

Aus der Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer-, Gesichtschirurgie  
der Universität Würzburg

Direktor: Professor Dr. med. Dr. med. dent. Jürgen Reuther

---

**Metrische Analyse des kraniofazialen Wachstums anhand  
lateraler und frontaler Röntgenaufnahmen  
bei normozephalen Jungen**

Inaugural – Dissertation  
zur Erlangung der Doktorwürde der  
Medizinischen Fakultät  
der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität  
zu Würzburg

vorgelegt von  
**Jochen Weiß**  
aus Coburg

Würzburg, Mai 2003

---

Referentin: Priv.-Doz. Dr. Dr. Edeltraud Reinhart  
Korreferent: Prof. Dr. Thomas Holste  
Dekan: Prof. Dr. Stefan Silbernagl

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Mai 2004

Der Promovend ist Zahnarzt.

---

Für meine Tochter

Laura

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ziel der Arbeit</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Aufbau und Wachstum des Schädels</b> .....	<b>4</b>
<b>3.1</b>	Neurokranium, Viscerokranium.....	<b>5</b>
<b>3.2</b>	Embryonale Schädelentwicklung.....	<b>7</b>
<b>3.3</b>	Ossifikation der Schädelknochen.....	<b>11</b>
<b>3.4</b>	Physiologisches Schädelwachstum.....	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>Methodik</b> .....	<b>20</b>
<b>4.1</b>	Auswahl der Patienten.....	<b>20</b>
<b>4.2</b>	Auswahl der Röntgenbilder, Röntgenaufnahmetechnik .....	<b>22</b>
<b>4.2.1</b>	Kephalometrische Referenzpunkte und Bezugsgrößen .....	<b>22</b>
<b>4.2.2</b>	Bildschärfe .....	<b>24</b>
<b>4.2.3</b>	Kontrast der Röntgenaufnahme .....	<b>25</b>
<b>4.2.4</b>	Schädelposition des Patienten .....	<b>26</b>
<b>4.3</b>	Definition der anatomischen Referenzpunkte .....	<b>28</b>
<b>4.3.1</b>	Referenzpunkte der Norma lateralis .....	<b>29</b>
<b>4.3.1.1</b>	Sella (S) .....	<b>30</b>
<b>4.3.1.2</b>	Nasion (N) .....	<b>31</b>
<b>4.3.1.3</b>	Spina nasalis anterior (Spna) .....	<b>31</b>
<b>4.3.1.4</b>	Subspinale oder A-Punkt .....	<b>31</b>
<b>4.3.1.5</b>	Spina nasalis posterior (Spnp) .....	<b>32</b>
<b>4.3.1.6</b>	Basion (Ba) .....	<b>32</b>
<b>4.3.1.7</b>	Artikulare (Ar) .....	<b>32</b>
<b>4.3.1.8</b>	Gnathion (Gn) .....	<b>33</b>

<b>4.3.1.9</b>	Gonion-Tangentenpunkt ( $t_{go}$ ) .....	33
<b>4.3.1.10</b>	Stirn-Tangentenpunkt ( $T_f$ ) .....	33
<b>4.3.1.11</b>	Stirnprominenzprojektion ( $t_f$ ) .....	33
<b>4.3.2</b>	Referenzpunkt der Norma frontalis .....	34
<b>4.3.2.1</b>	Zygomatico-frontale Sutur (Z-Punkt) .....	35
<b>4.3.2.2</b>	Jochbogen (ZA-Punkt) .....	35
<b>4.3.2.3</b>	Antegonion (Ag) .....	35
<b>4.3.2.4</b>	Nasion (N) .....	36
<b>4.3.2.5</b>	Spina nasalis anterior (Spna) .....	36
<b>4.3.2.6</b>	Referenzpunkt der Unterkiefermitte (M) .....	37
<b>4.3.2.7</b>	Medialer Orbitapunkt (OS) .....	38
<b>4.3.2.8</b>	Definition weiterer wichtiger anatomischer Strukturen .....	38
<b>4.3.2.8.1</b>	Apertura piriformis lateralis .....	38
<b>4.3.2.8.2</b>	Processus palatinus der Maxilla .....	39
<b>4.3.2.8.3</b>	Crista galli .....	39
<b>4.4</b>	Definition der zu messenden Strecken und Winkel .....	41
<b>4.4.1</b>	Norma lateralis .....	41
<b>4.4.1.1</b>	Referenzlinien .....	41
<b>4.4.1.1.1</b>	Horizontale Referenzlinien .....	42
<b>4.4.1.1.1.1</b>	Nasion-Sella-Linie (NSL) .....	42
<b>4.4.1.1.1.2</b>	Nasallinie (NL) .....	43
<b>4.4.1.1.1.3</b>	Mandibularlinie (ML) .....	43
<b>4.4.1.1.2</b>	Vertikale Referenzlinien .....	44
<b>4.4.1.1.2.1</b>	N-Spna-Strecke .....	45
<b>4.4.1.1.2.2</b>	N-A-Strecke .....	45
<b>4.4.1.1.2.3</b>	$T_f$ - $t_f$ -Strecke und N- $t_f$ -Strecke .....	45
<b>4.4.1.1.2.4</b>	$t_{go}$ -Ar-Strecke .....	45
<b>4.4.1.1.2.5</b>	Sella-Basion-Strecke .....	46
<b>4.4.1.2</b>	Winkelmessung .....	46
<b>4.4.1.2.1</b>	SNA-Winkel .....	46

4.4.1.2.2	NSL-NL-Winkel .....	46
4.4.1.2.3	NSL-Ba-Winkel .....	47
4.4.1.2.4	Gn-t <sub>go</sub> -Ar-Winkel .....	47
4.4.2	Norma frontalis .....	48
4.4.2.1	Horizontale Referenzlinien .....	48
4.4.2.1.1	Zygonion-Linie (Z-Linie) .....	48
4.4.1.1.2	Jochbogen-Linie (ZA-Linie) .....	49
4.4.2.1.3	Antegonion-Linie (Ag-Linie) .....	49
4.4.2.2	Vertikale Referenzlinien .....	50
4.4.2.2.1	Median-Sagittale-Referenzlinie (MSR-Linie) .....	50
4.4.2.3	Winkelmessung .....	51
4.5	Durchzeichnung und Ausmessung der Röntgenaufnahmen .....	53
4.5.1	Durchzeichnung .....	53
4.5.1.1	Methodik bei lateralen Röntgenaufnahmen .....	53
4.5.1.2	Methodik bei frontalen Röntgenaufnahmen .....	56
4.5.2	Ausmessung .....	57
4.6	Intra/Inter-observer-Varianz .....	58
4.7	Statistische Auswertung .....	60
4.8	Berechnung des Konfidenzintervalls .....	61
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>62</b>
5.1	Darstellung der ersten 10 Lebensjahre .....	62
5.1.1	Laterale Röntgenaufnahmen .....	62
5.1.1.1	S-N-Strecke: Länge der vorderen Schädelbasis .....	62
5.1.1.2	Spna-Spnp-Strecke: Oberkieferbasis-Länge .....	64
5.1.1.3	t <sub>go</sub> -Gn-Strecke: Länge des horizontalen Unterkieferastes .....	66
5.1.1.4	N-Spna-Strecke: Höhe des vorderen Mittelgesichtes .....	68
5.1.1.5	T <sub>f</sub> -t <sub>f</sub> -Strecke: Höhe der Stirnprominenz .....	70
5.1.1.6	N-t <sub>f</sub> -Strecke: Sagittale Ausdehnung der Stirnprominenz .....	72
5.1.1.7	t <sub>go</sub> -Ar-Strecke: Höhe des aufsteigenden Unterkieferastes .....	74

<b>5.1.1.8</b>	SNA-Winkel .....	76
<b>5.1.1.9</b>	NSL-NL-Winkel .....	78
<b>5.1.1.10</b>	NSL-BA-Winkel .....	80
<b>5.1.1.11</b>	Gn-t <sub>go</sub> -Ar-Winkel .....	82
<b>5.1.1.12</b>	Schädelbasis-Index .....	84
<b>5.1.2</b>	Frontale Röntgenaufnahmen .....	86
<b>5.1.2.1</b>	Bilaterale Zygonion-Strecke (Z-Z-Strecke) .....	86
<b>5.1.2.2</b>	Bilaterale Jochbogen-Strecke (ZA-ZA-Strecke) .....	88
<b>5.1.2.3</b>	Bilaterale Antegonion-Strecke (Ag-Ag-Strecke) .....	90
<b>5.1.2.4</b>	Intercalarabstand .....	92
<b>5.2</b>	Vergleich der eigenen Durchschnittswerte mit den Werten der Bolton- Standards bei lateralen Röntgenaufnahmen .....	94
<b>5.2.1</b>	Datenvergleich MKG-Chir.-Klinik WÜ / Bolton Mittelwert S-N-Strecke bei Jungen .....	94
<b>5.2.2</b>	Datenvergleich MKG-Chir.-Klinik WÜ / Bolton Mittelwert Spna-Spnp-Strecke bei Jungen .....	95
<b>5.2.3</b>	Datenvergleich MKG-Chir.-Klinik WÜ / Bolton Mittelwert N-Spna-Strecke bei Jungen .....	96
<b>5.2.4</b>	Datenvergleich MKG-Chir.-Klinik WÜ / Bolton Mittelwert SNA-Winkel bei Jungen .....	97
<b>5.3</b>	Spezielle Darstellung des Wachstums im ersten Lebensjahr .....	99
<b>5.3.1</b>	Laterale Röntgenaufnahmen .....	99
<b>5.3.1.1</b>	S-N-Strecke: Länge der vorderen Schädelbasis .....	99
<b>5.3.1.2</b>	Spna-Spnp-Strecke: Oberkieferbasislänge .....	101
<b>5.3.1.3</b>	t <sub>go</sub> -Gn-Strecke: Länge des horizontalen Kieferastes .....	103
<b>5.3.1.4</b>	N-Spna-Strecke: Höhe des anterioren Mittelgesichtes .....	105
<b>5.3.1.5</b>	T <sub>f</sub> -t <sub>f</sub> -Strecke: Höhe der Stirnprominenz .....	107
<b>5.3.1.6</b>	N-t <sub>f</sub> -Strecke: Ausdehnung der Stirnprominenz .....	109
<b>5.3.1.7</b>	t <sub>go</sub> -Ar-Strecke: Höhe des aufsteigenden Unterkieferastes .....	111
<b>5.3.1.8</b>	SNA-Winkel .....	113



---

<b>5.3.1.9</b>	NSL-NL-Winkel .....	115
<b>5.3.1.10</b>	NSL-Ba-Winkel .....	117
<b>5.3.1.11</b>	Gn- $t_{go}$ -Ar-Winkel .....	119
<b>5.3.2</b>	Frontale Röntgenaufnahmen .....	121
<b>5.3.2.1</b>	Bilaterale Zygonion-Strecke .....	121
<b>5.3.2.2</b>	Bilaterale Jochbogen-Strecke (ZA-ZA-Strecke).....	123
<b>5.3.2.3</b>	Bilaterale Antegonion-Strecke (Ag-Ag-Strecke).....	125
<b>5.3.2.4</b>	Intercalarabstand .....	127
<b>6</b>	<b>Diskussion</b> .....	129
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	141
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	143

---

## 1 Einleitung

Without the biologic dynamics of natural and contrived changes in craniofacial morphology no occlusion can be improved, no face made more esthetic.“

(R.E. Moyers 1988)

Für Moyers stellt das Verständnis des kraniofazialen Systems in seiner Gesamtheit eine Grundlage ärztlichen Handelns dar.

