekonstruktion, das Ergebnis der Untersuchung in allen drei Raumebenen anschaulich beurteilt werden.

Bei Anfertigung eines postoperativen Scans kann das individuelle outcome und auch das chirurgische Vorgehen objektiv ausgewertet werden.

Allerdings muss bedacht werden, dass nur durch follow up Untersuchungen die Möglichkeit des prä- und postoperativen Vergleiches von Schädelform und Volumenveränderung besteht.

Tartaro et. al. beschreibt die CT als das vollständigste und genaueste bildgebende Verfahren zur Diagnose einer Kraniosynostose. In verschiedenen Studien konnte eine hohe diagnostische Genauigkeit und Behandlerunabhängigkeit gezeigt werden (Tartaro et al. 1998; Flohr et al. 2005). Vannier et. al. beschreibt eine Sensitivität von 96% und Spezifität von 100% bei Diagnostik durch einen erfahrenen Radiologen (Vannier et al. 1994).

Doch muss die Indikation einer computertomographischen Untersuchung kritisch gestellt werden. Ein wichtiger Grund besteht in der für die Untersuchung notwendigen

Strahlenbelastung. Auf die Lebenszeit bezogen geht damit sowohl eine erhöhte Inzidenz der Entstehung, als auch die Gefahr an einem Malignom zu versterben, einher. Brenner et.al geht davon aus, dass von den 600.000 in den USA durchgeführten abdominal und cranial CT Untersuchungen an unter 15-jährigen in der Zukunft ca. 500 Kinder an einem Tumor, der durch diese computertomographische Untersuchungen verursacht wurde, sterben werden (Brenner et al. 2001). Die Entstehung eines Malignoms unterliegt keiner ionisierenden Schwellendosis (Reiser et al. 2011). Des Weiteran befindet sich der Patient in einer Phase schnellen Wachstums mit einer hohen Zellumsatzrate und damit großen Empfänglichkeit für durch Röntgenstrahlen verursachte Zellschäden.

Weiterhin bedeutet die Untersuchung für fast alle Kinder Stress. Daher ist immer eine Sedierung nötig, die für sich ebenfalls eine Belastung darstellt und potentiell mit Komplikationsrisiken behaftet ist (Fearon et al. 2007).

Im Zuge der sensibleren Wahrnehmung der Strahlenbelastung wird auch zunehmend die Indikation einer CT in der Routine der präoperativen Phase von vielen Autoren kritisch gesehen. So konnte in verschiedenen Studien gezeigt werden, dass zur Diagnosefindung eine CT nicht immer nötig ist (Engel et al. 2012b). Schweitzer et al. beschreiben in einer Veröffentlichung die Stellung der richtigen Diagnose durch alleinige klinische Untersuchung in 97,1% der Fälle (Schweitzer et al. 2012). Fearon et al. kommen in ihrer Studie bei der körperlichen Untersuchung auf eine Genauigkeit von 98%. Noch dazu wird beschrieben, dass drei von vier Operateuren die Computertomographie für die operative chirurgische Korrektur nicht benötigen und die Behandlung nicht beeinträchtigt würde, wenn keine CT gemacht worden wäre (Fearon et al. 2007).

4.4.2 MRT

Bei Einsatz der Magnetresonanztomographie wird ionisierende Strahlung vermieden. Der Vorteil liegt neben der für uns wichtigen Möglichkeit der Diagnostik von Kraniosynostosen (Zöller 2003) in der Darstellung des intrakraniellen Weichgewebes. Aufgrund der guten Darstellung besitzt die MRT Untersuchung Vorteile bei der Erkennung von Mittellinienanomalien, Anomalien des Parenchyms und intrakraniellen Herniationen. Des Weiteren können Störungen in der Liquorzirkulation erkannt werden (Freudlsperger et al. 2013). Eine Darstellung und Bewertung der knöchernen Strukturen ist mit dieser Untersuchung nur eingeschränkt möglich. Ein weiterer Nachteil liegt in

dem zeitintensiven und unangenehmen Untersuchungsablauf. Dieser erstreckt sich im Allgemeinen über eine Zeitspanne von etwa 30 Minuten bei einer Standard MRT-Untersuchung des Kopfes. In einem gewissen Rahmen kann die Untersuchungszeit verkürzt werden. Zoeckler beschreibt eine Zeitersparnis von 7,3 Minuten zu der Standard MRT Untersuchung des Kopfes, wenn man bei der Qualität der MRT Datensätze hinsichtlich der Auflösung und Schichtdicke Abstriche in Kauf nimmt (Zockler, M J K 2006).

Dies erfordert jedoch eine von einem kleinen Kind nicht zu erbringende Mitarbeit. Einhergehend mit den entsprechenden Risiken ist hier eine tiefe Sedierung oder zumindestens eine Kurzzeitnarkose unumgänglich (Barkovich 2005; Fearon et al. 2007).

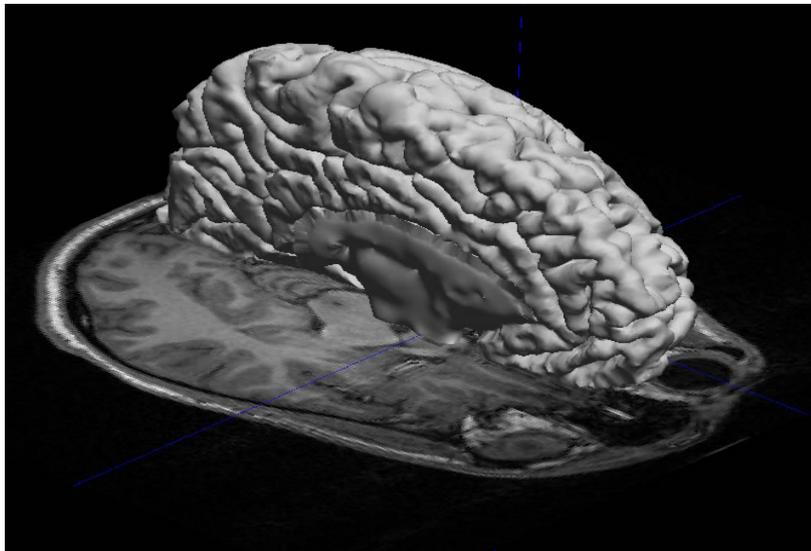


Abbildung 47
MRT 3D Rekonstruktion der linken Gehirnhälfte

4.4.3 Dreidimensionale Photogrammetrie

Das in dieser Arbeit verwendete Verfahren der dreidimensionalen Photogrammetrie ermöglicht eine maßstabsgetreue Erfassung des gesamten Kopfes in allen drei räumlichen Dimensionen.

Mit ihr haben wir Daten durch rechnergestützte anthropometrische Messungen gewonnen. So ist es uns möglich Strecken und Umfang zu messen, aber auch das kraniale Volumen zu bestimmen. Durch die Anfertigung von postoperativen Aufnahmen und deren Analyse können die Daten analysiert und die chirurgischen Techniken evaluiert werden. Eine komplette Evaluation der Schädeldeformitäten kann

nur durch eine Analyse des Schädelvolumens und dessen Veränderungen vorgenommen werden.

Die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit dieser Methode wurde in verschiedenen Studien untersucht und bestätigt (McKay et al. 2010; Schaaf et al. 2010a; Wong et al. 2008).

Ein großer Vorteil dieser Untersuchungstechnik ist, dass es sich um ein nicht invasives Verfahren handelt. Diese Technik arbeitet mit sichtbarem Licht, Röntgenstrahlen werden nicht benutzt. Eine Sedierung ist nicht notwendig, da die Untersuchung in wenigen Augenblicken durchgeführt werden kann. Die Belastung für das Kind ist dabei minimal.

Die dreidimensionale Photogrammetrie kann in der klinischen Routine vom Zeitpunkt der Diagnose und im follow up eingesetzt werden. Eine Auswertung ist durch die digitale Speicherung jederzeit möglich und unabhängig vom Behandler wiederholbar.

