Aus dem Institut für Anatomie und Zellbiologie
(Direktor: Prof. Dr. med. Karlhans Endlich)
Universitätsmedizin der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald

Thema: Zur Pneumatisation des Siebbeinkomplexes beim Schimpansen, *Pan troglodytes* (Primates, Catarrhini)

Inaugural - Dissertation

zur

Erlangung des akademischen

Grades

Doctor medicinae dentariae

(Dr. med. dent.)

der

Universitätsmedizin der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald

2012

vorgelegt von:

Matthias Arndt

geb. am: 19. April 1981

in: Wolfen

Dekan: Prof. Dr. rer. nat. Heyo K. Kroemer

1. Gutachter: Prof. Dr. T. Koppe

2. Gutachter: Prof. Dr. Dr. R. J. Radlanski

Ort, Raum: Greifswald, Seminarraum der Klinik für MKG-Chirurgie

Tag der Disputation: 13.12.2012

1 EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG 1

2 LITERATURÜBERSICHT 4
2.1 Systematik von *Pan troglodytes* 4
2.2 Biologische Charakterisierung von *Pan troglodytes* 8
2.3 Entwicklung und Anatomie des Schädels unter besonderer Berücksichtigung des Primatenschädels 9
2.4 Anatomie der Nase 13
2.5 Anatomie und Funktion der Nasennebenhöhlen 15
2.6 Anatomie des Siebbeins 27

3 MATERIAL UND METHODEN 31
3.1 Material 31
3.2 Methoden 31
3.2.1 Computertomographische Untersuchung 31
3.2.2 Metrische Schädeluntersuchung 32
3.2.2.1 Festlegung der Schädelmaße 32
3.2.2.2 Untersuchung der Siebbeinzellen und der Stirnhöhle 38
3.2.3 Biostatistische Auswertung 38

4 ERGEBNISSE 41
4.1 Morphologie der Nasennebenhöhlen 41
4.1.1 Sinus frontalis 41
4.1.2 Cellulae ethmoidales 48
4.1.2.1 Bulla ethmoidalis 58
4.1.3 Prozentualer Anteil des Siebbeinzellsystems und der Sinus frontales 63
4.1.4 Asymmetrien der Nasennebenhöhlen 64
4.2 Ergebnisse der Schädelmessung 66
4.2.1 Längenmaße 66
4.2.2 Breitenmaße 68
4.2.3 Höhenmaße 70
4.2.4 Gesichtsschädelvolumen 71

4.2.5 Schädelbasisknickungswinkel 72
4.3 Korrelationsanalyse 73
4.3.1 Bivariate Korrelationsanalyse zwischen den Schädelmaßen und dem Sinus frontalis 73
4.3.2 Bivariate Korrelationsanalyse zwischen den Schädelmaßen und den Cellulae ethmoidales 75
4.3.3 Ergebnisse der partiellen Korrelationsanalyse 77
4.4 Ergebnisse der Regressionsanalyse 78

5 DISKUSSION 82
5.1 Methodenkritik 82
5.2 Morphologie der Nasennebenhöhlen 83
5.3 Schädelmorphologie 87
5.4 Korrelationsanalyse zur Beziehung der Nasennebenhöhlen zur Schädelarchitektur 89
5.5 Schlussfolgerungen 90

6 ZUSAMMENFASSUNG 92

7 LITERATURVERZEICHNIS 94

8 ANHANG

1 Einleitung und Fragestellung

Gajus Secundus Plinius d.Ä. spricht bereits um die Zeitenwende von Primaten und hebt deren Ähnlichkeit mit dem Menschen hervor. Der Anatom Galen von Pergamon (130-201 n. Chr.) sezierte Affen und Menschenaffen, um dabei festzustellen, dass die Form des Knochengerüstes unter allen lebenden Wesen dem Menschen am ähnlichsten ist (ANKEL, 1970). Er befasste sich ebenfalls bereits mit den Nasennebenhöhlen des Menschen (BLANTON and BIGGS, 1969). Leonardo da Vinci (1452-1519) bildete in seinen Studien des Schädels bereits um das Jahr 1489 das Antrum maxillae und den Sinus frontalis ab. Er ging damals davon aus, dass die Kieferhöhle eine Flüssigkeit enthält, welche die Zähne ernährt (O'MALLEY and SAUNDERS, 1982). Die erste wissenschaftliche Beschreibung des Sinus maxillaris fand durch Highmore im Jahre 1651 statt (KOPPE et al., 1999). Er entwickelte zudem erstmals die Hypothese von deren Pneumatisation (KEIR, 2009).

Zahlreichen Untersuchungen zur Morphologie und Funktion der menschlichen Nasenhöhlen und ihrer Begleitstrukturen (u.a. BRAUNE und CLASEN, 1877; ZUCKERKANDL, 1882-92; PAULLI, 1900 a; SCHAEFFER, 1920; WEIDENREICH, 1924; BEZOLD, 1945; NEGUS, 1958; TAKAHASHI, 1984; LANG, 1989; BRAUN und STAMMBERGER, 2003; HOSEMANN und FANGHÄNEL, 2004), stehen deutlich weniger Studien an nicht-menschlichen Primaten gegenüber (SEYDEL, 1891; ZUCKERKANDL, 1882-92; PAULLI, 1900 a/ b/ c; ELLER, 1932; WEGNER, 1936; CAVE and HAINES, 1940; HOUSE et al., 1966; REIKE, 1991; KOPPE und SCHUMACHER, 1992; KOPPE and NAGAI, 1997; KOPPE et al., 1999; KOPPE et al., 2006). Es fehlt hierbei zumeist an hinreichend genauem quantitativem Datenmaterial (KOPPE und SCHUMACHER, 1992). Trotz kontroverser Diskussion in den letzten Jahrhunderten konnte die Frage zur Funktion der Nasennebenhöhlen bis in unsere Zeit nicht abschließend geklärt werden (NEGUS, 1958; BLANEY, 1990; LAITMAN et al., 1996; WITMER, 1997). Die zahlreichen unterschiedlichen Vermutungen hierzu und die lange Zeitspanne der Forschungen legen nahe, dass die Nasennebenhöhlen nicht nur eine, sondern eine Reihe unterschiedlicher Funktionen teils physiologischer, teils biomechanischer Art aufweisen.

Die vorliegende Studie befasst sich mit dem Siebbeinlabyrinth des Schimpansen (*Pan troglodytes*). Der Sinus frontalis wurde in die Untersuchung mit einbezogen, da er sich aus einer vorderen Siebbeinzelle entwickelt (PAULLI, 1900 c; SZILVÁSSY, 1982; BLANEY, 1986; MAFEE, 1993; FREYSCHMIDT und VOGL, 2002; ROSSIE, 2005).

Um das Siebbeinzellsystem des Schimpansen zu analysieren, wurde in dieser Arbeit die Volumenbestimmung anhand von Computertomographiedatensätzen durchgeführt. Diese Methode fand bereits bei vorangegangenen Untersuchungen dieser, sich mit den Nasenhöhlen und deren Begleitstrukturen bei Primaten beschäftigenden, Greifswalder Arbeitsgruppe Verwendung (REIKE, 1991; KOPPE und SCHUMACHER, 1992; MOORMANN, 2004; SCHIWAL, 2005; GEISSLER, 2007; BALCZUN, 2008; FRENKERT, 2009; TÖPPKE, 2010). Mit diesem Verfahren ist es möglich, verschiedene Parameter der Nasennebenhöhlen metrisch genau und reproduzierbar zu erfassen (KOPPE und SCHUMACHER, 1992; GOTWALD, 2001; FATTERPEKAR, 2008), wobei eine Schichtdicke von 1 mm nicht überschritten werden sollte, um auch sehr grazile Strukturen darstellen zu können (DOLL und LOZANOFF, 2003).

Im Einzelnen verfolgt die vorliegende Arbeit folgende Zielstellungen:

1. Beschreibung und Vermessung der Siebbeinzellen und des Sinus frontalis

2. Untersuchung des postnatalen Wachstums des Siebbeinlabyrinths und des Sinus frontalis

3. Beschreibung der Nachbarschaftsbeziehungen der einzelnen Siebbeinzellen und des Sinus frontalis

4. Untersuchung der Asymmetrien und des Geschlechtsdimorphismus der Siebbeinzellen und des Sinus frontalis

5. Beschreibung der statistischen Zusammenhänge zwischen den Volumina der Siebbeinzellen beziehungsweise des Sinus frontalis und verschiedenen Schädelmaßen

6. Diskussion der Bedeutung der Untersuchungsergebnisse

2 Literaturübersicht

2.1 Systematik von *Pan troglodytes*

Schimpansen gehören zur Ordnung der Primaten (Herrentiere), Unterordnung Haplorrhini (Trockennasenaffen), Teilordnung Catarrhini (Altweltaffen/ Schmalnasenaffen), Überfamilie Hominoidea (Menschenartige), Familie Hominidae (große Menschenaffen), Subfamilie Homininae, Gattung *Pan* (HENKE und ROTHE, 1998). Zur Gattung der Schimpansen gehört des Weiteren der Bonobo (*Pan paniscus*).

Die Ordnung der Primaten unterteilt sich in 2 Hauptgruppen, die Prosimii (Halbaffen) und die Anthropoidea (eigentliche Affen). Die eigentlichen Affen bilden mit den Altweltaffen (Catarrhini) und den Neuweltaffen (Platyrrhini) zwei Stämme. Die Ursprünge der Primaten reichen mehr als 65 Millionen Jahre zurück (BARETT und DUNBAR, 2001). Die in der oberen Kreide aus Insektivoren hervorgegangene (ANGST, 1988), sehr heterogene Ordnung weist unter allen Säugetieren die weiteste Evolutionsspanne auf (THENIUS, 1979). Sie umfasst mehr als 360 Arten (GEISSMANN, 2003). Die Ordnung lässt sich eher durch Merkmalsmuster, als durch einzelne definierte Primatenmerkmale beschreiben (STORCH et al., 2001), da einige Merkmale durchaus ursprüngliche Säugetiermerkmale sind (GRUPE et. al., 2005), z. B. die Fünfstrahligkeit der Extremitäten, das Vorhandensein von Schlüsselbeinen sowie ein heterodontes Gebiss mit drei verschiedenen Zahntypen.

Eine Auswahl primatentypischer Merkmale nach HENKE und ROTHE (1998), MARTIN (1990), GEISSMANN (2003) und GRUPE et. al. (2005) ist:

- Greifhand und Greiffuß mit opponierbarer Großzehe und Daumen (mit Ausnahme des Standfußes beim Menschen)
- Plattnägel auf Fingern und Zehen (mit Ausnahme des Krallenäffchens)
- Relativ große Augen mit einem knöchernen Ring um die Augenhöhle (Strepsirrhini) beziehungsweise einer trichterförmig geschlossenen knöchernen Augenhöhle (Haplorrhini)

- Stark nach vorn gewandte, dicht beieinander liegende Augen mit sich stark überlappenden Sehfeldern
- Primär arboricole Lebensweise (in den Bäumen lebend)
- Zahnformel zeigt reduzierte Maximalzahl, ursprüngliche Anzahl von 3.1.4.3/3.1.4.3 bei dem gemeinsamen Vorfahren der modernen plazentalen Säugetiere über 2.1.4.3/2.1.4.3 bei den ursprünglichen Primaten weiter reduziert zur Formel von 2.1.3.3/2.1.3.3 bei heute lebenden Primaten, weitere Reduktion auf 2.1.2.3/2.1.2.3 bei Altweltaffen
- Reduktion der Inzisivenzahl geht mit Reduktion des Praemaxillare einher

Primaten sind neben den Walen diejenigen Säugetiere mit den am höchsten entwickelten Gehirnen. Bei ihnen besteht eine Tendenz zur Zerebralisation (SCHUMACHER, 1997). Darunter ist eine Oberflächen- und Volumenzunahme des Gehirns, eine intensivere Verschaltung einzelner Hirnzentren sowie die Neuanlage von Hirnteilen zu verstehen (HENKE und ROTHE, 1998). Der Geruchssinn zur Orientierung hat bei den meisten Primaten an Bedeutung verloren. Dies zeigt sich nicht nur in einer deutlichen Reduktion der Ektoturbinalia bis hin zu deren vollständigem Fehlen und vereinfachten Ethmoturbinalia, sondern auch in einer Verkleinerung der entsprechenden zentralen Repräsentation (ANKEL, 1970). Der olfaktorische Sinn spielt allerdings weiterhin eine gewichtige Rolle im sozio-sexuellen Kontext. Neben der Reduktion der Zahnzahl zeigt sich die Tendenz zur Verzögerung des Zahnwechsels vom Milch- zum Dauergebiss, welches als Indiz für eine verlängerte Jugendphase gewertet werden kann (HENKE und ROTHE, 1998).

Ist die Einteilung des Schimpansen heute bis auf das Niveau der Überfamilie unstrittig, so gibt es bei der weiteren Unterteilung der Hominoidea in Familien und Unterfamilien unterschiedliche Angaben, was auf verschiedenen Klassifikationskonzepten beruht (HENKE und ROTHE, 1998; ANDREWS and HARRISON, 2005; GRUPE et al., 2005). War es in der Vergangenheit aufgrund überwiegend anatomisch-morphologischer Merkmale üblich, alle großen Menschenaffen (Schimpanse, Gorilla und Orang-Utan) der Subfamilie der Pongidae zuzuordnen und den Menschen der der Hominidae (Abb. 1) (z.B. SIMPSON, 1961; MAYR, 1969; ANKEL, 1970; BERGER und TYLINEK, 1984), so ist diese Einteilung aus heutiger Sicht nicht mehr haltbar. Es

handelt sich hierbei um eine Zuordnung, die die Verwandtschaft des Menschen mit den anderen Menschaffen, und hier besonders mit dem Schimpansen, verschleiert (LECOINTRE und LE GUYADER, 2006).

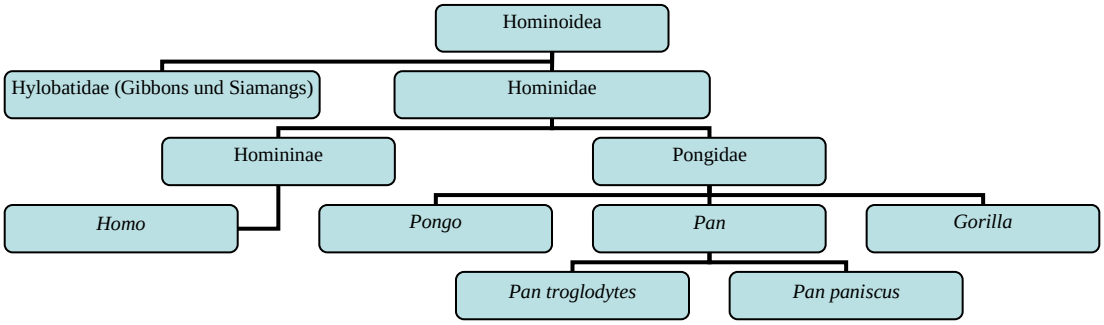


Abb. 1: Traditionelle Systematisierung der Menschenaffen und des Menschen (nach HENKE und ROTHE, 1998)

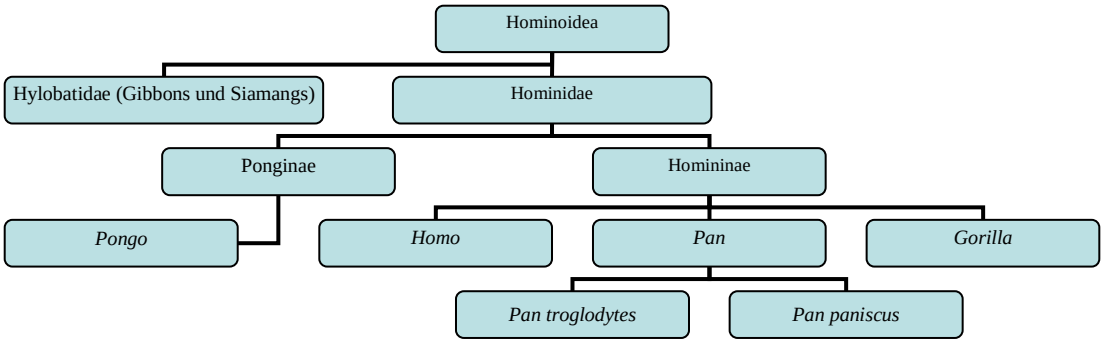


Abb. 2: Moderne Systematisierung der Menschenaffen und des Menschen (nach HENKE und ROTHE, 1998)

Nach dem heutigen Stand der Wissenschaft wird der Orang-Utan (*Pongo*) der Subfamilie der Ponginae zugeordnet, Mensch, Gorilla und Schimpanse hingegen der der Homininae (Abb. 2) (HENKE und ROTHE, 1998). ANDREWS and HARRISON (2005) schlagen eine weitere Unterteilung der Subfamilie Homininae in die Stämme Gorillini (*Gorilla*) und Hominini (*Homo* und *Pan*) vor. Eine Möglichkeit ist, Mensch und Schimpanse in der Subfamilie der Homininae einzuordnen, und die Gorillinae innerhalb der Familie der Hominidae in eine weitere Subfamilie zu stellen, in Abgrenzung zur Familie der Pongidae mit dem Orang-Utan.

Hat sich der Orang-Utan bereits vor etwa 16 Mio. Jahren von der Familie der afrikanischen Menschenaffen abgespalten, so geschah dies bei Gorilla und Schimpanse vor etwa 7 bis 9 Mio. Jahren. Mensch und Schimpanse lassen sich auf einen gemeinsamen Vorfahren vor etwa 5 bis 6 Mio. Jahren zurückführen (PILBEAM, 2002; SOMMER, 2003; WILDMAN et al., 2003; GRUPE et al., 2005; ANDREWS and HARRISON, 2005). Die Unterteilung der Gattung Pan in den gemeinen Schimpansen (*Pan troglodytes*) und den Zwergschimpansen (*Pan paniscus*) ist unstrittig. Beide Arten haben sich vor 2 bis 0,8 Millionen Jahren voneinander abgespalten (SOMMER, 2003). Die weitere Gliederung des gemeinen Schimpansen in seine Unterarten (Subspezies) wird hingegen kontrovers diskutiert.

Innerhalb der Art *Pan troglodytes* werden traditionell drei geographisch definierte Unterarten unterschieden (SCHWARZ, 1934; ANKEL, 1970; BERGER und TYLINEK, 1984; SOMMER und AMMANN, 1998; GEISSMANN, 2003; GRUPE et al., 2005; WON and HEY, 2005):

- *Pan troglodytes verus*, westafrikanischer Schimpanse (Gemeiner oder Maskenschimpanse)
- *Pan troglodytes troglodytes*, zentralafrikanischer Schimpanse (Tschego)
- *Pan troglodytes schweinfurthii*, ostafrikanischer Schimpanse (Ost- oder Langhaarschimpanse)

In den letzten Jahren fand die zwischen unterem Niger und Kamerun lebende Population als eigenständige Subspezies (*Pan troglodytes vellerosus*) Eingang in die Literatur (GONDER et al., 1997) (Abb. 3). Die genetische Variabilität innerhalb der Spezies ist dabei größer als bei den anderen Menschenaffen (KOCHER and WILSON, 1991; MORIN et al. 1992).

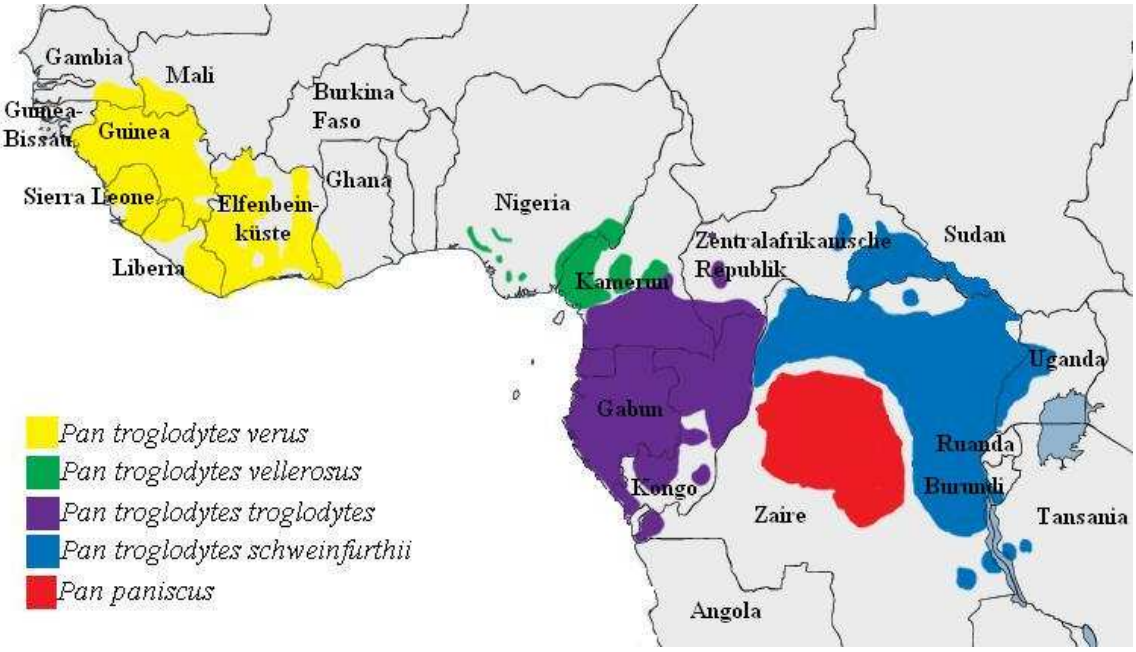


Abb. 3: Verbreitung des *Pan paniscus* und der Subspezies von *Pan troglodytes* (nach: http://de.wikipedia.org/wiki/Schimpansen [Stand 2012])

Aus heutiger Sicht ist somit allgemein akzeptiert, dass der Schimpanse der nächste Verwandte des Menschen ist, gefolgt vom Gorilla und Orang-Utan (z.B. MIYAMOTO et al., 1987; PILBEAM, 2000; BARRETT und DUNBAR, 2001). Je nach Forschungsansatz stimmen 94 % (DEMUTH et al., 2006) bis 99,4 beziehungsweise 98,4 % (SOMMER, 2003; WILDMAN et al., 2003) des Genoms von Mensch und Schimpanse überein. Einige Autoren gehen davon aus, dass der Bonobo in noch engerer Verwandtschaft zum Menschen steht (z.B. COLLIDGE, 1933; ZIHLMAN, 1984), während andere ihn als sekundäre, vom Gemeinen Schimpansen abstammende, Spezialisierung ansehen (KORTHLAND, 1972; JOHNSON, 1981).

2.2 Biologische Charakterisierung von *Pan troglodytes*

Die in verschiedenen Gebieten bereits ausgerotteten Schimpansen (BERGER und TYLINEK, 1984) sind noch in 21 afrikanischen Ländern zu finden, von der westafrikanischen Küste durch den Waldgürtel des nördlichen Zairebeckens bis zur Peripherie des Ostafrikanischen „Lake Tanganyka“ (PFORR, 2005) (Abb. 3).
Die sich wechselweise im Geäst und auf dem Boden aufhaltenden Primaten bewohnen mit immergrünen Regenwäldern, geschlossenen und lichten Wäldern, Plantagen,

Galeriewäldern sowie offener Savanne und Grasland sehr verschiedene Lebensräume mit zum Teil erheblichen saisonalen klimatischen Unterschieden (HENKE und ROTHE, 1998).

Mit einer durchschnittlichen Größe von 120 cm bei den männlichen und 113 cm bei den weiblichen Tieren sind die Schimpansen die kleinsten der Großen Menschenaffen (KNAUER, 1915; SOMMER und AMMANN, 1998). Wiegen die Männchen im Mittel 43 kg (Spanne: 37-60 kg), so sind die weiblichen Tiere mit durchschnittlichen 32 kg (Spanne: 30-47 kg) etwas leichter. Größenunterschiede aufgrund des Geschlechts treten erst mit Beendigung der juvenilen Phase auf, und bleiben gering. Die Männchen werden im Alter von 13-14 Jahren geschlechtsreif, das Alter der ersten Geburt liegt bei den Weibchen bei 11-20 Jahren. Alle vier Jahre wird zumeist ein Junges geboren (BARETT und DUNBAR, 2001). Die Tragezeit beträgt 240 bis 255 Tage (BERGER und TYLINEK, 1984). Können Schimpansen in Gefangenschaft älter als 50 Jahre werden, so wird in der Literatur bei wildlebenden Tieren eine maximale Lebensdauer von 40 Jahren angegeben (SOMMER und AMMANN, 1998). Sie sind in fission-fusion-Gruppen mit mehreren adulten Männchen und Weibchen organisiert (GEISSMANN, 2003; CONLEE and BOYSEN, 2005). Die Zahl der Individuen schwankt zwischen 12 und 40 (5-15 Männchen, 7-25 Weibchen), wobei auch Gruppen mit bis zu 100 Tieren beobachtet wurden (HENKE und ROTHE, 1998; SOMMER und AMMANN, 1998).

2.3 Entwicklung und Anatomie des Schädels unter besonderer Berücksichtigung des Primatenschädels

Die Merkmale des Kopfes haben bei Erörterungen über Evolutionsfragen immer eine maßgebliche Rolle gespielt (KIPP, 1991). Das Anlagematerial zur Entwicklung des Primatenschädels entstammt drei verschiedenen Quellen:

- dem Kopfmesenchym, welches den kranialsten Anteil der Notochorda umgibt
- den kranialen Somiten aus dem Rumpfgebiet
- den ersten beiden Kiemenbögen.

Der Kopf verfügt, mit einem Zentrum für die Vorderkopf- und einem für die Hinterkopfregion, über zwei Induktionszentren (SCHUMACHER, 1997).

Die Morphogenese des Schädels ist einer Reihe formbestimmender Faktoren unterworfen. Der Formbildungsprozess des Schädels beginnt mit Ausbildung der Hirnbläschen. Das umgebende Kopfmesoderm wird dadurch zu einer Hülle komprimiert. Aus dieser Hülle entwickelt sich über häutige und knorpelige Vorstufen der knöcherne Schädel (SCHUMACHER, 1973).

Der Primatenschädel weist zwei unterschiedliche Verknöcherungsmechanismen auf, welche entwicklungsgeschichtlich auf ein ursprünglich vorhandenes Exo- und Endoskelett zurückgehen (SCHUMACHER, 1997). Dabei verknöchert das Exoskelett desmal durch direkte Verknöcherung des Bindegewebes (Deckknochenbildung). Das Endoskelett verknöchert chondral auf Grundlage knorpelig präformierter Teile (Ersatzknochenbildung). Die Knochen des Schädels können einem dieser beiden Verknöcherungsmechanismen zugeordnet werden, wobei manche Knochen Anteile von beiden aufweisen. Chondral entstehen die Knochen der Schädelbasis, desmal hingegen die des Schädeldaches, der Nasenhöhle und des Kieferskeletts. Die Knochen der Nasenhöhle entstehen hierbei auf einer knorpeligen Nasenkapsel, welche sich dabei zurückbildet (SCHUMACHER, 1997).

WEIDENREICH (1945) benennt mit der Größenzunahme des Gehirns und der Anpassung an den aufrechten Gang zwei für die Schädelentwicklung ausschlaggebende Faktoren.

Der grundsätzliche Aufbau des Schimpansenschädels ähnelt dem des Menschen (KIPP, 1991). Auch STARCK und KUMMER (1962) weisen in ihrer Übersichtsarbeit zur Ontogenese des Schimpansenschädels auf die Ähnlichkeit zur menschlichen Schädelentwicklung und die erstaunlich große Übereinstimmung der fetalen Schädel hin.

Im Bereich des Gesichtsschädels überschneiden sich drei Organsysteme: Orbita, Nase mit den Nebenhöhlen und der maxillo-mandibuläre Apparat (SCHUMACHER, 1997). Weisen Gorilla und Orang-Utan starke Geschlechtsunterschiede auf, so sind diese am Schädel des Menschen und Schimpansen nicht so eindrucksvoll nachweisbar (BERGE

and PENIN, 2004). Bei allen großen Menschenaffen, so auch beim Schimpansen, besteht hingegen eine große Variabilität im Schädelbau (ANKEL, 1970).

Nach KIPP (1991) verläuft die ontogenetische Entwicklung der Schädelform bei den Affen in zwei Phasen mit unterschiedlichen Wachstumstendenzen. In der ersten Phase, der Embryonalentwicklung und kurze Zeit postnatal, dominiert die Gehirnentwicklung bei kurz bleibender Kieferregion. Die Schädelform der frühkindlichen Menschenaffenschädel bezüglich des Verhältnisses Gehirn- zu Gesichtsschädel ist der des Menschen sehr ähnlich. In der zweiten Phase, postnatal und verstärkt mit dem Zahnwechsel, setzt eine starke Entwicklung der Kieferregion bei zurückbleibendem Gehirnwachstum ein. Im Gegensatz zur menschlichen Gehirnentwicklung ist diese bei den Menschenaffen mit Durchbruch der Milchzähne weitestgehend abgeschlossen. Das weitere Wachstum in horizontaler Richtung ergibt sich nach WEIDENREICH (1950) aus der Verbindung zur Schädelbasis, welche nach abgeschlossenem Gehirnwachstum weiterhin an Größe zunimmt. Auch für den Menschen berichtet SCHUMACHER (1997) von unterschiedlichen postnatalen Wachstumstendenzen einzelner Abschnitte des Gesichts. So wächst das Obergesicht postnatal deutlich schneller als das Mittelgesicht. Die Untereinanderlagerung der Mund-, Nasen- und Augenregion beinhaltet eine Vergrößerung des interorbitalen Raumes, was eine Entwicklung von Siebbeinzellen und Stirnhöhle beim Primaten unterstützt (KOPPE et al., 1999). Der adulte Schimpansenschädel weist bei nicht vollständig erreichter horizontaler Anordnung der Schädelteile eine fliehende Stirn, kräftige Brauenwülste und ein flaches Schädeldach auf (KIPP, 1991).

Der menschliche Hirnschädel wächst am intensivsten im ersten Lebensjahr. Mit zehn Jahren ist dessen Wachstum weitestgehend abgeschlossen (MARTIN, 1928). Ab dem fünften Lebensjahr dominiert das Gesichts- gegenüber dem Hirnschädelwachstum. Das stärkste Wachstum des Gesichtsschädels ist in der Pubertät zu beobachten (MIETHKE, 1990). Im Vergleich zu den anderen Menschaffen verfügt der menschliche Schädel über eine deutlich größere Gehirnkapsel und einen reduzierten Gesichtsschädel (ELLER, 1932).

Beim Menschen sind Erbfaktoren für Gestaltung und Formentwicklung des Hirnschädels entscheidend. Die Gesichtsschädelentwicklung hingegen beruht auf Wechselwirkungen zwischen Erbfaktoren und Umwelteinflüssen (SCHUMACHER, 1985).