Eine der wichtigen Voraussetzungen zur Beurteilung des kraniofazialen Wachstums ist dabei die quantitative Analyse der Schädelentwicklung in den ersten Lebensjahren. Die bisher vorliegenden Kenntnisse über das physiologische Schädelwachstum sind teilweise unvollständig. Es ergibt sich daraus die Notwendigkeit, das postnatale Schädelwachstum genauer zu analysieren.

Eines der primären Ziele in der Entwicklung und Anwendung der radiologischen Kephalemetrie zur Erforschung des individuellen Schädelwachstums war die Schaffung von aussagekräftigen und in der Praxis anwendbarer Messgrößen. Der klinische Nutzen solcher Messgrößen bei der diagnostischen Beurteilung liegt im Vergleich der ermittelten Werte des einzelnen Patienten mit physiologischen Normwerten. Standardwerte finden nicht nur im Bereich der Kieferorthopädie, sondern auch auf dem Gebiet der Kieferchirurgie wie auch der kraniofazialen Chirurgie ihre Anwendung. Es ist damit möglich, pathologische Wachstumsvorgänge und morphologische Abweichungen frühzeitig zu erkennen und eventuell therapeutisch zu korrigieren.

Die radiologische Kephalemetrie wurde erstmals im Jahre 1931 von Broadbent und Hofrath in den Vereinigten Staaten und in Deutschland beschrieben (Broadbent et al. 1975).

Über weitere Verfahren zur kephalometrischen Auswertung wurde in den darauf folgenden Jahren von Brodie 1955, Bambha 1961, Singh und Savara 1966 bzw. 1968 und Sekiguchi 1973 berichtet. Aus der Vielzahl der möglichen kephalometrischen Auswertungsverfahren wurde die von Hasund et al. (1973) und Broadbent et al. (1975) sowie Segner und Hasund (1994) angegebene Methodik für die vorliegende Analyse ausgewählt.

## **2 Ziel der Arbeit**

Normwerte auf der Basis einer hinreichend großen Anzahl von Probanden sind die Grundlage für jede kephalometrische Analyse.

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit sollen Normwerte bei einer Anzahl kephalometrischer Größen für das Schädelwachstum bei gesunden Jungen bis zu einem Alter von 10 Lebensjahren ermittelt werden. Dabei wird das von Hasund et al. (1973) und Broadbent et al. (1975) beschriebene Auswertungsverfahren angewendet und die verwendeten kephalometrischen Messpunkte der vorliegenden Analyse zu Beginn genau erläutert.

Desweiteren werden gleich definierte kephalometrische Messgrößen, sowohl Strecken als auch Winkel, der eigenen Analyse mit den amerikanischen Bolton-Standards (Broadbent et al. 1975) verglichen, um die hier ermittelten Durchschnittswerte zu überprüfen bzw. die Normwerte des Bolton-Standards zu bestätigen.

Aufgrund des Fehlens von geeigneten Normwerten der Wachstumsentwicklung des Schädels von Jungen im ersten Lebensjahr wurden, mit einem Zeitintervall von je 3 Monaten, die kephalometrischen Messgrößen einzeln erfasst und deren Mittelwert beschrieben. Dadurch wird die exakte Darstellung der Schädelentwicklung speziell im ersten Lebensjahr möglich.

### **3 Aufbau und Wachstum des Schädels**

Die Morphologie des Kopfskeletts kann nur aus seiner phylogenetischen und ontogenetischen Entwicklung verstanden werden, denn es vereinigen sich mehrere Komponenten verschiedenen morphologischem Ursprungs zu einem geschlossenen Ganzen. Alle diese Komponenten besitzen eine lange und komplizierte Evolution, die am ehesten an Hand der Embryonalentwicklung erklärt werden kann.

Die Entwicklung des Schädels wird gleichermaßen von autonomen, regional begrenzten Wachstumsprozessen wie auch von formgestaltenden Kräften der unmittelbaren Umgebung bestimmt. Zum Verständnis des Schädelbaues ist ebenso eine Analyse der funktionellen Beziehungen der in engster Umgebung befindlichen Organe hilfreich. Erwiesen ist die wechselseitige Beziehung zwischen Schädel und Gehirn sowie zwischen Schädel und Kauapparat. Es wird angenommen, dass der Schädel in seiner jetzigen Form als passives Produkt zwischen zwei verschieden wirksamen Kräften, dem Hirnwachstum und der Aktion der Kau- und Nackenmuskulatur, entsteht (Kahle et al. 1990). Weiterhin beinhaltet der Schädel die großen Sinnesorgane Augen und Ohren und bildet den Anfang des Atem- und Speiseweges.

Es darf aber nicht, wie Untersuchungen früherer Zeiten immer wieder bestätigt haben (van der Klaauw 1948-1952, Hofer 1969, Starck 1954), übersehen werden, dass auch eigene, regional begrenzte und lokalisiert ablaufende Wachstumsprozesse für Formbildung und Gestaltwandel des Kraniaums von größter Bedeutung sind.

Da am Schädel im Vergleich zu Rumpf und Gliedmaßen nur in geringem Ausmaß Muskeln entwickelt sind, bleibt seine Weichteilbedeckung relativ dünn. Das Kopfskelett bestimmt weitestgehend die äußere Form des Kopfes. Individuelle Unterschiede der Kopfform beruhen meist auf Differenzen der Schädelform.

### 3.1 Neurokranium, Viszerokranium

Aufgrund genetischer und topographischer Gesichtspunkte unterscheidet man am Schädel den Hirnschädel, Neurokranium, und den Gesichtsschädel, Viszerokranium. Der Hirnschädel bildet eine geschlossene Schutzkapsel für das Gehirn, er umschließt zugleich Labyrinthorgan und Mittelohr. Seine Knochen sind untereinander und mit dem Gesichtsschädel durch Nähte, Suturen oder Knorpelfugen verbunden. Abgesehen von den Gelenken zwischen den Gehörknöchelchen gibt es zwischen den Schädelknochen nur eine einzige Gelenkverbindung, das Kiefergelenk (Frick et al. 1992).

Der Gesichtsschädel besteht aus dem Nasenskelett und dem Kieferskelett. Die Knochen des Hirnschädels und des Nasenskeletts werden als Ossa cranii, die Elemente des Kieferskeletts als Ossa faciei bezeichnet (Frick et al. 1992).

Weiterhin ist eine Differenzierung der Schädelknochen aufgrund ihrer embryonalen Entwicklung möglich. Hier unterscheidet man eine bindegewebliche Komponente, das Dermatokranium (Exokranium) und eine knorpelig praeformierte Komponente, das Chondrokranium (Endokranium).

Allgemein lässt sich feststellen, dass im Laufe der Stammesgeschichte Elemente des Endokraniums und des Dermatokraniums in vielfältiger Kombination zusammentreten können und ein Synkranium bilden. Die Natur der Einzelemente lässt sich dann nur aus der Ontogenese und Phylogenese erkennen (Langman 1989).

Grundsätzlich sind zwei Entwicklungsvorgänge innerhalb des Schädels festzustellen. Diese zwei entwicklungsgeschichtlichen Anteile beruhen auf der Art der Knochenbildung. Der eine Anteil ist das Chondrokranium, der andere das Desmokraniem. Beim Chondrokranium findet man eine Ersatzknochenbildung, während beim Desmokraniem die einzelnen Knochen sich als Deckknochen aus dem Bindegewebe direkt entwickeln. Die beiden Entwicklungsvorgänge kommen in beiden

funktionellen Anteilen, nämlich dem Neurokranium und dem Viscerokranium vor. Dabei können Anteile, die sich einerseits auf desmaler und andererseits auf chondraler Grundlage entwickeln, miteinander verschmelzen und einen einheitlichen Knochen bilden, wie es z.B. beim Schläfenbein vorkommt (Kahle et al. 1991).



### 3.2 Embryonale Schädelentwicklung

Während der frühen Phase der Embryonalentwicklung zeigt der Kopf im Gegensatz zur segmentalen Gliederung der Leibeswand, die als Metamerie bezeichnet wird, im dorsalen Bereich keine metameren Strukturen. Dieser rostradorsale Kopfteil, dem auch die Anlagen von Riechorgan, Auge und Labyrinthorgan zugehören, ist eine regionale Sonderbildung. Sie ist nicht aus dem Rumpf hervorgegangen und ihr entspricht kein Bauteil des Rumpfes. Nur an der „Kopf-Rumpf-Grenze“ wird Material der vordersten Rumpfsomiten in Mesenchym aufgelöst und trägt später zum Aufbau der Hinterhauptsregion bei (Frick et al. 1992).

Im ventralen bzw. viszeralen Kopfbereich tritt frühembryonal eine andersgeartete segmentale Gliederung auf, die als Branchiomerie bezeichnet wird. Darunter versteht man die serielle, kraniokaudal gerichtete Abfolge bestimmter Bauelemente des Kiemen- oder auch Schlunddarms bei der Kopf- und Halsentwicklung der Wirbeltiere, z.B. die embryonale Ausbildung von Kiemenbögen, Schlundtaschen und Kiemenfurchen (Frick et al. 1992).

Zum Aufbau des Kopfes tragen somit drei Anteile bei:

- ein rostradorsaler Bezirk
- primäres Rumpfmateriale im spinalen Bezirk mit metamerer Gliederung
- ein ventraler Bezirk mit Branchiomerie (Frick et al. 1992)

Branchiomerie und Metamerie der Leibeswand erfolgen unabhängig voneinander, wenngleich sich im Grenzbereich Somiten (dorsal) und Schlundtaschen (ventral) übereinanderschieben und deshalb im gleichen Querschnitt liegen. Auch die Branchiomerie führt vorübergehend oder dauernd zur Ausbildung segmentaler Bauteile. Beispiele dazu sind Branchialbögen, Branchialmuskeln, Kiemenbogenarterien und Branchialnerven.

Die serielle Abfolge der Branchialnerven hat jedoch nichts mit der segmentalen Anordnung der Spinalnerven zu tun. Kopf und Rumpf sind verschieden organisiert. Kopfbildung (Kephalogenese) und Rumpfbildung (Notogenese) sind voneinander prinzipiell unabhängige Prozesse (Frick et al. 1992).

Der Schädel entwickelt sich im Mesenchym um das Zentralnervensystem aus knorpeligen Anlagen, dem Endokranium, und aus Deckknochen, dem Exokranium. Die knorpeligen Anlagen ossifizieren in der Ontogenese als Ersatzknochen und vergrößern sich durch Knochenzuwachs. Einzig allein im Nasenskelett bleiben Knorpelteile als Nasenknorpel erhalten (Frick et al. 1992).

Am Hirnschädel entstehen auf knorpeliger Grundlage, d.h. als Ersatzknochen, die Schädelbasis mit Labyrinthkapsel basal vom Gehirn und eine schmale Spange, das sog. Tectum, das die Medulla oblongata dorsal umfasst. Auf bindegewebiger Grundlage entwickeln sich als Deckknochen das Schädeldach und Teile der Schädelseitenwand (Kahle et al. 1991). Vom Zentrum der Schädelbasis gehen gleichfalls knorpelig präformierte Fortsätze aus. Die Ala temporalis des Knorpelschädels wird zum späteren großen Keilbeinflügel des knöchernen Schädels, die Ala orbitalis zum kleinen Keilbeinflügel. Die Fortsätze umwachsen die meisten Hirnnerven und umgrenzen deren Austrittsstellen (Frick et al. 1992).