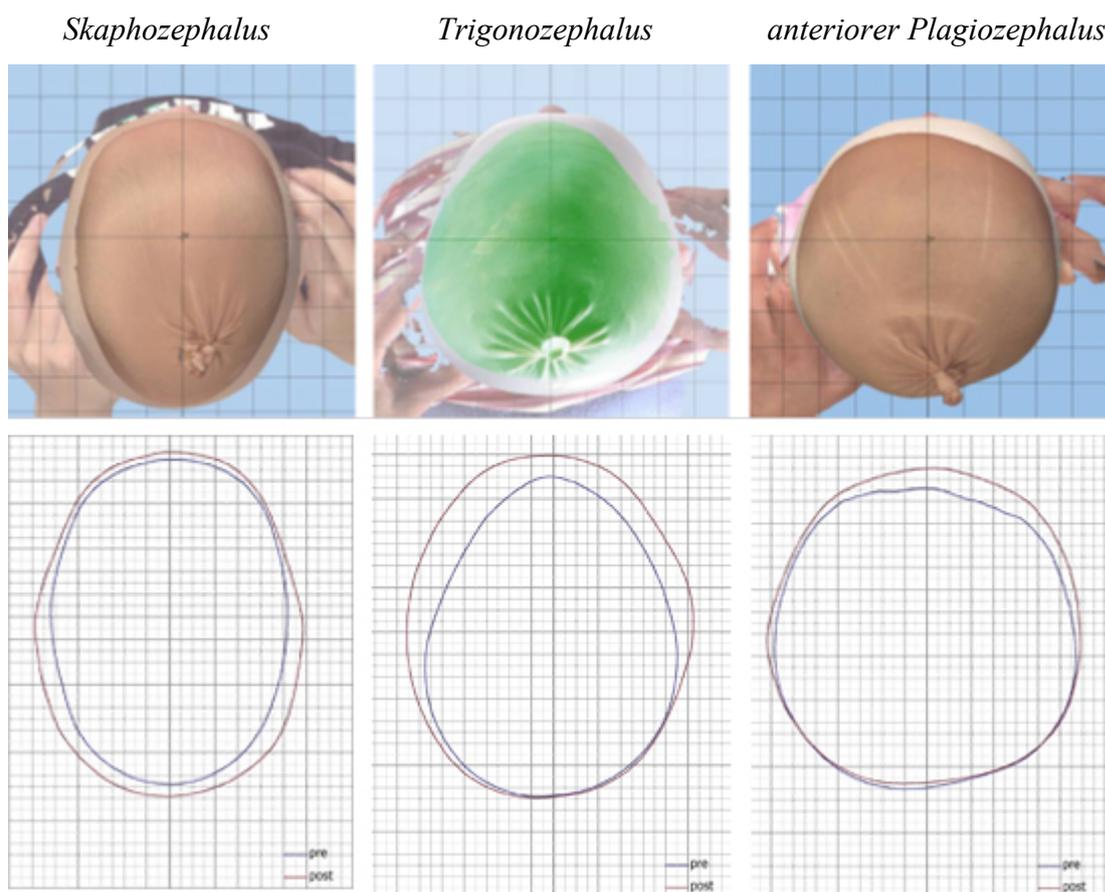


Abbildung 48
Überlagerung von prä- und postoperativen Scans zur objektiven perioperativen Beurteilung der kraniofazialen Veränderungen

4.5 Auswertung der Daten

Trotz der kleinen Patientengruppe ist das vorliegende Patientengut für eine statistische Auswertung ausreichend. Die Schwierigkeit bestand darin, das unterschiedliche Alter der Patienten zu berücksichtigen und das Wachstum vernachlässigbar zu machen. Dazu wurde auf der Höhe der fünften Ebene die Fläche eines Dreiecks bestimmt, welches parallel zur Grundebene, gebildet durch den rechten und linken Tragus sowie den Subnasalpunkt, gegeben ist und durch die Operation nicht tangiert wird.

Die Vergleichbarkeit der Photoscans zwischen den unterschiedlich alten Kindern wurde mit Hilfe einer Kovarianzanalyse hergestellt. Mit dieser Berechnung wird das individuelle Alter eines jeden Patienten zum Zeitpunkt der Untersuchung berücksichtigt. Auch das unterschiedliche perioperative Intervall wird damit unabhängig und vergleichbar.

Um eine Aussage zur Abweichung von einer normalen Kopfform machen zu können, sollten die Resultate mit einer Normalpopulation verglichen werden. So können cut-off Werte festgesetzt werden, die eine eindeutige Schlussfolgerung zulassen können.

Hierzu wäre es jedoch zunächst notwendig, ein ausreichend großes Normkollektiv photogrammetrisch zu untersuchen, zu vermessen und die Daten in entsprechenden alters- und geschlechtsspezifischen Perzentilkurven verfügbar zu machen, in etwa äquivalent zu Wilbrand et al. (Wilbrand et al. 2012a).

4.6 Schlussfolgerung

Dies ist die erste Studie, bei der ein objektiver Vergleich von prä- und postoperativen Befunden bei Kindern mit prämaturen Kraniosynostosen unter Einsatz der dreidimensionalen Photogrammetrie erfolgte.

Die in dieser Arbeit dargestellten und diskutierten Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe der dreidimensionalen Photogrammetrie eine Technik existiert, mit der eine objektive Vergleichbarkeit zwischen zwei Untersuchungen hergestellt werden kann. Bisher ist die Abschätzung des endgültigen postoperativen Ergebnisses in den meisten Fällen von dem subjektiven Empfinden des Operateurs abhängig. Es gab bisher keine suffiziente Methode, die eine objektive Erfassung des Ergebnisses einer Kraniosynostoseoperation ermöglichte. Zweidimensionale Verfahren haben den Nachteil, dass nicht die Gesamtheit der Veränderungen dargestellt werden kann. Auch sind nur bedingt Streckenmessungen und überhaupt keine Volumenberechnungen möglich. Eine dreidimensionale Darstellung mittels Computertomographie gibt die chirurgischen Gegebenheiten gut wieder. Die Qualität ist oft sehr gut. Um jedoch einen Vergleich der Volumina anstellen zu können, müssen mindestens zwei Untersuchungen, prä- und postoperativ, durchgeführt werden. Diese Strahlenbelastung geht bezogen auf die Lebenszeit mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Malignoms einher und ist als Routineuntersuchung deshalb nicht akzeptabel. Mit der Magnetresonanztomographie teilt sich die Computertomographie die Nachteile des höheren zeitlichen Aufwandes, sowie die oftmals nötige Sedierung mit den dadurch bedingten entsprechenden Komplikationen.

Die CT-Untersuchung wird in der präoperativen Planung in der nächsten Zeit sicherlich ihren Stellenwert behalten. Doch ist in Bezug auf die Diagnostik eine gründliche körperliche Untersuchung oft ausreichend. Von Fearon et al. wird sogar aufgezeigt, dass die Computertomographie für eine chirurgische Korrektur in einigen Fällen hilfreich, jedoch nicht unbedingt nötig ist (Fearon et al. 2007).

Die statistischen Resultate dieser Studie müssen mit Bedacht betrachtet werden. In Bezug auf die klinische Beobachtung erbrachten die Operationen zufriedenstellende Ergebnisse. Dies wurde durch die Zufriedenheit der Eltern bestätigt. Die statistischen Auswertungen ergaben in der Tendenz verbesserte Resultate. Erwartet wurden jedoch größere Veränderungen.

Wie wir zeigen konnten, ist es möglich, das intrakranielle Volumen zu bestimmen und

zu vergleichen. Die Genauigkeit der Untersuchung wurde in Studien belegt (Schaaf et al. 2010a). Durch Übereinanderlagern der dreidimensionalen Bilder kann direkt erkannt werden, in welchem Bereich eine Veränderung erfolgte. Durch die visuelle Darstellung besteht zudem ein hoher Nutzen für klinische Demonstrationen und Illustrationen. Die Veränderung der Schädelform wird durch diese Methode erstmals reproduzierbar darstellbar.

Mit Hilfe der dreidimensionalen Photogrammetrie steht ein Verfahren zur Verfügung, mit dem es möglich ist, einen objektiven Vergleich zwischen zwei Untersuchungen herzustellen. Die Prozedur ist einfach und schnell durchführbar, Aufnahmefehler können sofort erkannt werden. Es besteht weder bei einer Wiederholung der Aufnahme, noch bei der Auswertung eine Abhängigkeit vom Behandler.

Mit der Photogrammetrie kann die Ursache einer Kraniosynostose nicht festgestellt werden. Sie stellt jedoch ein exzellentes Werkzeug dar, um die perioperative Entwicklung der Kopfform zu dokumentieren und ein CT zur Objektivierung des postoperativen Erfolges (Schädelform, Volumen) zu ersetzen.

Um einen Vergleich zu normwertigen Schädelvolumina ziehen zu können, sollten in folgenden Studien Normwerttabellen von gesunden Kindern zu definierten Zeiträumen erarbeitet werden. Da bisher keine Normwerttabellen für das intrakranielle Volumen bei Kindern bestehen, können daher momentan weder Aussagen über Normwerte noch über Abweichungen von den Normwerten gemacht werden. Ähnlich den Wachstumsperzentilen in Bezug auf die Körperlänge, Kopfumfang und Gewicht kann mit dieser Untersuchung, integriert in die klinische Routine und ohne Belastung für das Kind, eine entsprechende Befunderhebung erfolgen.