MOSS (1968) spricht in diesem Zusammenhang von dem Zusammenwirken der funktionellen Matrix und der sekundär entstehenden skelettalen Einheit. Die funktionelle Matrix enthält, der jeweiligen Funktion entsprechend, alle Weichgewebe und funktionellen Hohlräume. Sie ist im Gegensatz zu der sekundär entstehenden skelettalen Einheit zur Unterstützung dieser funktionellen Matrix genetisch determiniert. Die Form des Primatenschädels ist somit ein Ergebnis sowohl phylogenetischer als auch ontogenetischer Entwicklung. Der Hauptdeterminent der Morphogenese ist zwar die Vererbung, die den Bauplan des Keimlings festlegt (SCHUMACHER, 1973), aber verschiedenste Faktoren wie Sprache, Mimik, Ernährung, Arbeit, Fetalisation, Domestikation, Adaptation, Vertikalisation, Zerebralisation (FANGHÄNEL und SCHUMACHER, 1986), Vererbung, Konstitution, Geschlecht, Hormone, Vitamine, Psyche, Klima, Statik und mechanische Faktoren (Habbits) (SCHUMACHER, 1973) üben ebenfalls einen Einfluss aus. MOSS (1973) zufolge werden Schädelwachstum und -entwicklung durch Funktionen des Kopfes und des Halses, z.B. Atmen, Riechen, Sehen, Hören, Sprechen, Kauen, Gleichgewichtsorientierung, neurale Integration und andere, induziert.

Die Schädelbasis nimmt in der Gehirn- und Gesichtsschädelentwicklung eine Schlüsselstellung ein und so stellen sich hier eine Reihe ontogenetischer und phylogenetischer Probleme dar (FANGHÄNEL und SCHUMACHER, 1986). Die Hominoiden weisen gegenüber den anderen Primaten ein größeres Maß an Schädelbasisrotation auf (ROSS and HENNEBERG, 1995). Diese Schädelbasisknickung als Ausdruck der fortschreitenden evolutionären Tendenz der Menschenaffen zur Vergrößerung des Gehirns (Zerebralisation) wurde bereits von VIRCHOW (1856) erkannt. Laut WEIDENREICH (1924) und SERCER and KRMPOTIC (1960) stellt die Schädelbasisrotation eine Anpassung an die veränderte statische und dynamische Situation beim Aufrichten der Körperachse dar (EDLER,

2006). WEIDENREICH (1924) untersuchte in diesem Zusammenhang die Beziehungen zwischen der Aufrichtung des Körpers und der Schädelbasisknickungsverhältnisse aus phylogenetischer Sicht. Die Horizontallage des Gehirns verlagert sich bei Säugetieren, die sich aufrichten können, in eine schrägere Position (WEIDENREICH, 1950).

Zur Bestimmung der Schädelbasisknickungsverhältnisse als Ausdruck dieser Lageveränderung eignet sich laut MARKEFSKY und MARKEFSKY (1989) der Sphenoidal-Clivus-Winkel nach Landzert. Auch TITZ und RÖHL (1996) bevorzugen diesen Winkel, da dieser über Tangenten am Os basilare (VIRCHOW, 1856) und nicht an festen Knochenpunkten abgenommen werden kann.

Das Nasenskelett der Primatenschädel ist einer deutlichen Reduktion unterworfen. ANKEL (1970) begründet dies mit der stärkeren Orientierung durch visuelle Reize. Verschiedene Autoren erklären die Tendenz zur Rückverlagerung der Nase unter die Augenhöhle mit der Verdrängung des Septum interorbitale bei den Primaten, woraus eine Verkürzung von Ober- und Unterkiefer resultiert (ELLER, 1932; FANGHÄNEL und SCHUMACHER, 1986; GEISSLER, 2007). Das hat für die Kaumuskulatur aufgrund kürzerer Hebelarme statische und biomechanische Vorteile (PREUSCHOFT und WITZEL, 2005). Die so veränderte Morphologie der Interorbitalregion hat einen erheblichen Einfluss auf die Schädelpneumatisation, und hier besonders auf das Auftreten von Siebbeinzellen und Stirnhöhle bei Primaten (KOPPE et al., 1999). Dieses System von Nasennebenhöhlen, bestehend aus Sinus frontalis, Sinus sphenoidalis, Sinus maxillaris und den Cellulae ethmoidales ist bei den Catarrhini so nur bei Mensch, Gorilla und Schimpanse zu finden (WEGNER, 1936; CAVE and HAINES, 1940; TÖPPKE, 2010).

2.4 Anatomie der Nase

Die Nasenregion als oberster Teil des Respirationstraktes und zentrales Strukturelement im Gesichtsschädel kann in den Nasenvorhof (Vestibulum nasi) und die Nasenhaupthöhle (Cavitas nasi) untergliedert werden.

Die Funktionen der Nase sind:

- Aufnahme olfaktorischer Reize
- Anfeuchtung und Erwärmung der Inspirationsluft
- Thermoregulation
- Reinigung der Inspirationsluft
- Produktion von Stickstoffoxid

Die Nasenhaupthöhle der Primaten wird als relativ kurze, sehr hohe Höhle beschrieben (KOPPE and OHKAWA, 1999). KNAUER (1915) beschreibt die Schimpansennase als flach. Ihre mittlere Längsrinne ist wenig tief, die Knorpel der Nasenflügel nicht gewulstet und die Scheidewand schmal. Die Nasenhaupthöhle wird durch das im vorderen Bereich knorpelige (Cartilago quadrangularis) und im hinteren Bereich knöcherne Nasenseptum (Septum nasi) geteilt.

Der knöcherne Teil des Septums wird kranial durch die dünne Lamina perpendicularis des Os ethmoidale, kaudal von dem kräftigeren Vomer, und zu einem geringen Teil durch das Os palatinum gebildet. Der Nasenboden wird größtenteils durch die Maxilla gebildet.

Die seitlichen Wände der Nasenhaupthöhle sind geprägt durch die drei Nasenmuscheln, die über den Schwellungszustand des submukösen Gewebes einen wesentlichen Einfluss auf den Atemwegswiderstand haben (GÖTTE und NICOLAI, 2009). Die Nasenmuscheln erlauben eine Unterteilung der Nasenhaupthöhle in den unteren, den mittleren und den oberen Nasengang (Meatus nasi inferior, medius und superior). Die seitliche Nasenwand stellt des Weiteren den Einmündungsbereich und ontogenetischen Ursprung der Pneumatisation der Nasennebenhöhlen dar (PAULLI, 1900 a) (Abb. 4). Der Flimmerschlag des respiratorischen Epithels ist dabei immer auf den entwicklungsgeschichtlichen Ausgangspunkt des Sinus in Richtung Nasenhaupthöhle gerichtet (FREYSCHMIDT und VOGL, 2002).

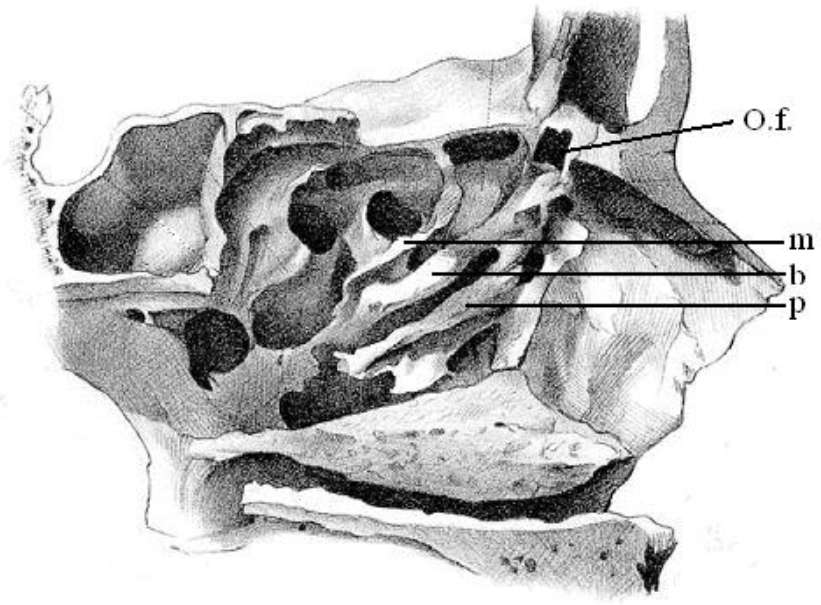


Abb. 4: Schnitt durch die laterale Nasenwand eines menschlichen Schädels mit Darstellung der Grundlamelle der mittleren Nasenmuschel;
O.f.: Ostium frontale; p: Processus uncinatus; b: Bulla ethmoidalis;
m: Grundlamelle der mittleren Muschel (nach ZUCKERKANDL, 1882-92)

2.5 Anatomie und Funktion der Nasennebenhöhlen

Als Nasennebenhöhlen werden lufthaltige, in unmittelbarer Nähe zur Nasenhaupthöhle und in diese sich öffnende Räume bezeichnet. WITMER (1999) konnte zeigen, dass Nasennebenhöhlen nur bei den Eutheriae und Archosauriae vorhanden sind. Die Homologie der Nasennebenhöhlenstrukturen bei unterschiedlichen Arten wird anhand ihrer Drainage in die Nasenhaupthöhle, und somit nach dem Ort der Entstehung ermittelt (SEYDEL, 1891; PAULLI, 1900 a; STARCK, 1978/79; ROSSIE, 2005).

Die afrikanischen Menschaffen und der Mensch besitzen drei paarige Nasennebenhöhlen und ein System aus kleinen, im Siebbein gelegenen Zellen. Die räumliche und strukturelle Ausdehnung der einzelnen Sinus kann stark variieren, sowohl inter-, als auch intraspezifisch (PAULLI, 1900; WEGNER, 1955/56; NEGUS, 1957; TERRIER et al., 1985; LUND, 1988). In der Ordnung der Primaten weisen die Hominoiden besonders stark ausgebildete Nasennebenhöhlen auf, was ANDREWS and MARTIN (1987) als ein Merkmal zur Unterscheidung von den anderen Catarrhini

anführen. Der Orang-Utan (*Pongo pygmaeus*) verfügt als einzige rezente Gattung der afrikanischen Menschenaffen über keine Stirnhöhle. Die Existenz von Siebbeinzellen beim Orang-Utan (*Pongo pygmaeus*) ist ebenfalls nicht zweifelsfrei belegt. Bestreiten WEINERT (1927), KLEINSCHMIDT (1933) und WEGNER (1936, 1955/56) deren Vorkommen, so beschreiben CAVE and HAINES (1940) und KOPPE and OHKAWA (1999) pneumatische Strukturen im Siebbein.

HAIKE (1910) und ESCHER (1948) übertrugen die Wittmaacksche Pneumatisationslehre des Warzenfortsatzes auf die Schädelpneumatisation. Danach kommt der Schleimhaut der Nasennebenhöhlen die entscheidende Bedeutung bei der Pneumatisation zu. Diese beeinflussende Faktoren sind: die Vererbung, das Knochenwachstum, das Gebiss, die Kaumuskulatur und die physiologische Nasendurchlässigkeit (NOWAK und MEHLIS, 1975) (Abb. 5). Die Nebenräume zeigen bezüglich Größe und Anlage eine starke Variabilität. PETER (1913) zufolge ist sie im Bereich der Siebbeinzellen und Stirnhöhle besonders groß, da diese sich aus verschiedenen Bereichen der Nasenhaupthöhle entwickeln können. Kiefer- und Keilbeinhöhle hingegen werden stets am gleichen Ort angelegt.

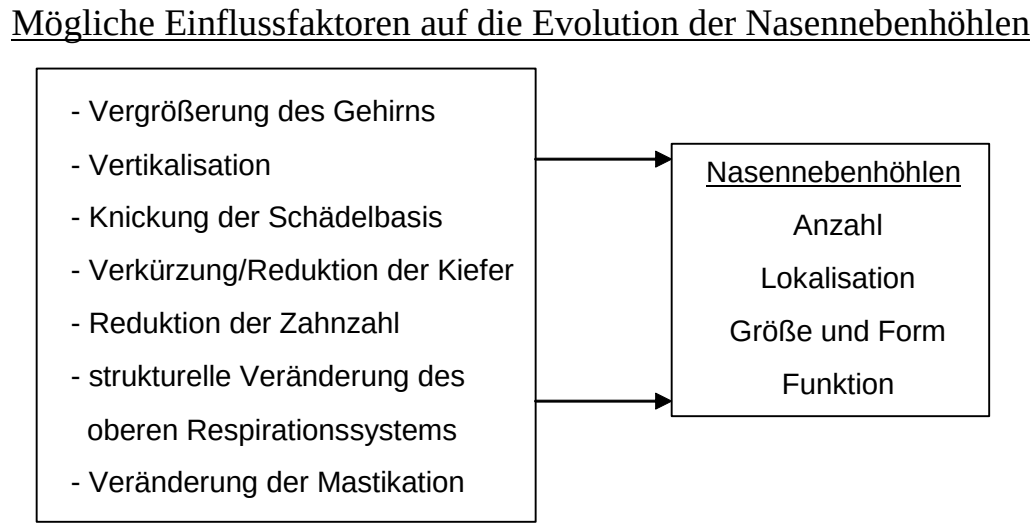


Abb. 5: Mögliche Einflussfaktoren auf die Evolution der Nasennebenhöhlen der Primaten (nach KOPPE et al., 1999)

Der paarig angelegte Sinus maxillaris, die beim Menschen größte Nebenhöhle, liegt in der Maxilla und drainiert über den Hiatus semilunaris in den mittleren Nasengang (PETER, 1913; GEURKINK, 1983). Der Ausführungsgang befindet sich nicht am tiefsten Punkt des Sinus, sondern im oberen Viertel der medialen Wand (FREYSCHMIDT und VOGL, 2002). Pathologische Geschehen im Bereich der vorderen Siebbeinzellen führen durch die enge Nachbarschaft häufig sekundär zu Erkrankungen des Sinus maxillaris und Sinus frontalis (SOMMER, 2009).

Der paarige Sinus frontalis ist eine in seiner Größe sehr variable Höhle (SZILVÁSSY, 1982; BROWN, 1984; HÖHNIG, 1999). SZILVÁSSY (1982) unterscheidet in diesem Zusammenhang vier unterschiedliche Formtypen: Bohnenform (Männer: 2,72%, Frauen: 3,86%), Blattform (M: 24,51%, F: 18,45%), Mitralform (M: 44,36%, F: 44,64%) und Pyramidenform (M: 28,42%, F: 33,04%). Im Gegensatz zur Kieferhöhle und den Siebbeinzellen, welche bereits bei der Geburt angelegt sind, vollzieht die Stirnhöhle nahezu ihre gesamte Entwicklung postnatal. Während die menschliche Stirnhöhle nach NIEDERER-LOHER (2010) erst mit etwa sechs bis acht Jahren belüftet wird, detektieren KRYMPOTIC-NEMANIC et al. (1997) diese röntgenologisch bereits bei einjährigen Menschen.

Die Bezeichnung als Sinus frontalis gibt laut PAULLI (1900 c) keinen Raum von bestimmtem morphologischen Wert an, da es sich hierbei um eine sich ins Stirnbein ausbreitende Siebbeinzelle handelt. Auch andere Autoren führen die Herausbildung des Sinus frontalis auf ein aktives Einwandern von Mukosazellen aus dem vorderen Ethmoidalkomplex in das Os frontale zurück (CAVE and HAINES, 1940; SZILVÁSSY, 1982; TERRIER et al., 1985; BLANEY, 1986; ANDREWS and MARTIN, 1987; MAFEE, 1993; FREYSCHMIDT und VOGL, 2002; ROSSIE, 2005). HÖHNIG (1999) bezweifelt diese Theorie, da sich in einem Versuch mit räumlicher Trennung eines Transplantates vom Os ethmoidale dennoch von Schleimhaut ausgekleidete Höhlen bildeten. In Anlehnung an SALINGER (1939) geht HÖHNIG (1999) von einem engen genetischen Zusammenhang zwischen der Sutura metopica und der Entwicklung des Sinus frontalis aus.

Die im Os frontale gelegene Höhle liegt oberhalb der vorderen Nasenhöhle und der Orbita. Da sich linke und rechte Seite unabhängig voneinander entwickeln, können häufig deutliche Unterschiede des Pneumatisationsgrades gefunden werden (SZILVÁSSY, 1982; WEIGLEIN, 1999). Nach DANIELS et al. (2003) stellt sich die Drainage des Sinus frontalis direkt in den mittleren Nasengang oder über das Infundibulum ethmoidale als komplexeste und variabelste aller Nasennebenhöhlen dar (SOMMER, 2009). Auch TERRIER et al. (1985) weisen auf die sehr variable Lage der nasalen Öffnung hin.

Der unterhalb der Sella turcica gelegene, beim Schimpansen nahezu das gesamte Keilbein pneumatisierende, Sinus sphenoidalis liegt im hinteren Bereich der Nasenhöhle und drainiert in den Recessus sphenoethmoidalis im oberen hinteren Winkel der Nasenhaupthöhle (PETER, 1913). Dieser Sinus ist nach KILLIAN (1895-96) und PAULLI (1900 c) keine echte pneumatische Höhle, sondern nur der hinterste, sekundär abgeschnürte Teil der ursprünglichen Nasenhaupthöhle. PETER (1913) hingegen geht auch bei der Entstehung der Keilbeinhöhle von sich ausstülpendem Nasenhöhlenepithel und nicht von einer Abschnürung aus. WEIGLEIN (1999) zufolge geht der Sinus sphenoidalis aus der hintersten Siebbeinzelle hervor. Die beiden im Keilbein liegenden Räume sind lediglich durch ein knöchernes, häufig nicht mittig gelegenes Septum voneinander getrennt (HOUSE, 1966). Der Grad der Pneumatisation der Keilbeinhöhle variiert erheblich (GEURKINK, 1983), wobei einige Autoren einen Zusammenhang mit der basikranialen Krümmung vermuten. Hierbei bedeute eine Zunahme der Krümmung auch eine Vergrößerung des Sinusvolumens (KOPPE et al., 1999).

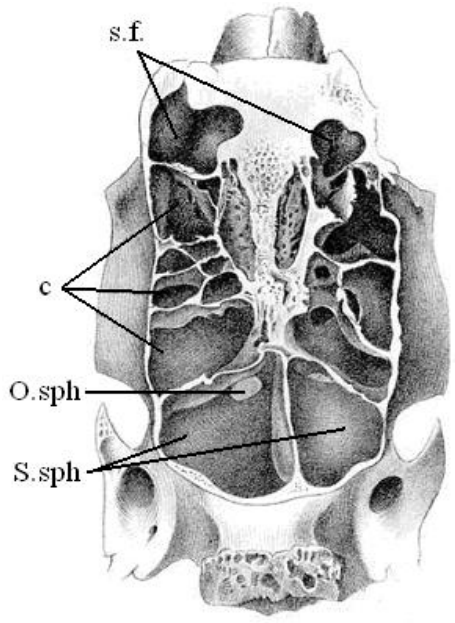


Abb. 6: Horizontaler Schnitt durch das menschliche Siebbein;
s.f.: Sinus frontalis; c: Cellulae ethmoidales und horizontale Trabekel;
O.sph.: Ostium des Sinus sphenoidalis; S.sph.: Sinus sphenoidalis
(nach ZUCKERKANDL, 1882-92)

Als Cellulae ethmoidales werden die kleinen, honigwabenartigen, lufthaltigen und zumeist im Os ethmoidale gelegenen Zellen zwischen Sinus maxillaris, seitlicher Nasenwand, Orbita und Sinus sphenoidalis bezeichnet (Abb. 6). Sie stülpen sich, wie der Sinus maxillaris und sphenoidalis, ab dem dritten Fetalmonat aus (GEURKINK, 1983). Aufgrund der frühen Verknöcherung des Ethmoids sind die einzelnen Zellen bereits ab dem siebenten beziehungsweise achten Monat der Fetalentwicklung durch Knochenlamellen voneinander getrennt. Bei 94% der neugeborenen Menschen konnten SPAETH et al. (1997) bereits röntgenologisch Siebbeinzellen nachweisen. Auch WEIGLEIN (1999) zufolge ist bereits zum Zeitpunkt der Geburt die volle Anzahl an Siebbeinzellen nachweisbar. Diese nehmen postnatal weiter an Größe zu (WEIGLEIN, 1999).

Begrenzt werden die menschlichen Siebbeinzellen lateral durch die Lamina papyracea der Orbita und nach kranial durch die zum Os frontale gehörenden Foveolae ethmoidales (GÖTTE und NICOLAI, 2009). Während einige Autoren die Siebbeinzellen in vordere, mittlere und hintere Zellen unterteilen, fassen zahlreiche

Autoren die vorderen und mittleren zu den vorderen Siebbeinzellen zusammen (TERRIER et al., 1985; VALVASSORI et al., 2004; GÖTTE und NOKOLAI, 2009).

Die Unterteilung der Siebbeinzellen in vordere und hintere erfolgt dabei anhand ihrer Lage vor oder hinter der Grundlamelle der mittleren Nasenmuschel (STAMMBERGER et al., 1997). Darunter ist der von vorn nach hinten S-förmig verlaufende Ansatz der mittleren Nasenmuschel zu verstehen (GÖTTE und NICOLAI, 2009).

Drainieren die vorderen Siebbeinzellen in den Bereich des mittleren Nasengangs, so öffnen sich die hinteren in den des oberen Nasengangs und, wenn eine Concha nasalis suprema vorhanden ist, gelegentlich auch in den Bereich des obersten Nasengangs (PETER, 1913; DANIELS et al., 2003). Die hinteren Siebbeinzellen des Menschen sind dabei gegenüber den vorderen weniger zahlreich und größer (TERRIER et al., 1985).

WEIGLEIN (1999) unterscheidet die Zellen nach VAN ALYEA (1939) und MOSS-SALENTIJN (1991):

1. Drainage in den meatus nasi medius:
   a) Infundibuläre Zellen
      - Agger nasi (anterosuperiore Zellen)
      - Sinus frontalis Zellen
      - Terminale (lacrimale) Zellen
      - Suprainfundibuläre Zellen
      - Inferiore Zellen
   b) Bulläre Zellen
      - Bulläre Zellen
      - Suprabulläre Zellen
   c) Zellen der Concha nasalis
   d) Zellen des Rezessus frontalis
2. Drainage in den Meatus nasi superior
   a) Posteriore Zellen
3. Drainage in den Meatus nasi supremus
   a) Postreme Zellen

Innerhalb der vorderen und hinteren Siebbeinzellgruppe gibt es anhand ihrer Lokalisation gesondert bezeichnete Zellen. So werden Zellen, die die orbitale Platte des Os frontale pneumatisieren, als supraorbitale Zellen bezeichnet (GOTWALD, 2001). Eine infraorbitale Siebbeinzelle, auch Hallerzelle genannt, pneumatisiert den Bereich zwischen Boden der Orbita und Dach der Kieferhöhle. Die Angaben bezüglich der Häufigkeit beim Menschen variieren sehr stark (4 % bei WEIGLEIN, 1999 bis 45,1% bei BOLGER, 1991), wobei vermutlich unterschiedliche Definitionen für diese Schwankungen verantwortlich sind.

Gelegentlich ist eine Pneumatisation der Umgebung des Nervus opticus durch hintere Siebbeinzellen zu beobachten, welche dann als Onodizellen bezeichnet werden. Diese Zellen können posterior bis in den Bereich des Sinus sphenoidalis eindringen beziehungsweise die vordere Wand des Türkensattels pneumatisieren (MAFEE, 1993). BASIĆ et al. (1999) geben deren Häufigkeit beim Menschen mit 10,4% an.

Eine weitere Gruppe von Siebbeinzellen liegt nicht vollständig im Ethmoid und bildet die sogenannten extramuralen Zellen (MAFEE, 1993).

Auch TERRIER et al. (1985) unterteilen die menschlichen Siebbeinzellen nicht nur in vordere und hintere Siebbeinzellen. Die vorderen werden weiter in Zellen des Prozessus uncinatus, des mittleren Nasenganges (auch als orbitale Zellen bezeichnet) und der Bulla ethmoidalis (auch als nasale Zellen bezeichnet) unterteilt. Bei den hinteren werden lediglich die Onodizellen gesondert erwähnt. TERRIER et al. (1985) nehmen bei den Siebbeinzellen anhand ihrer Drainage eine Unterteilung in zwei anatomisch und funktionell voneinander getrennte Einheiten vor. Die erste Gruppe bilden die vorderen Siebbeinzellen gemeinsam mit den Sinus frontales und maxillares, welche alle in den mittleren Nasengang im Bereich der Bulla ethmoidalis münden. Die zweite Gruppe wird durch die hinteren Siebbeinzellen und den Sinus sphenoidalis gebildet, welche sich in den Bereich oberhalb der mittleren Turbinalia (Ethmoturbinale I) öffnen und somit weniger zu chronisch entzündlichen Prozessen und Ausbildung von Polypen neigen.

HOUSE (1966) beschreibt, dass die vordere und mittlere Siebbeinzelle beim Schimpansen, im Unterschied zum Menschen in den oberen Nasengang drainieren, wobei sich der Sinus frontalis gemeinsam mit den mittleren Zellen in die Nasenhaupthöhle öffnet. Die hintere Siebbeinzelle soll sich über den Recessus sphenoethmoidalis in die Nasenhaupthöhle öffnen. Die größte Zelle des vorderen Systems beim Menschen ist die Bulla ethmoidalis. PAULLI (1900 a) betrachtet sie aufgrund ihrer Lage zwischen Processus uncinatus und Concha nasalis inferior als rudimentäre Ektoturbinalia. Ihre Vorwölbung in die Nasenhaupthöhle macht sie zu einer wichtigen Landmarke in der endoskopischen Nasenchirurgie. Die menschliche Bulla ethmoidalis ist die konstanteste Siebbeinzelle (SOMMER, 2009) und bildet die kaudale Grenze der Siebbeinpneumatisation. Sie ist hier zu 70% pneumatisiert und in 30% lediglich als Torus lateralis (Grünwald) ausgebildet (HOSEMANN und KÜHNEL, 2001). HOUSE (1966) spricht von einem vollständigen Fehlen sowohl der Bulla ethmoidalis als auch des Hiatus semilunaris beim Schimpansen.

Abgesehen vom Gibbon zeigen die Nasennebenhöhlen des Schimpansen die primitivste Anlage unter den anthropoiden Affen (CAVE and HAINES, 1940). WEGNER (1936) bezeichnet den Schimpansen als den dem Menschen ähnlichsten Anthropoiden hinsichtlich der Nasenhöhlenverhältnisse, des gut entwickelten Sinus ethmoidalis, des langen Hiatus semilunaris und der Bulla ethmoidalis.

Das beim Menschen komplizierte Siebbeinlabyrinth gestaltet sich beim Schimpansen einfacher (KOPPE and OHKAWA, 1999). Geben STRUTZ und MANN (2001) die Anzahl der menschlichen Siebbeinzellen mit zwei bis zehn vorderen und zwei bis sechs hinteren und TERRIER et al. (1985) mit sieben bis zehn Zellen pro Seite an, so ist deren Zahl beim Schimpansen und Gorilla deutlich geringer. KOPPE and OHKAWA (1999) benennen deren Anzahl beim Schimpansen mit nicht mehr als drei recht uniformen pneumatischen Räumen. Nach HOUSE (1966) ist dabei die hintere Zelle größer und weist vermutlich eine weitere Unterteilung auf. CAVE and HAINES (1940) sprechen beim Gorilla von maximal drei Siebbeinzellen (eine vordere und zwei hintere Zellen), welche in der späten Jugendphase beziehungsweise frühen Erwachsenenphase ihre Maximalgröße und –anzahl erreichen. Die für den Gorilla in der späteren Entwicklung

berichtete Reduktion der Zellenanzahl (WEGNER, 1936; CAVE and HAINES, 1940), ausgelöst durch eine starke Pneumatisation des Sinus maxillaris oder gelegentlich auch des Sinus frontalis, konnte beim Schimpansen nicht beobachtet werden (WEGNER, 1936).

Aufgrund der komplexen Struktur des Siebbeins finden sich volumetrische Bestimmungen der Siebbeinzellen nur vereinzelt. Die in der Vergangenheit genutzten Methoden zur Bestimmung des Rauminhaltes der Nasennebenhöhlen, wie beispielsweise mittels Schrot (SCHÜRCH, 1906), Wachs (BRAUNE und CLASEN, 1877), Wasser (MÜNDNICH, 1938) oder Quecksilber (BEZOLD, 1945), konnten häufig im Bereich der Siebbeinzellen aufgrund der grazilen Strukturen mit kleinem Rauminhalt nicht angewandt werden.

Nach TERRIER et al. (1985) und MAFEE (1993) sind die Ostien der Nasennebenhöhlen in computertomographischen Aufnahmen nicht immer eindeutig darstellbar. Dies kann zu Unstimmigkeiten bei der Zuordnung einzelner Räume zu einer bestimmten Nasennebenhöhlengruppe führen.

Die Funktion der Sinus paranasales wird kontrovers diskutiert. KOPPE und SCHUMACHER (1992) sehen eine mögliche Ursache im Fehlen eines hinreichend genauen quantitativen Datenmaterials sowie in der Vernachlässigung vergleichender Aspekte. Verschiedene Autoren haben mögliche Funktionen zusammengetragen und interpretiert (NEGUS, 1958; BLANTON and BIGGS, 1969; TAKAHASHI, 1984; BLANEY, 1990; WITMER, 1997; KOPPE et al., 1999). Es wird allgemein davon ausgegangen, dass die pneumatischen Höhlen eine Reihe unterschiedlicher Funktionen erfüllen (BLANTON and BIGGS, 1969), wobei der Schlüssel zu deren Verständnis laut KOPPE et al. (1999) nicht allein in deren struktureller Rolle innerhalb der Schädelarchitektur, sondern auch im Wissen um ihre Einbindung in das obere Respirationssystem liegt.

BLANTON and BIGGS (1969) nennen die in der Vergangenheit am häufigsten genannten Theorien:

- Gewichtsreduktion zur besseren Schädelbalance
- Anfeuchtung und Erwärmung der Inspirationsluft
- Oberflächenvergrößerung der olfaktorischen Membran
- Resonanzraum für die Stimme
- Evolutionäre Überbleibsel beziehungsweise funktionslose lufthaltige Bereiche
- Absorption von auf den Kopf einwirkenden Schock- und Schlagphänomenen
- Schleimproduktion zur Anfeuchtung der Nasenschleimhaut
- Temperaturisolation der Nervzentren und des Gehirns
- Einfluss auf Schädelwachstum und –architektur

In der Literatur wird über zahlreiche Funktionen kontrovers diskutiert.

- *Gewichtsreduktion zur besseren Schädelbalance*

BRAUNE und CLASEN (1877) haben ermittelt, dass die Gewichtsreduktion durch die Nebenhöhlen lediglich 1% beträgt.

- *Anfeuchtung und Erwärmung der Inspirationsluft*

Nach BLANTON and BIGGS (1969) spielt die Konditionierung der Inspirationsluft durch die Nasennebenhöhlen aufgrund der sehr englumigen Ostien keine maßgebliche Rolle.