Am Gesichtsschädel entwickeln sich als Deckknochen die Knochen des Kieferskeletts und einige Elemente des Nasenskeletts wie das Os lacrimale, Os nasale und der Vomer. In der Entwicklung des Unterkiefers wird zunächst eine primäre Knorpelspange, die aus dem ersten Viszeralbogen hervorgeht, gebildet. Diese wird auch als Meckelscher Knorpel bezeichnet. Im weiteren Wachstum entsteht lateral dieses Knorpels der definitive Unterkiefer, die Mandibula. Durch sekundäre Anlagerung der Mandibula an den Schuppenteil des Schläfenbeines kommt es zur Bildung des späteren sekundären Kiefergelenks. Der größte Teil des Meckelschen Knorpels wird vollständig zurückgebildet (Frick et al. 1992).

Allein der dorsale Anteil, das frühere primäre Kiefergelenk, bleibt als Hammer-Amboß-Gelenk erhalten und bildet einen Teil des schalleitenden Apparates des Mittelohres. Aus dem proximalen Ende des zweiten Viszeralbogens entsteht das dritte Gehörknöchelchen, der Steigbügel, Incus. Der Rest des zweiten Bogens bildet zunächst eine lange Knorpelspange, den sog. Reichertschen Knorpel, dessen Endstück ossifiziert und als Processus styloideus mit dem Schläfenbein verschmilzt. Der mittlere Teil wird später zum Ligamentum styloideum zurückgebildet. Der distale Abschnitt ossifiziert zum kleinen Zungenbeinhorn (Langman 1998).

Die ersten Anlagen für die Gesichtsstrukturen sind um die ektodermale Mundbucht, das Stomodeum, angeordnet. Kaudal vom Stomodeum kann man die Unterkieferwülste erkennen, seitlich die Oberkieferwülste und kranial eine leichte runde Erhebung, den Stirnfortsatz (Langman 1998).

Der Oberkieferwulst und der Unterkieferwulst stammen beide vom ersten Pharyngealbogen ab. Auf beiden Seiten des Stirnfortsatzes liegt über dem Stomodeum eine Verdickung des Oberflächenektoderms, die Riechplakode. Die Riechplakode, die Ausgangspunkt für die Entwicklung des Riechepithels ist, wird von zwei schnellwachsenden Leisten, dem lateralen und dem medialen Nasenwulst, umgeben. Dort, wo der laterale und der mediale Nasenwulst und später der Oberkieferwulst aneinandergrenzen, bildet sich zwischen dem Boden der entstandenen Riechgrube und dem Dach der Mundhöhle ein epithelialer Saum, die sog. Hochstetter-Membran aus, die sich kurz nach ihrer Bildung durch einwachsendes Mesenchym auflöst.

Im weiteren Verlauf können Lippen- und Gaumenspalten auftreten. Dabei kann man das Foramen incisivum als Grenzlinie zwischen den vorderen und hinteren Spaltenmissbildungen betrachten. Diejenigen, die vor dem Foramen incisivum liegen, beruhen auf einer ungenügenden Mesodermeinwanderung und einem echten Gewebsabbau im Bereich der Furchen zwischen den medialen Nasenwülsten und den Oberkieferwülsten. Diejenigen, welche hinter dem Foramen incisivum liegen, entstehen,

wenn die Gaumenplatten sich nicht vereinigen. Diese können ebenso als sekundäre Gaumenspalten bezeichnet werden. Die dritte Kategorie betrifft Spalten, die sowohl vor wie auch hinter dem Foramen incisivum liegen. Da sich die Gaumenplatten etwa eine Woche nach der Ausbildung der Oberlippe aneinanderlegen, und da der Verschlussmechanismus der Lippe ein ganz anderer als beim sekundären Gaumen ist, müssen vordere und hintere Spalten als voneinander unabhängige Missbildungen angesehen werden (Langman 1989).

Im weiteren Verlauf wachsen die Oberkieferwülste in medialer Richtung weiter und drücken die medialen Nasenwülste gegen die Mittellinie. Die beiden medialen Nasenwülste vereinigen sich an der Oberfläche und in der Tiefe. Die Gebilde, die aus den miteinander verschmolzenen Wülsten entstehen, entwickeln sich zusammen zum Zwischenkiefersegment. Dieses besteht aus einem Lippenanteil, einem Oberkieferanteil und einem Gaumenanteil, der den dreieckigen primären Gaumen bildet (Langman 1989).

Kranial geht das Zwischenkiefersegment in den rostralen Anteil des Nasenseptums über, das aus dem Stirnfortsatz entsteht. Der Hauptanteil des definitiven Gaumens wird von zwei simsähnlichen Fortsätzen des unteren Abschnittes der Oberkieferwülste gebildet. Diese Fortsätze, die Gaumenplatten, sind beiderseits schräg nach abwärts gerichtet, richten sich auf und nehmen dann eine horizontale Lage ein. Sie vereinigen sich miteinander in der Mittellinie und bilden so den sekundären Gaumen. Vorn verschmelzen die Gaumenplatten mit dem dreieckigen primären Gaumen. Das Foramen incisivum liegt etwa an der Stelle, an der primärer und sekundärer Gaumen zusammenstoßen. Während die Gaumenplatten miteinander verschmelzen, wächst das Nasenseptum nach unten und vereinigt sich von kranial mit dem neu geformten Gaumen (Langman 1989).

### 3.3 Ossifikation der Schädelknochen

Die Verknöcherung des menschlichen Schädels beginnt mit dem Auftreten der Deckknochen ab der sechsten Schwangerschaftswoche (Langman 1989). Erste Knochenbälkchen sind in der Mandibula, kurz darauf in der Maxilla bei Embryonen mit einer Scheitel-Steiß-Länge von 15 mm nachweisbar. Mit einer Größe von 37 mm sind alle weiteren Deckknochen angelegt (Augier 1931).

Der erste Knochenkern im Chondrokranium entsteht im ersatzknöchernen Teil der Hinterhauptsschuppe bei Embryonen von etwa 30 mm Scheitel-Steiß-Länge. Am Ende des dritten Schwangerschaftsmonats sind in allen Ersatzknochen Ossifikationszentren ausgebildet (Augier 1931).

Die meisten Schädelknochen entstehen von zwei oder mehreren Knochenkernen aus, die miteinander verschmelzen. Augier (1931) konnte am Os sphenoidale sogar 18 bis 19 Einzelossifikationszentren nachweisen. Ersatz- und Deckknochen schließen sich im Laufe der Ontogenese zur Einheit „Schädel“ zusammen.

Augier (1931) beschreibt das Auftreten der ersten Knochenbälkchen in den Deckknochen in bezug auf die Scheitel-Steiß-Länge wie folgt:

1. Mandibula, kurz danach Maxilla; 15 mm
2. Palatinum, Zygomaticum, Squamosum, Frontale; 25 mm
3. Goniale, Pterygoid, Vomer; 30 mm
4. Tympanicum, Nasale, Lacrimale, Interparietale; 32-34 mm
5. Parietale; 37 mm

Weiterhin gibt Augier (1931) das Auftreten der ersten Knochenkerne in den Ersatzknochen wiederum gemessen an der Scheitel-Steiß-Länge wie folgt an:

1. Supraoccipitale; 30 mm
2. Exoccipitale, Alisphenoid; 37 mm
3. Basioccipitale; 51 mm
4. Orbitosphenoid; 60 mm Basisphenoid; 65 mm
5. Praesphenoid; 90 mm
6. Petrosus, Incus; 110 mm
7. Malleus; 117 mm
8. Maxilloturbinale, Ossicula Bertini, Ethmoid; 130 mm
9. Tapes; 140 mm

Die Deckknochen des Schädels entstehen getrennt voneinander und wachsen erst im Laufe der Entwicklung aufeinander zu. Beim Neugeborenen finden sich daher zunächst an den Ecken der Knochen nur bindegewebig überbrückte Flächen, die sog. Fontanellen. In der großen Fontanelle treffen sich die beiden Stirn- und Scheitelbeine, in der kleinen Fontanelle die beiden Scheitelbeine und das Hinterhauptbein (Langman 1989).

Die Keilbeinfontanelle liegt zwischen dem vorderen unteren Winkel des Os parietale und dem Oberrand der Ala major des Os sphenoidale. Die Fontanellen schließen sich erst nach der Geburt, und zwar verschmilzt als erster der Fonticulus posterior im dritten Lebensmonat. Der Fonticulus sphenoidales schließt sich im sechsten und der Fonticulus anterior im 36. Lebensmonat (Kahle 1991).

Mit zunehmendem Flächenwachstum der Deckknochen verbleiben schließlich schmale Bindegewebsverbindungen, die Schädelnähte oder auch Suturen an den Knochengrenzen frei, die ein weiteres Wachstum des Schädels gestatten. Erst bei einer vollständigen Verschmelzung, einer Synostosierung, wird das Wachstum eingestellt (Kahle 1991).

Zwischen einigen Knochen, bedingt durch knorpelige Präformation (Chondrokranium),

befinden sich Knorpelhaften, die sog. Synchrondrosis cranii. Etwa im 18. Lebensjahr verknöchert (Os tribasilare) die Synchrondrosis spheno-occipitalis. Im Bereich des Keilbeinkörpers befindet sich die Synchrondrosis intersphenoidalis, die frühzeitig ossifiziert, während zwischen dem Keilbein und dem Siebbein die Synchrondrosis sphenometmoidalis erst zur Zeit der Reife synostosiert.

Außerdem gibt es die, während des ganzen Lebens erhalten bleibenden Knorpelhaften zwischen der Pars petrosa des Os temporale und den benachbarten Knochen, die Synchrondrosis sphenopetrosa und die Synchrondrosis petro-occipitalis (Frick et al. 1992).

Mit zunehmendem Alter verknöchern diese Nähte in einer bestimmten Reihenfolge. Zwischen dem Stirn- und den beiden Scheitelbeinen verläuft die Kranznaht, Sutura coronalis, quer über das Schädeldach. Die sagittale Pfeilnaht, Sutura sagittalis, verläuft zwischen den beiden Ossa parietalia in der Medianebene. An die Sagittalnaht schließen sich nach hinten die beiden schräg verlaufenden Schenkel der Sutura lambdoidea an. An der Schädelseitenwand tritt an die Stelle der Fonticula sphenoidales die Sutura sphenoparietalis (Kahle et al. 1991).

Die Pars squamosa des Os temporale lagert sich dem Unterrand des Os parietale in einer nach oben konvexen Linie an und bildet die Schuppennaht, Sutura squamosa (Kahle et al. 1991). Zwischen den ursprünglich zwei Ossa frontalia verläuft die Interfrontalnaht, Sutura metopica, die aber schon sehr früh im 2. Lebensjahr verknöchert. Alle anderen Schädelnähte synostosieren erst jenseits des 40. Lebensjahres (Frick et al. 1992).