Da es sich durchgängig um digitale Informationen handelt, ist, um eine große Anzahl an Kindern erfassen zu können, eine klinikübergreifende Zusammenarbeit vorstellbar.

5 Zusammenfassung

Bei dem Krankheitsbild der prämaturen Kraniosynostosen handelt es sich um ein selten vorkommendes klinisches Bild bei Patienten innerhalb des ersten Lebensjahres, welches zu einer zunehmenden Verformung des in diesem Zeitraum sehr stark wachsenden kindlichen Kopfes durch einen frühzeitigen Verschluss einer oder mehrerer Schädelnähte führt. Die Indikationsstellung zur chirurgischen Versorgung ist bislang ebenso wenig valide normiert wie die objektive Erfassung dessen, was durch eine dann durchgeführte chirurgische Schädelumformung resultiert.

Eine neuartige Methode der Oberflächenuntersuchung steht nun auch im klinischen Alltag spezialisierter Zentren durch die dreidimensionale Photogrammetrie zur Verfügung. Hierbei wird es möglich, anhand einer multipositionellen Photographie ein genaues Abbild der Kopfform vor und nach einer Remodellations-Operation ohne Strahlenbelastung und artefaktanfällige anthropometrische Untersuchung eines (evtl. wehrhaften) Kindes zu generieren und dieses am Bildschirm und mit einer untersucherunabhängigen Software halbautomatisiert auszuwerten.

Inhalt der hier vorliegenden Studie war es nun, 28 Kinder mit dem Krankheitsbild einer prämaturen Kraniosynostose jeweils prä- und postoperativ mit dieser photogrammetrischen Technik zu untersuchen und die durch den Eingriff stattgehabte Veränderung verschiedener kraniofazialer Indizes und Volumina zu erfassen und biometrisch auszuwerten. Das Patientengut setzte sich aus 8 Skaphozephalien, 12 Trigonocephalien und 8 synostotischen Plagiocephalien zusammen. Zeitunterschiede im Hinblick auf das Patientenalter zwischen den einzelnen Photoscans wurden durch eine statistische Kovarianzanalyse eliminiert. Das Fehlen von Vergleichsparametern machte eine Aussage zu Signifikanzunterschieden schwierig, allerdings konnten für alle Kinder Verbesserungstendenzen in den jeweils zur Verfügung stehenden und untersuchten Parametern (Cranial Index für Scaphocephalien, anteriores Schädelvolumen für Trigonocephalien und anteriore Symmetrie-Ratio für Plagiocephalien) gezeigt werden.

Damit steht mit der strahlungsfreien und nicht invasiven Methode der dreidimensionalen Photogrammetrie ein wertvolles klinisches Instrument zur Ersteinschätzung und Verlaufsbeobachtung synostotischer Schädeldeformitäten bei Säuglingen zur Verfügung. Mit dieser Arbeit wurde es erstmals möglich, Veränderungen, die im Bereich des Kraniaums durch eine remodellierende chirurgische Maßnahme entstehen, objektiv festzuhalten, anthropometrisch und statistisch zu

untersuchen und letztlich anschaulich für Betroffene und deren Angehörige dreidimensional zu illustrieren.

6 Abstract

The clinical picture of a premature craniosynostosis is a rare occurrence in patients within the first year of life, which leads to an increased deformation, in this period very severe growing infantile head, due to an early closure of one or more sutures. The indication of a surgical treatment up to now is equally less valid normed as the objective acquisition of the outcome of a surgical cranium deformation.

A novel method in the examination of the surface is now also available in everyday clinical specialist centres through the three dimensional (3D) photogrammetry. In this connection it is possible, based on a multi-positional photography, to generate an exact image of the shape of the head before and after remodelling surgery without radiation exposure and artifact-prone antroanthropom examination of an (possible defensive) infant and to semiautomatic analyse the image on the screen, using independent investigation software.

Matter of this existent study was to examine 28 infants with symptoms of a premature craniosynostosis respectively pre and post surgery using photogrammetric techniques and to record and biometric analyse changes of craniofacial indices and volumes due to previous intervention. The sample consisted of 8 scaphocephaly, 12 trigonocephaly and 8 synostosis plagiocephaly patients. Time differences with regards to the age of the patients between the photo scans were eliminated using a statistical analysis of covariance. The lack of comparative parameters made a statement of significant differences difficult, however signs of improvement were evident in all infants and examined parameters (cranial index for scaphocephaly, anterior volume of the skull for trigonocephaly and anterior symmetry-ratio for plagiocephaly).

Thus a radiation-free and non-invasive method of 3D photogrammetry for an initial assessment and observation of cranial deformities provides a valuable clinical tool. With this work it became possible for the first time to objective record changes of the cranium as a result of a remodelling surgical procedure, to anthropometric and statistical examine and finally to clearly illustrate in 3D for the persons concerned and their dependants.

7 Abkürzungsverzeichnis

ASR	Anterior Symmetry Ratio
ASV	Anteriores Schädelvolumen
AVG	Anteriorer Volumen Gewinn
bzw.	beziehungsweise
CBW	Cranial Base Width (Tragus rechts – Tragus links)
ccm	Kubikzentimeter = cm ³
CCT	Cranial Computertomographie
CI	Cranial Index
cm	Zentimeter
CT	Computertomographie
CVAI	Cranial Vault Asymmetry Index
et al.	et alii
IQ	Intelligenzquotient
m	männlich
MBM	mesh based methode
mm	Millimeter
MRI	Magnetic Resonance Imaging
MRT	Magnetresonanztomographie
MW	Mittelwert
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
PC	Personal Computer
PSR	Posterior Symmetry Ratio
Q	Volumen
SSC	Single Suture Craniosynostosis
SSW	Schwangerschaftswoche
VEP	visuell evozierte Potentiale
w	weiblich

x-Achse	Abszisse
y-Achse	Ordinate
z-Achse	Applikate

8 Formelverzeichnis

Cranial Index	$CI = \frac{\text{Breite}}{\text{Länge}} * 100$	[%]
Cranial Vault Asymmetry Index	$CVAI = \frac{(A - B)}{\text{kl. Diagonale}} * 100$	[%]
Anterior Symmetry Ratio	$ASR = \frac{Q_{max}}{Q_{min}}$	
Posterior Symmetry Ratio	$PSR = \frac{Q_{max}}{Q_{min}}$	

9 Literaturverzeichnis

- Alderman, B. W.; Fernbach, S. K.; Greene, C.; Mangione, E. J.; Ferguson, S. W. (1997): Diagnostic practice and the estimated prevalence of craniosynostosis in Colorado. In: *Arch Pediatr Adolesc Med* 151 (2), S. 159–164.
- Alderman, B. W.; Zamudio, S.; Barón, A. E.; Joshua, S. C.; Fernbach, S. K.; Greene, C.; Mangione EJ (1995): Increased risk of craniosynostosis with higher antenatal maternal altitude. In: *International journal of epidemiology* 24 (2), S. 420–426.
- Anand, Amit; Champion, Nicholas J.; Cheshire, James; Haigh, Thomas; Leckenby, James; Nishikawa, Hiroshi; White, Nicholas (2013): Analysis of Cosmetic Results of Metopic Synostosis. In: *Journal of Craniofacial Surgery* 24 (1), S. 304–308. DOI: 10.1097/SCS.0b013e318272dadb.
- Azouz, Jamila-Stephanie (2008): Einfluss der operativen Behandlung auf die Entwicklung von Kindern mit nonsyndromaler Kraniosynostose [Elektronische Ressource]. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hbz:6-65509429011>.
- Barkovich, A. James (2005): Pediatric neuroimaging. 4th ed. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins.
- Berg, K.; Grundmann, U.; Wilhelm, W.; Krier, C.; Mertzlufft, F. (1997): Kraniosynostose-Operationen im Kindesalter. In: *Anesthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther* 32 (3), S. 138–150. DOI: 10.1055/s-2007-995028.
- Bischoff, Henle u. a. (1839-45): Vom Baue des menschlichen Körpers. neue Auflage. Leipzig: Voss (4).
- Bottero, L.; Lajeunie, E.; Arnaud, E.; Marchac, D.; Renier, D. (1998): Functional outcome after surgery for trigonocephaly. In: *Plast Reconstr Surg* 102 (4), S. 952-8; discussion 959-60.
- Bottler, Thomas (2007): Katamnesen nach chirurgischer Versorgung prämaturer Nahtsynostosen. Eine retrospektive Analyse. Universität Tübingen, Wilhelmstr. 32, 72074 Tübingen. Online verfügbar unter <http://tobias-lib.uni-tuebingen.de/volltexte/2007/2783>.
- Branson, Helen M.; Shroff, Manohar M. (2011): Craniosynostosis and 3-dimensional computed tomography. In: *Semin. Ultrasound CT MR* 32 (6), S. 569–577. DOI: 10.1053/j.sult.2011.07.002.
- Brenner, D.; Elliston, C.; Hall, E.; Berdon, W. (2001): Estimated risks of radiation-induced fatal cancer from pediatric CT. In: *AJR Am J Roentgenol* 176 (2), S. 289–296.
- Carmichael, Suzan L.; Ma, Chen; Rasmussen, Sonja A.; Honein, Margaret A.; Lammer, Edward J.; Shaw, Gary M. (2008): Craniosynostosis and maternal smoking. In: *Birth Defect Res A* 82 (2), S. 78–85. DOI: 10.1002/bdra.20426.
- Cinalli, G.; Chumas, P.; Arnaud, E.; Sainte-Rose, C.; Renier, D. (1998): Occipital remodeling and suboccipital decompression in severe craniosynostosis associated with tonsillar herniation. In: *Neurosurgery* 42 (1), S. 66-71; discussion 71-3.
- Cohen, M. Michael; MacLean, Ruth E. (2000): Craniosynostosis. Diagnosis, evaluation, and management. 2nd. New York: Oxford University Press. Online verfügbar unter <http://catdir.loc.gov/catdir/enhancements/fy0602/99032749-d.html>.