- *Oberflächenvergrößerung der olfaktorischen Membran*

Die olfaktorische Membran erstreckt sich bei den Primaten lediglich auf ein kleines Rezeptorenfeld im oberen Bereich der Nasenhaupthöhle. Eine Oberflächenvergrößerung in den Bereich der Nasennebenhöhlen oder auf die Turbinalia findet nicht statt. Fibröse Strukturen, Volumenunterschiede oder das vollständige Fehlen der Nasennebenhöhlen haben auf den Geruchssinn keinen Einfluss. PROETZ (1953) zufolge lässt der Fund von Rezeptorarealen in den Nasennebenhöhlen einiger niederer Tiere nicht zweifelsfrei auf ein ursprüngliches Merkmal schließen. Auch der Verlust des Geruchssinnes in diesem Bereich bei gleichzeitiger Persistenz der Nasennebenhöhlen lässt sich so nicht erklären (PROETZ, 1953). Beim Menschen haben die Nasennebenhöhlen für die Geruchswahrnehmung keine Funktion.

- *Resonanzraum für die Stimme*

Der Einfluss der Sinus auf die Stimmresonanz wird von BLANTON and BIGGS (1969) als nachvollziehbar, aber eher sekundär eingeschätzt.

- *Evolutionäre Überbleibsel beziehungsweise funktionslose lufthaltige Bereiche oder Einfluss auf Schädelwachstum und -architektur*

Bluntschli entwickelte 1926 das so genannte Kraftliniengesetz (BEZOLD, 1945). Dabei entstehen im Bereich des Gesichtsschädels neben den mechanisch stark beanspruchten Kraftlinien andere weniger stark beanspruchte Bereiche. In diesen Bereichen wird der Knochen zwar reduziert, die Nasennebenhöhlen sind dennoch nicht als tote Areale zu betrachten. Diese Region ist für das Schädelwachstum sowie dessen Statik und Architektur von wichtiger Funktion. Die menschlichen Nasennebenhöhlen liegen dabei vollständig vor dem Schwerpunkt des Kopfes, was auf eine statische Bedeutung der Pneumatisation hinweist (BEZOLD, 1945). Auch KOPPE et al. (1999) bezeichnen die Nasennebenhöhlen nicht als ungewollte Räume, sondern als Schlüsselstrukturen bei der Auseinandersetzung mit der Evolution der Primaten.

- *Absorption von auf den Kopf einwirkenden Schock- und Schlagphänomenen*

Bei den zu den Paarhufern (Artiodactyla) gehörenden *Bovidae* (Rinderartigen) vergrößert sich mit zunehmender Horngröße auch der Sinus frontalis. SCHAFFER and REED (1972) sehen hier eine mögliche Anpassung der Stirnhöhle an die Funktion der Hörner. FARKE (2007) sieht diesen direkten Zusammenhang nicht. Er spricht davon, dass die Größe des Sinus von verschiedenen morphologischen Komponenten in dieser Region abhängt.

-*Temperaturisolation der Nervzentren und des Gehirns*

Die Funktion der Temperaturisolation der Nervzentren und des Gehirns zur Anpassung an die klimatischen Verhältnisse wird mit den großen Stirnhöhlen der Neandertaler als Anpassung an die letzte Eiszeit erklärt. Heute in kalten Klimazonen lebende Menschen wie die Inuit weisen hingegen eine geringe Pneumatisation der Stirnhöhlen auf (KOERTVELYESSY, 1972; SZILVÁSSY, 1982). BAKER (1979) spricht von „selective brain cooling (SBC)“ bei dem durch Einfluss arteriellen Blutes aus kühleren Bereichen die Gehirntemperatur in hyperthermischen Phasen konstant gehalten werden kann (SIMOENS et al., 1987; ZENKER and KUBIK, 1996).

- *Schleimproduktion zur Anfeuchtung der Nasenschleimhaut*

Neben der diskutierten Schleimproduktion stellt die Produktion von Stickstoffoxid durch das Enzym Stickstoffoxid-Synthase (NOS) im Nasennebenhöhlenepithel eine mögliche weitere Funktion der Sinus paranasales dar (GUSTAFSSON et al., 1991; LUNDBERG et al., 1995; MANISCALCO et al., 2007). Stickstoffoxid führt unter anderem zu einer Vasodilatation an der glatten Gefäßmuskulatur (WANG et al., 2003; BALCUN, 2007).

Die Entstehung der Nasennebenhöhlen wird von IHLE et al. (1927) als Verschwinden der Spongiosa und Auseinanderweichen der kompakten Grenzlagen beschrieben. Alle Sinus gehen aus kleinen Ausbuchtungen der Nasenhaupthöhle hervor (PETER, 1913; WITMER, 1999). Die Pneumatisation kann in zwei Phasen untergliedert werden. In der primären Pneumatisation kommt es zur Bildung sogenannter Paleosinus. Mit der anschließenden, größtenteils postnatal stattfindenden, sekundären Pneumatisation bilden sich die Neosinus (WITMER, 1999). Aufgrund von Überlagerungen, Überwachsungen und gemeinsamen Öffnungen verschiedener Zellen kann es bei deren Zuordnung zu Unstimmigkeiten kommen. PETER (1913) weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass der morphologische Wert einer Siebbeinzelle nicht nach ihrer Lage, sondern anhand der Position ihrer Öffnung in die Nasenhaupthöhle zu bestimmen sei. Beim Menschen beginnt deren Entwicklung in der 10. bis 12. Schwangerschaftswoche (WEIGLEIN, 1999). Die Schleimhaut der Nasenhöhle dringt dabei in sie ein und kleidet den Raum von innen aus (ELLER, 1932). CAVE (1959) wählte dafür den Begriff der „pneumatic osteolysis“ und definierte ihn als Prozess, bei dem eindringende lufthaltige Kammern eine progressive Pneumatisation eines oder mehrerer kranieller Elemente hervorrufen. Dies beinhaltet eine Absorption sowohl der internen, spongiösen als auch externen kompakten knöchernen Strukturen. Der Grund dieses komplizierten Vorgangs sowie die Kontrollmechanismen sind nur unzulänglich geklärt (CAVE, 1961). Es fehlen noch viele Erkenntnisse über die Pneumatisationsvorgänge auf Zell- und Gewebeebene (WITMER, 1999).

WITMER (1999) nennt die Kieferhöhle als einzige aus der respiratorischen Region entstehende Höhle. Das Siebbeinlabyrinth und die daraus entstehenden Sinus frontales und sphenoidales hingegen sollen sich aus der olfaktorischen Region entwickeln.

2.6 Anatomie des Siebbeins

Das Siebbein ist ein komplexer Knochen im Zentrum des Mittelgesichts. Beim Menschen artikuliert es mit zahlreichen anderen Knochen (Os frontale, sphenoidale, nasale, lacrimale, palatinale, dem Vomer, der Maxilla und der Concha nasalis inferior) (MAFEE, 1993). Eine der ersten detaillierten Darstellungen des Siebbeins stammt von ZUCKERKANDL (1882-92). Das sich chondral aus dem knorpeligen Nasenskelett entwickelnde Siebbein ist eine anatomische Leichtbaukonstruktion im zentralen Mittelgesicht (BEHRBOHM, 2009), welches, von frontal betrachtet, die Form eines römischen Kreuzes aufweist (TERRIER et al., 1985). Unter dem Siebbein liegt in der Medianebene das unpaare Pflugscharbein. Nach posterior schließt das Keilbein an. Das menschliche Siebbein besteht aus einer horizontalen Platte, der Lamina cribrosa, einer mittig angeordneten vertikalen Knochenlamelle, der Lamina perpendicularis, und den seitlich gelagerten, stark gekammerten Siebbeinlabyrinthen (SCHUMACHER, 1997). Das Labyrinth hat vereinfacht betrachtet die Form einer auf der schmalen Seite stehenden Streichholzschachtel, dessen Breite erheblich variieren kann (MAY, 1991; LEVINE et al., 1993). Jedes Siebbein hat einen individuellen Bauplan, keines gleicht dem anderen vollkommen (BEHRBOHM, 2009).

Das Siebbein der Primaten unterscheidet sich deutlich von dem der übrigen Säugetiere. PAULLI (1900 c) erklärt dies mit einer Reduktion des Riechorgans und den Veränderungen des Schädels. Diese Veränderungen beruhen auf einer starken Entfaltung der Hemisphären, der Lageveränderung der Augenhöhlen und der infrazerebralen Verschiebung des Kieferskeletts. Die Lamina cribrosa, welche den knöchernen Teil der oberen Nasenhöhle und den mittleren Bodenteil der vorderen Schädelgrube bildet, weist viele Perforationen auf. Diese dienen den Fasern des Riechnerves, den Nn. olfactorii, zum Durchtritt in die Nasenhöhle. Der nasale Bereich der Lamina cribrosa ist Sitz der Riechschleimhaut, Regio olfactoria. Die Lamina

perpendicularis bildet den oberen Teil des knöchernen Nasenseptums. Der untere Teil wird durch das unpaare Pflugscharbein gebildet.

Obwohl die Architektur des Siebbeins bei allen heute lebenden Primaten sehr ähnlich ist, verfügen nur die afrikanischen Menschenaffen und der Mensch über Siebbeinzellen (MOORE, 1981). Das von axial betrachtet trapezförmige bis quadratische Siebbeinlabyrinth des Menschen grenzt mit der Lamina orbitalis, auch Lamina papyracea genannt, an die Orbita (TERRIER et al., 1985). Das Labyrinth enthält die Siebbeinzellen. Die posteriore Begrenzung des Labyrinthes ist gleichbedeutend mit der anterioren Knochenwand des Sinus sphenoidalis. Der nasale Bereich des Labyrinthes bildet die obere und mittlere Nasenmuschel. Die untere Nasenmuschel wird durch einen eigenständigen Knochen gebildet (TERRIER et al., 1985). ELLER (1932) und CAVE (1940) bezeichnen die Nasenmuscheln des Schimpansen in Analogie zur vergleichenden Anatomie wie folgt:

Os ethmoidale	Concha nasalis suprema	Ethmoturbinale III
	Concha nasalis superior	Ethmoturbinale II
	Concha nasalis media	Ethmoturbinale I
Os turbinale	Concha nasalis inferior	Maxilloturbinale

Die meisten Säugetiere haben eine Grundausstattung von fünf Ethmoturbinalia in jeder Schädelhälfte (GEISSMANN, 2003). Bei allen Trockennasenprimaten ist deren Zahl auf zwei reduziert (ohne das Nasoturbinale); ein drittes kann noch rudimentär angelegt sein (ANKEL, 1970; GEISSMANN, 2003). Nach GEURKINK (1983) können beim Menschen fetal ab dem siebenten Monat zahlreiche Turbinalia nachgewiesen werden, welche bis zur Geburt zu zwei bis drei verschmelzen.

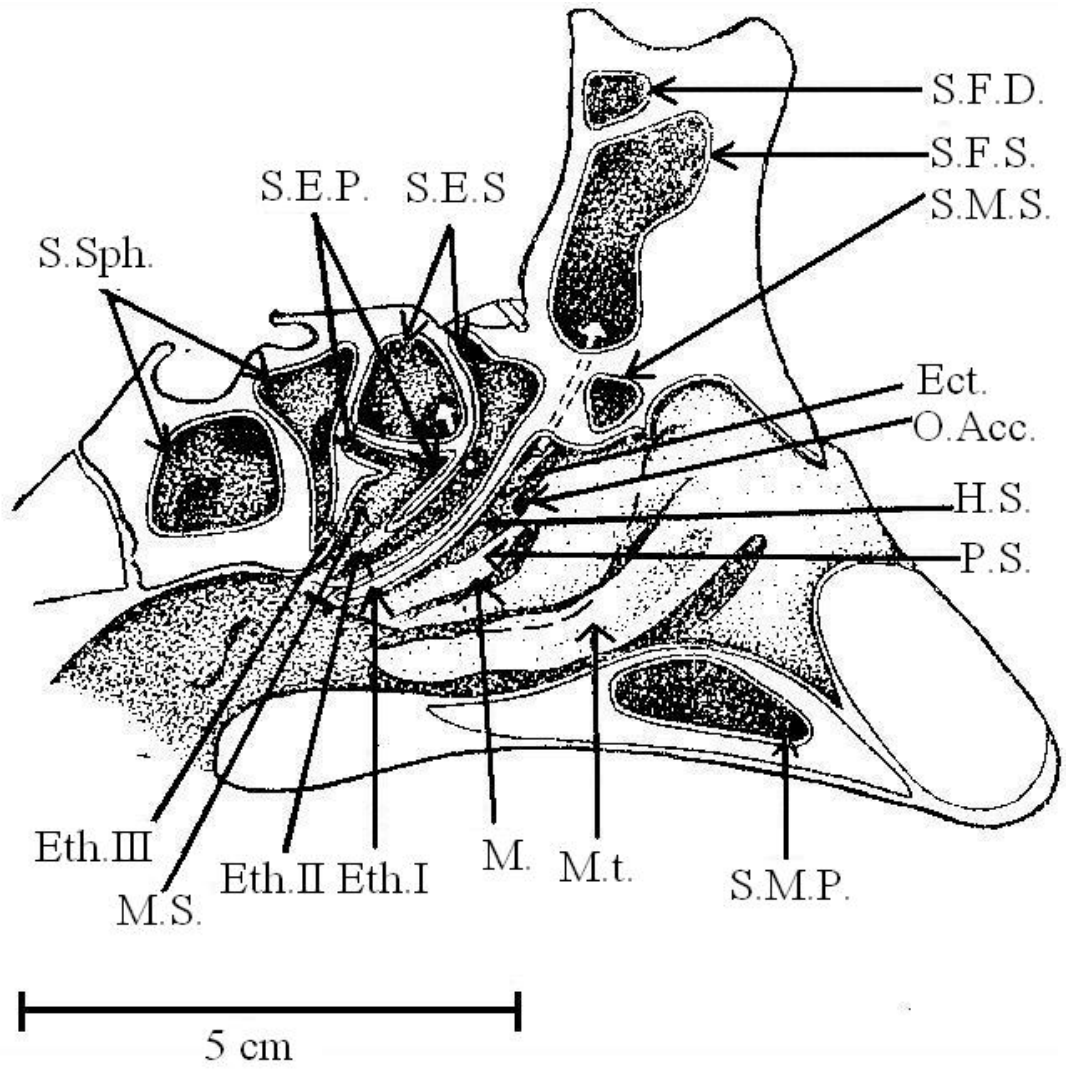


Abb. 7: Laterale Wand der rechten Nasenhaupthöhle eines sechs Jahre alten weiblichen Schimpansen;
Ect: erstes Ektoturbinale (Bulla ethmoidalis); Eth. I, II, III: erstes, zweites und drittes Ethmoturbinale (Concha nasalis media, superior und suprema);
H.S.: Hiatus semilunaris; M.: Margo saliens; M.S.: Meatus nasi suprema;
M.t.: Maxilloturbinale (Concha nasalis inferior); O. Acc.: zusätzliches Ostium des Sinus frontalis; P.S.: Plica semilunaris; S.E.S.: Cellulae ethmoidales posteriores ausgehend vom Meatus nasi superior; S.F.D.: Sinus frontalis dexter; S.F.S.: Sinus frontalis sinister; S.M.P.: intrapalatinale Extension des Sinus maxillaris; S.M.S.: obere Extension des Sinus maxillaris; S.Sph.: Sinus sphenoidalis; geschrichelte Linie: Umriss der Concha nasalis media;
S.E.P.: hintere Siebbeinzelle ausgehend vom Meatus nasi suprema
(nach CAVE, 1949)

Eine häufige Variation stellt die Concha bullosa, eine Pneumatisation des I. Ethmoturbinale, dar (ZINREICH et al., 1988). Das vordere Siebbeinzellsystem ist funktionell und anatomisch der Kiefer- und Stirnhöhle vorgeschaltet, da diese über keine direkte Verbindung zur Nasenhaupthöhle verfügen und Belüftung und Drainage indirekt über die Siebbeinzellen erfolgt (RETTINGER, 1999; SOMMER, 2009). Bei der chronischen Sinusitis stellen die vorderen Siebbeinzellen und hier besonders die Bulla ethmoidalis (MUNTZ und LUSK, 1991; JIANG et al., 1997) sowie der osteomeatale Komplex eine Schlüsselregion in der Pathogenese dar (MAFEE, 1993; ROMBAUX et al., 2005).

Als osteomeataler Komplex wird dabei der Bereich des mittleren Nasengangs bezeichnet, in den Sinus maxillaris und frontalis sowie die vorderen und mittleren Siebbeinzellen drainieren (MAFEE, 1993, 1995). Dieser Komplex wird medial durch das I. Ethmoturbinale, lateral durch die Lamina papyracea sowie kranial und kaudal durch die Basallamelle begrenzt. Er enthält die Bulla ethmoidalis, die vorderen Siebbeinzellen, die Agger nasi Zellen, das Infundibulum und den Rezessus frontalis (LEVINE et al., 1993) (Abb. 19).

3 Material und Methoden

3.1 Material

Es standen für die Untersuchung Computertomographiedatensätze von 21 weichteilbedeckten Schimpansenköpfen (*Pan troglodytes*) unterschiedlichen postnatalen Alters und beiderlei Geschlechts zur Verfügung (Tab. 1). Die Präparate entstammen der Sammlung des Primate Research Institute, Kyoto University, Japan. Die Schimpansen wurden aufgrund unbekannten biologischen Alters in Anlehnung an FRENKERT (2009) anhand der Dentition in drei Altersgruppen eingeteilt.

- infantil - Milchzahngebiss (Gebissphase bis zum Durchbruch des ersten permanenten Molaren)
- juvenil - Wechselgebiss (Phase zwischen dem Durchbruch des ersten und zweiten permanenten Molaren)
- adult - permanentes Gebiss (nach Durchbruch des zweiten permanenten Molaren)

3.2 Methoden

3.2.1 Computertomographische Untersuchung

Die morphologische Analyse der Nasennebenhöhlen sowie Vermessung ausgewählter Schädelmaße erfolgte anhand computertomographischer Schichtaufnahmen. Die Köpfe wurden im Laboratory of Physical Anthropology der Kyoto University (Japan) bei 120 kV und 80 bis 150 mA mit einem Computertomographen des Typs Xvision (Toshiba®, Tokio) geröntgt. Sie wurden dabei nach der Frankfurter Horizontalebene ausgerichtet. Von 20 Köpfen entstanden CT-Schichtaufnahmen in der Transversalebene mit einer Schichtdicke von 0,2 mm. Bei einem weiteren adulten Kopf wurden die CT-Schichtaufnahmen in der Frontalebene mit einer Schichtdicke von 0,4 mm erstellt (Tab. 20, Anhang).

Tab. 1: Geschlecht und Altersgruppe der Köpfe von *Pan troglodytes*

Alter	männlich	weiblich	unbekannt
infantil	3	3	
juvenil	4	7	2
adult	2		

3.2.2 Metrische Schädeluntersuchung

3.2.2.1 Festlegung der Schädelmaße

Um die an den Nasennebenhöhlen ermittelten Volumina (s. Kap. 4.2) in einen schädelmorphologischen Kontext setzen zu können, wurden verschiedene Schädelmaße erhoben.

Mit Ausnahme der größten Schädellänge L1, der Intraorbitalbreite B4 und den Höhenmaßen H2 und H3 erfolgte die Festlegung der Strecken in Anlehnung an MARTIN (1928), KNUSSMANN (1988) und WHITEHEAD (2005).

Da die Schädelmaße an den weichteilbedeckten Köpfen nicht direkt gemessen werden konnten, wurden hierfür die entsprechenden CT-Aufnahmen genutzt. Mit Hilfe der Software Volocity® 4.2 (Improvision Ltd., A PerkinElmer Company, Coventry, UK) wurden aus den Computertomographiedatensätzen dreidimensionale Rekonstruktionen der Schimpansenköpfe erstellt. An diesen erhoben wir in der Median-Sagittalebene die folgenden Längen-, Breiten- und Höhenmaße sowie den Schädelbasisknickungswinkel nach Landzert. Die Zahlen in den eckigen Klammern entsprechen dabei den Maßen von MARTIN (1928).

Längenmaße

L1: Größte Schädellänge (Prosthion – Opisthokranion)

L2: Schädelbasislänge (Nasion – Basion) [5]

L3: Gesichtslänge (Basion – Prosthion) [40]

L4: Gaumenlänge (Orale – Staphylion) [62]

Breitenmaße

B1: Mittelgesichtsbreite (Zygomaxillare – Zygomaxillare) [46]

B2: Maxilloalveolarbreite (Ektomolare – Ektomolare) [61]

B3: Gaumenbreite (Endomolare – Endomolare) [63]

B4: Interorbitalbreite (konstruierte Messpunkte)
[in Anlehnung an Maß 50 in MARTIN 1928]

Höhenmaße

H1: Obergesichtshöhe (Nasion – Prosthion) [48]

H2: Nasenhöhe I (Staphylion – kranialste Extension der Crista galli)

H3: Nasenhöhe II (nasaler Eingang des Canalis incisivus – kranialste Extension der Crista galli) [in Anlehnung an die Nasenhöhe, Maß 55, in MARTIN 1928]

Winkelmaß

W1: Schädelbasisknickungswinkel (Sphenoidal-Clivus-Winkel nach Landzert) (VIRCHOW, 1856; WILL, 2001)

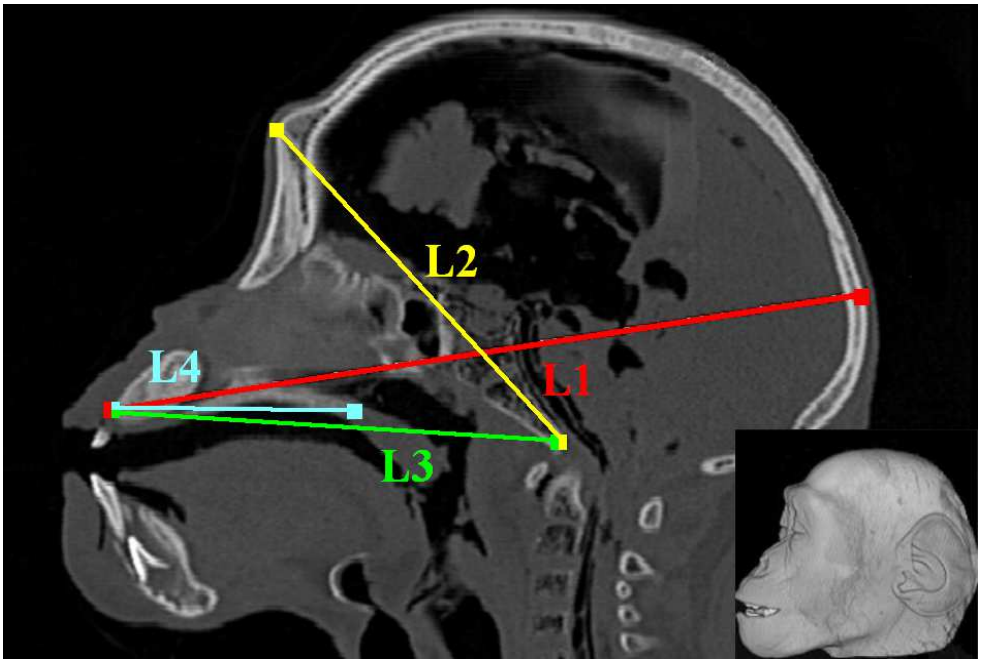


Abb. 8: CT-Schichtaufnahme in der Medianebene eines weiblichen juvenilen Schimpansenkopfes mit Darstellung der größten Schädellänge (L1), der Schädelbasislänge (L2), der Gesichtslänge (L3) und der Gaumenlänge (L4)

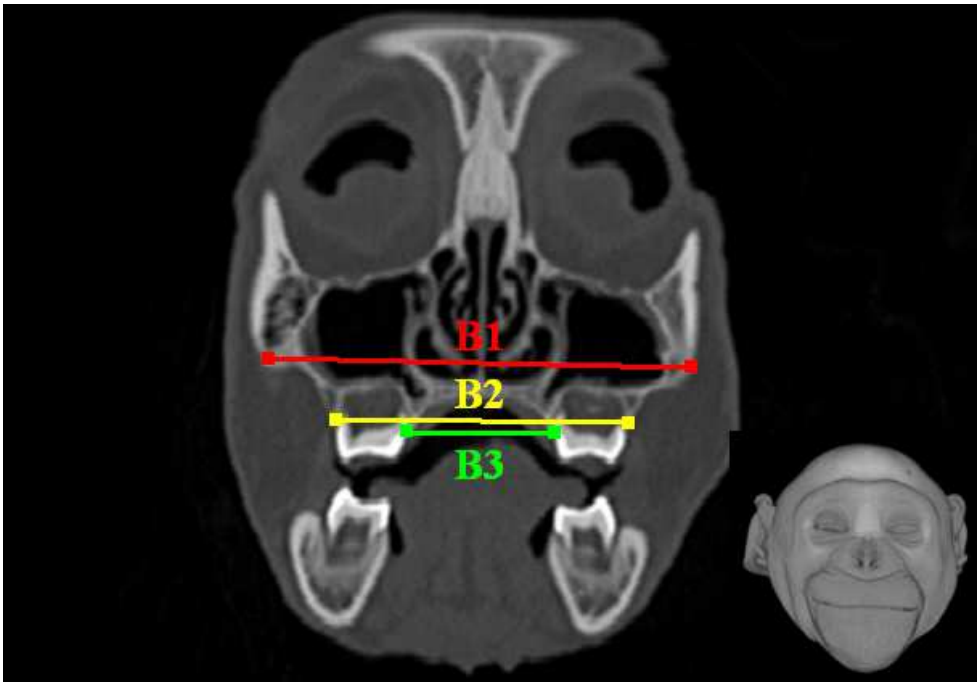


Abb. 9: CT-Schichtaufnahme in der Frontalebene eines weiblichen juvenilen Schimpansenkopfes mit Darstellung der Mittelgesichtsbreite (B1), der Maxilloalveolarbreite (B2) und der Gaumenbreite (B3)

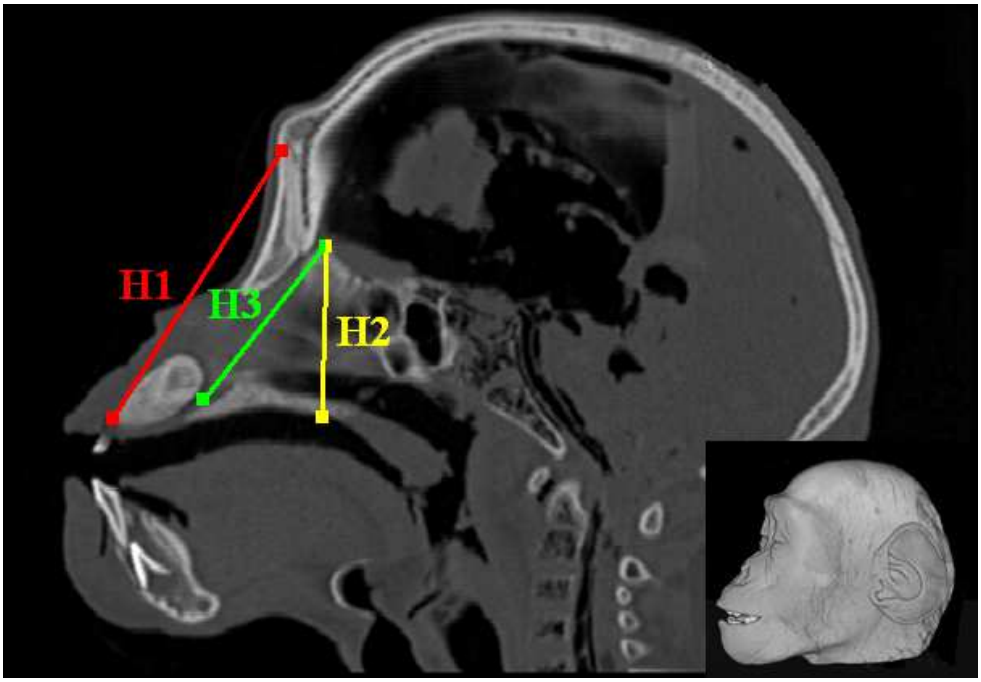


Abb. 10: CT-Schichtaufnahme in der Medianebene eines weiblichen juvenilen Schimpansenkopfes mit Darstellung der Obergesichtshöhe (H1), der Nasenhöhe I (H2) und der Nasenhöhe II (H3)

Die Erhebung der Interorbitalbreite B4 erfolgte nach eigener Festlegung. MARTIN (1928) definiert die vordere Interorbitalbreite als die geradlinige Entfernung der beiden Maxillofrontalia voneinander, wobei das Maxillofrontale als der Punkt, an dem der Innenrand der Orbita, also die Crista lacrimalis anterior beziehungsweise deren Verlängerung, von der Sutura frontomaxillaris geschnitten wird. Da die entsprechenden Suturen an den CT-Aufnahmen nicht dargestellt werden konnten, erfolgte die Vermessung der Interorbitalbreite nach eigenen Gesichtspunkten.

Mit dem Computerprogramm Volocity® 4.2 wurde dazu die Schädelbasislänge L2 durch Markierung des Nasions und des Basions in dem jeweils geeigneten Horizontalschnitt eingezeichnet. Ändert man nun im Programm Volocity® 4.2 die Ebene (Frontalebene, Medianebene), bleibt L2 als Projektion erhalten und kann für Winkelbestimmungen und weitere Längenmessungen genutzt werden. Ausgehend von L2 wurde somit in der Medianebene der intrakraniale Schnittpunkt der Strecke L2 mit dem Stirnbein markiert und als N`` bezeichnet (Abb. 11). Anschließend wurde, sowohl

im Transversal-, als auch im Frontalschnitt, die Interorbitalbreite eingezeichnet (Abb. 12, 13). Dabei ist B4 in beiden Ebenen als Senkrechte auf L2 definiert, wobei der Schnittpunkt zwischen L2 und B4 jeweils in N`` lag (Abb. 12, 13). Bei Erfüllung aller Vorbedingungen wurde abschließend die Länge der Interorbitalbreite (B4) ermittelt.