### 3.4 Physiologisches Schädelwachstum

Wachstum des Schädels bedeutet zunächst einmal primäre Größenzunahme. Dabei spielt die Vergrößerung der tragenden Knochenteile eine entscheidende Rolle. Hunter wies aber schon 1771 in einem Experiment nach, dass es am Schädelknochen kein interstitielles Knorpelwachstum nach dem Modus der chondralen Ossifikation (Frick 1992) im Bereich der Metaphysen gibt (Sarnat 1986). Vielmehr wird vermutet, dass das Wachstum eines Knochens von seiner Oberfläche ausgehen muss. Hier sind drei verschiedene Strukturen zu finden, von denen aus die Knochenbildung erfolgen kann.

Es sind dies erstens die periostbedeckte Oberfläche eines einzelnen Knochens, zweitens die zwischen zwei Knochen liegenden Syndesmosen und drittens der zwischen zwei Knochen lokalisierte Knorpel bzw. das einem Knochen aufliegende Knorpelgewebe (Synchondrosen) (Kahle 1991).

Grundsätzlich ist die Ursache jeglichen Wachstums auf den Einfluss der somatotropen Hormone, anaboler Steroide und der Schilddrüsenhormone zurückzuführen (Vanwyk 1975). Während die Funktion dieser Stoffe auf zellulärer Ebene bekannt ist, ist der Wirkort bislang umstritten.

Theoretisch gibt es drei verschiedene Möglichkeiten:

1. Knorpel- und Knochengewebe wächst primär, Weichgewebe folgt dann der knöchernen Struktur (klassische Theorie).
2. Weichgewebe gibt das Wachstum vor, die Knochenstruktur folgt (Theorie der funktionellen Matrix).
3. Wachstumshormonwirkung beeinflusst gleichermaßen die Knochen- und Weichgewebsbildung (Theorie der simultanen Wachstumssteuerung) (Carlson et al. 1985).



Die klassische Theorie der Größenzunahme geht davon aus, dass das Knorpel- und Knochenwachstum im Vordergrund steht. Das Flächenwachstum der platten Knochen des Schädeldaches erfolgt an den Rändern in den Schädelnähten. Zur gleichen Zeit vollziehen sich fein abgestimmte An- und Abbauprozesse an Außen- und Innenfläche dieser Knochen und führen die für den größer werdenden Schädel notwendige Ummodellierung herbei. Der beim Neugeborenen noch einschichtige Knochen der Schädelkalotte wird dreischichtig. Das Knochenwachstum wird hormonell beeinflusst (Frick 1991).

Moss formulierte 1954 die Theorie der funktionellen Matrix als primären Wachstumsauslöser. Im Mittelpunkt steht dabei der Gedanke, dass physiologische Funktionen jeglicher Art das Schädelwachstum induzieren (Moss 1954). Moss geht davon aus, dass sich primär das Weichgewebe aufgrund seiner Funktion entwickelt und das Knochengerüst sekundär folgt (Moss 1960). Dennoch stehen beide Gewebearten in einer engen Funktionsgemeinschaft und bilden zusammen als Ganzes den Schädel.

Insgesamt bestätigt auch Moss die Bedeutung der Gene, welche die Größenzunahme und Transformation kontrollieren. Doch glaubt er, dass ihre Wirkung primär auf die verschiedenen Arten von Weichgewebe erfolgt, was gleichzeitig bedeutet, dass das Knochen- und Knorpelwachstum nicht autonom ist, sondern einen Sekundäreffekt (Translationswachstum) darstellt (Moss 1976).

Die Theorie des simultanen Wachstums vereinigt gewissermaßen beide zuvor genannten Theorien auf sich. Sie geht folglich von einer gleichmäßigen, harmonisch aufeinander abgestimmten Knochen-Knorpel-Weichgewebeentwicklung aus. Während einerseits gesagt wird, dass nur die primäre Anlage eines Schädelknochens genetisch bedingt ist, die weitere Entwicklung jedoch durch die unmittelbar angrenzenden Gewebe gesteuert wird (Blehschmidt 1976), geht man andererseits von der Überzeugung aus, dass nicht nur die Anlage selbst, sondern ebenso die Grundgröße und -form der entsprechenden anatomischen Struktur genetisch determiniert sind

Goose 1982). Die definitive Morphogenese soll jedoch vom umgebenden Gewebe und von der Funktion bestimmt werden (Johnston 1986), wobei man zum Teil noch zwischen Ober- und Unterkiefer (Hauser 1976) bzw. zwischen Schädel- und Skelettknochen differenzieren kann (Moyers 1988).

Darüber hinaus beurteilt man die Rolle des dominierenden Gewebes auch zeitabhängig. Bis zum vierten Lebensjahr soll das Wachstum im Bereich der Synchronosen und der Syndesmosen ausschlaggebend für die Schädelentwicklung sein. Danach soll die funktionelle Matrix dominieren und die knorpeligen und faserigen Knochennähte lediglich als Anpassungsgrößen funktionieren.

Dies bedeutet, dass die funktionelle Matrix zu einer Translation der makroskopischen und mikroskelettalen Einheiten führt. Der daraus resultierende zunehmende Abstand zwischen den einzelnen Schädelknochen, aufgrund der Volumenzunahme des Gehirns, wird durch Knochenneubildung so lange verringert, bis ein stabiler Endzustand erreicht ist.

Die Wachstumsfaktoren, die die Ausbildung des Schädels in seiner Größe und Form bestimmen, können nicht getrennt voneinander betrachtet werden. Es wird angenommen, dass den Schädelnähten als Zone des Randwachstums zwischen den einzelnen Knochenterritorien eine entscheidende Rolle zukommt. Ebenso sind Knochenapposition und -resorption von wesentlicher Bedeutung. Das Auseinanderweichen der Knochenschuppen aufgrund der Volumenzunahme des Gehirns im Bereich der Nähte und ständige Knochenneubildung an deren Kanten dürfen nicht außer Acht gelassen werden.

Inwieweit nun das Schädelwachstum von den Suturen abhängt, wird unterschiedlich beurteilt. Müke (1972) vermutet, dass das Nahtwachstum von der Spannung der Schädelkapsel bzw. vom intrakraniellen Druck bestimmt wird. Im Tierversuch konnte ein zeitlich begrenztes Wachstum der Schädelnähte nachgewiesen werden. Im

Gegensatz dazu glaubte Scott (1956), wie auch Massler und Schour (1951), dass die Suturen das Schädelwachstum nicht initiieren können, sondern dass das Flächenwachstum an den Nähten und der remodellierende Knochenumbau eher vom Periost und von der Dura ausgeht. Troitzky (1932) ging gleichfalls davon aus, dass die Suturen quasi im inneren Schädelperiost vorgebildet sind und durch Faktoren bestimmt werden, die außerhalb des Wachstums und der Mechanik des Einzelknochens liegen. Dazu konnte Troitzky (1932) und Powiertowski (1974) im Tierexperiment nachweisen, dass es nach der Resektion von Schädelknochen einschließlich der Naht, unter Schonung des endokranialen Periosts, zur vollständigen Regeneration des Knochens kommt und die Suturen wieder an ihren ursprünglichen Stellen ausgebildet werden.

Aufgrund dieser Ergebnisse kann gefolgert werden, dass die Schädelnähte, anders als die Epiphysenfugen, keine aktiven Wachstumszonen darstellen und die genetische Wachstumsdetermination nicht allein auf die Suturen beschränkt sein kann.

Laut Moss (1957) ist der hydrostatische Druck des Schädelinhalts der entscheidende Stimulus für das Wachstum des Neurokraniums. Ob der Ursprung dieses Druckes physiologischer oder pathologischer Natur ist, bleibt dabei ohne Bedeutung. Experimentelle Befunde von Young (1959) als auch klinische Beobachtungen belegen eine Anpassung der Schädelform an den Schädelinhalt. Beispielhaft stehen hierfür der Hydrocephalus und die Mikrocephalie.

Das Flächenwachstum an den Schädelnähten erscheint als der wichtigste Wachstumsmechanismus in den ersten vier Lebensjahren. In der gleichen Zeit kommt es beim Gehirn zu dessen relativ größter Volumenzunahme (Kokich 1986). In der darauffolgenden Entwicklung wird das Schädelwachstum eher von Knochenapposition und –resorption dominiert.

Die phylogenetische Entwicklung der Schädelbasis wird zum großen Teil von der Entwicklung und vom Wachstum des Gehirns bestimmt. Es konnte aber auch von Koski

und Rönning (1970) die Fähigkeit eines autonomen Wachstums der Schädelbasis nachgewiesen werden, das auf der autonomen proliferativen Fähigkeit der Synchronosen der Schädelbasis beruht. Als Beleg kann hier das klinische Erscheinungsbild des Anencephalus angesehen werden, bei dem trotz fehlender Großhirnentwicklung die Schädelbasis annähernd normal ausgebildet wird.

Weiterhin darf aber auch nicht die Einflussnahme der Schädelbasis auf die Entwicklung der viszeralen Schädelanteile außer Acht gelassen werden. Die Entwicklung des Os sphenoidale als zentraler Schädelknochen übt hierbei einen besonderen Einfluss auf die Ausformung des prominenten Gesichts aus. Broadbent et al. konnten in den Bolton-Wachstumsanalysen (1975) eine antero-caudale Rotation des Gesichts während seiner Entwicklung nachweisen. Die funktionell unterschiedlichen Bauteile des Kopfes zeigen auch in den einzelnen Entwicklungsphasen altersabhängig abweichende Proportionen. Da das Gehirn ontogenetisch früh entsteht und rasch wächst, der Kauapparat aufgrund des späteren Funktionsbeginns zunächst langsamer entsteht, überwiegt in der frühen Entwicklungsphase der Hirnteil des Kopfes gegenüber dem Gesichtsteil erheblich. Das Verhältnis der Volumina von Hirn- und Gesichtsteil des Kopfes beträgt beim Neugeborenen 8:1, beim Erwachsenen 2:1. Das Wachstum des Gesichts- und des Kieferschädels hängt weitgehend von der Ausbildung des Gebisses ab und steht in enger Korrelation zum Durchtritt der Milchzähne, zum Zahnwechsel und zum Erscheinen der Zuwachszähne. So ist beim Kieferschädel weit nach dem Abschluss des Hirnwachstums, vor allem in der Pubertät, ein beachtlicher Wachstumsschub zu beobachten. Im allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass sich das Wachstum der Schädelkalotte am Hirnwachstum orientiert, während die Wachstumsdynamik des Gesichtsschädels weit mehr parallel zu der des übrigen Skeletts verläuft (Kreiborg 1986).

Die Formgestaltung des Schädels wird von mehreren verschiedenen Faktoren beeinflusst, so z.B., dem Gehirn, dem Kauapparat, den Sinnesorganen des Kopfes und

dem Atemweg. Der knöcherne Schädel entsteht als passives Gerüst, geformt von den benachbarten Organen und stellt die Synthese der verschieden wirkenden Faktoren dar.

Neurokranium und Viszerokranium müssen daher als geschlossenes anatomisches System betrachtet werden, bei dem die Fehlentwicklung eines Teils nicht ohne Auswirkung auf den Gesamtschädel bleiben kann.