- Cohen, M. M., JR (2009): Perspectives on craniosynostosis: sutural biology, some well-known syndromes, and some unusual syndromes. In: *The Journal of craniofacial surgery* 20 Suppl 1, S. 646–651.
- Colak, A.; Tahta, K.; Bertan, V.; Erben, A.; Sağlam, S.; Gürçay, O. et al. (1992): Craniosynostosis: a review of 143 surgically-treated cases. In: *Turk. J. Pediatr.* 34 (4), S. 231–238.
- Collmann, H.; Sörensen, N.; Krauss, J. (1999): Craniosynostosis - treatment, results, and complications. In: *Pediatr Neurosurg* 14, S. 291-322.
- Collmann, H.; Sörensen, N.; Krauss, J.; Mühling, J. (1988): Hydrocephalus in craniosynostosis. In: *Childs Nerv Syst* 4 (5), S. 279–285.
- Da, Costa AC; Anderson, V. A.; Savarirayan, R.; Wrennall, J. A.; Chong, D. K.; Holmes, A. D. et al. (2012): Neurodevelopmental functioning of infants with untreated single-suture craniosynostosis during early infancy. In: *Childs Nerv Syst*. DOI: 10.1007/s00381-011-1660-1.
- David, D. J.; Simpson, D. A. (1982): Surgical indications in single suture craniosynostosis. In: *Neurosurgery* 11 (3), S. 466.
- Delashaw, J. B.; Persing, J. A.; Broaddus, W. C.; Jane, J. A. (1989): Cranial vault growth in craniosynostosis. In: *J. Neurosurg* 70 (2), S. 159–165. DOI: 10.3171/jns.1989.70.2.0159.
- Di Rocco, C.; Velardi, F.; Ferrario, A.; Marchese, E. (1996): Metopic synostosis: in favour of a "simplified" surgical treatment. In: *Childs Nerv Syst* 12 (11), S. 654–663.
- Dufresne, C. R.; McCarthy, J. G.; Cutting, C. B.; Epstein, F. J.; Hoffman, W. Y. (1987): Volumetric quantification of intracranial and ventricular volume following cranial vault remodeling: a preliminary report. In: *Plast. Reconstr. Surg.* 79 (1), S. 24–32.
- Engel, M.; Freudlsperger, C.; Hoffmann, J.; Mühling, J.; Castrillón-Oberndorfer, G.; Seeberger, R. (2012a): Surgical outcome after using a modified technique of the pi-procedure for posterior sagittal suture closure. In: *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery* 40 (8), S. e363. DOI: 10.1016/j.jcms.2012.01.024.
- Engel, Michael; Castrillon-Oberndorfer, Gregor; Hoffmann, Juergen; Freudlsperger, Christian (2012b): Value of preoperative imaging in the diagnostics of isolated metopic suture synostosis: a risk-benefit analysis. In: *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 65 (9), S. 1246–1251. DOI: 10.1016/j.bjps.2012.03.038.
- Fanghänel, Jochen (2004): Suturen - Wachstumszentren des Schädels. In: *Osteopathische Medizin* 5 (1), S. 4. Online verfügbar unter <http://www.zbmed.de/ccmedimages/2004/42243.pdf>.
- Fearon, Jeffrey A. (2003): Rigid fixation of the calvaria in craniosynostosis without using "rigid" fixation. In: *Plast. Reconstr. Surg.* 111 (1), S. 27-38; discussion 39. DOI: 10.1097/01.PRS.0000036261.99248.09.
- Fearon, Jeffrey A.; Singh, Davinder J.; Beals, Stephen P.; Yu, Jack C. (2007): The Diagnosis and Treatment of Single-Sutural Synostoses: Are Computed Tomographic Scans Necessary? In: *Plastic and Reconstructive Surgery* 120 (5), S. 1327–1331. DOI: 10.1097/01.prs.0000279477.56044.55.
- Flohr, Thomas G.; Schaller, Stefan; Stierstorfer, Karl; Bruder, Herbert; Ohnesorge, Bernd M.; Schoepf, U. Joseph (2005): Multi-detector row CT systems and image-

- reconstruction techniques. In: *Radiology* 235 (3), S. 756–773. DOI: 10.1148/radiol.2353040037.
- Freudlsperger, C.; Castrillón-Oberndorfer, G.; Hoffmann, J.; Engel, M. (2013): Isolierte, nichtsyndromale Kraniosynostosen. In: *MKG-Chirurg* 6 (4), S. 301–313. DOI: 10.1007/s12285-013-0364-9.
- Gardner, J. S.; Guyard-Boileau, B.; Alderman, B. W.; Fernbach, S. K.; Greene, C.; Mangione, E. J. (1998): Maternal exposure to prescription and non-prescription pharmaceuticals or drugs of abuse and risk of craniosynostosis. In: *Int J Epidemiol* 27 (1), S. 64–67.
- Garza, Rebecca; Khosla, Rohit (2012): Nonsyndromic Craniosynostosis. In: *Seminars in Plastic Surgery* 26 (02), S. 053–063. DOI: 10.1055/s-0032-1320063.
- Gerszten, P. C.; Gerszten, E. (1995): Intentional cranial deformation: a disappearing form of self-mutilation. In: *Neurosurgery* 37 (3), S. 374–81; discussion 381–2.
- Ghali, G. E.; Sinn, Douglas P.; Tantipasawasin, Sittichai (2002): Management of nonsyndromic craniosynostosis. In: *Atlas Oral Maxillofac Surg Clin North Am* 10 (1), S. 1–41.
- Greene, C S Jr (1998): Pancraniosynostosis after surgery for single sutural craniosynostosis. In: *Pediatr Neurosurg* 29 (3), S. 127–132.
- Haberl, H.; Hell, B.; Zockler, M J K; Zachow, S.; Lamecker, H.; Sarrafzadeh, A. et al. (2004): Technical aspects and results of surgery for craniosynostosis. In: *Zentralbl Neurochir* 65 (2), S. 65–74. DOI: 10.1055/s-2004-816280.
- Hansen, M.; Mulliken, J. B. (1994): Frontal plagiocephaly. Diagnosis and treatment. In: *Clin Plast Surg* 21 (4), S. 543–553.
- Hennekam, R. C.; van den Boogaard, M. J. (1990): Autosomal dominant craniosynostosis of the sutura metopica. In: *Clin. Genet.* 38 (5), S. 374–377.
- Hopf, Hanns Christian (1999): Neurologie in Praxis und Klinik. [in 2 Bänden]. 2 Bände. Stuttgart [u.a.]: Thieme.
- Horch, Hans-Henning; Bier, Jürgen (2007): Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie. 4., vollst. überarb. Aufl. . . München [u.a.]: Urban & Fischer (Praxis der Zahnheilkunde, 10).
- Hudgins, R. J.; Cohen, S. R.; Burstein, F. D.; Boydston, W. R. (1998): Multiple suture synostosis and increased intracranial pressure following repair of single suture, nonsyndromal craniosynostosis. In: *Cleft Palate Craniofac. J.* 35 (2), S. 167–172. DOI: 10.1597/1545-1569(1998)035<0167:MSSAII>2.3.CO;2.
- Jane, J. A.; Edgerton, M. T.; Futrell, J. W.; Park, T. S. (1978): Immediate correction of sagittal synostosis. In: *J. Neurosurg.* 49 (5), S. 705–710. DOI: 10.3171/jns.1978.49.5.0705.
- Jane, John A.; Edgerton, Milton T.; Futrell, J. William; Park, Tae Sung (2007): Immediate correction of sagittal synostosis. In: *Journal of Neurosurgery: Pediatrics* 107 (5), S. 427–432. DOI: 10.3171/PED-07/11/427.
- Junker, Regina Natalie (2002): Nonsyndromale Kraniosynostose. Einfluß des Operationszeitpunktes auf die Entwicklung.
- Kolar, John C. (2011): An Epidemiological Study of Nonsyndromal Craniosynostoses. In: *Journal of Craniofacial Surgery* 22 (1), S. 47–49. DOI:

10.1097/SCS.0b013e3181f6c2fb.

Koszlat, Thorsten (2002): Intrakranielle Volumenbestimmung bei Kindern mit isolierten und syndromalen prämaternen Kraniosynostosen anhand von Schädel-Computertomogrammen. Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg.

Krayenbühl, H.; Brihaye, J.; Loew, F.; Logue, V.; Mingrino, S.; Pertuiset, B. et al. (1974): *Advances and Technical Standards in Neurosurgery*. Vienna: Springer Vienna (*Advances and Technical Standards in Neurosurgery*, 1).

Lajeunie, E.; Le Merrer, M.; Marchac, D.; Renier, D. (1998a): Syndromal and nonsyndromal primary trigonocephaly: analysis of a series of 237 patients. In: *Am J Med Genet* 75 (2), S. 211–215.

Lajeunie, Elizabeth; Le Merrer, Martine; Bonaiti-Pellie, Catherine; Marchac, Daniel; Renier, Dominique (1996): Genetic study of scaphocephaly. In: *Am. J. Med. Genet* 62 (3), S. 282–285. DOI: 10.1002/(SICI)1096-8628(19960329)62:3<282::AID-AJMG15>3.0.CO;2-G.

Lane, L.C (1892): Pioneer craniectomy for relief of mental imbecillity due to premature suturai closure and microcephalus. In: *J.A.M.A.* (18:29).

Lannelongue, M. (1890): De la craniectomie dans la microcéphalie. *Compte-rendu*. In: *Académie des Sciences* (110:1382).

Lentze, M.J; Schaub, J.; Schulte, F.J (2003): *Padiatrie: Grundlagen und Praxis*: Springer. Online verfügbar unter <http://books.google.de/books?id=gz1O1T-W2WIC>.

Lütsch G. (1997): *Fehlbildungen des ZNS 1997*.

Marchac, D. (2005): Kraniofaziale Chirurgie. In: Alfred Berger und Robert Hierner (Hg.): *Plastische Chirurgie*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, S. 1–26.

Marchac, Daniel; Renier, Dominique (1989): Craniosynostosis. In: *World J. Surg* 13 (4), S. 358–365. DOI: 10.1007/BF01660748.

Marchac, Daniel; Renier, Dominique; Arnaud, Eric (2008): Unoperated craniosynostosis patients: correction in adulthood. In: *Plast Reconstr Surg* 122 (6), S. 1827–1838. DOI: 10.1097/PRS.0b013e31818cc388.

McCarthy, J. G.; Glasberg, S. B.; Cutting, C. B.; Epstein, F. J.; Grayson, B. H.; Ruff, G. et al. (1995a): Twenty-year experience with early surgery for craniosynostosis: I. Isolated craniofacial synostosis--results and unsolved problems. In: *Plast Reconstr Surg* 96 (2), S. 272–283.

McCarthy, J. G.; Glasberg, S. B.; Cutting, C. B.; Epstein, F. J.; Grayson, B. H.; Ruff, G. et al. (1995b): Twenty-year experience with early surgery for craniosynostosis: II. The craniofacial synostosis syndromes and pansynostosis--results and unsolved problems. In: *Plast. Reconstr. Surg.* 96 (2), S. 284-95; discussion 296-8.

McKay, Douglas R.; Davidge, Kristen M.; Williams, Susanne K.; Ellis, Lloyd A.; Chong, David K.; Teixeira, Rodrigo P. et al. (2010): Measuring cranial vault volume with three-dimensional photography: a method of measurement comparable to the gold standard. In: *J Craniofac Surg* 21 (5), S. 1419–1422. DOI: 10.1097/SCS.0b013e3181e3181e92a.

Meyer, P.; Renier, D.; Arnaud, E.; Jarreau, M. M.; Charron, B.; Buy, E. et al. (1993): Blood loss during repair of craniosynostosis. In: *Br J Anaesth* 71 (6), S. 854–857.

- Meyer-Marcotty, P.; Bohm, H.; Linz, C.; Kochel, J.; Stellzig-Eisenhauer, A.; Schweitzer, T. (2013): Three-dimensional analysis of cranial growth from 6 to 12 months of age. In: *The European Journal of Orthodontics*. DOI: 10.1093/ejo/cjt010.
- Mühling, Joachim (2000): Kraniofaziale Fehlbildungen. In: *Mund Kiefer GesichtsChir* 4 (S1), S. S068. DOI: 10.1007/PL00022962.
- Müke, R. (1972): Neue Gesichtspunkte zur Pathogenese und Therapie der Kraniosynostose. II. Die klinische neurologische Symptomatik.; A new point of view on the pathogenesis and therapy of craniosynostoses. II. Clinical neurologic symptoms. In: *Acta neurochirurgica* 26 (4), S. 293–326.
- Müke, R.; Meyer-Glauner, M. (1977): Duraspannung und Schädelwachstum. In: *Acta Neurochir (Wien)* 37 (3-4), S. 281–291.
- Nagaraja, S.; Anslow, P.; Winter, B. (2013): Craniosynostosis. In: *Clin Radiol* 68 (3), S. 284–292. DOI: 10.1016/j.crad.2012.07.005.
- Nitsche, M. (2003): Kraniosynostosen: Behandlung mit interdisziplinärem Konzept. In: *Arzteblatt Sachsen* 14 (5), S. 188. Online verfügbar unter <http://www.zbmed.de/ccmedimages/2003/35731.pdf>.
- Norwood, Christopher W.; Alexander, Eben; Davis, Courtland H.; Kelly, David L. (1974): Recurrent and multiple suture closures after craniectomy for craniosynostosis. In: *Journal of Neurosurgery* 41 (6), S. 715–719. DOI: 10.3171/jns.1974.41.6.0715.
- Patriquin, H. B.; Kaplan, P.; Kind, H. P.; Giedion, A. (1977): Neonatal mucopolidosis II (I-cell disease): clinical and radiologic features in three cases. In: *AJR. American journal of roentgenology* 129 (1), S. 37–43.
- Porter, M. (2005): *Windows of the Soul: Physiognomy in European Culture 1470-1780*: Oxford University Press. Online verfügbar unter <http://books.google.de/books?id=o4p6yx0D1PkC>.
- Porthun, J. (2010): Suturen des Hirnschädels. In: *DO* 8 (04), S. 18–22. Online verfügbar unter doi:10.1055/s-0030-1254416.
- Posnick, J. C. (1996): Unilateral coronal synostosis (anterior plagiocephaly): current clinical perspectives. In: *Ann Plast Surg* 36 (4), S. 430–447.
- PRITCHARD, J. J.; Sott, J. H.; GIRGIS, F. G. (1956): The structure and development of cranial and facial sutures. In: *J. Anat* 90 (1), S. 73–86.
- Rachwalski, M.; Wollnik, B.; Kress, W. (2013): Klinik und Genetik syndromaler und nichtsyndromaler Kraniosynostosen. In: *medgen* 25 (3), S. 373-387. DOI: 10.1007/s11825-013-0412-x.
- Reinhart, E.; Reuther, J.; Collmann, H.; Mühling, J.; Zöller, J.; Pistner, H. et al. (1998): Langzeitergebnisse nach Korrekturoperationen am Neuro- und Viszerokranium von Patienten mit einfachen und syndromalen prämaternen Kraniosynostosen. ÉALong-term results after corrective operations on the neuro- and viscerocranium of patients with isolated and syndrome-related premature craniosynostosis. In: *Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie : MKG* 2 (Suppl 1), S. S44-8. DOI: 10.1007/PL00014478.
- Reinhart, Edeltraud (2000): Differenzierte Analyse des kraniofazialen Wachstums bei isolierten und syndromalen prämaternen Kraniosynostosen.
- Reiser, Maximilian; Kuhn, Fritz-Peter; Debus, Jürgen (2011): *Radiologie*. 3., vollst. überarb. u. erw. Aufl. Stuttgart: Thieme (Duale Reihe).