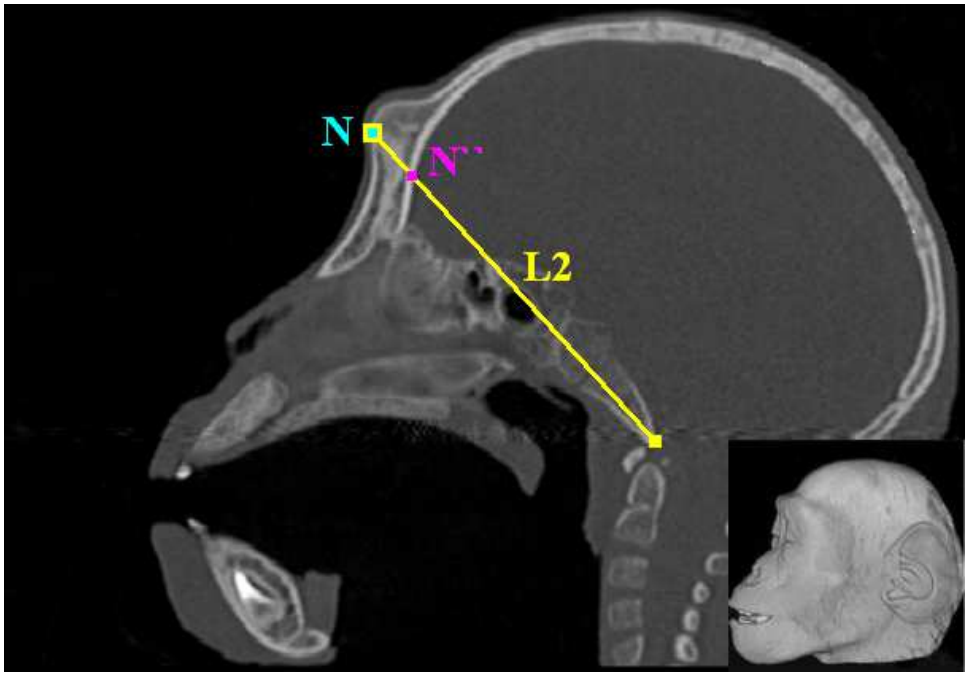


Abb. 11: CT-Schichtaufnahme eines weiblichen juvenilen Schimpansenkopfes in der Medianebene mit Darstellung der Schädelbasislänge (L2) und dem intrakranialen Schnittpunkt von L2 mit der Innenseite des Os frontale (N``-Nasion``)

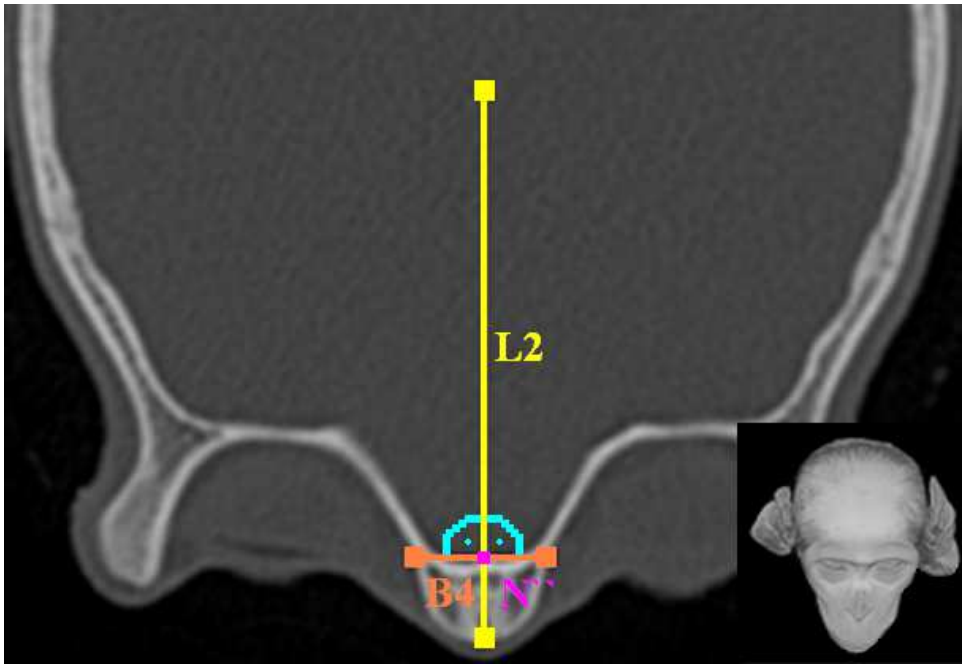


Abb. 12: CT-Schichtaufnahme des weiblichen juvenilen Schimpansenkopfes der Abbildung 11 mit Projektion der Schädelbasislänge (L2) in die Horizontalebene und Darstellung der Interorbitalbreite (B4) als Senkrechte auf L2 in N``

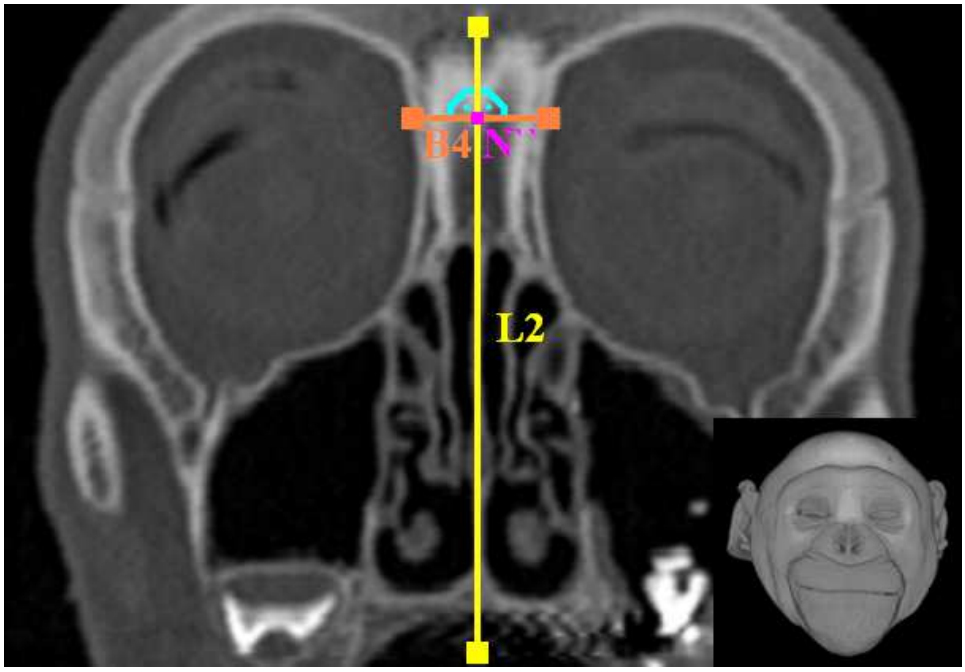


Abb. 13: CT-Schichtaufnahme des weiblichen juvenilen Schimpansenkopfes der Abbildung 11 mit Projektion der Schädelbasislänge L2 in die Frontalebene, sowie der zu ihr in N`` senkrechten Interorbitalbreite B4

3.2.2.2 Untersuchung der Siebbeinzellen und der Stirnhöhle

Für die Vermessung der Siebbeinzellen und des Sinus frontalis wurden die anfangs im DICOM-Format vorliegenden Datensätze mit DicomWorks® v1.3.5 (inviweb, Frankreich) bearbeitet. Die zu vermessende Region wurde vergrößert und ein Knochenfenster (Fensterweite 2000 HE, Center 500 HE) eingestellt. Zur späteren Kalibrierung der Messergebnisse wurde weiterhin eine Strecke mit definierter Länge in Zentimeter eingefügt. Anschließend sind die Schichtbilder in das JPEG-Format überführt worden. Alle weiteren Untersuchungen erfolgten anhand dieser JPEG-Datensätze.

Die JPEG-Bilddateien wurden mittels der 3D-Rekonstruktionssoftware WinSurf® 4.1.0 (Scott Lozanoff, http://www.surfdriver.com) ausgewertet. In diesem Programm wird in jedem Schichtbild die zu vermessende Struktur eingezeichnet. Durch Kennzeichnung dieser Flächen in den fortlaufenden Schichtbildern entsteht ein dreidimensionaler Körper, dessen Volumenberechnung mittels WinSurf nach entsprechender Kalibrierung möglich ist. Diese Methode erlaubt es, die häufigen Septierungen der Nasennebenhöhlen zu beachten. Somit ist eine sehr exakte Darstellung und Volumenangabe dieser pneumatisierten Räume möglich (MOORMANN, 2004).

3.2.3 Biostatistische Auswertung

Die statistische Auswertung der ermittelten Daten diente der Untersuchung und Einordnung der Nasennebenhöhlen in den morphologischen Gesamtkontext des Schimpansenschädels und berücksichtigte die eventuell vorhandenen Geschlechtsunterschiede. Von allen erhobenen Schädelmaßen wurden zunächst die Mittelwerte und Standardabweichungen bestimmt. Zur Darstellung des Mittelwertes und der Streuung der Volumina erfolgte die Erstellung von Boxplots. Die Prüfung der Werte auf Normalverteilung als Voraussetzung zur Durchführung des parametrischen T-Tests wurde mittels der Testverfahren nach Kolmogorov-Smirnov ($p < 0,05$) und Shapiro-Wilks ($p < 0,05$) sowie graphisch anhand des Histogramms und der Q-Q-Diagramme (normal und trendbereinigt) durchgeführt (BÜHL und ZÖFEL, 2000). Die durchgeführten Prüfungen ließen keine eindeutige Aussage zum Vorliegen einer Normalverteilung zu. Aus diesem Grunde wurde zusätzlich zum T-Test für unabhängige

Stichproben der U-Test nach Mann-Whitney als nichtparametrischer Test zur Verifizierung eines möglichen Geschlechtsdimorphismus der untersuchten Parameter durchgeführt (SOKAL and ROHLFS, 1995; http://www.bb-sbl.de/tutorial/verteilungen/ueberpruefungnormalverteilung.html [Stand 2011]). Beiden lag eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0{,}05$ zugrunde. Die Resultate zur Prüfung auf Normalverteilung werden im Ergebnissteil nicht einzeln aufgeführt. In die statistische Auswertung der Volumina des Sinus frontalis, der Cellulae ethmoidales und der größten Schädellänge (L1) fanden neben den eigenständig ermittelten Werten auch von KOPPE and OHKAWA (1999) veröffentlichte Daten Eingang.

Zur Untersuchung der Anteile der einzelnen Nasennebenhöhlenstrukturen am pneumatischen Gesamtraum und deren zeitliche Veränderung wurden Kreisdiagramme für die verschiedenen Altersgruppen, getrennt nach Geschlechtern, erstellt und interpretiert.

In der Literatur werden häufig Asymmetrien einzelner Nasennebenhöhlen (CAVE und HAINES, 1940; SHANKAR, 1994), und hier besonders des Sinus frontalis (KIPP, 1991; WEIGLEIN, 1999; PROSSINGER et al., 2003) beschrieben. Diese wurden mit Hilfe einer von LOVICH and GIBBONS (1992) entwickelten, und von KOPPE and NAGAI (1997) auf die Untersuchung von Asymmetrien (AI) angewandten Formel beschrieben. Die geschlechtsspezifische Unterscheidung der Messergebnisse kann der Abbildung 33 entnommen werden.

A: $$AI = \left[-\left(\frac{GS}{KS} \right) \right] + 1$$

B: $$AI = \left[+\left(\frac{GS}{KS} \right) \right] - 1$$

- GS: größere Struktur
- KS: kleinere Struktur
- Formel A, wenn die rechte Struktur die Größere ist
- Formel B, wenn die linke Struktur die Größere ist

Um die einzelnen Nasennebenhöhlenstrukturen ins Verhältnis zur Schädelgröße des Schimpansen setzen zu können, wurde mittels der Heronischen Formel (BARTSCH, 1984) aus den Längenmaßen L2 (Schädelbasislänge) und L3 (Gesichtslänge), dem Breitenmaß B1 (Mittelgesichtsbreite) sowie dem Höhenmaß H1 (Obergesichtshöhe) das Gesichtsschädelvolumen (GSV) bestimmt.

$$GSV = \left(\sqrt{s \cdot (s - L2) \cdot (s - L3) \cdot (s - H1)}\right) \cdot B1$$

wobei: $s = \frac{1}{2} \cdot (L2 + L3 + H1)$

Zum Aufzeigen möglicher statistischer Zusammenhänge zwischen den einzelnen Nasennebenhöhlenvolumina und den Schädelmaßen sowie dem Gesichtschädelvolumen wurde eine bivariate Korrelationsanalyse unter Verwendung des Korrelationskoeffizienten nach Pearson bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0{,}001$ durchgeführt. Für ausgewählte Merkmalspaare ist eine partielle Korrelationsanalyse (SOKAL and ROHLFS, 1995) durchgeführt worden.

Mit ausgesuchten Merkmalspaaren der bivariaten Korrelationsanalyse wurde des Weiteren eine lineare Regressionsanalyse zur graphischen und mathematischen Darstellung des jeweiligen Zusammenhangs durchgeführt (VOSS, 1997; BÜHL und ZÖFEL, 2005). Auch bei diesem Verfahren lag die Irrtumswahrscheinlichkeit bei $p < 0{,}001$.

Der graphischen Darstellung der Punktwolke mit den entsprechenden Wertepaaren wurde die Regressionsgerade mit der Gleichung:

$y = bx + a$

- x, y: Angaben des Wertepaares
- a: Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der y-Achse
- b: Anstieg der Regressionsgeraden

hinzugefügt. Sowohl bei der Korrelations-, als auch der Regressionsanalyse wurden die Altersgruppen und Geschlechter zusammengefasst.

Die statistische Auswertung der mit WinSurf und Volocity gewonnenen Messergebnisse fand mit SPSS© für Windows 11.5.1 und Microsoft® Excel 2002 statt.

4 Ergebnisse

4.1 Morphologie der Nasennebenhöhlen

4.1.1 Sinus frontalis

Volumina

In allen drei Altersgruppen weisen die männlichen im Vergleich zu den weiblichen Tieren größere Volumina auf. Nach Interpretation der Ergebnisse des T-Tests ($p < 0,05$) sind die Mittelwertunterschiede allerdings nicht signifikant. Diese Aussage wird durch das Resultat des nichtparametrischen U-Tests nach Mann-Whitney ($p < 0,05$), hier ohne Aufteilung in die drei Altersgruppen, unterstützt (Tab. 2). Zum graphischen Vergleich der Mittelwerte und Interquartilbereiche der einzelnen Altersgruppen sowie Geschlechter werden diese in Boxplots dargestellt (Abb. 14).

Tab. 2: Ergebnisse der Volumenberechnungen und des Geschlechtsdimorphismus der Sinus frontales bei *Pan troglodytes*

Sexus	$\bar{x}$	SD	N	T	Z
	infantil				
m	0,32	0,33	3		
w	0,20	0,08	3	–0,60 n.s.	
	juvenil				
m	1,13	0,90	4		
w	0,87	0,89	7	–0,46 n.s.	
	adult				
m	8,85	3,80	8[a]		
w	5,67	1,23	6[a]	–2,21 n.s.	–1,34 n.s.

m: männlich; w: weiblich; $\bar{x}$: Mittelwert in cm³; SD: Standardabweichung des Mittelwertes in cm³; N: Anzahl; T: Prüfgröße des T-Tests; Z: Prüfgröße des U-Tests nach Mann-Whitney; n.s.: nicht signifikant ($p < 0,05$), [a]: beinhalten Daten aus KOPPE and OHKAWA, 1999

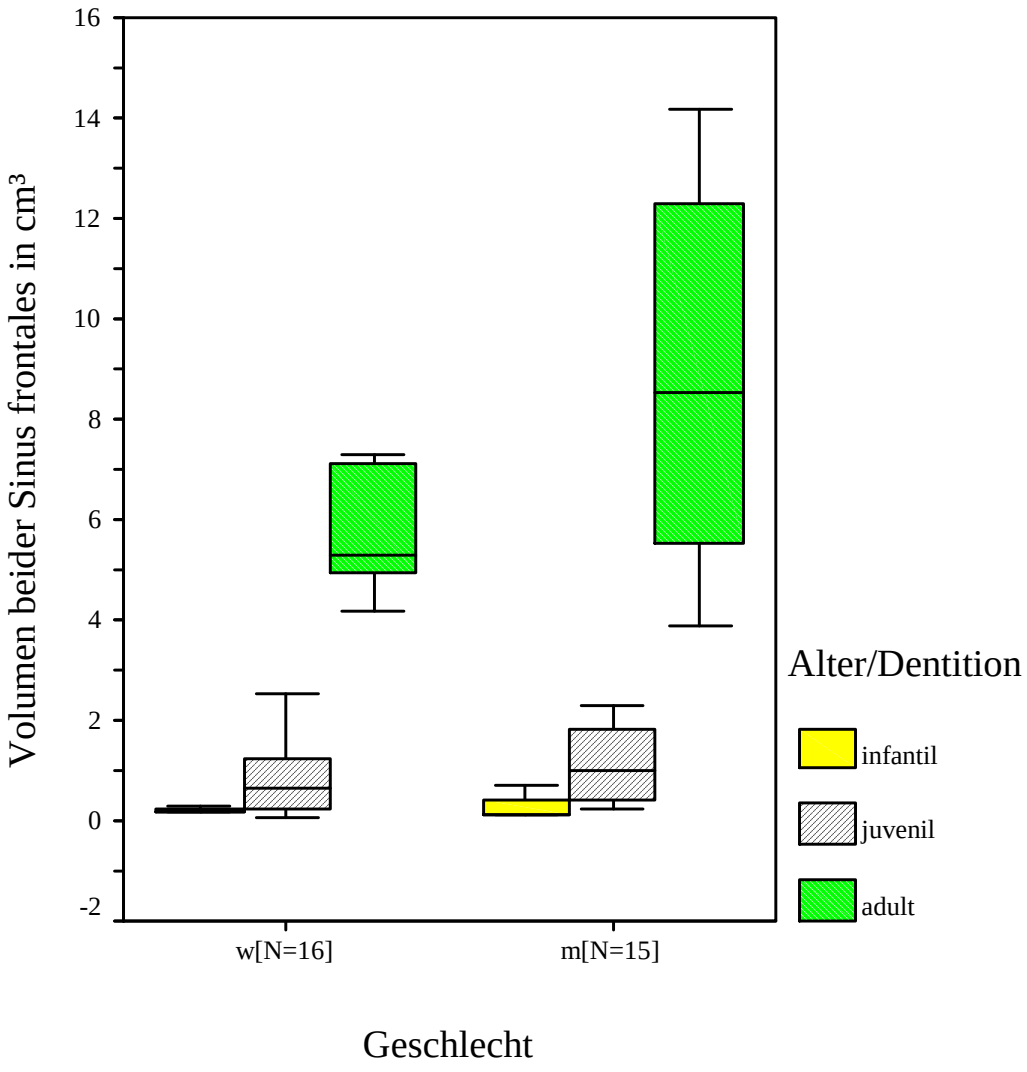


Abb. 14: Boxplots zur Darstellung der Verteilung der Volumina der Sinus frontales bei *Pan troglodytes*;
N: Anzahl (beinhalten Daten aus KOPPE and OHKAWA, 1999); w: weiblich; m: männlich; die Präparate ohne Geschlechtsangabe wurden nicht aufgeführt

Es konnten innerhalb unseres Untersuchungsmaterials erhebliche Größenvariationen der Sinus frontales festgestellt werden, was an den großen Interquartilbereichen der Boxplots deutlich wird (Abb. 14).

Morphologie und Nachbarschaftsbeziehungen

Die paarig angelegte Stirnbeinhöhle konnte in allen 21 Köpfen gefunden werden. Rechte und linke Stirnbeinhöhle, welche häufig ebenfalls deutliche Größenunterschiede aufwiesen (Abb. 14, 15), waren in allen Köpfen durch ein knöchernes Septum voneinander getrennt. Es bestehen enge Nachbarschaftsbeziehungen zur Fossa cranialis anterior, der Orbita, der Bulla ethmoidalis, den Cellulae ethmoidales anteriores, dem Ductus nasolacrimalis und dem Sinus maxillaris (Abb. 14, 15, 16, 17, 18 und 19). Der Sinus frontalis mündet gemeinsam mit der Bulla ethmoidalis, den Cellulae ethmoidales anteriores und dem Sinus maxillaris über das Infundibulum ethmoidale und den Bereich des Hiatus semilunaris in den mittleren Nasengang.

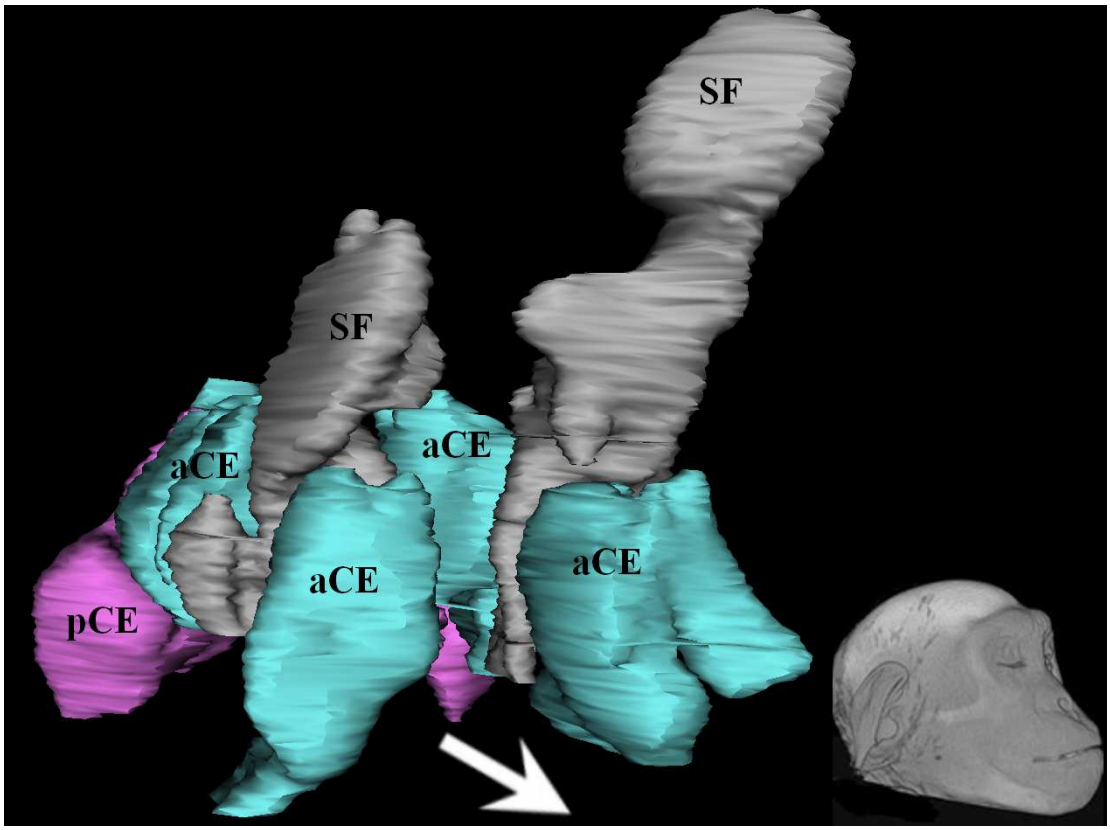


Abb. 15: Dreidimensionale Rekonstruktion des Siebbeinlabyrinthes bei einem weiblichen juvenilen Schimpansen;
SF: Sinus frontalis; aCE: Cellulae ethmoidales anteriores; pCE: Cellulae ethmoidales posteriores; die 3D-Figur ist 45 Grad nach links um die Longitudinalachse gedreht; Pfeilrichtung: anterior

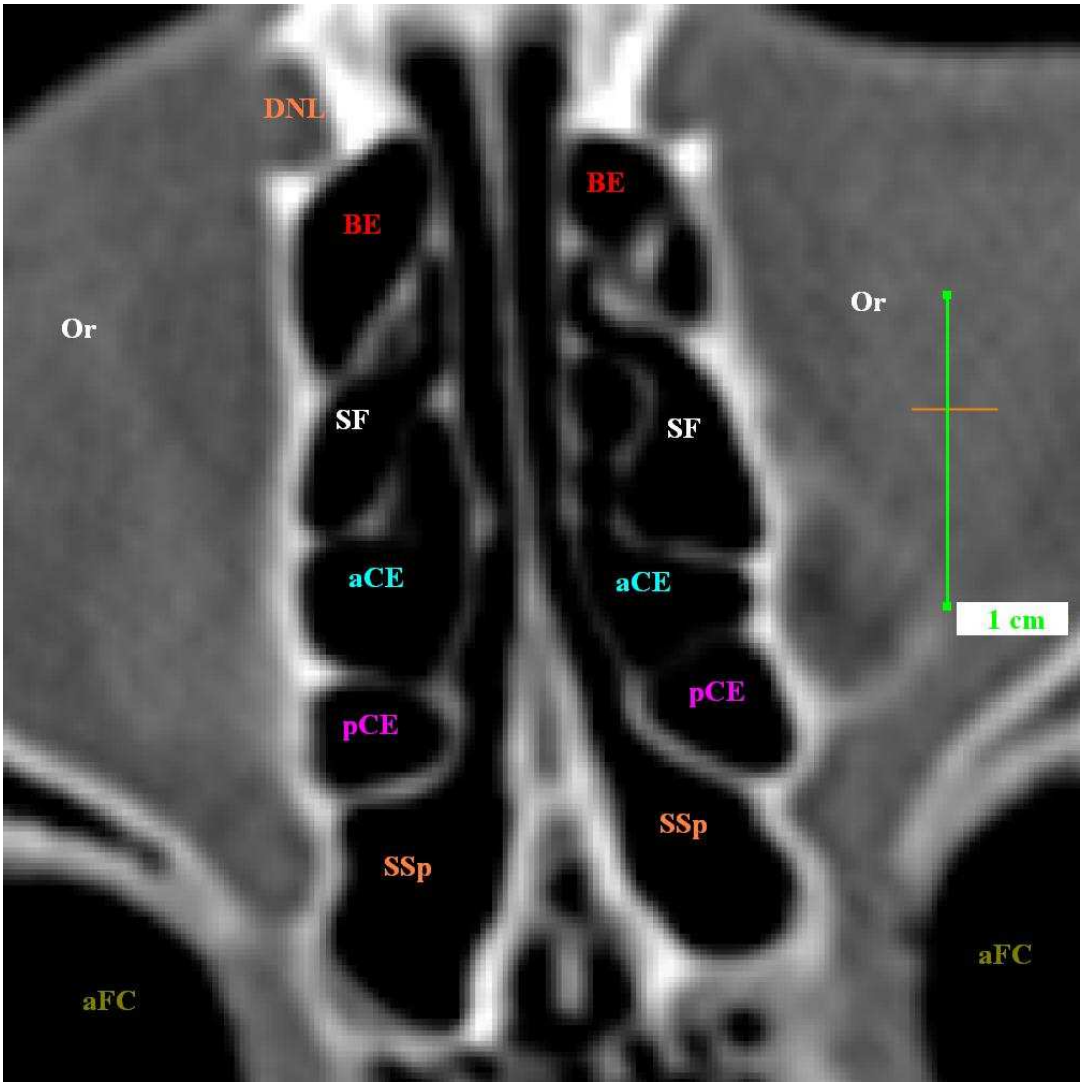


Abb. 16: CT-Schichtaufnahme in der Transversalebene des Kopfes eines weiblichen infantilen Schimpansen mit Darstellung der Nasennebenhöhlen und ausgewählten Nachbarstrukturen;
BE: Bulla ethmoidalis; Or: Orbita; SF: Sinus frontalis; aCE: Cellulae ethmoidales anteriores; pCE: Cellulae ethmoidales posteriores; SSp: Sinus sphenoidalis; aFC: Fossa cranialis anterior; DNL: Ductus nasolacrimalis

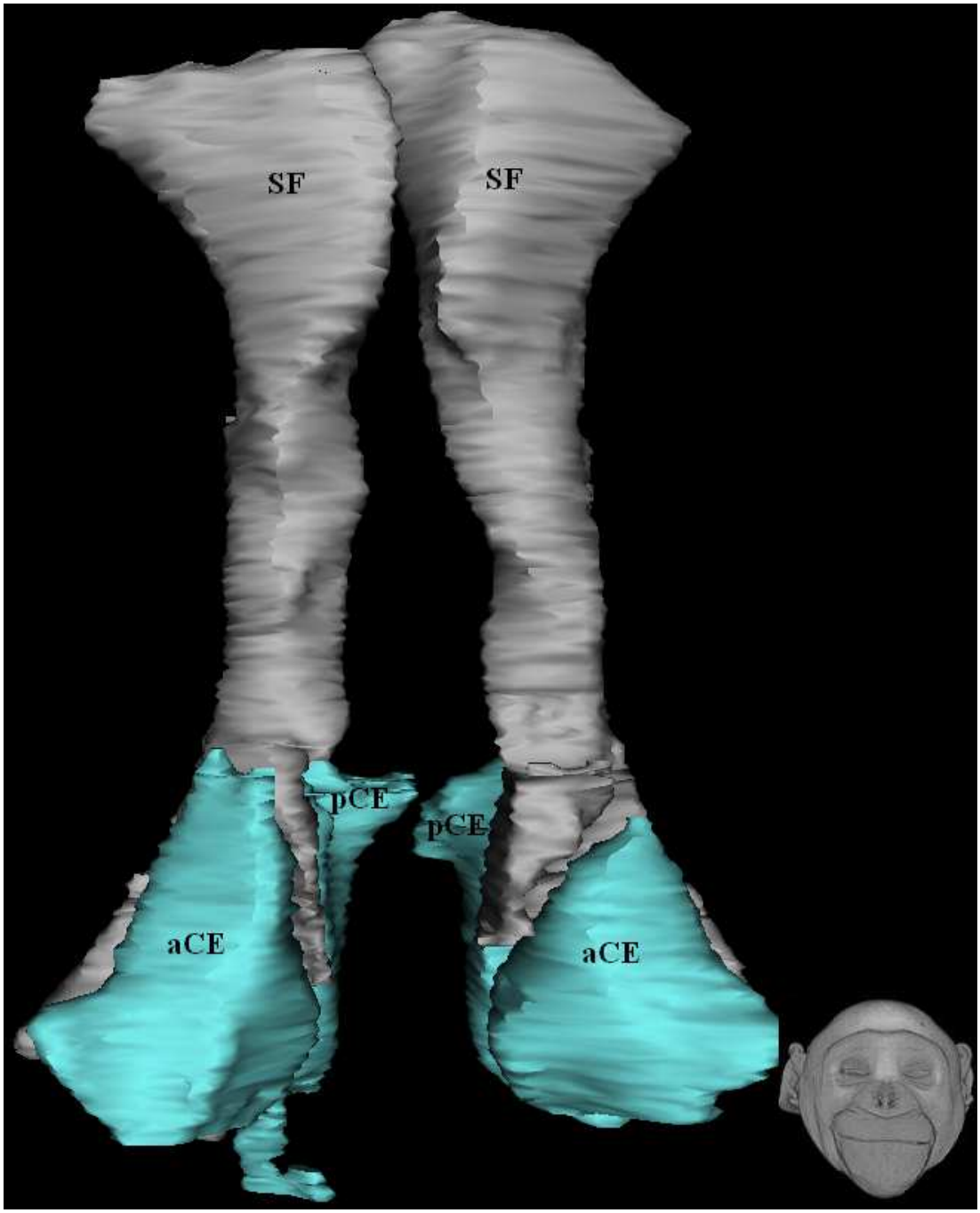


Abb. 17: 3D-Rekonstruktion der Cellulae ethmoidales und des Sinus frontalis bei einem männlichen juvenilen Schimpansen in der Frontalansicht;
SF: Sinus frontalis; aCE: Cellulae ethmoidales anteriores; pCE: Cellulae ethmoidales posteriores