## **4 Methodik**

### **4.1 Auswahl der Patienten**

Zunächst wurden in der Röntgenabteilung der Universitätskinderklinik entsprechend jedem Lebensjahr seitliche und frontale Schädelaufnahmen von 30 gesunden Jungen ausgewählt, die Grundlage der vorliegenden Analyse bilden sollten. Dabei war darauf zu achten, dass alle Patienten in bezug auf ihre Körpergröße und ihr Körpergewicht normal entwickelt waren und ein unauffälliges Wachstumsverhalten aufwiesen. Des Weiteren durften in der Krankengeschichte keine Anhaltspunkte vorliegen, die auf eine Störung des skelettalen Wachstums, insbesondere des Schädelwachstums, deuteten.

Um dieser Forderung Rechnung zu tragen, einen Standard für kraniofaziale laterale und frontale Strecken- und Winkelmaße zu ermitteln, wurden ausschließlich Kinder aus dem Einzugsbereich der Universitätsklinik vermessen. Sie gehören alle der kaukasischen Rasse an. Patienten, die anderen Volksgruppen angehören, wie z.B. der negroiden, der mongoloiden oder einer orientalischen Rasse, wurden in die kephalometrische Analyse nicht mit einbezogen.

Die Mehrzahl der Kinder wurde aufgrund verschiedenster Verdachtsdiagnosen, wie beispielsweise Verdacht auf Schädelfraktur nach Sturz, in der Röntgenabteilung der Universitätskinderklinik untersucht. Für die vorliegende Analyse wurden Röntgenaufnahmen ausschließlich aus den Jahren 1982 bis 1996 verwendet.

In dieser Arbeit werden ausschließlich männliche Kinder analysiert. Insgesamt wurden mehr als 621 Kinder in die Auswertung einbezogen, von denen jeweils ein laterales und ein frontales Röntgenbild vermessen wurde. Um eine hinreichend große Sicherheit bei der Bestimmung von Durchschnittswerten und Normbereichen zu erhalten, sollten im

Schnitt 30 Kinder pro Lebensjahr und Geschlecht erfasst werden (Horbitz 1996). Um die statistischen Ergebnisse nicht zu verfälschen, durfte pro Kind nur jeweils ein laterales und frontales Röntgenbild ausgewertet werden, auch wenn mehrere Aufnahmen von einem Kind vorlagen, die zu unterschiedlichen Zeiten angefertigt wurden.

## **4.2 Auswahl der Röntgenbilder, Röntgenaufnahmetechnik**

Bei der Auswahl der verwendeten Schädelaufnahmen kam es zunächst darauf an, qualitativ hochwertige Röntgenbilder auszuwählen. Wichtig dabei war, auf einen relativ weichen Kontrast und eine optimale Zeichnungsschärfe zu achten. Weiterhin durften die Aufnahmen keine Unschärfe aufweisen, was gerade bei den sehr jungen Patienten in den ersten Lebensjahren nur mit hohem Aufwand erreicht werden kann. Im Gesamten sollten die für die vorliegende Untersuchung wichtigen anatomischen Strukturen, die im Folgenden noch definiert werden, klar und zweifelsfrei erkennbar sein, um die Fehlerquote bei der Durchzeichnung und Ausmessung möglichst gering zu halten.

### **4.2.1 Kephalometrische Referenzpunkte und Bezugsgrößen**

Alle Röntgenaufnahmen wurden unter gleichen technischen Bedingungen gefertigt, d.h. für jedes Bild wurde die selbe Röntgenanlage verwendet. Der Focus-Film-Abstand betrug immer 120 cm, sowohl bei den lateralen wie auch den frontalen Aufnahmen.

Der Abstand der Schädelmedianebene zum Film kann bei lateralen Röntgenaufnahmen im Durchschnitt mit 12 cm angegeben werden. Bei den frontalen Aufnahmen ist zu erwähnen, dass sich alle für die Auswertung wichtigen Strukturen in der Nähe zur Tuberebene befinden. Somit haben die hier relevanten anatomischen Strukturen alle in etwa den gleichen Abstand, nämlich ca. 12 cm ( $d_f$ ), zur Filmplatte und werden im gleichen Maßstab zueinander auf dieser abgebildet.

Die Aufnahmedaten waren mit einer Belichtungszeit von 0,1s, bei einer Röhrenspannung von 60 bis 70 kV sowie bei 64 bis 70 mAs (mC) festgelegt.



Aufgrund der Divergenz der Röntgenstrahlen kann nicht jeder Teil des Kopfes vom Zentralstrahl erfasst werden. Dies hat zur Folge, dass die Abbildung des Schädels auf dem Film im Vergleich zum Original vergrößert dargestellt wird. Weiterhin ist zu beachten, dass aufgrund der Morphologie nicht alle Teile des Schädels den exakt gleichen Abstand zur Filmebene haben können. Daraus ergibt sich ein unterschiedlicher Vergrößerungsfaktor für filmferne und filмнаhe Strukturen. Bei den lateralen Röntgenaufnahmen liegen alle Messpunkte mit Ausnahme des Gonion-Tangentenpunktes in der Median-Sagittal-Ebene. Die Strukturen des Unterkiefers wurden bei der Durchzeichnung gemittelt. Dies wird im Folgenden noch näher beschrieben.

Das Maß der Vergrößerung lässt sich mit Hilfe des Strahlensatzes berechnen. Der prozentuale Vergrößerungsfaktor  $V$  ergibt sich somit aus

$$V = \frac{d_0}{d_0 - d_f} \times 100$$

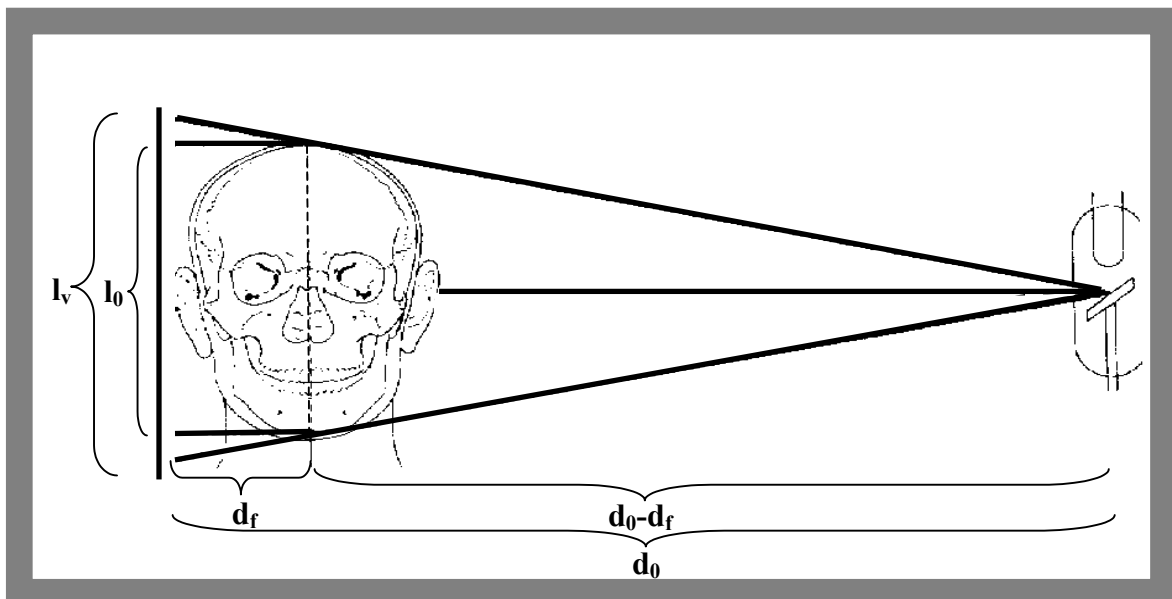


Abb. 1: Vergrößerungseffekt bei der Fernröntgenaufnahme durch die Divergenz der Strahlen

Dabei sei  $d_f$  der mittlere Abstand des Objektes von der Filmebene und  $d_0$  der Abstand der Röntgenröhre vom Film. Für die vermessenen Aufnahmen ( $d_0 = 120$  cm) ergibt sich somit eine Vergrößerung ( $l_v$ ) von 11,1% in Bezug auf den Originalschädel ( $l_0$ ).

Je größer also der Film-Focus-Abstand bei gleichbleibendem Abstand des Schädels von der Filmebene gewählt wird, desto geringer wird die Vergrößerung des Objektes auf der Filmplatte sein. Für Fernröntgenaufnahmen, wie sie in der Kieferorthopädie verwendet werden, wird in der Regel ein Film-Focus-Abstand von  $d_0 = 400$  cm eingestellt. Um die ermittelten Daten ( $d_0 = 120$  cm) mit den Messwerten der Fernröntgenaufnahme vergleichen zu können, mussten alle diese Werte mit dem Faktor 0,94 multipliziert werden. Dies gilt ausschließlich für lineare Messungen. Anguläre Messwerte werden durch unterschiedliche Film-Focus-Abstände nicht verändert.

Die ermittelten Messergebnisse wurden alle auf einen Film-Focus-Abstand von vier Metern umgerechnet und auch so in den Tabellen angegeben. Zwingend erforderlich ist jedoch die Angabe des Film-Focus-Abstandes zu jeder Aufnahme. Bei Nichtbeachtung kann es in Folge der Verwendung unterschiedlicher Vergrößerungsfaktoren bei der Vermessung zu gravierenden Differenzen kommen; die Ergebnisse sind dann nicht mehr vergleichbar.

#### **4.2.2 Bildschärfe**

Die kephalometrische Auswertung stellt eine hohe Anforderung an die Zeichnungsschärfe einer Röntgenaufnahme, da hier im Millimeterbereich gemessen werden soll.

Als Erstes sei erwähnt, dass die Anode einer Röntgenquelle nicht punktförmig ist, sondern immer eine Fläche von 50 bis 100 mm<sup>2</sup> umfasst. Diese Tatsache führt zu einer gewissen Unschärfe, die mit einem größeren Film-Focus-Abstand ausgeglichen werden kann. Da aber mit größer werdendem Abstand die Strahlungsleistung mit dem Quadrat des Film-Focus-Abstandes geringer wird, muss dies durch eine Verlängerung der Expositionszeit ausgeglichen werden, um einen gleichwertigen Schwärzungsgrad zu erreichen. Dabei muss allerdings das Risiko einer mehr oder minder großen Bewegungsunschärfe in Kauf genommen werden.

Die Möglichkeit einer Erhöhung der Strahlungsleistung ist begrenzt durch den enormen technischen Aufwand, der in der Praxis normalerweise nicht betrieben werden kann. Somit bleiben Fernröntgenaufnahmen auf einen Film-Focus-Abstand von maximal vier Metern begrenzt.

Zum Zweiten spielt die Empfindlichkeit des Filmmaterials eine weitere wichtige Rolle. Alle verwendeten Aufnahmen wurden mit einer feinkörnigen Verstärkerfolie erstellt, die eine sehr feine Darstellung der Schädelstrukturen erlaubt, deren Wirksamkeit aber gegenüber den grobkörnigen Verstärkerfolien etwas geringer ist. Auf die Problematik der daraus erwachsenden erhöhten Strahlungsleistung und verlängerten Expositions-dauer wurde bereits hingewiesen.

### **4.2.3 Kontrast der Röntgenaufnahme**

Aufgrund der Morphologie sind Strukturen verschiedener Röntgendichtigkeit am Schädel zu finden. So stellt der Bereich des Keilbeins, in dem das Basion und das Artikulare liegen, einen sehr röntgendichten Teil des Schädels dar. Auch der dentale Komplex erweist sich als sehr röntgendicht. Hingegen ist das Nasenskelett mit den benachbarten Sinus maxillaris und der angrenzenden vorderen Schädelbasis inklusive der Sinus frontales ein weniger röntgendichter Bereich.