- Renier, D.; Lajeunie, Elizabeth; Arnaud, Eric; Marchac, Daniel (2000): Management of craniosynostoses. In: *Child's Nervous System* 16 (10-11), S. 645–658. DOI: 10.1007/s003810000320.
- Renier, Dominique; Brunet, Laurence; Marchac, Daniel (1987): I.Q. and Craniostenosis. In: Daniel Marchac (Hg.): *Craniofacial Surgery*: Springer Berlin Heidelberg, S. 114–117. Online verfügbar unter http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-82875-1_25.
- Ridgway, Emily B.; Berry-Candelario, John; Grondin, Ronald T.; Rogers, Gary F.; Proctor, Mark R. (2011): The management of sagittal synostosis using endoscopic suturectomy and postoperative helmet therapy. In: *Journal of Neurosurgery: Pediatrics* 7 (6), S. 620–626. DOI: 10.3171/2011.3.PEDS10418.
- Ritvanen, Antti G.; Oliveira, Marcelo Elias; Koivikko, Mika P.; Hallila, Harri O.; Haaja, Juha K.; Koljonen, Virve S. et al. (2013): Mesh-based method for measuring intracranial volume in patients with craniosynostosis. In: *Int J CARS* 8 (5), S. 703–709. DOI: 10.1007/s11548-013-0822-x.
- Schaaf, H.; Pons-Kuehnemann, J.; Malik, C. Y.; Streckbein, P.; Preuss, M.; Howaldt, H-P; Wilbrand, J-F (2010a): Accuracy of three-dimensional photogrammetric images in non-synostotic cranial deformities. In: *Neuropediatrics* 41 (1), S. 24–29. DOI: 10.1055/s-0030-1255060.
- Schaaf, Heidrun; Malik, Christoph Yves; Streckbein, Philipp; Pons-Kuehnemann, Joern; Howaldt, Hans-Peter; Wilbrand, Jan-Falco (2010b): Three-dimensional photographic analysis of outcome after helmet treatment of a nonsynostotic cranial deformity. In: *J Craniofac Surg* 21 (6), S. 1677–1682. DOI: 10.1097/SCS.0b013e3181f3c630.
- Schweitzer, T.; Böhm, H.; Meyer-Marcotty, P.; Collmann, H.; Ernestus, R-I; Krauß, J. (2012): Avoiding CT scans in children with single-suture craniosynostosis. In: *Childs Nerv Syst* 28 (7), S. 1077–1082. DOI: 10.1007/s00381-012-1721-0.
- Scott, JR; Isom, C. N.; Gruss, J. S.; Salemy, S.; Ellenbogen, R. G.; Avellino, A. et al. (2009): Symptom outcomes following cranial vault expansion for craniosynostosis in children older than 2 years. In: *Plastic & Reconstructive Surgery* 123 (1), S. 289-97; discussion 298-9.
- Selber, Jesse; Reid, Russell R.; Chike-Obi, Chuma J.; Sutton, Leslie N.; Zackai, Elaine H.; McDonald-McGinn, Donna et al. (2008): The changing epidemiologic spectrum of single-suture synostoses. In: *Plast. Reconstr. Surg.* 122 (2), S. 527–533. DOI: 10.1097/PRS.0b013e31817d548c.
- Sharma, RameshKumar (2013): Craniosynostosis. In: *Indian J Plast Surg* 46 (1), S. 18. DOI: 10.4103/0970-0358.113702.
- Shillito, J., JR (1992): A plea for early operation for craniosynostosis. In: *Surgical neurology* 37 (3), S. 182–188.
- Shillito, J., JR; Matson, D. D. (1968): Craniosynostosis. A review of 519 surgical patients. In: *Pediatrics* 41 (4), S. 829–853.
- Sloan, G. M.; Wells, K. C.; Raffel, C.; McComb, J. G. (1997): Surgical treatment of craniosynostosis: outcome analysis of 250 consecutive patients. In: *Pediatrics* 100 (1), S. E2.
- Steinhäuser, Emil W. und Eike F. Palluck (Hg.) (1995): Weichteilvorhersage bei bimaxillären Operationen. Fortschritte in der Kiefer- und Gesichtschirurgie. Stuttgart

[u.a.]: Thieme-Verlag.

Tartaro, A.; Larici, A. R.; Antonucci, D.; Merlino, B.; Colosimo, C.; Bonomo, L. (1998): Ottimizzazione e accuratezza diagnostica della Tomografia Computerizzata con tecnica spirale tridimensionale nello studio della craniostenosi. In: *Radiol Med* 96 (1-2), S. 10–17.

Tessier, P. (1967): Ostéotomies totales de la face. Syndrome de Crouzon, syndrme d'Apert: oxycéphalies, scaphocéphalies, turricephalies. In: *Ann Chir Plast* 12 (4), S. 273–286.

Tessier, P. (1971): The definitive plastic surgical treatment of the severe facial deformities of craniofacial dysostosis. Crouzon's and Apert's diseases. In: *Plast. Reconstr. Surg.* 48 (5), S. 419–442.

Trinkaus, Erik (1983): *The Shanidar Neandertals*. New York: Acad. Press.

Tubbs, R. Shane; Salter, E. George; Oakes, W. Jerry (2006): Artificial deformation of the human skull: a review. In: *Clin Anat* 19 (4), S. 372–377. DOI: 10.1002/ca.20177.

van der Meulen, Jacques (2012): Metopic synostosis. In: *Childs Nerv Syst* 28 (9), S. 1359–1367. DOI: 10.1007/s00381-012-1803-z.

van der Meulen, Jacques; van der Hulst, Rene; van Adrichem, Leon; Arnaud, Eric; Chin-Shong, David; Duncan, Christian et al. (2009a): The increase of metopic synostosis: a pan-European observation. In: *J Craniofac Surg* 20 (2), S. 283–286.

van der Meulen, Jacques; van der Hulst, Rene; van Adrichem, Leon; Arnaud, Eric; Chin-Shong, David; Duncan, Christian et al. (2009b): The increase of metopic synostosis: a pan-European observation. In: *J Craniofac Surg* 20 (2), S. 283–286.

Vannier, M. W.; Pilgram, T. K.; Marsh, J. L.; Kraemer, B. B.; Rayne, S. C.; Gado, M. H. et al. (1994): Craniosynostosis: diagnostic imaging with three-dimensional CT presentation. In: *AJNR Am J Neuroradiol* 15 (10), S. 1861–1869.

Vercauteren, M.; van Vyve, M.; Janssen, L.; Hanegreefs, G.; Selosse, P. (1985): Craniostenosis: the importance of the anesthesiologist. In: *Acta Anaesthesiol Belg* 36 (3), S. 168–175.

Versnel, Sarah L.; Mulder, Paul G H; Hovius, Steven E R; Mathijssen, Irene M J (2007): Measuring surgical outcomes in congenital craniofacial surgery: an objective approach. In: *J Craniofac Surg* 18 (1), S. 120–126. DOI: 10.1097/SCS.0b013e31802cf424.

Virchow, Rudolf (1851): *Archiv für pathologische Anatomie und Physiologie und für klinische Medicin*. Berlin.

Virchow, Rudolf (1851/52): Ueber den Cretinismus, namentlich in Franken, und über pathologische Schädelformen. In: *Gesammelte Abhandlungen zur wissenschaftlichen Medicin*.

Vollmer, D. G.; Jane, J. A.; Park, T. S.; Persing, J. A. (1984): Variants of sagittal synostosis: strategies for surgical correction. In: *J. Neurosurg.* 61 (3), S. 557–562. DOI: 10.3171/jns.1984.61.3.0557.

Waldeyer, Anton; Mayet, Anton (1993): *Allgemeine Anatomie, allgemeine Histologie, allgemeine Embryologie, Rücken, Bauch, Becken, Bein*. 16., neubearb. Aufl... Berlin [u.a.]: de Gruyter (*Anatomie des Menschen für Studierende und Ärzte*, 1).