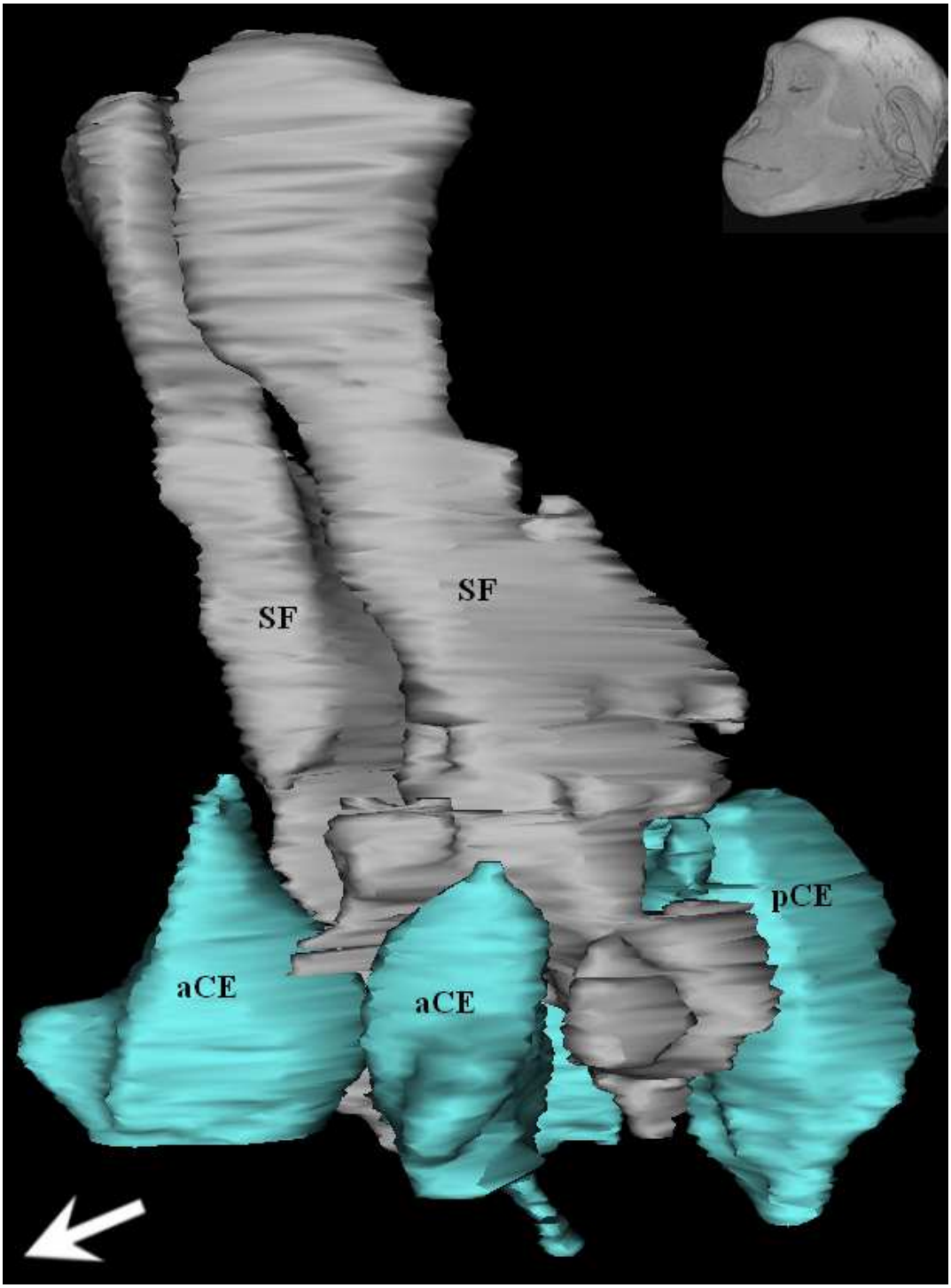


Abb. 18: 3D-Rekonstruktion der Cellulae ethmoidales und des Sinus frontalis bei dem männlichen juvenilen Schimpansen der Abbildung 17 in der Seitenansicht;
SF: Sinus frontalis; aCE: Cellulae ethmoidales anteriores; pCE: Cellulae ethmoidales posteriores; die 3D-Figur ist 45 Grad nach rechts um die Longitudinalachse gedreht; Pfeilrichtung: anterior

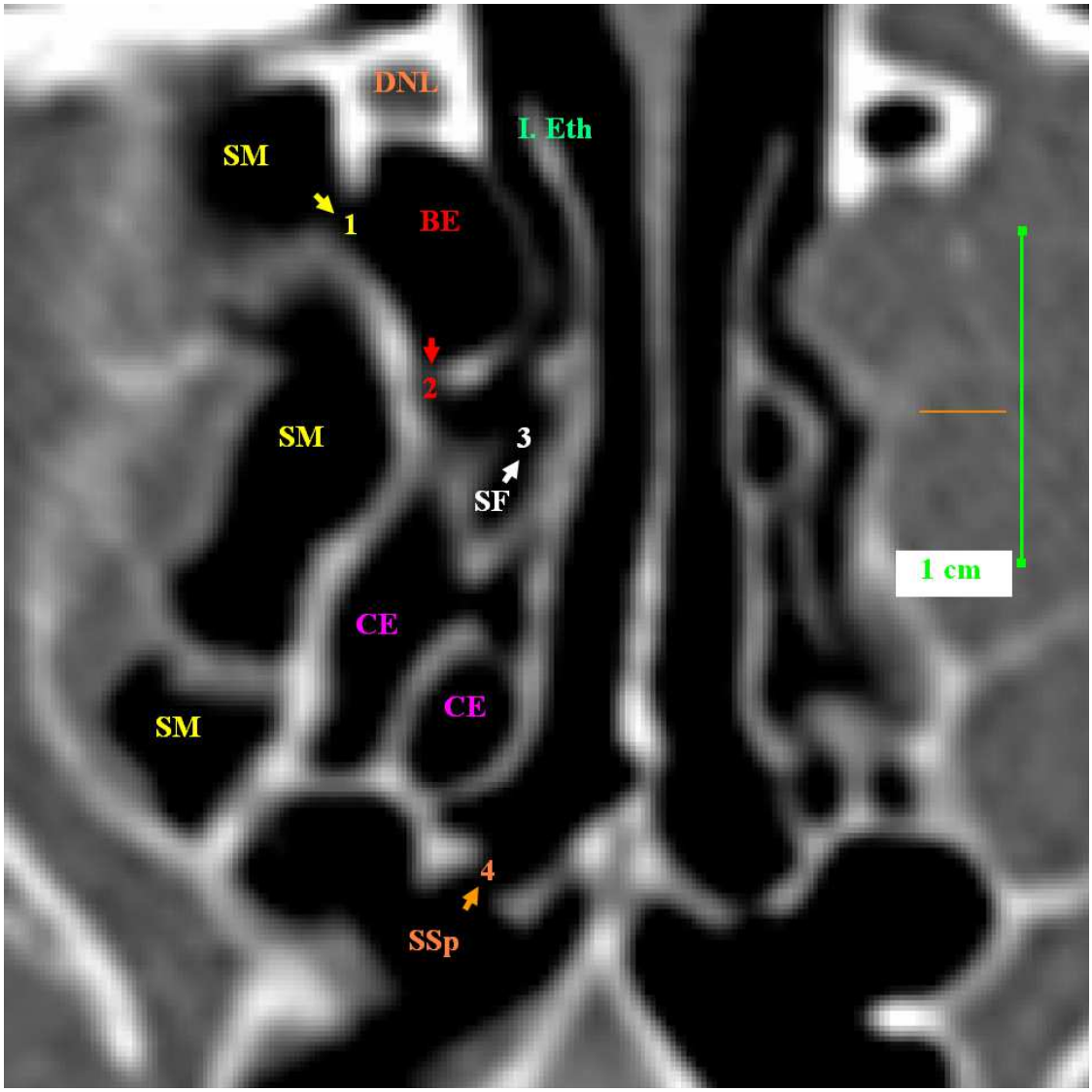


Abb. 19: CT-Schichtaufnahme in der Transversalebene des Kopfes eines weiblichen infantilen Schimpansen mit Darstellung der Mündungen des Sinus maxillaris, der Bulla ethmoidalis und dem Sinus frontalis in den mittleren Nasengang;
SM: Sinus maxillaris; BE: Bulla ethmoidalis; I.Eth: 1. Ethmoturbinale;
SF: Sinus frontalis; CE: Cellulae ethmoidales; SSp: Sinus sphenoidalis;
1. Pfeil (gelb): Mündung des Sinus maxillaris; 2. Pfeil (rot): Mündung der Bulla ethmoidalis; 3. Pfeil (weiß): Mündung des Sinus frontalis; 4. Pfeil (orange): Mündung des Sinus sphenoidalis

4.1.2 Cellulae ethmoidales

Volumina

In der juvenilen und adulten Altersgruppe weisen die männlichen im Vergleich zu den weiblichen Tieren größere Mittelwerte auf. In der infantilen Altersgruppe hingegen ist der weibliche Wert um 0,02 cm³ größer. Nach Durchführung des T- und des U-Tests sind die Mittelwertunterschiede zwischen den Geschlechtern nicht signifikant ($p < 0,05$) (Tab. 3). Zum graphischen Vergleich werden die Ergebnisse der einzelnen Altersgruppen sowie Geschlechter in Boxplots dargestellt (Abb. 20). In der weiblich-juvenilen Gruppe befindet sich mit einem Volumen von 3,24 cm³ ein deutlich oberhalb des Mittelwerts von 1,29 cm³ liegender Ausreißer. Ein Ausreißer ist dabei definiert als Wert, welcher zwischen 1,5 und 3 Boxlängen vom oberen oder unteren Rand der Box entfernt ist, wobei die Boxlänge dem Interquartilbereich entspricht. Nimmt man Kopf Nr. 32 aus der statistischen Auswertung heraus, so ändern sich Mittelwert und Standardabweichung deutlich nach unten (Tab. 3).

Tab. 3: Ergebnisse der Volumenberechnungen und des Geschlechtsdimorphismus der Cellulae ethmoidales bei *Pan troglodytes*

Sexus	$\bar{x}$	SD	N	T	Z
	infantil				
m	0,48	0,23	3		
w	0,50	0,17	3	–0,11 n.s.	
	juvenil				
m	1,44	0,40	4		
w	1,29	1,02	7	–0,34 n.s.	
w⁺	0,96⁺	0,59⁺	6	–2,00 n.s.+	
	adult				
m	7,19	0,90	8[a]		
w	5,95	2,36	6[a]	–1,23 n.s.	–1,37 n.s.

m: männlich; w: weiblich; $\bar{x}$: Mittelwert in cm³; SD: Standardabweichung des Mittelwertes in cm³; N: Anzahl; T: Prüfgröße des T-Tests; Z: Prüfgröße des U-Tests nach Mann-Whitney; n.s.: nicht signifikant ($p < 0,05$); ⁺: Korrektur der weiblichen juvenilen Werte ohne Kopf Nr. 32; [a]: beinhalten Daten aus KOPPE and OHKAWA, 1999

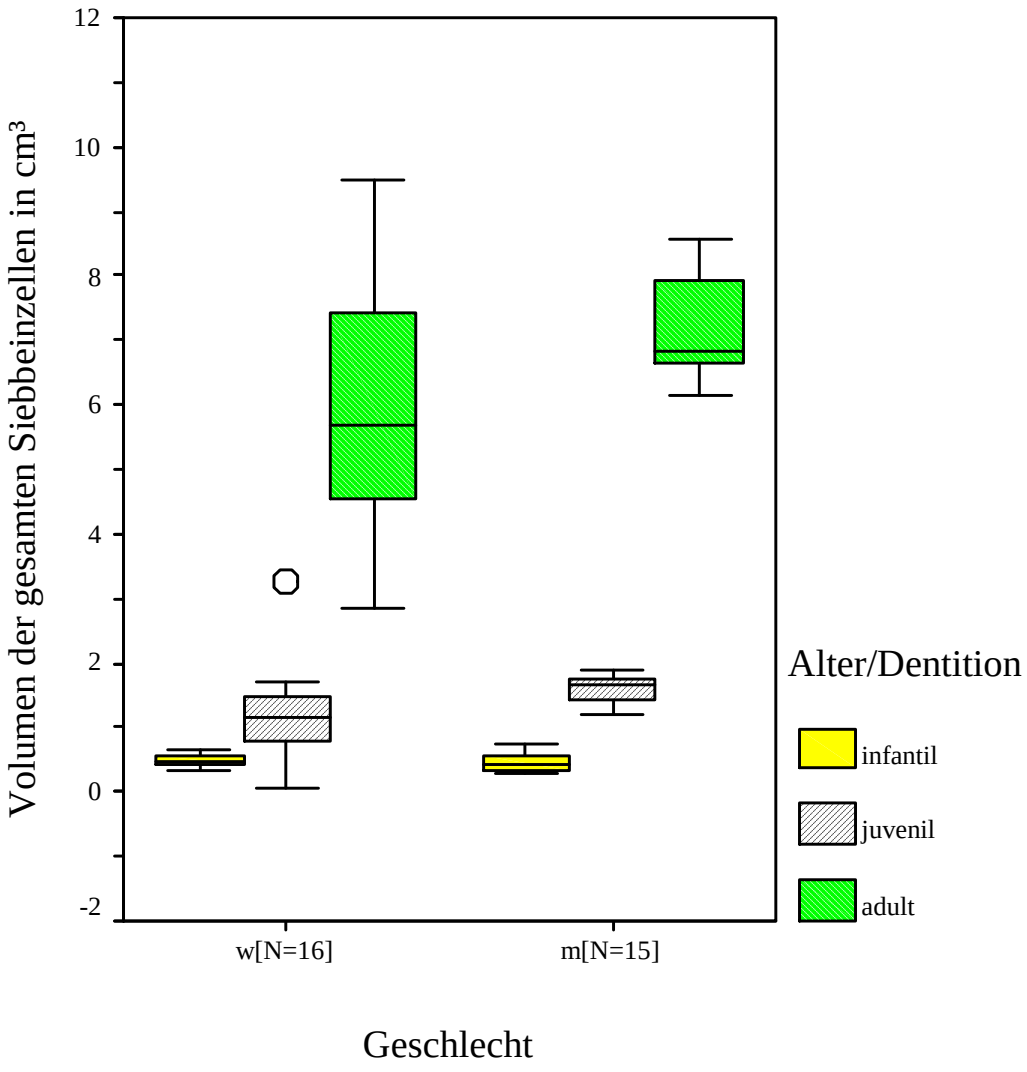


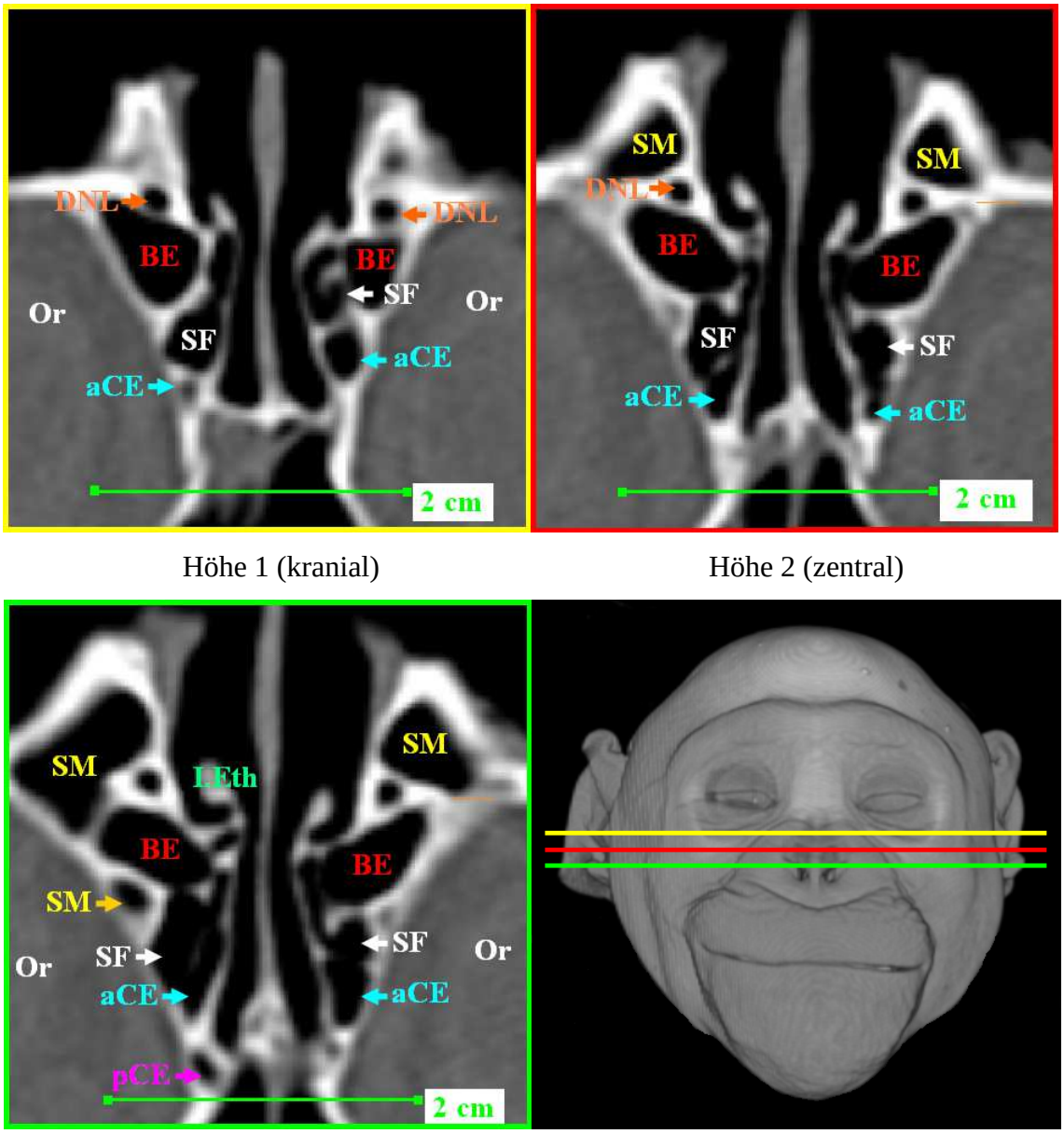
Abb. 20: Boxplots zur Darstellung der Verteilung der Volumina der Siebbeinzellen bei *Pan troglodytes*;
N: Anzahl (beinhalten Daten aus KOPPE and OHKAWA, 1999); w: weiblich; m: männlich; die Präparate ohne Geschlechtsangabe wurden nicht aufgeführt; O: Kopf Nr. 32

Morphologie und Nachbarschaftsbeziehungen

Zehn Tiere weisen drei und fünf vier Siebbeinzellen pro Seite auf. Bei fünf Präparaten konnten zwei Siebbeinzellen pro Seite vermessen werden. Lediglich bei Kopf Nr. 36, einem weiblichen juvenilen Tier, konnte neben der Bulla ethmoidalis keine weitere Siebbeinzelle gefunden werden.

Bei den zehn Köpfen mit drei Siebbeinzellen pro Seite konnten diese in zwei vordere und eine hintere Siebbeinzelle unterteilt werden. Innerhalb der vorderen Siebbeinzellen konnte bei allen 21 Schimpansenköpfen eine sehr große Zelle beobachtet werden. Diese wurde in Analogie zur menschlichen Terminologie als Bulla ethmoidalis bezeichnet. Die Definition der Siebbeinzellen erfolgte hierbei anhand ihrer Kommunikation mit der Nasenhaupthöhle und deren Lage anterior oder posterior der Grundlamelle der mittleren Nasenmuschel. Die vorderen Siebbeinzellen münden in den vor der Grundlamelle liegenden Bereich des Hiatus semilunaris. Sie werden dem osteomeatalen Komplex zugerechnet. Die hinteren Zellen drainieren weiter kaudal hinter der Grundlamelle direkt in die Nasenhaupthöhle. Bei sechs Präparaten konnte neben der Bulla ethmoidalis keine weitere vordere Siebbeinzelle gefunden werden, bei 12 Tieren fanden sich mit der Bulla drei vordere Zellen. Bei drei Exemplaren (Kopf Nr. 31, 32, 39) hingegen konnten mehr als drei vordere Siebbeinzellen vermessen werden. Kopf Nr. 32 und 39 wiesen vier, Nr. 31 sogar fünf vordere Siebbeinzellen auf. Die hinteren Siebbeinzellen konnten bei 20 der 21 Köpfe identifiziert werden.

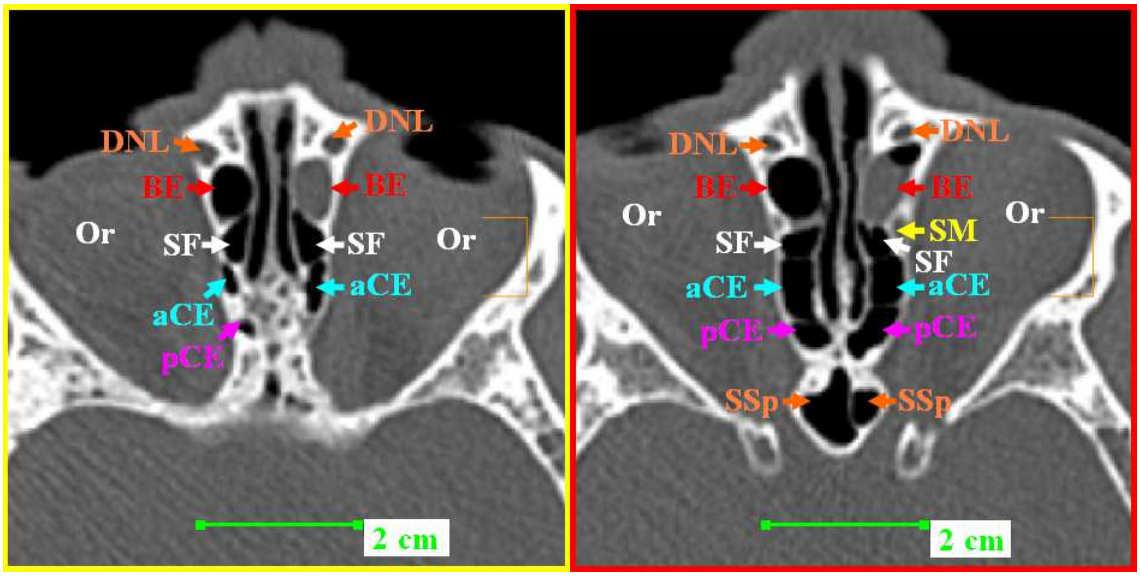
In der Regel wurden zwei hintere Zellen vorgefunden. Bei Kopf Nr. 46 wurden drei, bei Nr. 49 vier Cellulae ethmoidales posteriores vermessen (Tab. 19, Anhang). Bei fünf Tieren unterschied sich die Anzahl der Zellen zwischen rechter und linker Seite. Alle Siebbeinzellen, einschließlich der Bulla ethmoidalis, grenzen an die Fossa cranialis anterior, die Orbita und den Sinus maxillaris. Die vorderen Zellen weisen des Weiteren enge Nachbarschaftsbeziehungen zum Sinus frontalis, die hinteren Zellen zum Sinus sphenoidalis auf (Abb. 21, 22, 23, 24, 25, 26 und 27).



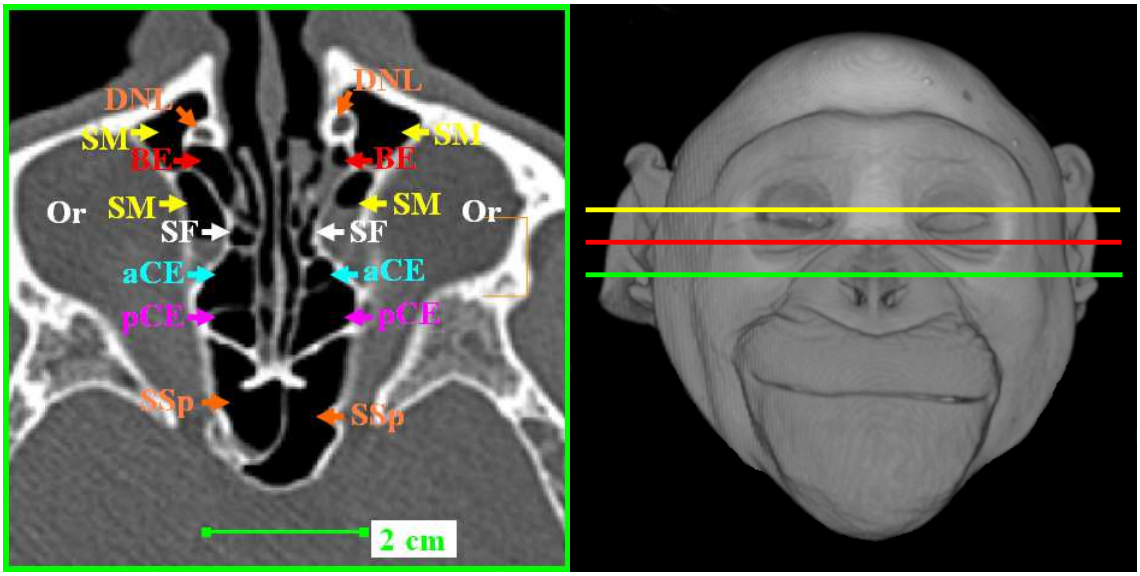
Höhe 1 (kranial) Höhe 2 (zentral)

Höhe 3 (kaudal)

Abb. 21: Horizontale CT-Schichtaufnahmen des Kopfes eines männlichen infantilen Schimpansen mit Darstellung der Siebbeinzellen und ausgewählter Nachbarstrukturen in drei verschiedenen Schichtebenen;
SM: Sinus maxillaris; BE: Bulla ethmoidalis; aCE: Cellulae ethmoidales anteriores; pCE: Cellulae ethmoidales posteriores; DNL: Ductus nasolacrimalis; SF: Sinus frontalis; Or: Orbita; I.Eth: 1. Ethmoturbinale



Höhe 1 (kranial) Höhe 2 (zentral)



Höhe 3 (kaudal)

Abb. 22: Horizontale CT-Schichtaufnahmen des Kopfes eines männlichen juvenilen Schimpansen mit Darstellung der Siebbeinzellen und ausgewählter Nachbarstrukturen in drei verschiedenen Schichtebenen;
SM: Sinus maxillaris; BE: Bulla ethmoidalis; aCE: Cellulae ethmoidales anteriores; pCE: Cellulae ethmoidales posteriores; SSp: Sinus sphenoidalis; Or: Orbita; DNL: Ductus nasolacrimalis; SF: Sinus frontalis

Die Nachbarschaftsbeziehung der hinteren Siebbeinzellen und der Keilbeinhöhle gestaltete sich bei Nr. 38 derart, dass die posteriore knöcherne Begrenzung dieser

Siebbeinzelle fehlte und somit eine großräumige Kommunikation beider Räume entstand (Abb. 23, 24).