Um alle Strukturen gut erkennbar darzustellen, sollte der Röntgenfilm mit einer relativ „weichen“ Strahlung belichtet werden, so dass das Röntgenbild möglichst kontrastarm bleibt. Auf die Darstellung der Gesichtsweichteile muss an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden, da diese nicht von vorrangiger Bedeutung waren.

#### **4.2.4 Schädelposition des Patienten**

Die Bestimmung einer Kauebene in dem noch nicht oder nur teilweise vorhandenen Milchgebiss ist nicht möglich. In Abhängigkeit vom Alter des Probanden war in wenigen Fällen die Bestimmung der Nasallinie durch Zahnkeimüberlagerungen im Bereich der Spina nasalis posterior erschwert. Eine definierte Schlussbisslage kann ebenso nicht angegeben werden. Die sichere Festlegung der Bezugslinien vom Gesichtsschädel zum Unterkiefer war so nicht möglich.

Einzig die Länge des horizontalen sowie des aufsteigenden Unterkieferastes konnte bei den lateralen Aufnahmen eindeutig bestimmt werden. Ein durch die Aufnahmetechnik bedingter nicht exakt transversal verlaufender Strahlengang kann zu einer Doppelkontur-Darstellung des Unterkiefers führen, die nach der Technik von Schwarz (1958) gemittelt wurde. Bei der Analyse blieb deshalb eine Beschreibung der Position des Unterkiefers in Relation auf den Gesichtsschädel unberücksichtigt.

Da bei den untersuchten Kindern während der Durchführung der Röntgenaufnahme der Unterkiefer meist eine unterschiedliche Position einnahm, entfielen mehrere Referenzgrößen, die der kephalometrischen Beschreibung des Unterkiefers selbst sowie seiner Position und Zuordnung im Schädelskelett dienen. Dies betrifft vor allem die S-Gn-Strecke und Spna-M-Strecke sowie den NL-ML-, SNB- und ANB-Winkel.

Es sollte sowohl bei den lateralen wie auch den frontalen Röntgenaufnahmen eine natürliche Kopfhaltung eingenommen werden. Dabei fixiert der Patient mit seinen

Augen einen Orientierungspunkt in der Ferne, der ebenfalls auf die Augenhöhe des Patienten einzustellen ist. Das kann sowohl im Stehen wie auch im Sitzen bei einer geraden Körperhaltung geschehen (Moorrees 1985). Nach Möglichkeit sollte der Kopf des Patienten dabei nach der Frankfurter Horizontalen ausgerichtet sein. Diese ist definiert als Verbindungslinie zwischen Porion-Punkt und Orbital-Punkt.

Bei lateralen Röntgenaufnahmen musste darauf geachtet werden, dass die Median-Sagittal-Ebene parallel zur Filmkassette ausgerichtet wird. Der Patient berührt dabei mit der einen Kopfseite die Filmkassette, um den Abstand des Schädels zur Filmebene möglichst gering zu halten.

Zuletzt sollte noch auf die Problematik eingegangen werden, die sich beim Röntgen von Säuglingen und Kleinkindern ergibt. Diese sind nicht immer in der Lage, den Kopf in der oben beschriebenen Art und Weise in Position zu halten. Dabei ist man auf die Unterstützung der Eltern angewiesen, die nach Anweisung des Röntgenarztes diese Aufgabe übernehmen können.

In die Analyse wurden nur Röntgenaufnahmen einbezogen, die den oben beschriebenen standardisierten Bedingungen entsprechen.

### 4.3 Definition der anatomischen Referenzpunkte

Zur kephalometrischen Analyse von Fernröntgenaufnahmen ist es notwendig, die verwendeten Referenzpunkte eindeutig zu definieren und ihre Reproduzierbarkeit zu garantieren. In der Studie werden fast ausschließlich Messpunkte angegeben, die aufgrund knöcherner anatomischer Strukturen eindeutig zu bestimmen sind. Meist handelt es sich dabei um Knochenkonturen, Einziehungen, Vorwölbungen oder um Schädelsuturen. Die Fehlerquote bei der wiederholten Bestimmung der Messpunkte sollte, insbesondere in der jeweiligen Richtung der zu vermessenden Strecken, möglichst gering ausfallen. Von Vorteil ist, wenn die zu bestimmenden Punkte relativ leicht und möglichst ohne vorhergehende Konstruktion auffindbar sind. Sowohl ihre Bezeichnung als auch ihre Definition sollten allgemein bekannt sein.

Die vermessenen Aufnahmen wurden zu großen Teilen basierend auf der Technik von Hasund et al. (1973) und Broadbent et al. (1975) analysiert. Die verwendeten Referenzpunkte und -linien sind in Abbildung 3 dargestellt und werden im Folgenden näher erläutert.

### 4.3.1 Referenzpunkte der Norma lateralis

In Abb. 2 ist die Durchzeichnung der knöchernen Strukturen einer lateralen Fernröntgenaufnahme dargestellt.

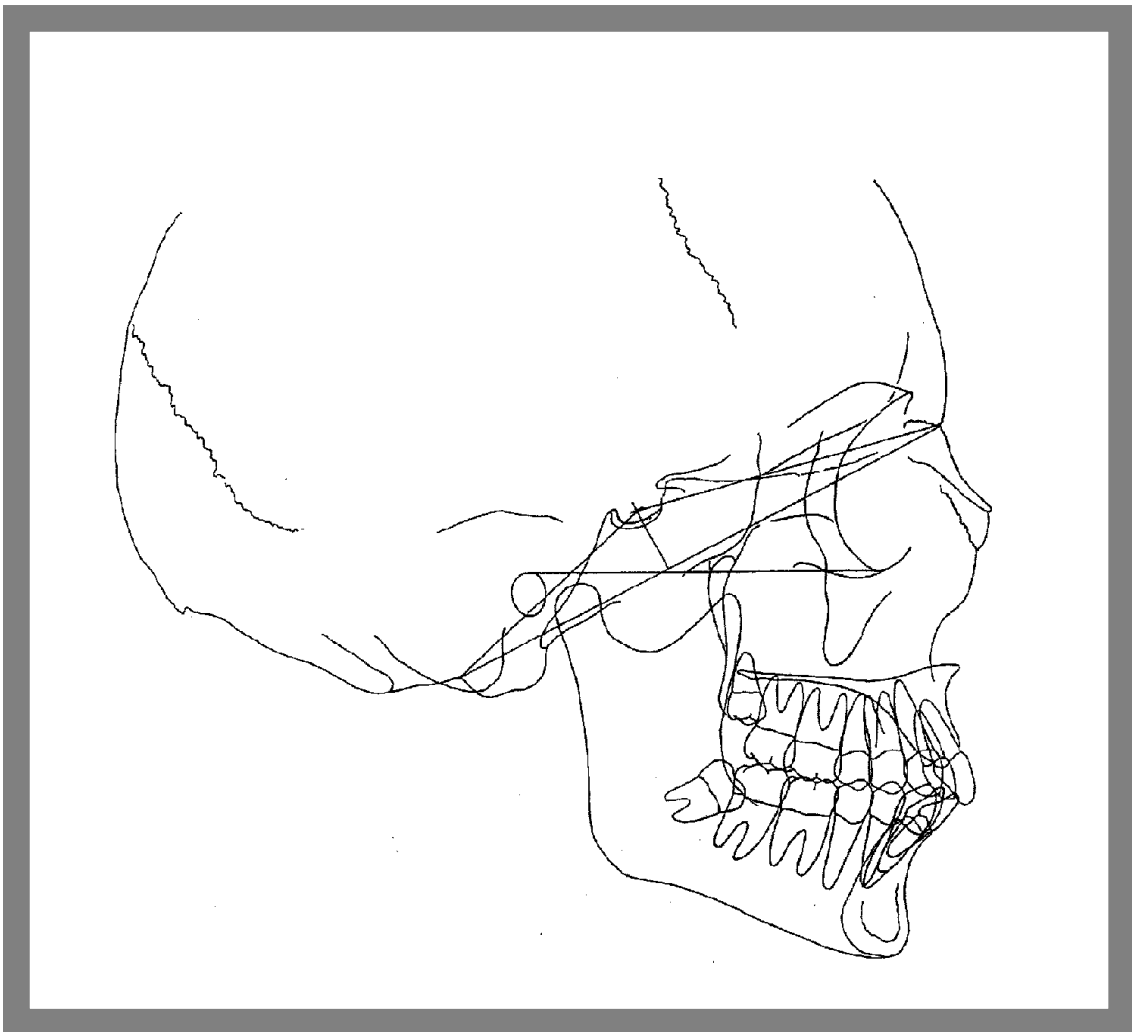


Abb. 2: Darstellung der Norma lateralis

Schematische Darstellung der einzelnen Referenzpunkte bei lateralen Fernröntgenaufnahmen.