- Weichert, A.; Tucher, E. von; Braun, T.; Kalache, K. (2012): Dreidimensionale Diagnostik kraniofazialer Anomalien. In: *Der Gynäkologe* 45 (10), S. 775–782. DOI: 10.1007/s00129-012-2973-1.
- Weinberg, Seth M.; Naidoo, Sybill; Govier, Daniel P.; Martin, Rick A.; Kane, Alex A.; Marazita, Mary L. (2006): Anthropometric precision and accuracy of digital three-dimensional photogrammetry: comparing the Genex and 3dMD imaging systems with one another and with direct anthropometry. In: *J Craniofac Surg* 17 (3), S. 477–483.
- Whitaker, L. A.; Bartlett, S. P.; Schut, L.; Bruce, D. (1987): Craniosynostosis: an analysis of the timing, treatment, and complications in 164 consecutive patients. In: *Plast. Reconstr. Surg.* 80 (2), S. 195–212.
- Wilbrand, Jan-Falco; Schmidtberg, Kerstin; Bierther, Uta; Streckbein, Philipp; Pons-Kuehnemann, Joern; Christophis, Petros et al. (2012): Clinical classification of infant nonsynostotic cranial deformity. In: *J. Pediatr.* 161 (6), S. 1120–1125. DOI: 10.1016/j.jpeds.2012.05.023.
- Wilbrand, Jan-Falco; Szczukowski, Alexander; Blecher, Joerg-Christoph; Pons-Kuehnemann, Joern; Christophis, Petros; Howaldt, Hans-Peter; Schaaf, Heidrun (2012b): Objectification of cranial vault correction for craniosynostosis by three-dimensional photography. In: *Journal of cranio-maxillo-facial surgery : official publication of the European Association for Cranio-Maxillo-Facial Surgery*. DOI: 10.1016/j.jcms.2012.01.007.
- Wilbrand, Jan-Falco; Wilbrand, Martina; Pons-Kuehnemann, Joern; Blecher, Joerg-Christoph; Christophis, Petros; Howaldt, Hans-Peter; Schaaf, Heidrun (2011): Value and reliability of anthropometric measurements of cranial deformity in early childhood. In: *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery* 39 (1), S. 24–29. DOI: 10.1016/j.jcms.2010.03.010.
- Wong, Julielynn Y.; Oh, Albert K.; Ohta, Eiichi; Hunt, Anne T.; Rogers, Gary F.; Mulliken, John B.; Deutsch, Curtis K. (2008): Validity and reliability of craniofacial anthropometric measurement of 3D digital photogrammetric images. In: *Cleft Palate Craniofac. J.* 45 (3), S. 232–239. DOI: 10.1597/06-175.
- Zöckler, Maja J. K. (2006): Modellgebundene Cranioplastie. Operationstechnik zur Umformung frühkindlicher Schädeldeformitäten unter Verwendung dreidimensionaler Standardformmodelle aus MRT-basierten Rekonstruktionen nicht deformierter Kinder.
- Zockler, M J K (2006): Modellgebundene Cranioplastie [Elektronische Ressource]. Operationstechnik zur Umformung frühkindlicher Schädeldeformitäten unter Verwendung dreidimensionaler Standardformmodelle aus MRT-basierten Rekonstruktionen nicht deformierter Kinder / von Maja J. K. Zöckler. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:188-fudissthesis000000002471-8>.
- Zöller, Joachim E. (2003): Kraniofaziale Chirurgie. Diagnostik und Therapie kraniofazialer Fehlbildungen ; 16 Tabellen. 1. Aufl... Stuttgart [u.a.]: Thieme.

10 Abbildungsverzeichniss

<i>Abbildung 1 Büste der Nofretete im neuen Museum, Berlin (Foto: Philip Pikart).....</i>	<i>4</i>
<i>Abbildung 2 Chinook Kind in einem Gerät zur kraniellen Formgebung (Gerszten und Gerszten 1995)</i>	<i>5</i>
<i>Abbildung 3 Anatomie des Schädels (Azouz 2008)</i>	<i>6</i>
<i>Abbildung 4 Struktur einer Suture nach Pritchard (PRITCHARD et al. 1956)</i>	<i>7</i>
<i>Abbildung 5 Die aus der Fusion einer oder mehrerer Suturen resultierenden Kopfformen (Rachwalski et al. 2013).....</i>	<i>11</i>
<i>Abbildung 6 Die drei Suturensysteme (verändert nach J. H. Scott und A. D. Dixon). Die Pfeile zeigen die Richtung der Wachstumsschübe an. (Fanghänel 2004).....</i>	<i>12</i>
<i>Abbildung 7 Schematische Darstellung eines Skaphozephalus, verursacht durch die Synostose der Sagittalnaht modifiziert nach (Zöller 2003).....</i>	<i>13</i>
<i>Abbildung 8 Fotografische Dokumentation des klinischen Bildes eines Skaphozephalus</i>	<i>14</i>
<i>Abbildung 9 Schematische Darstellung eines Trigonocephalus, verursacht durch die Synostose der Sutura metopica, modifiziert nach Zöller (Zöller 2003)</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 10 Fotografische Dokumentation des klinischen Bildes eines Trigonocephalus</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 11 Schematische Darstellung eines linksseitigen anterioren Plagiocephalus, verursacht durch die Synostosierung der linken Koronarnaht, modifiziert nach Zöller (Zöller 2003)</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 12 Fotografische Dokumentation des klinischen Bildes eines anterioren linksseitigen Plagiocephalus aufgrund der Synostose der Sutura coronalis links.....</i>	<i>18</i>
<i>Abbildung 13 Schematische Darstellung eines posterioren linksseitigen Plagiocephalus durch einseitige Synostosierung der Sutura lambdoidea links, modifiziert nach Zöller</i>	

<i>(Zöller 2003)</i>	19
<i>Abbildung 14 Fotografische Dokumentation des klinischen Bildes eines posterioren Plagiozephalus aufgrund einseitiger Synostose der Sutura Lambdoidea rechts</i>	20
<i>Abbildung 15 Schematische Darstellung des Vorgehens bei operativer Korrektur mittels π-Prozedur (Jane et al. 1978)</i>	27
<i>Abbildung 16 Anthropometron nach Elsholtz (Porter 2005)</i>	31
<i>Abbildung 17 Messung der Schädelbreite mit Messzirkel mit radialer Skalierung. Die Breite wird 1cm oberhalb des otobasis superior Punktes strikt horizontal gemessen. (Wilbrand et al. 2011)</i>	33
<i>Abbildung 18 Messung der Schädellänge mit Messzirkel und radialer Skalierung, gemessen wird von der Glabella zum Opisthocranium parallel zur Frankfurter Horizontalen (Wilbrand et al. 2011)</i>	34
<i>Abbildung 19 Messung der Schädeldiagonale mit Messzirkel und radialer Skalierung. Gemessen wird strikt horizontal vom ipsilateralen punctum fronto-temporal zum kontralateralen lambdoidea Punkt, dem Schnittpunkt der Sutura lambdoidea mit dem Kopfumfang. (Wilbrand et al. 2011)</i>	35
<i>Abbildung 20 Fixierung des kindlichen Kopfes mit dem Daumen im Bereich der Protuberantia zygomatica und dem Mittelfinger/Zeigefinger im Bereich des Nackens durch Assistenz (Wilbrand et al. 2011)</i>	36
<i>Abbildung 21 <u>links</u>: Die Kraniobasis ist mit registrierten und überlagerten Oberflächenpunkten dargestellt; <u>rechts</u>: Wiedergabe der rekonstruierten komplexen Oberflächenstrukturen durch das polygonale virtuelle Netz (Ritvanen et al. 2013)</i>	37
<i>Abbildung 22 Dreidimensional rekonstruiertes CT (Branson und Shroff 2011)</i>	38
<i>Abbildung 23 Schematische Darstellung der Apparatur zur dreidimensionalen photogrammetrischen Erfassung mit Hilfe von 5 synchronisierten Kameras</i>	40