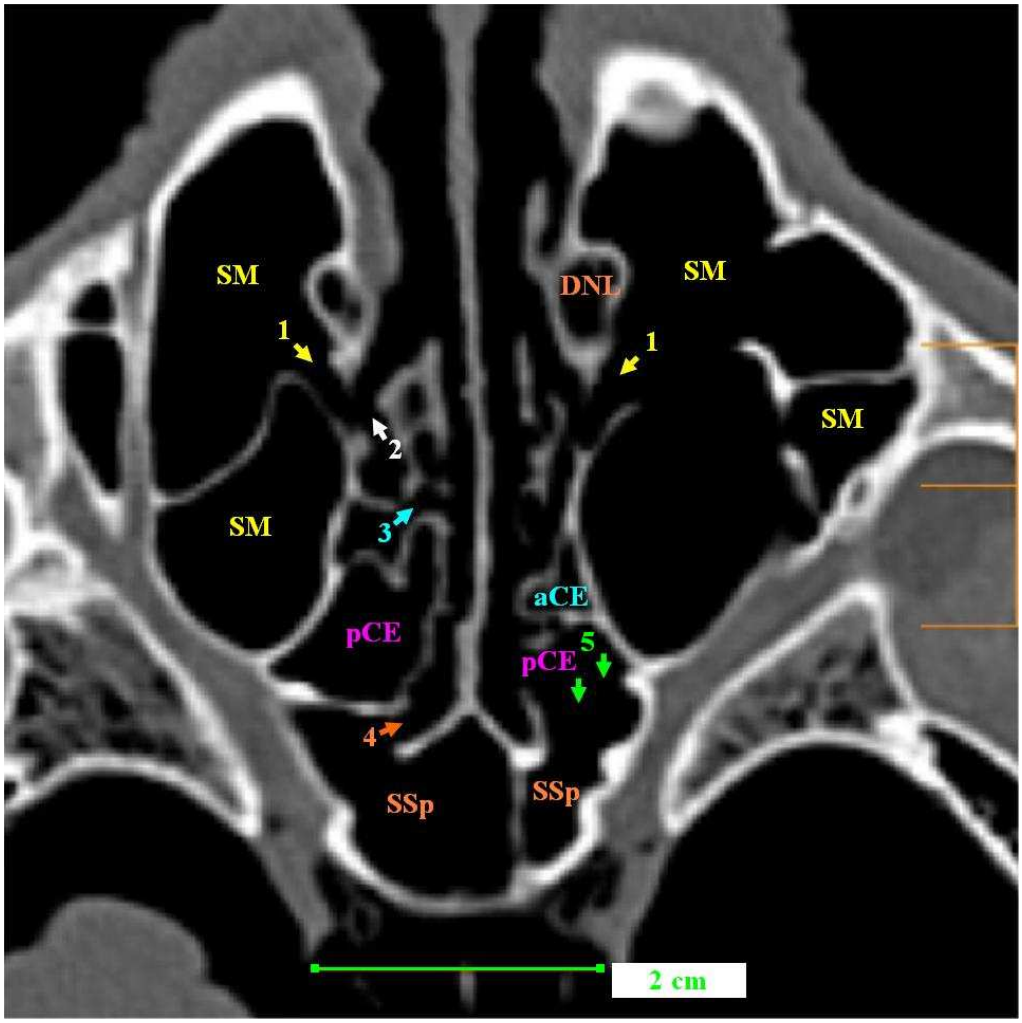


Abb. 23: Horizontale CT-Schichtaufnahme eines juvenilen Schimpansenkopfes unbekannten Geschlechts mit Darstellung des fehlenden Knochenseptums zwischen einer hinteren Siebbeinzelle und der Keilbeinhöhle links (5. Pfeil, grün);
SM: Sinus maxillaris; aCE: Cellulae ethmoidales anteriores; pCE: Cellulae ethmoidales posteriores; SSp: Sinus sphenoidalis; 1. Pfeil (gelb): Mündung des Sinus maxillaris; 2. Pfeil (weiß): Mündung des Sinus frontalis;
3. Pfeil (blau): Mündung der Cellulae ethmoidales anteriores;
4. Pfeil (orange): Mündung des Sinus sphenoidalis; 5. Pfeil (grün): fehlendes Knochenseptum zwischen den Cellulae ethmoidales posteriores und dem Sinus sphenoidalis links

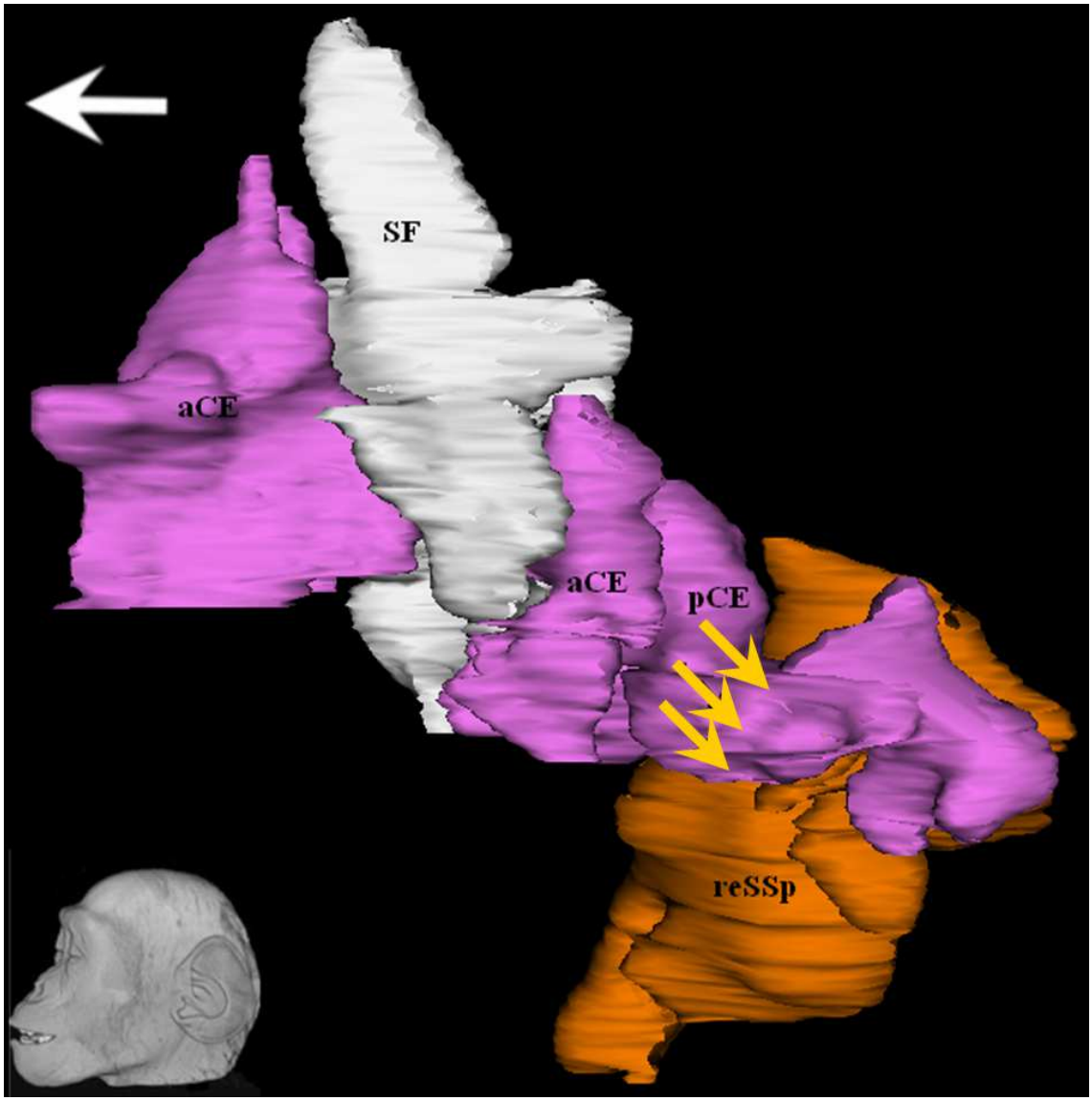


Abb. 24: 3D-Rekonstruktion der Cellulae ethmoidales, des Sinus frontalis und des Sinus sphenoidalis bei einem juvenilen Schimpansen unbekannten Geschlechts mit Darstellung der Verbindung einer hinteren Siebbeinzelle mit der Keilbeinhöhle links (gelbe Pfeile);
SF: Sinus frontalis; aCE: Cellulae ethmoidales anteriores; pCE: Cellulae ethmoidales posteriores; reSSp: Sinus sphenoidalis rechts; Ansicht von lateral links; Pfeilrichtung (weiß): anterior

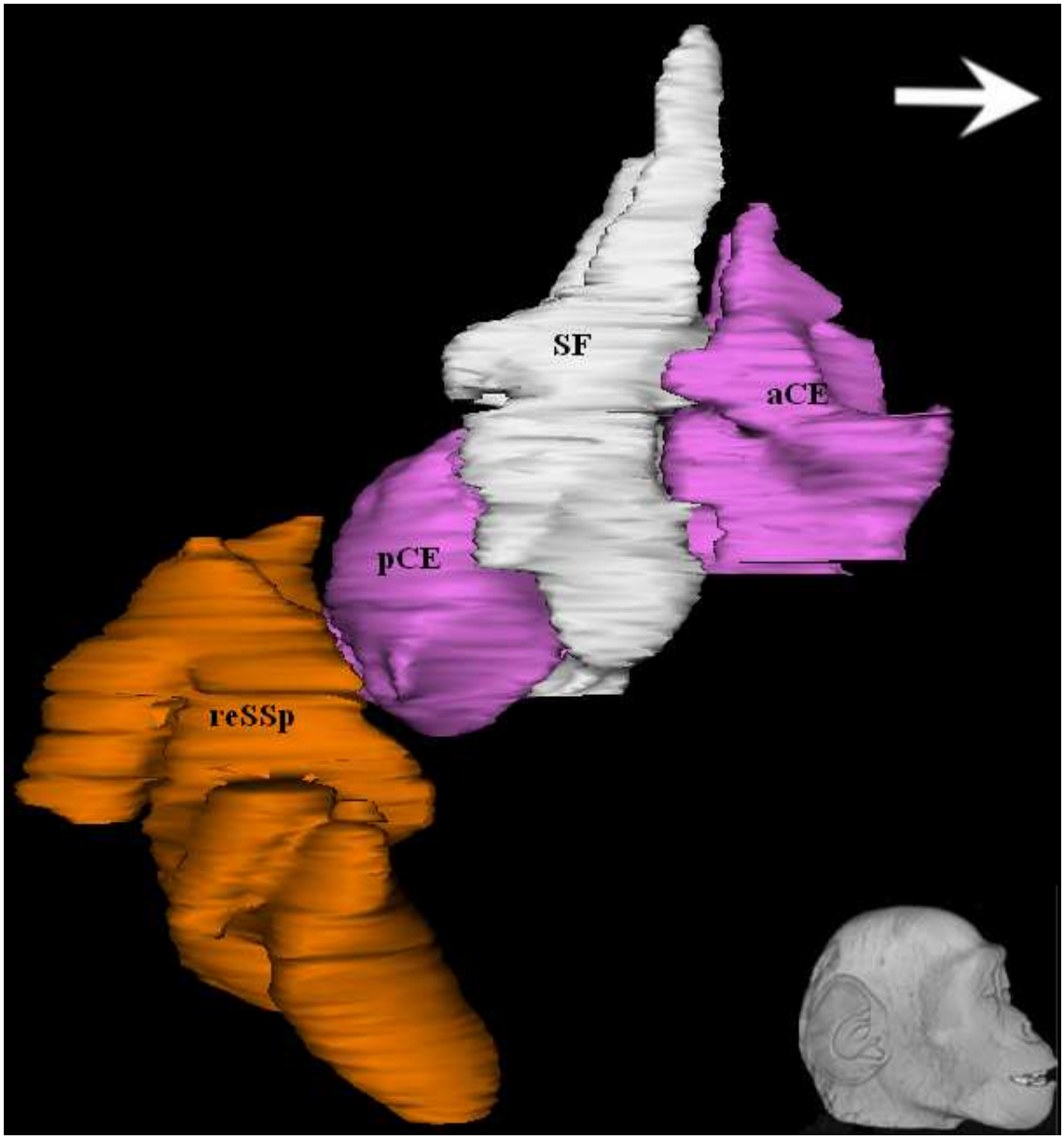


Abb. 25: 3D-Rekonstruktion der Cellulae ethmoidales, des Sinus frontalis und des Sinus sphenoidais bei dem juvenilen Schimpansen unbekannten Geschlechts der Abbildung 24;

SF: Sinus frontalis; aCE: Cellulae ethmoidales anteriores; pCE: Cellulae ethmoidales posteriores; reSSp: Sinus sphenoidalis rechts; Ansicht von lateral rechts; Pfeilrichtung: anterior

Eine ähnliche anatomische Besonderheit zeigte sich bei Kopf Nr. 35 durch die enge Nachbarschaftsbeziehung zwischen hinterer Siebbeinzelle und Stirnhöhle. Aufgrund eines fehlenden Knochenseptums auf der linken Seite entsteht im Mündungsbereich des Sinus frontalis eine weite Kommunikation beider Räume, welche eine eindeutige Unterteilung erschwert (Abb. 26, 27).

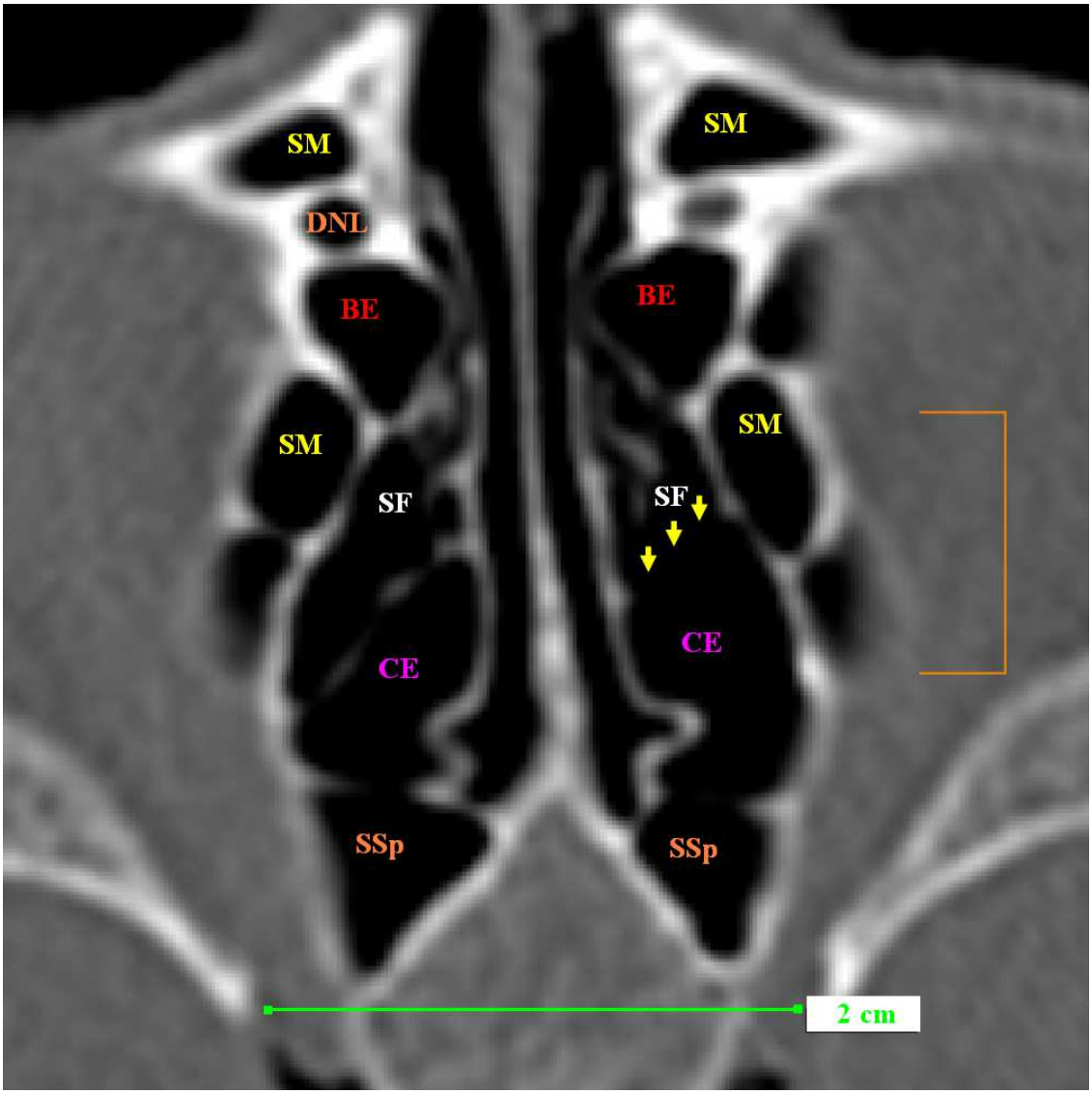


Abb. 26: Horizontale CT-Schichtaufnahme eines männlichen infantilen Schimpansenkopfes mit Darstellung des fehlenden Knochenseptums zwischen einer hinteren Siebbeinzelle und der Stirnhöhle links;
DNL: Ductus nasolacrimalis; BE: Bulla ethmoidalis; SM: Sinus maxillaris; SF: Sinus frontalis; CE: Cellulae ethmoidales; SSp: Sinus sphenoidalis; Pfeile (gelb): fehlendes Knochenseptum

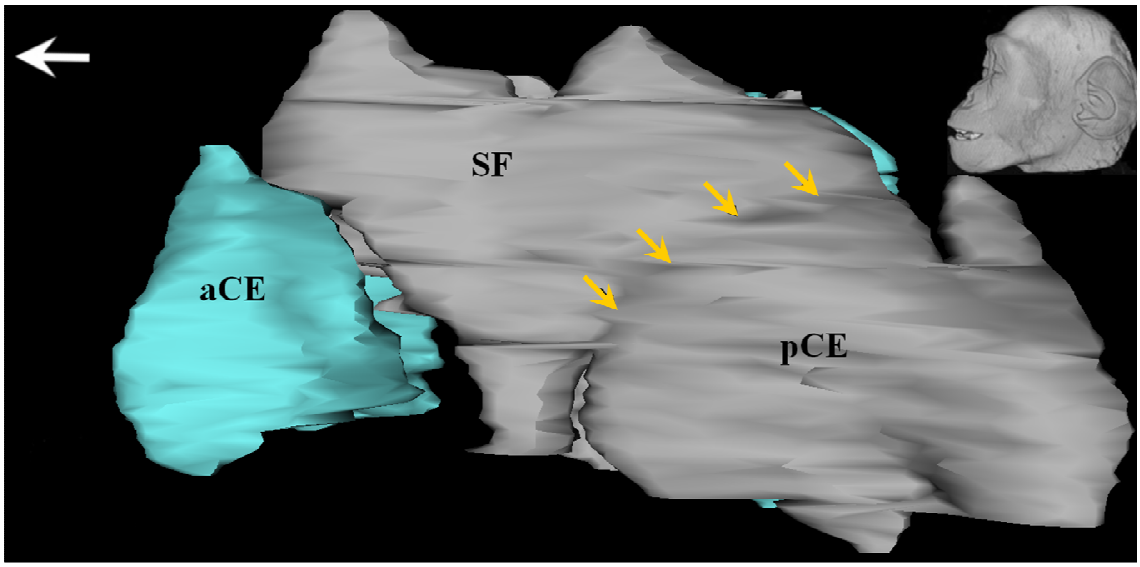


Abb. 27: 3D-Rekonstruktion der Cellulae ethmoidales und des Sinus frontalis des männlichen infantilen Schimpansen aus Abbildung 26 mit Darstellung der äußeren Einziehung im Bereich des fehlenden knöchernen Septums zwischen hinterer Siebbeinzelle und Stirnhöhle von lateral links (gelbe Pfeile);
SF: Sinus frontalis; aCE: Cellulae ethmoidales anteriores; pCE: Cellulae ethmoidales posteriores; Pfeilrichtung(weiß): anterior

4.1.2.1 Bulla ethmoidalis

Volumina

Bei Betrachtung der Mittelwerte sowie der jeweiligen Streuungsmaße bei den Bullae ethmoidales zeigen sich in der infantilen und juvenilen Altersgruppe bei den weiblichen Tieren geringfügig größere Mittelwerte. Nach Durchführung des T- und U-Tests ($p < 0,05$) zum Mittelwertvergleich beider Geschlechter ist auch hier der Unterschied nicht signifikant (Tab. 4). In dem Computertomographiedatensatz fanden sich keine adulten weiblichen Tiere. Zum graphischen Vergleich werden die Ergebnisse der einzelnen Altersgruppe sowie Geschlechter in Boxplots dargestellt (Abb. 28).

Tab. 4: Ergebnisse der Volumenberechnungen und des Geschlechtsdimorphismus der Bulla ethmoidalis bei *Pan troglodytes*

Sexus	$\bar{x}$	SD	N	T	Z
	infantil				
m	0,15	0,05	3		
w	0,16	0,07	3	0,02 $^{n.s.}$	
	juvenil				
m	0,57	0,20	4		
w	0,58	0,38	7	–0,05 $^{n.s.}$	
	adult				
m	2,6	0,42	2		
w	n.	n.	0	—	–0,73 $^{n.s.}$

m: männlich; w: weiblich; $\bar{x}$: Mittelwert in cm³; SD: Standardabweichung des Mittelwertes in cm³; N: Anzahl; T: Prüfgröße des T-Tests; Z: Prüfgröße des U-Tests nach Mann-Whitney; n.s.: nicht signifikant ($p < 0,05$)

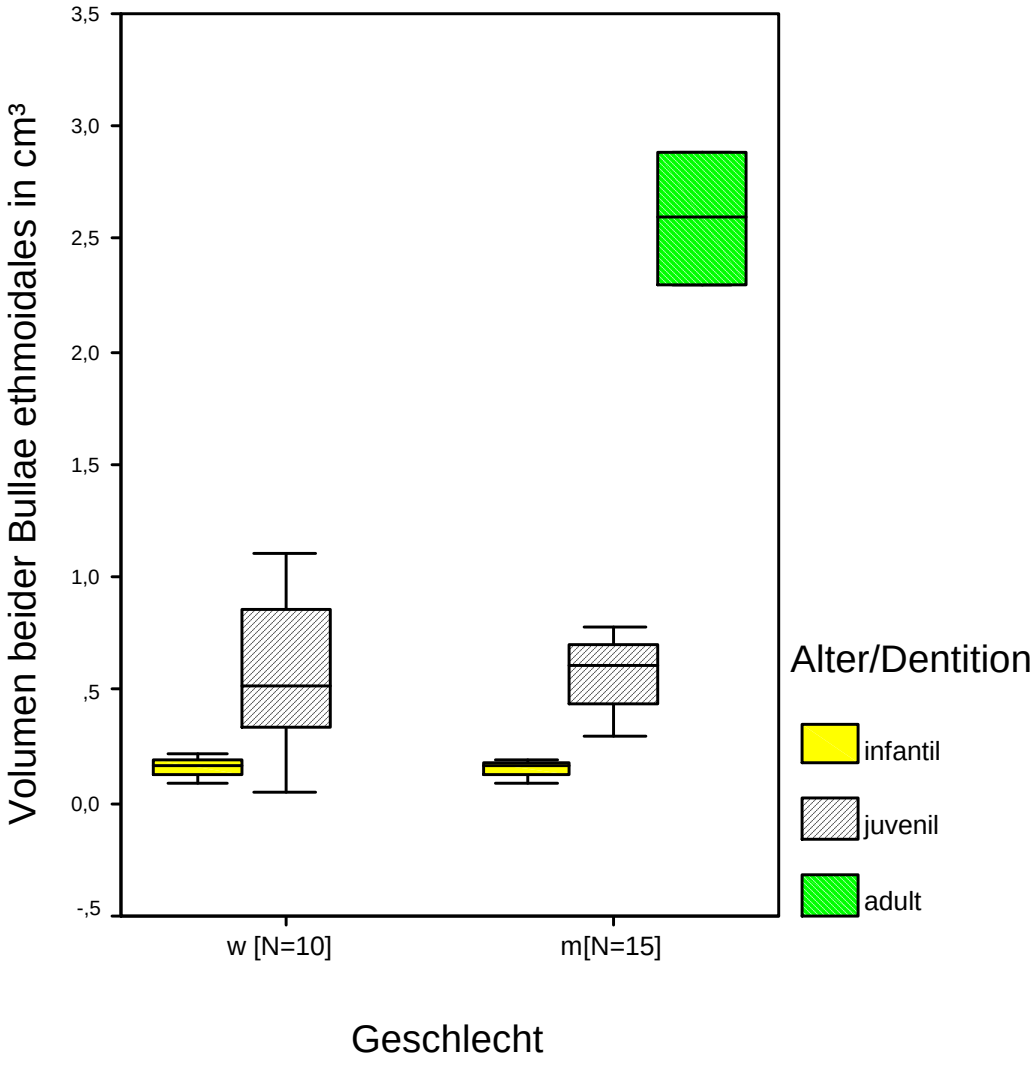
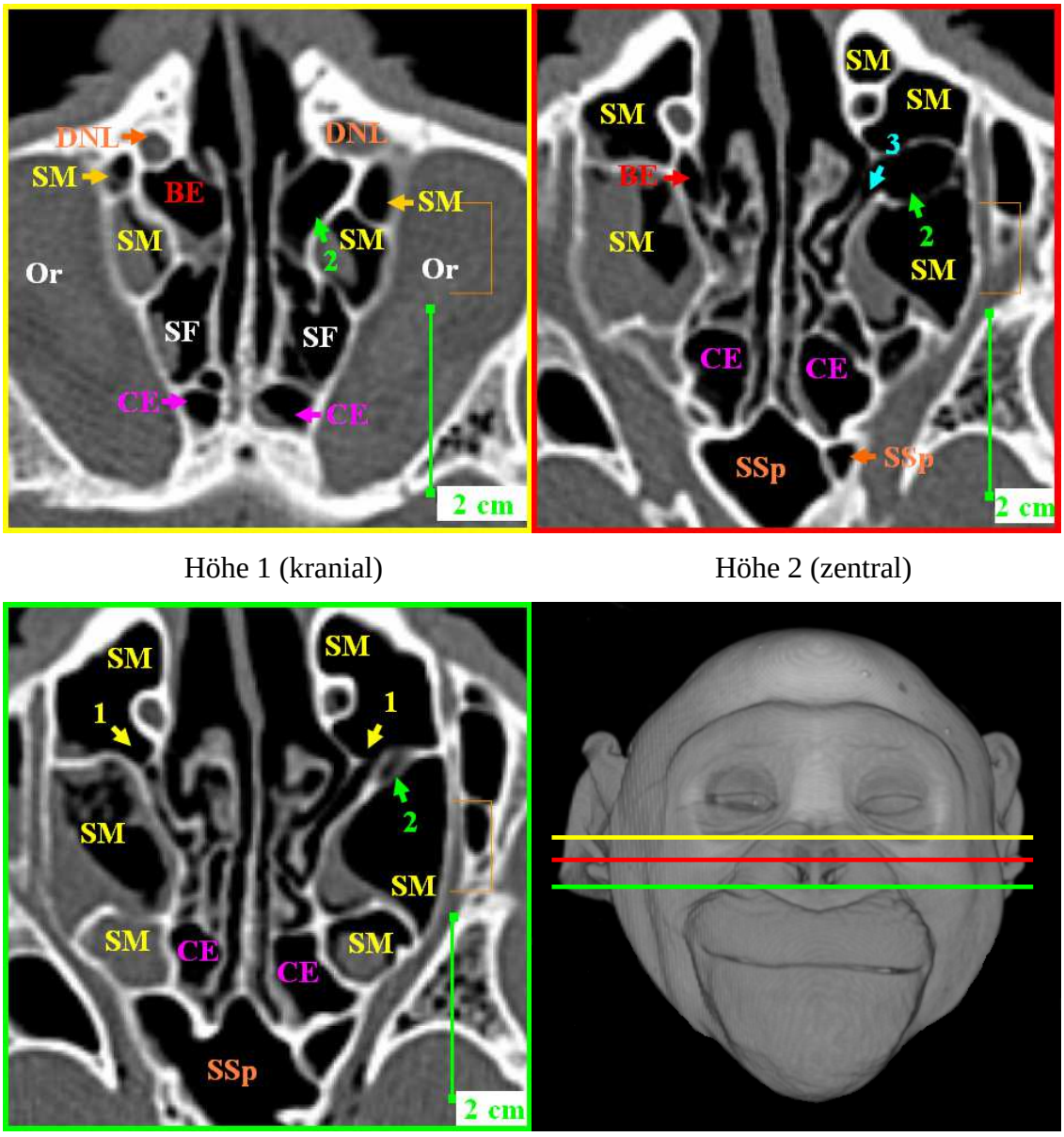


Abb. 28: Boxplots zur Darstellung der Verteilung der Volumina der Bullae ethmoidales bei *Pan troglodytes*;
N: Anzahl; w: weiblich; m: männlich; die Präparate ohne Geschlechtsangabe wurden nicht aufgeführt

Morphologie und Nachbarschaftsbeziehungen

Die Bulla ethmoidalis bildet die kaudale Grenze der Siebbeinpneumatisation. Sie ist die größte und konstanteste Zelle des vorderen Siebbeinzellkomplexes. Sie öffnet sich nach medial in den Bereich des Hiatus semilunaris und ist somit Teil des osteomeatalen Komplexes (Abb. 19). Die Kommunikation zwischen Ostium maxillae und Ostium bullae ethmoidales war in unserem Untersuchungsgut meist großlumig. Die Bulla ethmoidalis ist in enger Nachbarschaft zur Fossa cranialis anterior, der Orbita, den Sinus maxillaris und frontalis und zum Ductus nasolacrimalis. Bei einem der 21 untersuchten Köpfe, Nr. 43, konnte eine Bulla ethmoidalis als infraorbitale Hallerzelle nachgewiesen werden (Abb. 29, 30, 31).



Höhe 1 (kranial) Höhe 2 (zentral)

Höhe 3 (kaudal)

Abb. 29: Horizontale CT-Schichtaufnahmen des Kopfes eines männlichen infantilen Schimpansen mit Darstellung einer linken Hallerzelle sowie ausgewählter Nachbarstrukturen in drei verschiedenen Schichtebenen;
BE: Bulla ethmoidalis; SM: Sinus maxillaris; SF: Sinus frontalis; DNL: Ductus nasolacrimalis; CE: Cellulae ethmoidales; SSp: Sinus sphenoidalis; Or: Orbita; 1. Pfeil (gelb): Mündung des Sinus maxillaris; 2. Pfeil (grün): Hallerzelle; 3. Pfeil (blau): Mündung der Hallerzelle

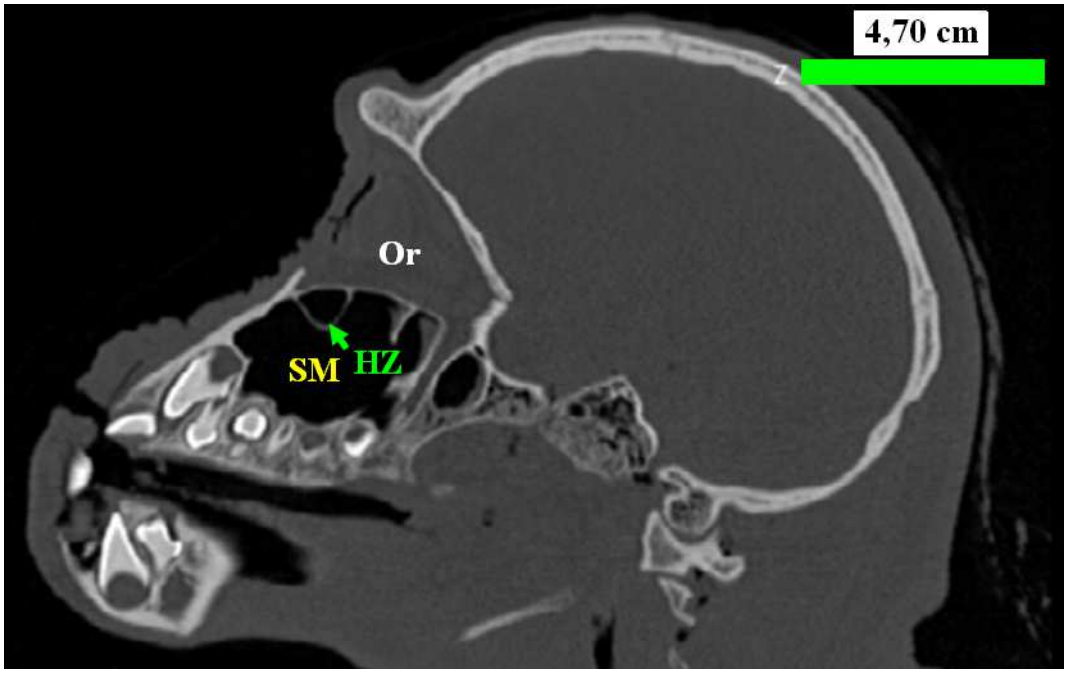


Abb. 30: Sagittale CT-Schichtaufnahme des männlichen infantilen Schimpansenkopfes aus Abbildung 29 mit Darstellung einer linken Hallerzelle sowie ausgewählter Nachbarstrukturen,
SM: Sinus maxillaris; HZ: Hallerzelle; Or: Orbita

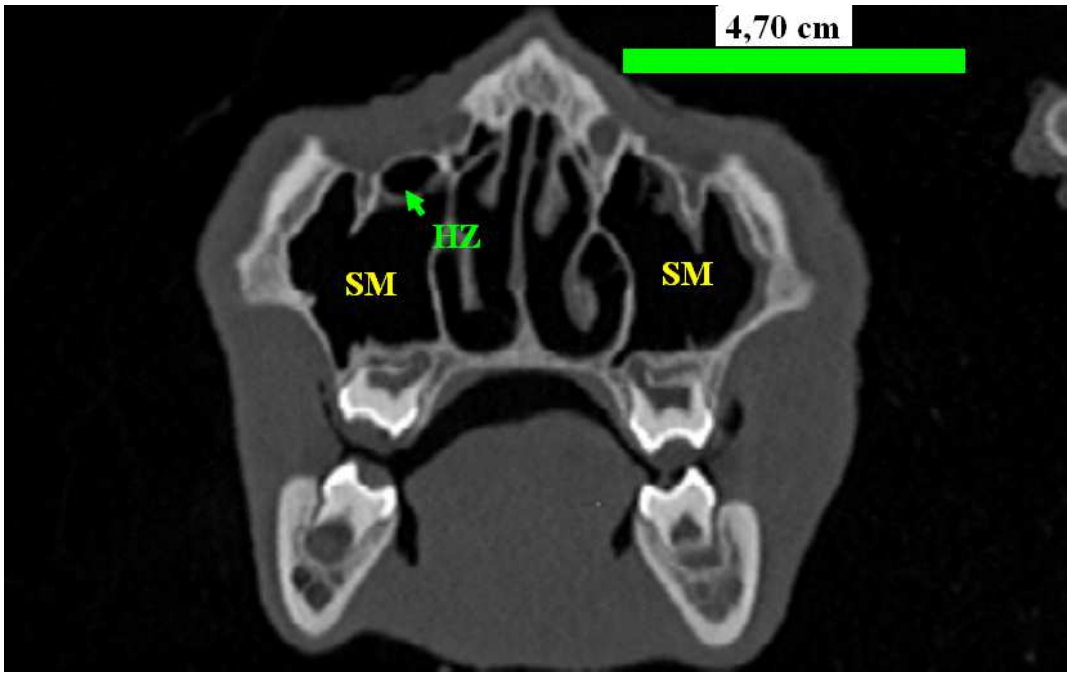


Abb. 31: Frontale CT-Schichtaufnahme des männlichen infantilen Schimpansenkopfes aus Abbildung 29 mit Darstellung einer linken Hallerzelle sowie ausgewählter Nachbarstrukturen;
SM: Sinus maxillaris; HZ: Hallerzelle