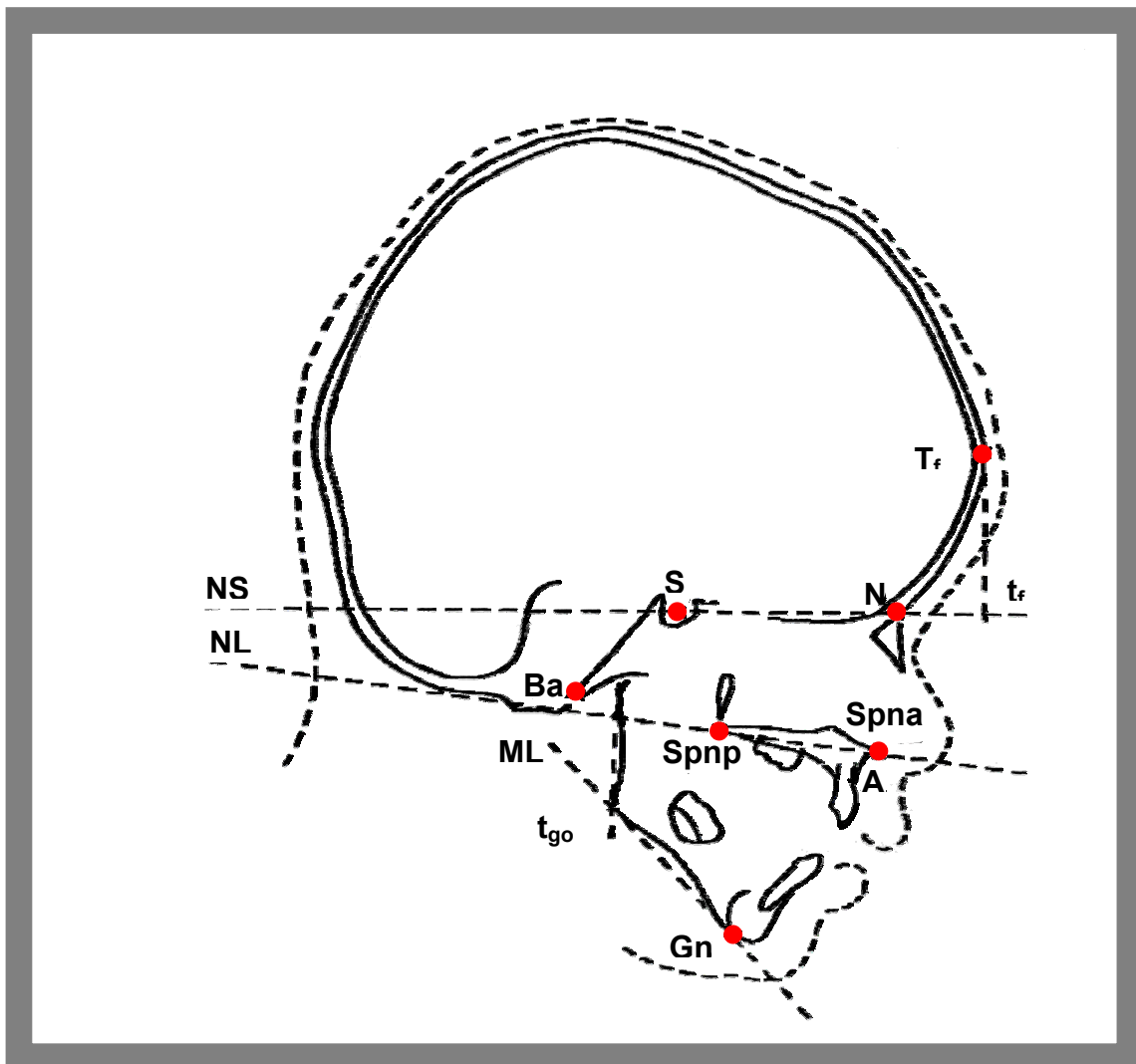


Abb. 3: Darstellung der Referenzpunkte der seitlichen Schädelaufnahme

#### 4.3.1.1 Sella (S)

Der Sella-Punkt wird als Zentrum der knöchernen Krypte der Sella turcica beschrieben. Dieser liegt in der Median-Sagittal-Ebene und wird aus der Halbierung des größten Durchmessers der Sella in sagittaler Richtung konstruiert (Hasund 1994).



#### **4.3.1.2 Nasion (N)**

Das Nasion ist als anteriorster Punkt der Sutura nasofrontalis definiert. Bei manchen Aufnahmen erscheint die Sutur nach ventral hin v-förmig geöffnet zu sein. Dann wird der am weitesten posterior gelegene Punkt des V als Nasion bestimmt. Das Nasion liegt auf der Median-Sagittal-Ebene.

#### **4.3.1.3 Spina nasalis anterior (Spna)**

Der am weitesten ventral gelegene Punkt der knöchernen Spina nasalis wird als Spina nasalis anterior bezeichnet. Beim Aufsuchen dieses Punktes muss darauf geachtet werden, die knorpelige Fortsetzung der Spina nicht mit dem eigentlichen Spna-Punkt zu verwechseln. Die knorpelige Struktur ist weniger röntgendicht und erscheint auf der Aufnahme transluzenter. Auch der Spna-Punkt liegt auf der Median-Sagittal-Ebene.

#### **4.3.1.4 Subspinale oder A-Punkt**

Der A-Punkt ist der am meisten dorsal gelegene Punkt der anterioren Kontur des Oberkiefer-Alveolarfortsatzes und liegt wie die Spina nasalis anterior in der Median-Sagittal-Ebene. Zu seiner Bestimmung wird von der Spina nasalis anterior eine Hilfslinie zum Limbus alveolaris gezogen, die dann soweit nach dorsal parallel verschoben wird, bis sie zur Tangente der konkaven anterioren Kontur des Alveolarfortsatzes wird. Der Tangentenpunkt markiert den gesuchten A-Punkt.

#### **4.3.1.5 Spina nasalis posterior (Spnp)**

Die knöcherne Spina nasalis posterior wird gebildet durch die gemeinsame Projektion der medialen Enden der dorsalen Begrenzung der beiden Ossa palatina. In der lateralen Röntgenaufnahme liegt der Spnp-Punkt immer vor der ventralen Begrenzung der ampullenförmigen Fossa pterygopalatina. Die Spina nasalis posterior liegt ebenfalls auf der Media-Sagittal-Ebene.

#### **4.3.1.6 Basion (Ba)**

Das Basion wird beschrieben als der am weitesten posterior und kaudal gelegene Punkt des Clivus in der Median-Sagittal-Ebene und damit der anteriorste Punkt des Foramen magnum. Häufig wird aufgrund der besseren Lokalisierbarkeit nicht die Außenkortikalis des Clivus verwendet, sondern das dorso-kaudale Ende der Spongiosa des Clivus. Zum leichteren Auffinden folgt man dem Unterrand der Schädelbasis und vom Dorsum sellae aus dem Clivus. Im Bereich des Schnittpunktes befindet sich der Punkt Basion (Hasund 1994).

#### **4.3.1.7 Artikulare (Ar)**

Das Artikulare ist ein konstruierter Referenzpunkt, der nur im lateralen Röntgenbild aufgefunden werden kann. Er ist definiert als Schnittpunkt des dorsalen Randes des aufsteigenden Unterkieferastes mit der kaudalen Begrenzung der Schädelbasis. Der rechte und der linke Unterkieferast werden manchmal nicht deckungsgleich in der Röntgenaufnahme abgebildet. Hier wird es notwendig, die beiden dorsalen Konturen zu mitteln und das Artikulare danach zu bestimmen. Dieser Messpunkt liegt nicht auf der Median-Sagittal-Ebene.

#### **4.3.1.8 Gnathion (Gn)**

Das Gnathion wird als der am weitesten kaudal und anterior gelegene Punkt der Symphyse der Mandibula beschrieben. Er liegt in der Median-Sagittal-Ebene und ist leicht auffindbar.

#### **4.3.1.9 Gonion-Tangentenpunkt ( $t_{go}$ )**

Der Gonion-Tangentenpunkt wird aus dem Schnittpunkt der Mandibularlinie (ML) mit der Ramuslinie konstruiert. Diese beiden Linien werden im folgenden definiert. Der Gonion-Tangentenpunkt dient als Scheitel zur Bestimmung der Größe des Kieferwinkels.

#### **4.3.1.10 Stirn-Tangentenpunkt ( $T_f$ )**

Der Stirn-Tangentenpunkt dient zur Beurteilung der anterioren Stirnwölbung und der Stirnhöhe in Bezug zur Nasion-Sella-Linie. Zu dessen Bestimmung wird ein Lot auf die Nasion-Sella-Linie konstruiert, so dass das Lot eine Tangente zur Stirn bildet. Der Tangentenpunkt auf der anterioren Stirnwölbung ist der Stirn-Tangentenpunkt  $T_f$ . Er liegt in der Median-Sagittal-Ebene.

#### **4.3.1.11 Stirnprominenzprojektion ( $t_f$ )**

Die Stirnprominenzprojektion auf die NSL-Linie ergibt sich bei der Konstruktion des Stirn-Tangentenpunktes ( $T_f$ ). Diese liegt auf der Nasion-Sella-Linie. Der Abstand zwischen Nasion und dem Schnittpunkt des Lotes mit der NSL-Linie ( $t_f$ ) ist ein Maß für die sagittale Ausdehnung der Stirnwölbung und befindet sich auf der Median-Sagittal-

Ebene. Der Stirn-Tangentenpunkt ( $T_f$ ) und der dazugehörige Lotpunkt ( $t_f$ ) ist insbesondere zur Kontrolle der Stirnentwicklung bei Kindern mit Kraniosynostosen und erfolgtem frontoorbitalem Advancement von Bedeutung.

#### 4.3.2 Referenzpunkte der Norma frontalis

Schematische Darstellung der einzelnen Referenzpunkte bei frontalen Fernröntgenaufnahmen.

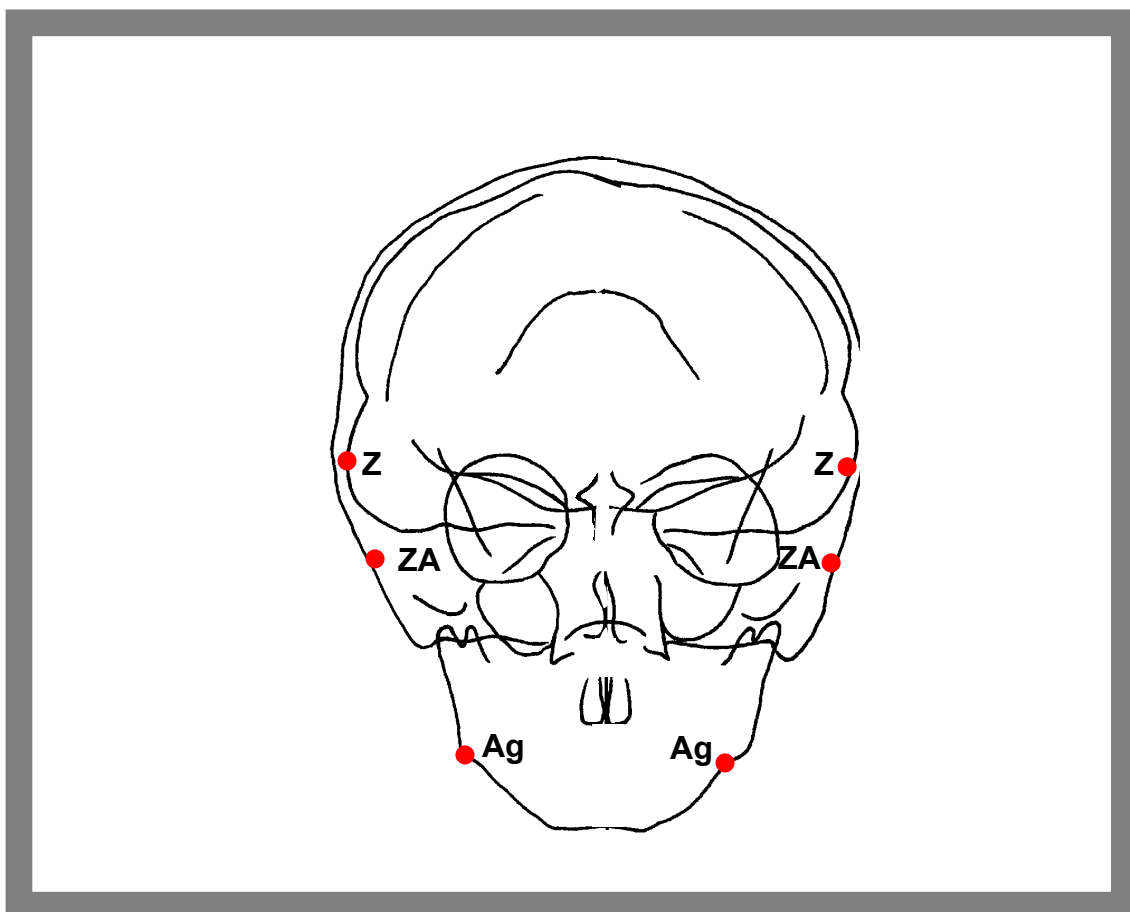


Abb. 4: Darstellung der Norma frontalis

Bei der kephalometrischen Analyse der frontalen Röntgenaufnahmen wurden Messpunkte verwendet, die von Broadbent et al. 1975 beschrieben wurden. Die linearen und angulären Messungen beruhen zu einem Teil auch auf der Beschreibung von Ricketts (1972).