<i>Abbildung 24 Ergebnis eines 3 dimensionalen photogrammetrischen Scans aus verschiedenen Richtungen, dargestellt bei Kraniosynostose</i>	<i>41</i>
<i>Abbildung 25 Vectra 3D Imaging System, Apparatur zur dreidimensionalen photogrammetrischen Erfassung, bestehend aus 5 synchronisierten Kameras</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 26 3D Scan mit Messpunkten: Nasion (N), Subnasale (Sn), Tragus rechts (Tr), Tragus links (Tl).....</i>	<i>46</i>
<i>Abbildung 27 Schematische Darstellung der Ebenen 0 – 11; hervorgehoben ist die Messebene 5 parallel zur Referenzebene 0</i>	<i>50</i>
<i>Abbildung 28 Illustration 3D Scan, Ebene 0 gegeben durch die Punkte Nasion, Tragus rechts, Tragus links, sowie der Messebene parallel zur Ebene 0 auf Höhe der größten occipitalen Krümmung(Meyer-Marcotty et al. 2013)</i>	<i>53</i>
<i>Abbildung 29 Gesamtzahl der Patienten, nach Diagnosen sortiert mit Darstellung des männlichen und weiblichen Anteils.....</i>	<i>56</i>
<i>Abbildung 30 Anzahl der Patienten nach Alter in Monaten und Geschlecht zum Zeitpunkt der Operation</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 31 Häufigkeitsverteilung der vier Synostosen im untersuchten Patientenkollektiv.....</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 32 Cranial Index (CI) bei den Pateinten mit Skaphozephalie (n=8) zum Zeitpunkt vor chirurgischer (Scan 1) und nach chirurgischer Korrektur (Scan 2), die unterschiedlichen Linien entsprechen jeweils einem Patienten</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 33 Mit statistischer Kovarianzanalyse vergleichbar gemachter, korrigierter Cranial Index (CI) der Patienten mit Skaphozephalie (n=8) zum Zeitpunkt vor der chirurgischen (Scan 1) und nach der chirurgischen Korrektur (Scan 2)</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 34 Skaphozephalus: <u>oben</u>: präoperativ; <u>unten</u>: postoperativ.....</i>	<i>60</i>
<i>Abbildung 35 Auswertung und Darstellung des präoperativen (innerer Kreis) und</i>	

<i>postoperativen (äußerer Kreis) Kopfumfangs auf Höhe der Messebene bei Skaphozephalie.....</i>	<i>62</i>
<i>Abbildung 36 Überlagerung des präoperativen und postoperativen Scans mit Blickrichtung von kranial bei Skaphozephalie.....</i>	<i>62</i>
<i>Abbildung 37 Anteriores Schädelvolumen (ASV) bei den Patienten mit Trigonozephalie (n=12), zum Zeitpunkt vor chirurgischer (Scan 1) und nach chirurgischer Korrektur (Scan 2), die unterschiedlichen Linien entsprechen jeweils einem Patienten.....</i>	<i>64</i>
<i>Abbildung 38 Mit statistischer Kovarianzanalyse vergleichbar gemachtes, korrigiertes anteriores Schädel-volumen (ASV) bei Patienten mit Trigonozephalie, (n=12), zum Zeitpunkt vor der chirurgischen (Scan 1) und nach der chirurgischen Korrektur (Scan 2) .</i>	<i>64</i>
<i>Abbildung 39 Trigonozephalus: <u>oben</u>: präoperativ <u>unten</u>: postoperative</i>	<i>65</i>
<i>Abbildung 40 Auswertung und Darstellung des prä- (innerer Kreis) und postoperativen (äußerer Kreis) Kopfumfangs auf Höhe der Messebene bei Trigonozephalie.....</i>	<i>67</i>
<i>Abbildung 41 Überlagerung des präoperativen (innerer Kreis) und postoperativen (äußerer Kreis) Kopfumfangs auf Höhe der Messebene bei Trigonozephalie.....</i>	<i>67</i>
<i>Abbildung 42 Symmetry ratio bei den Patienten mit Plagiozephalie (n=8) zum Zeitpunkt vor chirurgischer (Scan 1) und nach chirurgischer Korrektur (Scan 2), die unterschiedlichen Linien entsprechen jeweils einem Patienten, Rohdaten</i>	<i>69</i>
<i>Abbildung 43 Mit statistischer Kovarianzanalyse vergleichbar gemachte, korrigierte symmetry ratio bei den Patienten mit Plagiozephalie, (n=8), zum Zeitpunkt vor der chirurgischen (Scan 1) und nach der chirurgischen Korrektur (Scan 2)</i>	<i>69</i>
<i>Abbildung 44 anteriorer Plagiozephalus: <u>oben</u>: präoperativ; <u>unten</u>: postoperativ</i>	<i>70</i>
<i>Abbildung 45 Auswertung und Darstellung des präoperativen (innerer Kreis) und postoperativen (äußerer Kreis) Kopfumfangs auf Höhe der Messebene bei Plagiozephalie.....</i>	<i>72</i>

<i>Abbildung 46 Überlagerung des präoperativen und postoperativen Scans mit Blickrichtung von kranial bei Plagiozephalie.....</i>	<i>72</i>
<i>Abbildung 47 MRT 3D Rekonstruktion</i>	<i>80</i>
<i>Abbildung 48 Überlagerung von prä- und postoperativen Scans zur objektiven perioperativen Beurteilung der kraniofazialen Veränderungen, unten Slice 5</i>	<i>81</i>

11 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1 Unterschiedliche Schädeldeformitäten mit betroffenen Schädelnähten.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabelle 2 Mögliche Folgen prämaturer Schädelnahtsynostosen (Horch und Bier 2007)</i>	<i>22</i>
<i>Tabelle 3 Operationsmethode in Relation zum Patientenalter und betroffener Sutur</i> <i>(Haberl et al. 2004).....</i>	<i>26</i>
<i>Tabelle 4 Klassifikation des chirurgischen Resultates nach Whitaker (Whitaker et al.</i> <i>1987).....</i>	<i>30</i>
<i>Tabelle 5 Wachstumsabhängige Parameter (Meyer-Marcotty et al. 2013).....</i>	<i>53</i>
<i>Tabelle 6 Durchschnittliches Operationsalter aller untersuchten Kinder zum Zeitpunkt</i> <i>der OP in Monaten; MW=Mittelwert in Monaten</i>	<i>55</i>
<i>Tabelle 7 Prozentualer Anteil der drei Kraniosynostoseformen am Gesamtgut, sowie</i> <i>Verhältnis von weiblichen zu männlichen Patienten.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabelle 8 Skaphozephalus: Tabellarische Darstellung der präoperativen Analyse mit</i> <i>der Software Cranioform Analytics 3.0.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabelle 9 Skaphozephalus: Tabellarische Darstellung der postoperativen Analyse mit</i> <i>der Software Cranioform Analytics 3.0.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabelle 10 Trigonozephalus: Tabellarische Darstellung der präoperativen Analyse mit</i> <i>der Software Cranioform Analytics 3.0.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabelle 11 Trigonozephalus: Tabellarische Darstellung der postoperativen Analyse mit</i> <i>der Software Cranioform Analytics 3.0.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabelle 12 anteriorer Plagiozephalus: Tabellarische Darstellung der präoperativen</i> <i>Analyse mit der Software Cranioform Analytics 3.0.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabelle 13 anteriorer Plagiozephalus: Tabellarische Darstellung der postoperativen</i> <i>Analyse mit der Software Cranioform Analytics 3.0.....</i>	<i>71</i>

12 Publikationsverzeichnis

Objectification of cranial vault correction for craniosynostosis by three-dimensional photography.

Wilbrand JF, Szczukowski A, Blecher JC, Pons-Kuehnemann J, Christophis P, Howaldt HP, Schaaf H.

Craniomaxillofac Surg. 2012 Feb 23.

13 Erklärung zur Dissertation

„Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe oder Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nichtveröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten sowie ethische, datenschutzrechtliche und tierschutzrechtliche Grundsätze befolgt. Ich versichere, dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, oder habe diese nachstehend spezifiziert. Die vorgelegte Arbeit wurde weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zweck einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt. Alles aus anderen Quellen und von anderen Personen übernommene Material, das in der Arbeit verwendet wurde oder auf das direkt Bezug genommen wird, wurde als solches kenntlich gemacht. Insbesondere wurden alle Personen genannt, die direkt und indirekt an der Entstehung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren. Mit der Überprüfung meiner Arbeit durch eine Plagiatserkennungssoftware bzw. ein internetbasiertes Softwareprogramm erkläre ich mich einverstanden.“

Ort, Datum

Unterschrift

14 Danksagung

Ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. med. Dr. med. dent. H.- P. Howaldt für die Überlassung des Themas.

Mein besonderer Dank gilt Herrn PD Dr. med. Dr. dent. med. Jan-Falco Wilbrand von der Abteilung für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie der mit seinem profunden Fachwissen und hilfreichen Hinweisen wesentlich zum Gelingen beigetragen hat.

15 Tabellarischer Lebenslauf

Der Lebenslauf wurde aus der elektronischen Version der Arbeit entfernt.