4.1.3 Prozentualer Anteil des Siebbeinzellsystems und der Sinus frontales

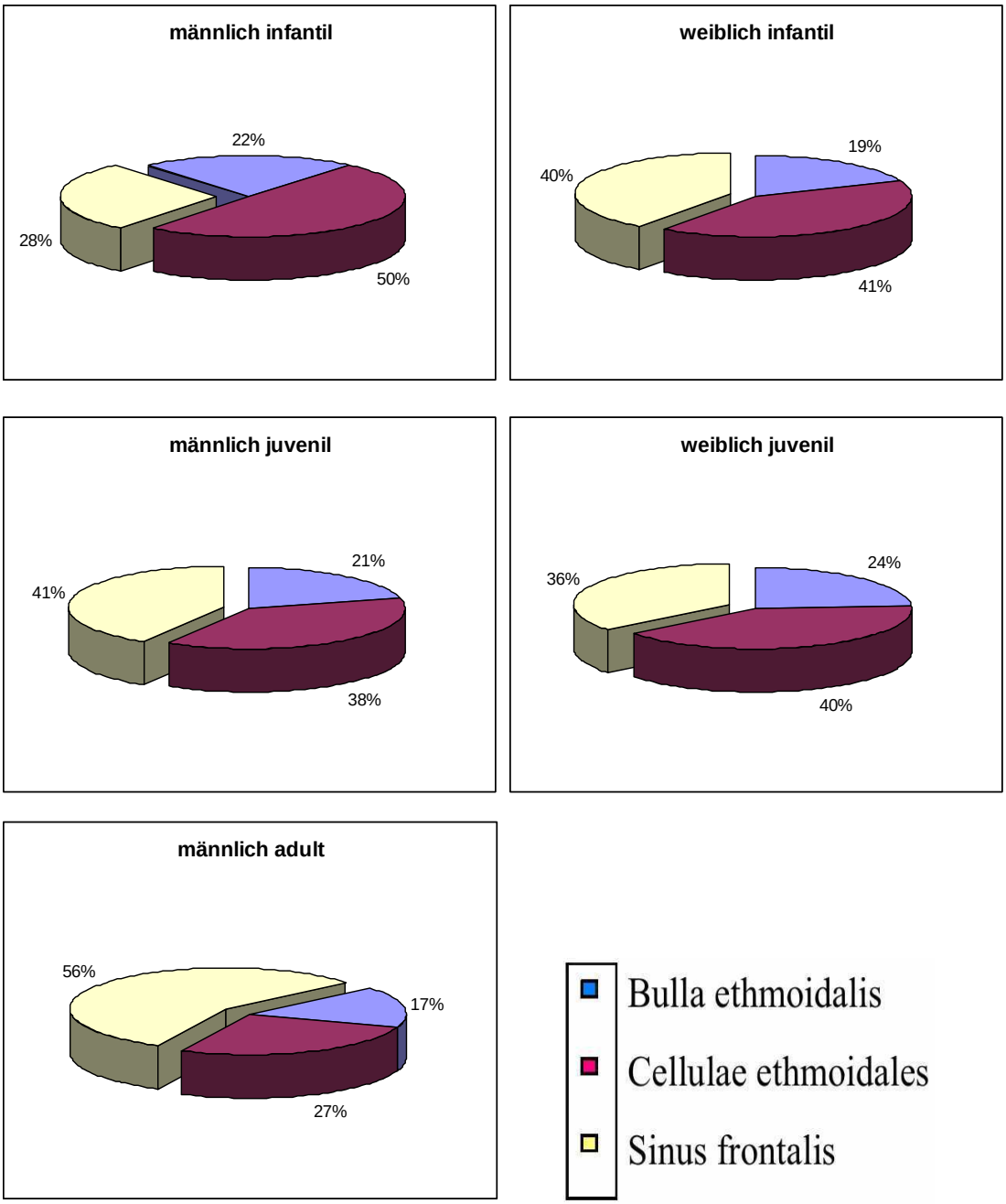


Abb. 32: Anteil der Bullae ethmoidales, der Sinus frontales und der Cellulae ethmoidales (ohne Bullae ethmoidales) an der Gesamtheit des durch sie gebildeten pneumatisierten Raumes

Bei Betrachtung des Anteils einer jeden untersuchten Nasennebenhöhlenstruktur, hier in Addition beider Seiten, bezogen auf die Gesamtheit des durch sie gebildeten pneumatisierten Raumes, fällt eine beträchtliche Größenzunahme des Sinus frontalis auf (Abb. 32). Dies lässt sich trotz der bereits beschriebenen Größenvariation des Rauminhaltes innerhalb der Population sowohl für die männlichen als auch die weiblichen Tiere feststellen. Der Anteil der Bulla ethmoidalis an diesem pneumatisierten Raum bleibt nahezu konstant. Die Volumenzunahme im Bereich der Siebbeinzellen (ohne Bulla ethmoidalis) verläuft langsamer, die der Sinus frontales schneller.

4.1.4 Asymmetrien der Nasennebenhöhlen

Die von uns durchgeführten Berechnungen zum Asymmetrieindex (AI) zeigen für *Pan troglodytes* Asymmetrien in der Volumenverteilung. Diese betreffen sowohl die Cellulae ethmoidales und die Bullae ethmoidales als auch den Sinus frontalis. Die Verteilung der Asymmetrien stellt sich allerdings zufällig dar. Es konnten keine Unterschiede zwischen rechts und links oder zwischen den Geschlechtern gezeigt werden. Somit handelt es sich bei diesen geringen Abweichungen um fluktuierende Asymmetrien. Auffällig ist in der Abbildung 33 mit Darstellung der Ergebnisse des Asymmetrieindex für die Cellulae ethmoidales, Kopf Nr. 35, welcher mit einem AI von -2,78 eine deutliche Asymmetrie zeigt.

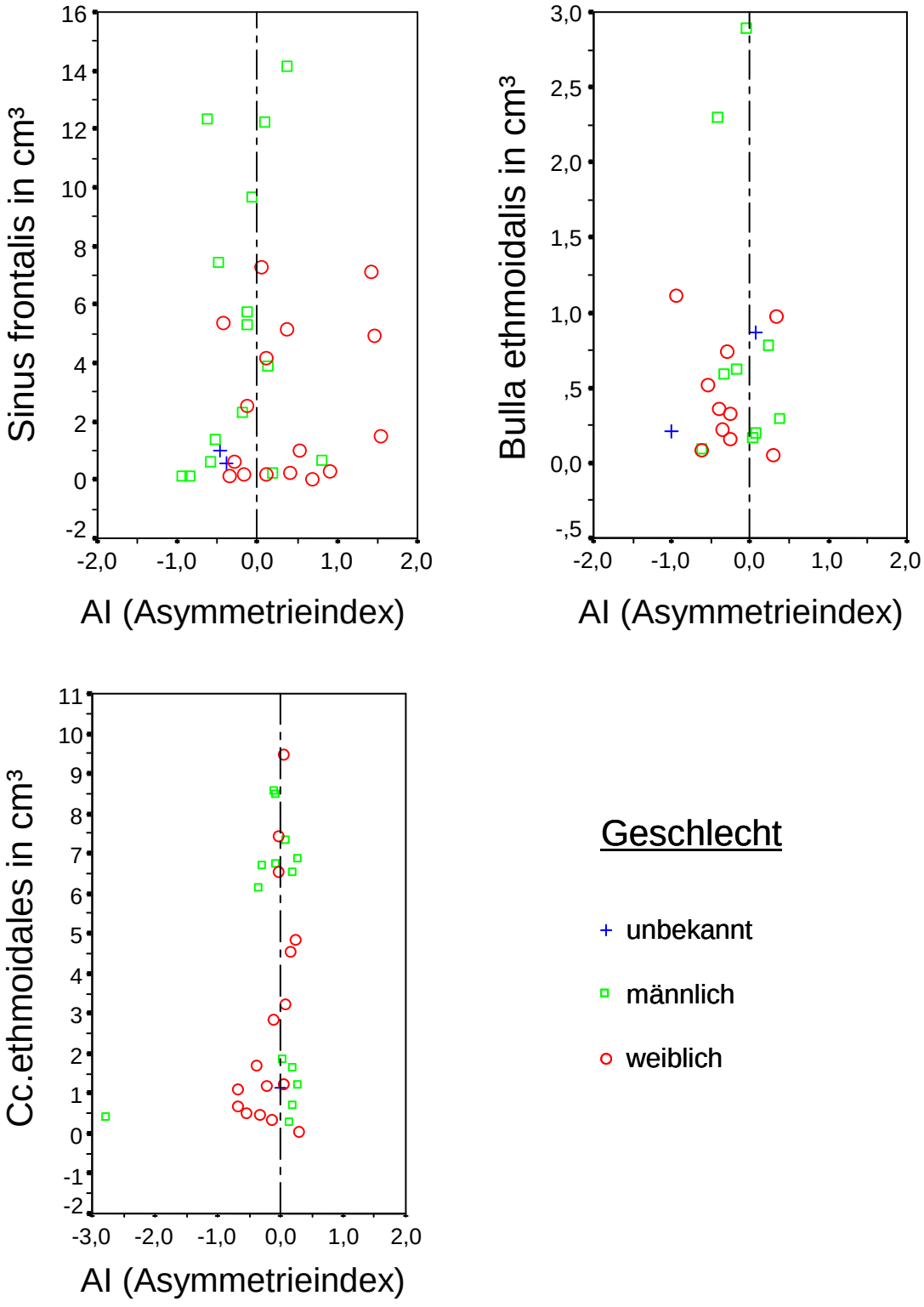


Abb. 33: Asymmetrieindex (AI) des Sinus frontalis, der Bulla ethmoidalis und der Cellulae ethmoidales

4.2 Ergebnisse der Schädelmessung

Die Tabellen 5 bis 9 geben einen Überblick über Mittelwert, die Standardabweichung und die Ergebnisse des T- und U-Tests der Längen-, Breiten- und Höhenmaße sowie des Gesichtsschädelvolumens und des Schädelbasisknickungswinkels von *Pan troglodytes*.

4.2.1 Längenmaße

Bei den erhobenen Längenmaßen weisen die männlichen Tiere der infantilen Gruppe und für die größte Schädellänge L1 auch die adulte Gruppe höhere Werte auf. In der juvenilen Gruppe hingegen konnte bei den weiblichen Tieren ein etwas größerer Betrag gemessen werden. Nach Analyse der Mittelwertunterschiede anhand des T-Tests sind diese lediglich bei der größten Schädellänge L1 in der adulten Altersgruppe signifikant ($p < 0,05$). Die Analyse der Wertepaare mittels des U-Tests nach Mann-Whitney ergab nicht signifikante Mittelwertunterschiede aller Längenmaße. Da der Levene-Test zur Prüfung der Varianzenhomogenität bei Durchführung des T-Tests in einem Fall eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0,05$ ergab, muss hier von einer Varianzenheterogenität ausgegangen werden. Das Ergebnis des T-Tests ist somit für L4 zu verwerfen (Tab. 5).

Tab. 5: Schädellängen von *Pan troglodytes*

Längenmaße	Sexus	$\bar{x}$	SD	T	Z	N
L1		infantil				
	m	13,67	0,06			3
	w	13,03	0,85	-1,29$^{n.s.}$	-0,66$^{n.s.}$	3
		juvenil				
	m	15,30	1,21			4
	w	15,72	1,62	0,49$^{n.s.}$	-0,38$^{n.s.}$	7
	o	15,30	1,27	–	–	2
		adult				
	m	19,82	1,44			8[a]
	w	17,74	0,66	-3,60	-2,40$^{n.s.}$	6[a]
L2		infantil				
	m	6,87	0,21			3
	w	6,60	0,26	-1,37$^{n.s.}$	-1,12$^{n.s.}$	3
		juvenil				
	m	7,95	0,73			4
	w	8,31	1,09	0,66$^{n.s.}$	-0,57$^{n.s.}$	7
	o	7,45	0,35	–	–	2
		adult				
	m	10,75	0,78			2
	w	–	–	–	–	0
L3		infantil				
	m	7,63	0,12			3
	w	7,60	0,36	-0,15$^{n.s.}$	-0,23$^{n.s.}$	3
		juvenil				
	m	9,68	1,25			4
	w	10,00	1,55	0,38$^{n.s.}$	-0,48$^{n.s.}$	7
	o	8,80	0,85	–	–	2
		adult				
	m	15,60	1,30			2
	w	–	–	–		0
L4		infantil				
	m	3,43	0,32			3
	w	3,23	0,06	-1,06$^{n.s.}$	-0,94$^{n.s.}$	3
		juvenil				
	m	4,25	0,06			4
	w	4,26	0,74	0,03*	-0,38$^{n.s.}$	7
	o	3,95	0,35	–	–	2
		adult				
	m	6,45	0,50			2
	w	–	–	–	–	0

m: männlich; w: weiblich; o: ohne Geschlechtsangabe; $\bar{x}$: Mittelwert in cm; SD: Standardabweichung des Mittelwertes in cm; T: Prüfgröße des T-Tests; Z: Prüfgröße des U-Tests nach Mann-Whitney; N: Anzahl; n.s.: nicht signifikant ($p < 0,05$); *: $p < 0,05$ im Levene-Test; [a]: beinhalten Daten aus KOPPE and OHKAWA, 1999

4.2.2 Breitenmaße

Bei den erhobenen Breitenmaßen weisen die männlichen Tiere in der infantilen Gruppe höhere Werte auf. Im Untersuchungsmaterial waren keine weiblichen adulten Präparate enthalten (Tab. 1). Nach Analyse der Mittelwerte in der infantilen und juvenilen Altersgruppe anhand des T-Tests ($p < 0,05$) sind keine signifikanten Unterschiede feststellbar. Der zusätzlich für alle Wertepaare durchgeführte U-Test nach Mann-Whitney bestätigt dieses Ergebnis. Da der Levene-Test zur Prüfung der Varianzenhomogenität bei Durchführung des T-Tests in einem Fall eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0,05$ ergab, muss hier von einer Varianzenheterogenität ausgegangen werden. Das Ergebnis des T-Tests ist somit für B1 zu verwerfen (Tab. 6).

Tab. 6: Schädelbreiten von *Pan troglodytes*

Breitenmaße	Sexus	$\bar{x}$	SD	T	Z	N
B1		infantil				
	m	5,70	0,87			3
	w	5,40	0,17	-0,59*	$-0,24^{n.s.}$	3
		juvenil				
	m	6,63	0,53			4
	w	6,67	0,92	0,11*	$-0,10^{n.s.}$	7
	o	6,75	0,50	–	–	2
		adult				
	m	7,85	0,07			2
	w	–	–	–	–	0
B2		infantil				
	m	4,50	0,35			3
	w	4,10	0,35	$-1,42^{n.s.}$	$-1,12^{n.s.}$	3
		juvenil				
	m	4,93	0,47			4
	w	5,09	0,70	$0,45^{n.s.}$	$-0,29^{n.s.}$	7
	o	5,10	0,43	–	–	2
		adult				
	m	6,20	0,57			2
	w	–	–	–	–	0
B3		infantil				
	m	2,56	0,21			3
	w	2,43	0,38	$-0,54^{n.s.}$	$-0,22^{n.s.}$	3
		juvenil				
	m	2,80	0,45			4
	w	3,06	0,48	$0,89^{n.s.}$	$-0,86^{n.s.}$	7
	o	2,85	0,35	–	–	2
		adult				
	m	3,95	0,21			2
	w	–	–	–	–	0
B4		infantil				
	m	1,30	0,10			3
	w	1,20	0,10	$-1,23^{n.s.}$	$-1,12^{n.s.}$	3
		juvenil				
	m	1,60	0,22			4
	w	1,90	0,60	$1,20^{n.s.}$	$-0,86^{n.s.}$	7
	o	1,60	0,14	–	–	2
		adult				
	m	3,10	0,85			2
	w	–	–	–	–	0

m: männlich; w: weiblich; o: ohne Geschlechtsangabe; $\bar{x}$: Mittelwert in cm; SD: Standardabweichung des Mittelwertes in cm; T: Prüfgröße des T-Tests; Z: Prüfgröße des U-Tests nach Mann-Whitney; N: Anzahl; n.s.: nicht signifikant ($p < 0,05$); *: $p < 0,05$ im Levene-Test

4.2.3 Höhenmaße

Bei allen erhobenen Höhenmaßen weisen die weiblichen Tiere in der juvenilen Altersgruppe höhere Werte auf. Für die infantilen Tiere lässt sich keine einheitliche Tendenz bei den ermittelten Schädelhöhen ermitteln. Der durchgeführte T- und U-Test ($p < 0,05$) zeigen, dass die Unterschiede der Mittelwerte zu gering und somit nicht signifikant sind (Tab. 7).

Tab. 7: Schädelhöhen von *Pan troglodytes*

Höhenmaße	Sexus	$\bar{x}$	SD	T	Z	N
H1		infantil				
	m	5,00	0,20			3
	w	4,83	0,76	$-0,37^{n.s.}$	$0^{n.s.}$	3
		juvenil				
	m	6,15	0,30			4
	w	6,47	0,76	$1,00^{n.s.}$	$-1,00^{n.s.}$	7
	o	6,35	0,64	–	–	2
		adult				
	m	8,45	1,77			2
	w	–	–	–	–	0
H2		infantil				
	m	2,83	0,31			3
	w	2,90	0,36	$0,24^{n.s.}$	$–0,21^{n.s.}$	3
		juvenil				
	m	3,58	0,33			4
	w	3,63	0,57	$0,20^{n.s.}$	$–0,50^{n.s.}$	7
	o	3,55	0,35	–	–	2
		adult				
	m	4,90	0,99			2
	w	–	–	–	–	0
H3		infantil				
	m	3,23	0,15			3
	w	3,20	0,30	$-0,17^{n.s.}$	$0^{n.s.}$	3
		juvenil				
	m	4,20	0,47			4
	w	4,30	0,61	$0,30^{n.s.}$	$–0,38^{n.s.}$	7
	o	4,05	0,78	–	–	2
		adult				
	m	6,40	0,71			2
	w	–	–	–	–	0

m: männlich; w: weiblich; o: ohne Geschlechtsangabe; $\bar{x}$: Mittelwert in cm; SD: Standardabweichung des Mittelwertes in cm; T: Prüfgröße des T-Tests; Z: Prüfgröße des U-Tests nach Mann-Whitney; N: Anzahl; n.s.: nicht signifikant ($p < 0,05$)

4.2.4 Gesichtsschädelvolumen

Das Gesichtschädelvolumen, als eine aus den Längenmaßen L2 und L3, dem Breitenmaß B1 sowie dem Höhenmaß H1 errechnete Größe, weist in der infantilen Gruppe bei den männlichen und in der juvenilen Gruppe bei den weiblichen Tieren höhere Werte auf. Nach Analyse der Mittelwerte mittels T- und U-Test sind diese Unterschiede jedoch nicht signifikant ($p < 0,05$).

Tab. 8: Gesichtsschädelvolumen von *Pan troglodytes*

GSV	Sexus	$\bar{x}$	SD	T	Z	N
		infantil				
	m	96,03	17,37			3
	w	83,83	17,20	$-0,86^{n.s.}$	$-0,66^{n.s.}$	3
		juvenil				
	m	161,75	28,96			4
	w	184,50	65,41	$0,80^{n.s.}$	$-0,76^{n.s.}$	7
	o	157,85	36,13	–	–	2
		adult				
	m	339,70	110,03			2
	w	–	–	–	–	0

m: männlich; w: weiblich; o: ohne Geschlechtsangabe; $\bar{x}$: Mittelwert; SD: Standardabweichung des Mittelwertes; T: Prüfgröße des T-Tests; Z: Prüfgröße des U-Tests nach Mann-Whitney; N: Anzahl; n.s.: nicht signifikant ($p < 0,05$)

4.2.5 Schädelbasisknickungswinkel

Die Beträge des Schädelbasisknickungswinkels der infantilen Gruppe sind im Vergleich zur juvenilen dezent größer. Lediglich die adulten Tiere weisen einen größeren Schädelbasisknickungswinkel auf. Die geringen Mittelwertunterschiede zwischen den Geschlechtern in der infantilen und juvenilen Gruppe waren nicht signifikant ($p < 0,05$).

Tab. 9: Schädelbasisknickungswinkel von *Pan troglodytes*

W1	Sexus	$\bar{x}$	SD	T	Z	N
		infantil				
	m	142,3	1,8			3
	w	142,2	2,8	$-0,07^{n.s.}$	$-0,22^{n.s.}$	3
		juvenil				
	m	141,4	4,8			4
	w	143,2	6,6	$0,51^{n.s.}$	$-0,57^{n.s.}$	7
	o	131,1	7,1	–	–	2
		adult				
	m	147,8	5,2			2
	w	–	–	–	–	0

m: männlich; w: weiblich; o: ohne Geschlechtsangabe; $\bar{x}$: Mittelwert in Grad; SD: Standardabweichung des Mittelwertes in Grad; T: Prüfgröße des T-Tests; Z: Prüfgröße des U-Tests nach Mann-Whitney; N: Anzahl; n.s.: nicht signifikant ($p < 0,05$)

4.3 Korrelationsanalyse

Durch die in dieser Studie durchgeführte bivariate Korrelationsanalyse ist es möglich, Zusammenhänge zwischen den untersuchten Nasennebenhöhlenstrukturen und anderen Schädelmaßen bei *Pan troglodytes* aufzuzeigen. Einen Überblick über die Ergebnisse der Korrelationsanalyse, hier ohne Geschlechterunterteilung, geben die Tabellen 10 bis 18.

4.3.1 Bivariate Korrelationsanalyse zwischen den Schädelmaßen und dem Sinus frontalis

Die Untersuchung des statistischen Zusammenhangs zwischen den Schädelmaßen und dem Sinus frontalis weist eine hohe Korrelation der Längen- und Höhenmaße sowie des Gesichtsschädelvolumens mit der Stirnhöhle auf (Tab. 10, 12, 13). Die Korrelation der Breitenmaße, und hier besonders zwischen der Mittelgesichtsbreite (B1) sowie der Maxilloalveolarbreite (B2) und dem Sinus frontalis ist, verglichen mit den Längen- und Höhenmaßen, geringer (Tab. 11). Keinen deutlichen statistischen Zusammenhang aufgrund einer geringen Korrelation zeigt sich zwischen der Größe des Schädelbasisknickungswinkel und der Stirnhöhle (Tab. 13).

Tab. 10: Regression und Korrelationskoeffizient für die Längenmaße und den Sinus frontalis von *Pan troglodytes*

korrelierende Merkmalspaare	Regressionsgleichung y=bx+a	Korrelations-koeffizient (r)	Anzahl N
L1-Sinus frontalis	y = 1,390 x - 19,438	0,882*	33[a]
L2-Sinus frontalis	y = 1,770 x - 12,464	0,804*	21
L3-Sinus frontalis	y = 1,051 x - 8,579	0,872*	21
L4-Sinus frontalis	y = 2,600 x - 9,249	0,853*	21

L1 - größte Schädellänge; L2 – Schädelbasislänge; L3 – Gesichtslänge; L4 - Gaumenlänge; *: $p < 0,001$; [a]: beinhalten Daten aus KOPPE and OHKAWA, 1999

Tab. 11: Regression und Korrelationskoeffizient für die Breitenmaße und den Sinus frontalis von *Pan troglodytes*

korrelierende Merkmalspaare	Regressionsgleichung y=bx+a	Korrelations-koeffizient (r)	Anzahl N
B1-Sinus frontalis	y = 1,904 x - 10,710	0,601**	21
B2-Sinus frontalis	y = 2,806 x - 12,260	0,696*	21
B3-Sinus frontalis	y = 3,882 x - 9,718	0,719*	21
B4-Sinus frontalis	y = 3,746 x - 4,934	0,830*	21

B1 – Mittelgesichtsbreite; B2 – Maxilloalveolarbreite; B3 – Gaumenbreite; B4 – Interorbitalbreite; *: $p < 0,001$; **: $p < 0,005$

Tab. 12: Regression und Korrelationskoeffizient für die Höhenmaße und den Sinus frontalis von *Pan troglodytes*

korrelierende Merkmalspaare	Regressionsgleichung y=bx+a	Korrelations-koeffizient (r)	Anzahl N
H1-Sinus frontalis	y = 1,899 x - 10,072	0,778*	21
H2-Sinus frontalis	y = 3,217 x - 9,712	0,784*	21
H3-Sinus frontalis	y = 2,494 x - 8,751	0,842*	21

H1 – Obergesichtshöhe; H2 - Nasenhöhe I; H3 - Nasenhöhe II; *: $p < 0,001$

Tab. 13: Regression und Korrelationskoeffizient für das Gesichtsschädelvolumen bzw. den Schädelbasisknickungswinkel und den Sinus frontalis von *Pan troglodytes*

korrelierende Merkmalspaare	Regressionsgleichung y=bx+a	Korrelations-koeffizient (r)	Anzahl N
GSV-Sinus frontalis	y = 0,29 x - 3,257	0,835*	21
W1-Sinus frontalis	y = 0,139 x -18,094	$0,287^{n.s.}$	21

GSV – Gesichtsschädelvolumen; W1 – Schädelbasisknickungswinkel; *: $p < 0,001$; n.s.: nicht signifikant ($p < 0,05$)

4.3.2 Bivariate Korrelationsanalyse zwischen den Schädelmaßen und den Cellulae ethmoidales

Die Untersuchung des statistischen Zusammenhangs zwischen den Schädelmaßen und den Cellulae ethmoidales, hier inklusive der Bulla ethmoidalis, weist eine hohe bis sehr hohe Korrelation auf (Tab. 14 bis 17). Die Korrelationskoeffizienten weisen auf einen geringeren linearen statistischen Zusammenhang zwischen Sinus frontalis und Mittelgesichtsbreite (B1) sowie zwischen Sinus frontalis und Maxilloalveolarbreite (B2) hin. Eine deutliche Korrelation liegt dennoch auch für diese Breitenmaße vor (Tab. 15). Zwischen der Größe des Siebbeinzellvolumens und dem Grad der Schädelbasisknickung konnte kein deutlicher statistischer Zusammenhang gefunden werden (Tab. 17).

Tab. 14: Regression und Korrelationskoeffizient für die Längenmaße und die Cellulae ethmoidales von *Pan troglodytes*

korrelierende Merkmalspaare	Regressionsgleichung y=bx+a	Korrelations-koeffizient (r)	Anzahl N
L1-Cellulae ethmoidales	y = 1,016 x - 13,321	0,860*	31[a]
L2-Cellulae ethmoidales	y = 1,215 x - 8,009	0,877*	19
L3-Cellulae ethmoidales	y = 0,708 x - 5,210	0,933*	19
L4-Cellulae ethmoidales	y = 1,772 x - 5,738	0,925*	19

L1 - größte Schädellänge; L2 – Schädelbasislänge; L3 – Gesichtslänge; L4 - Gaumenlänge; *: $p < 0,001$; [a]: beinhalten Daten aus KOPPE and OHKAWA, 1999

Tab. 15: Regression und Korrelationskoeffizient für die Breitenmaße und die Cellulae ethmoidales von *Pan troglodytes*

korrelierende Merkmalspaare	Regressionsgleichung y=bx+a	Korrelations-koeffizient (r)	Anzahl N
B1-Cellulae ethmoidales	y = 1,459 x - 7,665	0,705*	19
B2-Cellulae ethmoidales	y = 2,047 x - 8,424	0,798*	19
B3-Cellulae ethmoidales	y = 2,745 x - 6,341	0,805*	19
B4-Cellulae ethmoidales	y = 2,363 x - 2,506	0,829*	19

B1 – Mittelgesichtsbreite; B2 – Maxilloalveolarbreite; B3 – Gaumenbreite; B4 – Interorbitalbreite; *: $p < 0,001$

Tab. 16: Regression und Korrelationskoeffizient für die Höhenmaße und die Cellulae ethmoidales von *Pan troglodytes*

korrelierende Merkmalspaare	Regressionsgleichung y=bx+a	Korrelations-koeffizient (r)	Anzahl N
H1-Cellulae ethmoidales	y = 1,290 x - 6,245	0,833*	19
H2-Cellulae ethmoidales	y = 2,164 x - 5,913	0,835*	19
H3-Cellulae ethmoidales	y = 1,690 x - 5,323	0,902*	19

H1 – Obergesichtshöhe; H2 - Nasenhöhe I; H3 - Nasenhöhe II; *: $p < 0,001$

Tab. 17: Regression und Korrelationskoeffizient für das Gesichtsschädelvolumen bzw. den Schädelbasisknickungswinkel und die Cellulae ethmoidales von *Pan troglodytes*

korrelierende Merkmalspaare	Regressionsgleichung y=bx+a	Korrelations-koeffizient (r)	Anzahl N
GSV-Cellulae ethmoidales	y = 0,019 x - 1,511	0,871*	19
W1-Cellulae ethmoidales	y = 0,126 x -16,314	$0,325^{n.s.}$	19

GSV – Gesichtsschädelvolumen; W1 – Schädelbasisknickungswinkel; *: $p < 0,001$; n.s.: nicht signifikant ($p < 0,05$)

4.3.3 Ergebnisse der partiellen Korrelationsanalyse

Um den Einfluss einer dritten Variablen, und somit eine Scheinkorrelation zweier Werte auszuschließen, wurde für ausgewählte Merkmalspaare eine partielle Korrelationsanalyse durchgeführt (Tab. 18). Bei diesem Verfahren wurden, im Gegensatz zur bivariaten Analyse, die Siebbeinzellenvolumina unter Herausrechnung der Bulla ethmoidalis verwendet. Dies ermöglicht eine eingehendere Untersuchung der Korrelation dieser beiden Größen zueinander. Bei den in Spalte K_1 aufgeführten Korrelationsfaktoren handelt es sich zur Gegenüberstellung um Ergebnisse der bivariaten Korrelation. Nach Analyse der in Spalte K_2 stehenden Korrelationsfaktoren der partiellen Analyse liegen keine Scheinkorrelationen vor. Lediglich bei der Korrelation zwischen den Cellulae ethmoidales und der Bulla ethmoidalis hat die größte Schädellänge (L1) als Störfaktor einen deutlicheren Einfluss. Auch hier liegt allerdings eine signifikante Korrelation ($p < 0,05$) vor.