#### **4.3.2.1 Zygomatiko-frontale Sutur (Z-Punkt)**

Die Sutura zygomatiko-frontalis wird durch die Verbindung des Stirnbeins mit dem Jochbein am lateralen Orbitalrand gebildet. Diese Naht ist auf frontalen Röntgenaufnahmen leicht zu identifizieren. Ihre Ausdehnung kann mehrere Millimeter betragen. Der äußerste laterale Rand der Sutur wurde als Messpunkt festgelegt.

#### **4.3.2.2 Jochbogen (ZA-Punkt)**

Die Jochbögen stellen auf den frontalen Aufnahmen, aufgrund ihrer exponierten Lage, eine leicht auffindbare anatomische Region dar. Wegen der Darstellung der Jochbögen auf dem Röntgenbild ist eine genauere Definition des Referenzpunktes notwendig. Es wurde die äußerste laterale Kontur des Jochbogens als Referenzpunkt festgelegt. Diese Festlegung gilt für beide Seiten.

#### **4.3.2.3 Antegonion (Ag)**

Das Antegonion ist definiert als der am meisten kranial gelegene Punkt der Einziehung ventral des Gonions am horizontal verlaufenden Unterrand der Mandibula. Auf frontalen Röntgenaufnahmen ist diese Einziehung relativ leicht zu erkennen, weil sie von keiner anderen Struktur überlagert wird.

#### **4.3.2.4 Nasion (N)**

In der frontalen Röntgenaufnahme findet man das Nasion am Schnittpunkt der zur Medianebene hin leicht nach kranial ansteigenden rechten und linken frontonasalen Sutur. Der Referenzpunkt liegt in der Mediansagittalebene und ist mit großer Sicherheit auffindbar. Er ist zur Konstruktion der mediansagittalen Referenzlinie notwendig.

#### **4.3.2.5 Spina nasalis anterior (Spna)**

Die Spina nasalis anterior wird auf der rechten und der linken Seite durch den Processus palatinus der Maxilla begrenzt. Weitere anatomische Anhaltspunkte sind der Canalis incisivus, die Mitte zwischen den ersten Inzisiven und der untere Teil der Nasenscheidewand, der hier vom knorpeligen vorderen Anteil, dem Septumknorpel und dem verknöcherten hinteren Teil, dem Vomer gebildet wird. Dieser Referenzpunkt ist die kaudale Begrenzung für die mediansagittale Referenzlinie.

#### 4.3.2.6 Referenzpunkt der Unterkiefermitte (M)

Schematische Darstellung der Unterkiefermitte bei frontalen Fernröntgenaufnahmen.

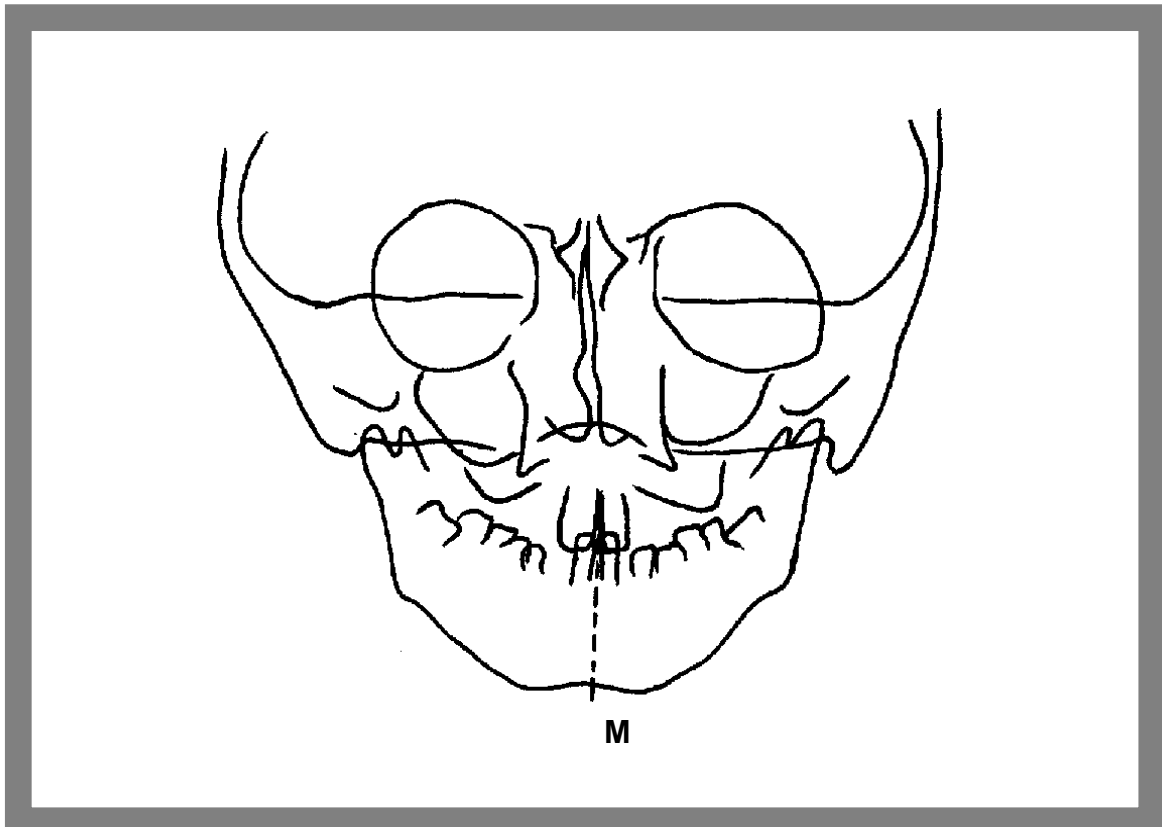


Abb. 5: Darstellung des Referenzpunktes der Unterkiefermitte (M)

Mit Hilfe der Spina mentalis und der Verbindungslinie des rechten und linken Antegonions wird die Unterkiefermitte bestimmt. Von der Spina mentalis ausgehend wird ein Lot auf die Antegonion- Verbindungslinie gefällt. Der Schnittpunkt dieser Lotlinie mit dem kaudalen Unterkieferrand ergibt den Referenzpunkt für die Unterkiefermitte. Mit Hilfe der Unterkiefermitte sind Abweichungen des Unterkieferkörpers von der mediansagittalen Referenzlinie erkennbar.

#### **4.3.2.7 Medialer Orbitapunkt (OS)**

Die Verbindung des rechten und linken Zygonionpunktes definiert die Zygonion-Linie. Der mediale Orbitapunkt ist der Schnittpunkt der Kontur der medialen Orbitawand mit der Zygonion-Linie. Mit dem Abstand dieser Punkte auf der Zygonion-Linie wird der röntgenologische Interorbitalabstand auf frontalen Röntgenaufnahmen beschrieben, der dem anatomisch definierten Intercalarabstand sehr nahe kommt. Der Intercalarabstand beschreibt die kürzeste Entfernung der beiden knöchernen Orbitae. Diese Strecke ist immer geringfügig kürzer als der röntgenologisch definierte Interorbitalabstand.

#### **4.3.2.8 Definition weiterer wichtiger anatomischer Strukturen**

Im Folgenden sind weitere anatomische Strukturen zur Orientierung auf frontalen Röntgenaufnahmen definiert.

##### **4.3.2.8.1 Apertura piriformis lateralis**

Die Apertura piriformis lateralis begrenzt die Nasenhöhle zum Sinus maxillaris nach lateral. Sie bildet die knöcherne Umrandung der vorderen Nasenöffnung.



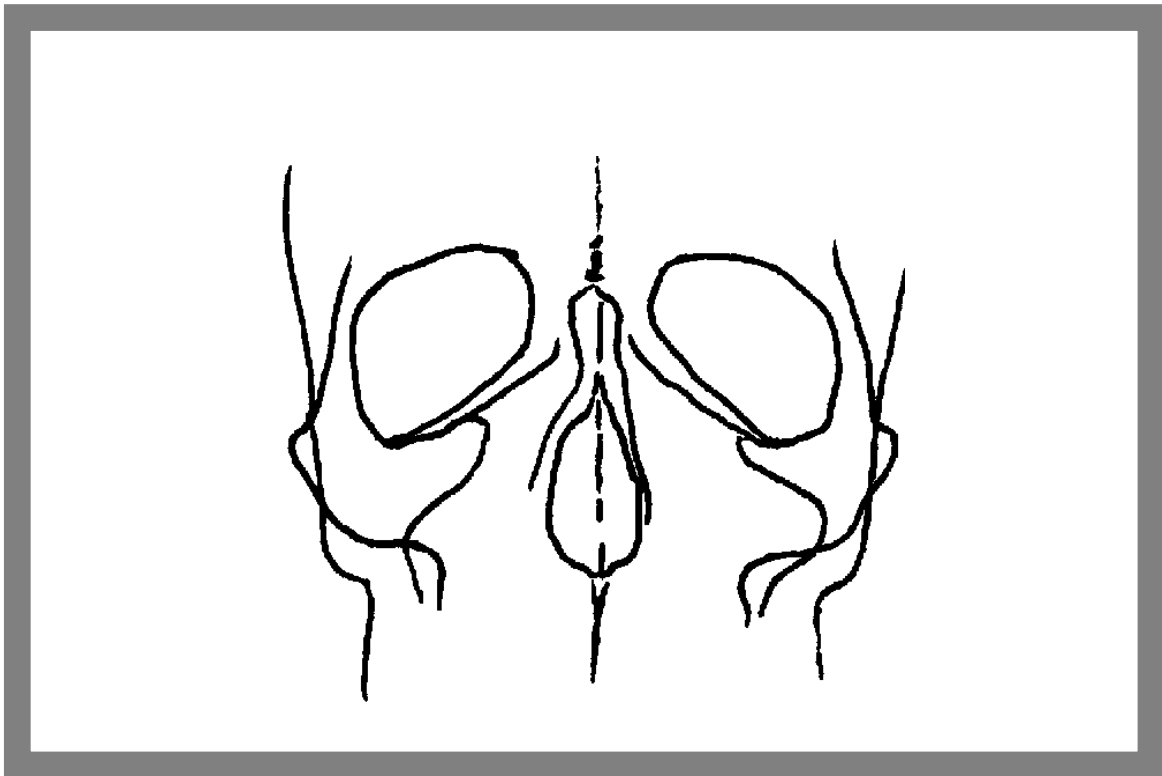


Abb. 6: Darstellung der Apertura piriformis lateralis

#### 4.3.2.8.2 Processus palatinus der Maxilla

Er bildet das Gaumendach ebenso wie den Nasenboden. Der Prozessus palatinus erscheint aufgrund seiner Lage zum Röntgenstrahl als sehr röntgendicht und ist leicht zu identifizieren.

#### 4.3.2.8.3 Crista galli

In der frontalen Röntgenaufnahme hebt sich die Crista galli deutlich von den benachbarten Sinus frontales ab. Sie gehört aus anatomischer Sicht zum Os ethmoidale. Die kaudal angrenzende Lamina perpendicularis setzt die Crista galli nach unten hin fort

und bildet den oberen Teil der knöchernen Nasenscheidewand. Die Nasenscheidewand selbst weicht meist von der Median-Sagittal-Ebene zu einer Seite hin ab (Septumdefiatio) und kann daher nicht zur Bestimmung der medialen Referenzlinie herangezogen werden.