Tab. 18: Ergebnisse der partiellen Korrelationsanalyse

	Cellulae ethmoidales		Bulla ethmoidalis		Sinus frontalis	
	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2
Cellulae ethmoidales			0,926*	0,572** (L1) 0,864* (B1) 0,772* (H1)	0,906*	0,631* (L1) 0,836* (B1) 0,734* (H1)
Bulla ethmoidalis	0,926*	0,572** (L1) 0,864* (B1) 0,772* (H1)			0.950*	0,876* (L1) 0,947* (B1) 0,886* (H1)
Sinus frontalis	0,906*	0,631* (L1) 0,836* (B1) 0,734* (H1)	0,950*	0,876* (L1) 0,947* (B1) 0,886* (H1)		

*: $p < 0,01$; **: $p < 0,05$; K1: Korrelationskoeffizient nach Pearson ohne konstante Größe; K2: Korrelationskoeffizient nach Pearson mit konstanter Größe; (L1), (B1), (H1): konstante Größe

4.4 Ergebnisse der Regressionsanalyse

Um die wechselseitigen Zusammenhänge der über die Korrelationsmatrix nachgewiesenen Beziehung genauer zu untersuchen und graphisch darzustellen, wurde eine einfache lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind im Kapitel 4.3 beschrieben. Der anhand der linearen Regressionsanalyse ermittelte Zusammenhang einiger ausgewählter Merkmalspaare ist in den Abbildungen 34 und 35 mittels Streudiagrammen dargestellt.

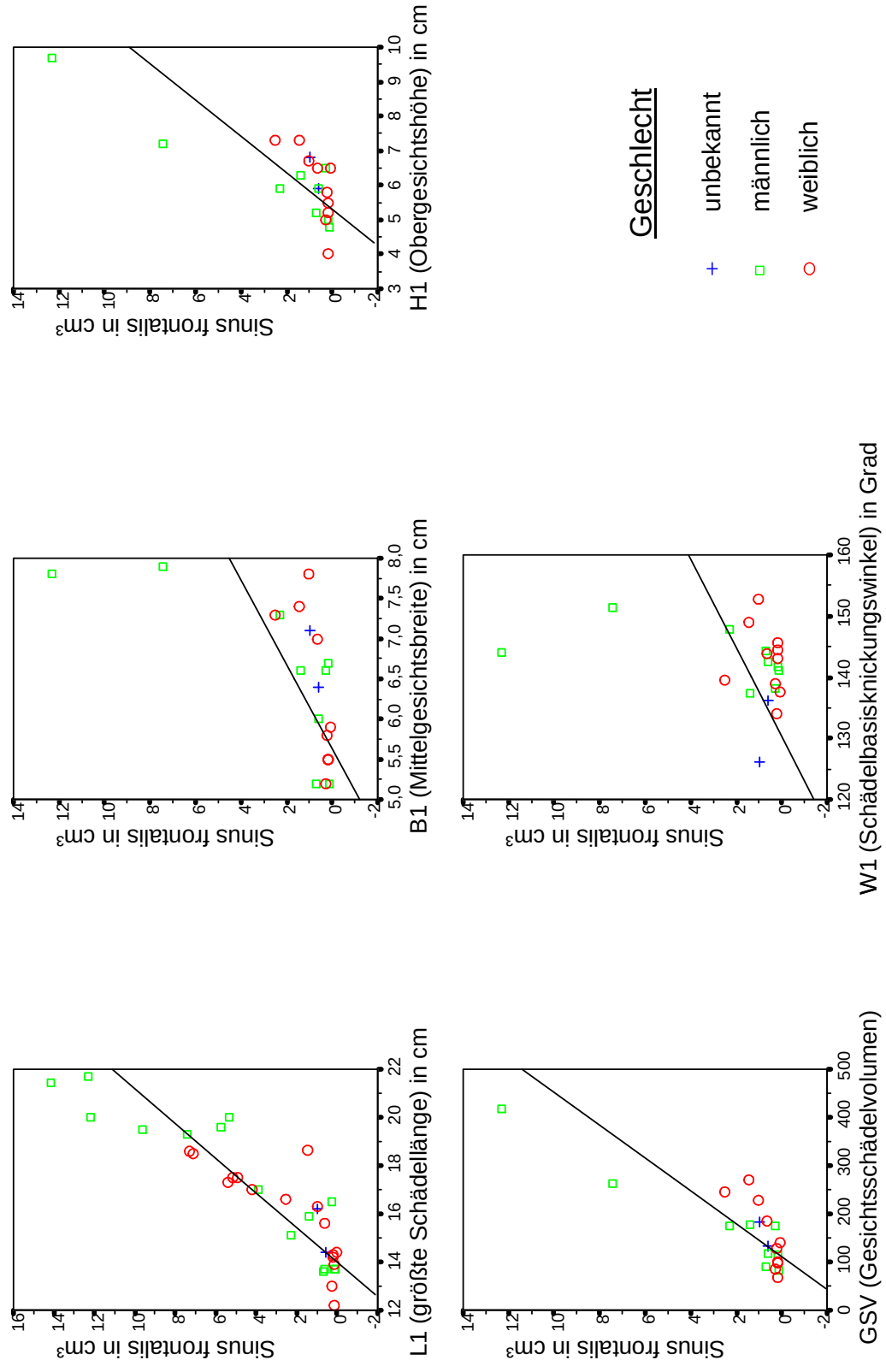


Abb. 26: Streudiagramme der linearen Regressionsanalyse des Sinus frontalis und ausgewählter Schädelmaße bei *Pan troglodytes*

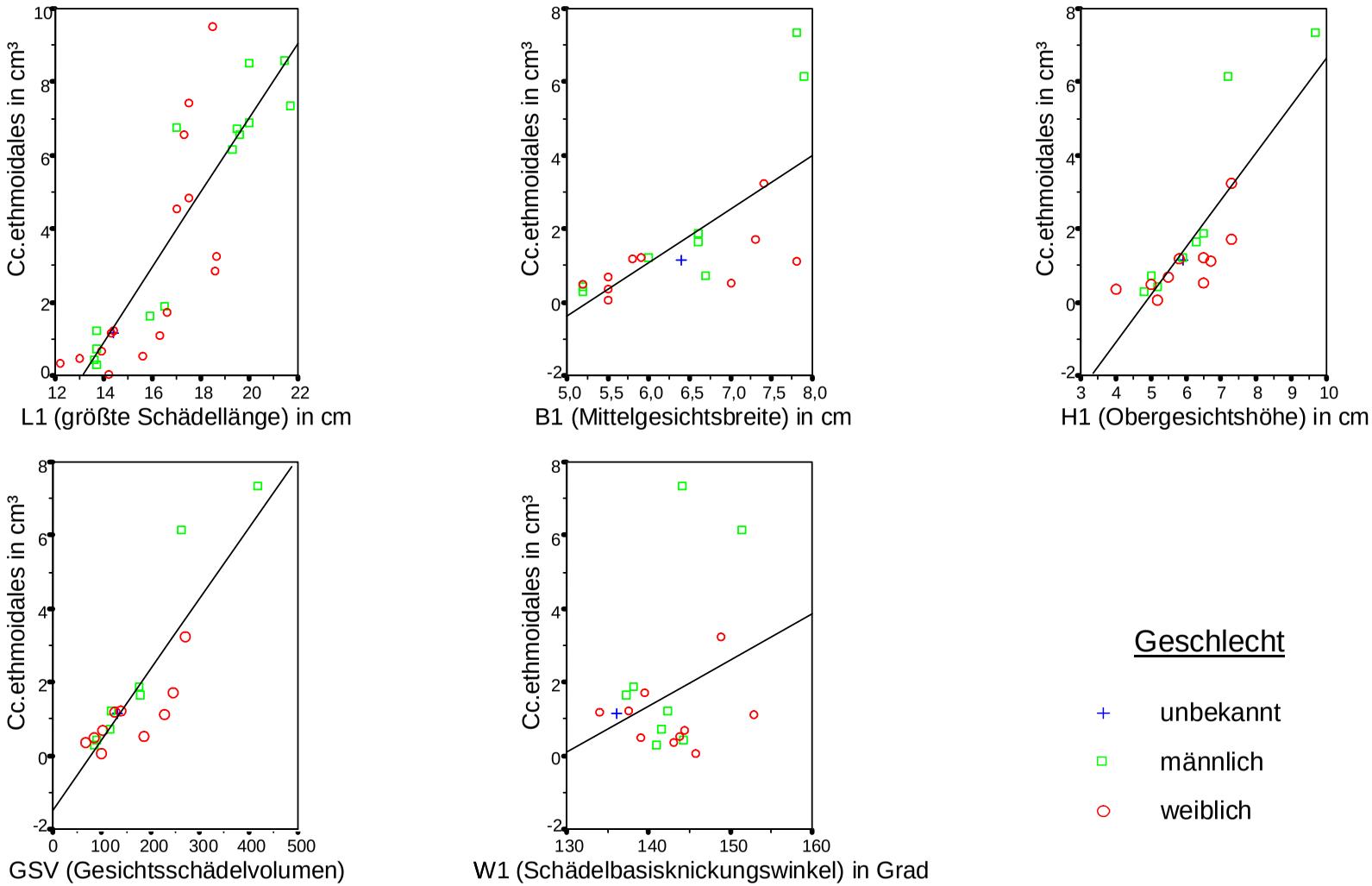


Abb. 27: Streudiagramme der linearen Regressionsanalyse der Cellulae ethmoidales und ausgewählter Schädelmaße bei *Pan troglodytes*

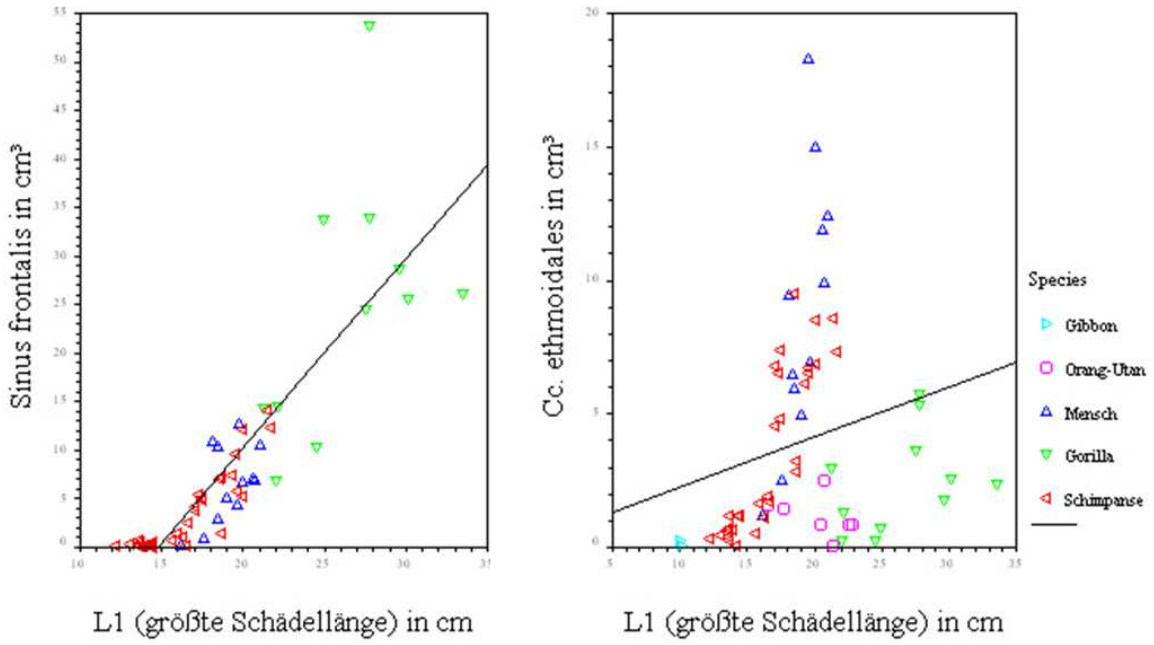


Abb. 28: Streudiagramm der linearen Regressionsanalyse des Sinus frontalis (links) bzw. der Cellulae ethmoidales (rechts) und der größten Schädellänge für die großen Menschenaffen (Daten von KOPPE and OHKAWA, 1999)

Zur Einordnung der Siebbeinzell- und Stirnhöhlenvolumina wurden die Messergebnisse für den Schimpansen mit denen anderer großer Menschenaffen graphisch in Beziehung gesetzt. Die Größe der Stirnhöhle zeigt bei Schimpanse, Gorilla und Mensch eine deutliche Korrelation mit der Schädellänge. Die größeren Volumina bei Mensch und Gorilla im Vergleich zum Schimpansen lassen sich dem Anschein nach auf deren größere Schädel zurückführen, da alle Werte nahe der Regressionsgeraden liegen.

Die Siebbeinzellenpneumatisation ist beim Menschen innerhalb der großen Menschenaffen im Verhältnis zur Schädellänge am stärksten. Die Werte liegen deutlich über der Regressionsgeraden. Auch der Schimpanse weist in Relation zur größten Schädellänge größere Volumina im Bereich der Siebbeinzellen auf.

5 Diskussion

5.1 Methodenkritik

Zahlreichen Untersuchungen der Nasennebenhöhlen des Menschen stehen deutlich weniger beim Schimpansen (*Pan troglodytes*) gegenüber. Beruhen die morphologischen Studien häufig auf Beschreibungen einzelner Tiere anhand mazerierter Schädel, so wurden die volumetrischen Messungen meist mit invasiven Verfahren durchgeführt (WEGNER, 1936; CAVE and HAINES, 1940; BEZOLD, 1945; CAVE, 1949; HOUSE, 1966; BLANEY, 1986; KOPPE und SCHUMACHER, 1992; KOPPE and OHKAWA, 1999). Diese Methoden sind zur präzisen Ermittlung des Rauminhaltes der Nasennebenhöhlen weniger geeignet als die uns nunmehr zur Verfügung stehenden Methoden mittels dreidimensionaler bildgebender Verfahren. Aufgrund der grazilen, mitunter zahlreichen und nur durch dünne Knochensepten voneinander getrennten Siebbeinzellen gestaltet sich deren Volumenbestimmung und Zuordnung zu einzelnen Gruppen besonders schwierig. Ebenso ist die Beschreibung des Siebbeins und der Nasenhaupt- und Nasennebenhöhlen anhand einer geringen Schädelzahl, aufgrund der interindividuellen Varianz, nur bedingt zur Formulierung allgemeingültiger Aussagen geeignet.

Die von uns basierend auf Computertomographiedatensätzen durchgeführte Analyse ermöglichte die präzise Ermittlung des Rauminhaltes der Siebbeinzellen und des Sinus frontalis sowie schädelmorphologische Analysen, basierend auf 21 Tieren. Obwohl die Zahl deutlich über den bisher meist durchgeführten Einzelbeschreibungen liegt, ist sie dennoch für bestimmte statistische Verfahren sehr gering. So konnte trotz verschiedener Prüfverfahren (Kolmogorov-Smirnov [$p < 0,05$] und Shapiro-Wilks [$p < 0,05$] graphisch anhand des Histogramms und der Q-Q-Diagramme [normal und trendbereinigt]) bezüglich des Vorliegens einer Normalverteilung keine eindeutige Aussage gemacht werden. Eine solche Normalverteilung ist Basis für die Durchführung des T-Tests für unabhängige Stichproben. Somit wurde zusätzlich der U-Test nach Mann-Whitney als nichtparametrischer Test zur Verifizierung eines möglichen Geschlechtsdimorphismus der untersuchten Parameter durchgeführt. Bei diesem ist das Vorliegen einer Gauß-Verteilung nicht erforderlich. Die Ergebnisse der Testverfahren wurden einander gegenüber gestellt. Bis auf zwei Ausnahmen (Größte Schädellänge L1 und Gaumenlänge L4, Tab. 5) kamen beide Testverfahren zu den gleichen Ergebnissen.

War das Geschlecht bei 19 der 21 Tiere bekannt, so musste die Ermittlung des biologischen Alters anhand der Dentition in Anlehnung an FRENKERT (2009) (Tab. 1) vorgenommen werden. Hierbei fand eine Einteilung in drei Altersgruppen (infantil, juvenil, adult) statt. Da diese Einteilung aufgrund sehr großer Altersspannweiten allenfalls als grobe Unterteilung gelten kann, wurden verschiedene Schädelmaße ermittelt und zu den berechneten Volumina in Beziehung gesetzt. Diese Vorgehensweise fand bereits in vorangegangenen Untersuchungen dieser Greifswalder Arbeitsgruppe Verwendung (u.a. MOORMANN, 2004; FRENKERT, 2009; GÖLLRICH, 2010).

Es wurden dafür verschiedene Höhen-, Breiten- und Längenmaße, das Gesichtsschädelvolumen (GSV) sowie der Schädelbasisknickungswinkel erhoben (Abb. 8 bis 13). Die Festlegung der dafür notwendigen Messpunkte erfolgte anhand von 3D-Rekonstruktionen der Schimpansenköpfe, welche mittels der Software Volocity® 4.2 (Improvision Ltd., A PerkinElmer Company, Coventry, UK) aus den Computertomographiedatensätzen generiert wurden.

Die von MARTIN (1928) vorgeschlagene Interorbitalbreite (Maß 50) konnte nicht verwendet werden, da sich Knochennähte und –grenzen in CT-Aufnahmen häufig nicht zweifelsfrei detektieren ließen. Hier wurde durch Konstruktion von Messpunkten, ausgehend von der Schädelbasislänge (L2) eine andere Interorbitalbreite definiert (Abb. 11 bis 13).

Zur Bestimmung der Nasenhöhe (Maß 55) schlägt MARTIN (1928) die „*geradlinige Entfernung des Nasion vom Nasospinale*“, also der Projektion des tiefsten Punktes des Unterrandes der Apertura piriformis in die Mediansagittalebene vor. An unseren Präparaten konnte dieses Nasospinale nicht immer eindeutig aufgefunden werden. Die somit eigenständig definierte Nasenhöhe II (H3) zwischen dem nasalen Eingang des Canalis incisivus und der kranialsten Extension der Crista galli erwies sich als guter Ersatz an den nicht mazerierten Schädeln.

5.2 Morphologie der Nasennebenhöhlen

Die Aussage von KRMPOTIC-NEMANIC et al. (1997), dass beim Menschen die Bulla ethmoidalis, die Keil-, Kiefer- und Stirnhöhle bereits mit einem Jahr nachweisbar sind, deckt

sich mit unseren Befunden. Die Angabe zum beschleunigten Wachstum innerhalb der ersten sieben Jahre, in unserem Untersuchungsgut die infantile Altersgruppe, lassen sich nicht überprüfen, da uns keine genaueren Altersangaben der Präparate vorlagen. Gleiches gilt für den von KRMPOTIC-NEMANIC et al. (1997) angeführten weitestgehenden Abschluss des Nasennebenhöhlenwachstums zwischen dem 12. bis 14. Lebensjahr, in unserem Untersuchungsgut die Grenze zwischen juveniler und adulter Altersgruppe.

Alle Tiere verfügten über jeweils eine Keilbein- und Kieferhöhle pro Seite. Die Keilbeinhöhle war stets vollständig durch ein, häufig nicht in der Mitte liegendes, knöchernes Septum von der Gegenseite getrennt (Abb. 16, 19, 22, 23, 26, 29). Zum Rauminhalt dieser Struktur liegen bereits Untersuchungen von TÖPKE (2010) vor. In unserer Studie stand das Siebbein im Zentrum. Die Vermessung wurde lediglich bei den Tieren vorgenommen, bei denen der Sinus sphenoidalis in direktem Zusammenhang mit den von uns untersuchten Formationen stand (Abb. 23 bis 25).

Alle Tiere verfügten über eine Stirnhöhle pro Schädelseite, welche allerdings in ihrer Größe sehr starken intra- und interindividuellen Variationen unterlag (Abb. 14, 15). Diese Feststellung deckt sich mit den Erkenntnissen früherer Arbeiten zur menschlichen Stirnhöhle (KIPP, 1981; SZILVÁSSY, 1982; BROWN, 1984; HÖHNIG, 1999; WEIGLEIN, 1999). Sie war in allen Fällen durch ein knöchernes, häufig nicht mittiges, Septum vollständig von der Gegenseite getrennt. Die von PETER (1925) gemachte Einschränkung, wonach man von einer Stirnhöhle erst mit Einbuchtung des Hohlraumes ins Stirnbein sprechen könne, wurde so nicht vorgenommen. Der Sinus frontalis wurde in unserem Untersuchungsgut auch dann als solcher identifiziert und vermessen, wenn dessen Pneumatisation nicht oder nur geringfügig das Os frontale erreichte und somit deutlich unterhalb der Arcus supraciliaris endete. Diese Abgrenzung des Sinus frontalis gegenüber den Siebbeinzellen war notwendig, um diesen auch bei Tieren mit nur rudimentärer Stirnhöhlenanlage von den übrigen Siebbeinzellen abzugrenzen. Ist eine solche Unterteilung statistisch und aufgrund der besseren Übersicht notwendig, so ist dennoch die häufig diskutierte Entstehung der Stirnhöhle aus einer vorderen Siebbeinzelle zu bedenken (u.a. PAULLI, 1900 c; BLANEY, 1986; MAFEE, 1993; ROSSIE, 2005). Eine vollständige Betrachtung des Siebbeins, und hier im Besonderen des Labyrinthes, ohne Einbeziehung der Stirnhöhle wäre somit unvollständig. Aus diesem Grund wurde die

Vermessung und morphologische Analyse des Sinus frontalis in unsere Studie über die Siebbeinzellen des Schimpansen integriert.

Der Sinus sphenoidalis wird von einigen Autoren ebenfalls als eine sich aus den Siebbeinzellen entwickelnde Struktur betrachtet (WEIGLEIN, 1999). Zumeist wird allerdings davon ausgegangen, dass es sich um einen sekundär abgeschnürten Teil der ursprünglichen Nasenhaupthöhle handelt (PAULLI, 1900 c). Bis auf eine Ausnahme (Kopf Nr. 38; Abb. 23 bis 25) ist der Sinus sphenoidalis in unserem Untersuchungsgut morphologisch deutlich von den Siebbeinzellen abzugrenzen. Die Hypothese zur möglichen Entstehung des Sinus sphenoidalis aus einer hinteren Siebbeinzelle konnte in unserer Untersuchung mit dem Ziel der morphologischen Beschreibung des Siebbeinlabyrinthes nicht beantwortet werden. Die deutliche Kommunikation zwischen beiden Systemen bei Kopf Nr. 38, einem juvenilen Tier unbekannten Geschlechts, ist in diesem Zusammenhang dennoch zu beachten. Durch das vollständige Fehlen eines knöchernen Septums zwischen diesen Strukturen findet sich hier eine weite Kommunikation beider auf der linken Seite (Abb. 23 bis 25).

Die Zahl der Siebbeinzellen bei *Pan troglodytes* ist im Vergleich zum Menschen deutlich geringer, was sich mit den Aussagen der Literatur deckt (HOUSE, 1966; KOPPE and OHKAWA, 1999). Die größte Zelle des vorderen Siebbeinzellkomplexes wurde von uns als Bulla ethmoidalis bezeichnet (siehe KOPPE et al. 2009). Ihr Vorkommen als voluminöseste und konstanteste vordere Siebbeinzelle (STAMMBERGER et al., 1997; SOMMER, 2009) deckt sich mit der Literatur zur Bulla ethmoidalis beim Menschen. Sie konnte bei allen 21 Tieren und somit in allen Altersgruppen aufgefunden werden. Dieser Fund bestätigt Angaben der Literatur, welche beim Menschen von einer sehr zeitigen Entwicklung ausgehen (KRMPOTIC-NEMANIC et al., 1997) und eine Resorption beim Schimpansen verneinen (WEGNER, 1936). HOUSE (1966) hingegen spricht beim Schimpansen von einem vollständigen Fehlen der Bulla. Diese Aussage kann nicht bestätigt werden. Auch die von HOUSE (1966) beschriebene Drainage der vorderen und hinteren Siebbeinzellen über den oberen Nasengang konnte so nicht gefunden werden. Die Drainage und Lage der Zellen ist der Situation beim Menschen sehr ähnlich.

Bei dem weiblich juvenilen Tier Nr. 43 stellte sich die linke Bulla ethmoidalis als infraorbitale Zelle, auch Hallerzelle genannt, dar. Dabei handelt es sich um die Extension einer Siebbeinzelle zwischen Orbitaboden und Kieferhöhlendach. Gibt es bereits zahlreiche Literatur zu solchen Hallerzellen des Menschen, so ist diese Struktur beim Schimpansen unseres Wissens nach noch nicht beschrieben worden. 2009 veröffentlichten KOPPE et al. erste Ergebnisse dieses Fundes. Die Angaben zur Häufigkeit einer solchen Hallerzelle beim Menschen schwanken sehr stark. In der Literatur sind Angaben von 4% (WEIGLEIN, 1999) über 5,5% (KAYALIOGLU et al., 2000), 6% (ARSLAN et al., 1999), 21,2% (BAŠIC and BAŠIC, 1998), 24,2% (KÖSLING, 1993) bis 45,1% (BOLGER, 1991) zu finden. Es ist allerdings bei dieser Spanne davon auszugehen, dass die Definition einer Hallerzelle nicht eindeutig genug ist.

Neben der Bulla ethmoidalis konnten bei zehn Tieren zwei weitere Siebbeinzellen pro Seite gefunden werden. Vier Präparate wiesen drei weitere, und fünf eine weitere Siebbeinzelle pro Seite auf. Diese Zahl deckt sich mit den Angaben der Literatur, welche von zwei bis drei Zellen pro Seite ausgehen (HOUSE, 1966; KOPPE and OHKAWA, 1999). Lediglich bei einem weiblichen juvenilen Tier konnte mit der Bulla ethmoidalis nur eine vordere und keine hintere Siebbeinzelle gefunden werden. Bei fünf Tieren unterschied sich die Anzahl der Zellen zwischen rechter und linker Seite, was die bereits in früheren Arbeiten formulierte Aussage bezüglich der großen Variabilität des Siebbeines und hier im Besonderen des Labyrinthes unterstreicht (PETER, 1913; BEHRBOHM et al., 2009).

Die geringe Zahl der Siebbeinzellen lässt eine Unterteilung in hintere und vordere Zellen anhand der Drainage in die Nasenhaupthöhle als ausreichend erscheinen. Die Bulla ethmoidalis kann in diesem Zusammenhang innerhalb der Gruppe der vorderen Zellen in Analogie zur menschlichen Terminologie gesondert bezeichnet werden. Eine weitere Unterteilung, wie z.B. von ALYEA (1939) und MOSS-SALENTIJN (1991) oder von TERRIER et al. (1985) für den Menschen vorgeschlagen (siehe Kap. 2.5), ist nicht zweckmäßig.

Nach TERRIER et al. (1985) und MAFEE (1993) sind Ostien der menschlichen Nasennebenhöhlen in CT-Aufnahmen nicht immer eindeutig darstellbar, was eine Zuordnung

zu bestimmten Nasennebenhöhlenstrukturen erschwert. Aufgrund der meist großlumigen Öffnungen der Nasennebenhöhlen beim Schimpansen kann diese Aussage nicht ohne weiteres auf diese übertragen werden.

Prozentualer Anteil des Siebbeinzellsystems und der Sinus frontales

Anhand der graphischen Analyse des prozentualen Anteils des Siebbeinzellsystems und der Sinus frontales am durch sie gebildeten Gesamtraum zeigte sich mit zunehmendem Alter erwartungsgemäß eine deutliche Verschiebung zugunsten des Sinus frontalis. Obwohl das Volumen der Siebbeinzellen mit dem Schädelwachstum zunimmt, ist diese Volumenzunahme im Bereich des Sinus frontalis durch dessen deutliches Wachstum häufig bis oberhalb des Arcus supraciliaris weitaus größer und schneller. Bulla ethmoidalis und die übrigen Siebbeinzellen nehmen im Vergleich zueinander gleichmäßig an Größe zu.

Asymmetrien der Nasennebenhöhlen

Der Asymmetrieindex dient zur Feststellung von Seitendifferenzen. Von einem einzelnen Tier abgesehen konnten erwartungsgemäß keine statistisch belegbaren Seitenunterschiede festgestellt werden.

Eine Asymmetrie wurde lediglich bei Kopf Nr. 35, einem männlichen infantilen Tier, im Bereich der Siebbeinzellen festgestellt (Abb. 33). Bei diesem Tier war aufgrund des fehlenden Knochenseptums zwischen Sinus frontalis und der hinteren Siebbeinzelle auf der linken Seite eine weite Kommunikation beider Räume entstanden. Eine eindeutige Unterteilung war nicht möglich. Der ganze Raum wurde dem Volumen der Stirnhöhle zugerechnet. Eine statistisch auswertbare Siebbeinzelle auf der linken Seite fehlt diesem Tier somit. Auf der rechten Seite hingegen konnte diese deutlich vom Sinus frontalis abgegrenzt und somit ausgewertet werden (Abb. 26, 27). Diese Verschmelzung einer Siebbeinzelle mit dem Sinus frontalis kann auf eine Reduktion der Siebbeinzellenzahl aufgrund eines starken Stirnhöhlenwachstums hindeuten, wie dies WEGNER (1936) für Gorilla und Orang-Utan beschreibt.

5.3 Schädelmorphologie

In unserem Untersuchungsgut befanden sich keine weiblichen adulten Tiere, so dass eine Betrachtung der Höhen-, Breiten- und Längenmaße für alle drei Altersgruppen lediglich bei

der größten Schädellänge (L1) möglich war, da hier neben den eigenständig ermittelten Werten auch von KOPPE and OHKAWA (1999) veröffentlichte Daten Eingang fanden.

Beim Vergleich der drei Altersklassen zueinander ist generell festzustellen, dass ein stetiges Höhen-, Breiten- und Längenwachstum vorliegt. Der Geschlechtsdimorphismus innerhalb der einzelnen Altersklassen ist uneinheitlich und zufällig, da die statistische Analyse der Mittelwerte anhand des T- und U-Tests die Abweichungen als nicht signifikant ermittelt. Diese Daten decken sich mit den Erkenntnissen früherer Arbeiten bezüglich des Geschlechtsdimorphismus beim Schimpansen (u.a. ANEMONE and SWINDLER, 1999; BERGE and PENIN, 2004). Auch GÖLLRICH (2010) konnte in seiner Untersuchung zu den Nasenhaupthöhlenvolumina beim Schimpansen keine signifikanten Geschlechtsunterschiede feststellen.

Der Schädelbasisknickungswinkel, bei welchem sich ebenfalls ein nicht signifikanter Unterschied beim Vergleich der Geschlechter zeigte, ist bei der infantilen (142,2°[w] beziehungsweise 142,3°[m]) und juvenilen Altersklasse (141,4°[m], 143,2°[w] und 131,1°[o]) nahezu unverändert. Die männlichen adulten Tiere weisen mit 147,8° einen größeren Winkel und somit eine verkleinerte Schädelbasisknickung auf. Diese, allerdings lediglich auf zwei Präparaten basierende, Messung steht im Gegensatz zu der von SERCER and KRMPOTIC (1960) beim Menschen anhand des Sphenoidalwinkels gemessenen Schädelbasisknickung. Der beim neugeborenen Menschen gemessene Winkel von 140° ist unserem in der infantilen und juvenilen Altersgruppe gemessenen ähnlich. Allerdings geht dieser beim Menschen bis zum Erwachsenenalter auf etwa 110° zurück, beim Schimpansen hingegen vergrößert er sich leicht. Dieses Erkenntnis deckt sich mit der Aussage KIPPs (1991), welcher von einer besonders großen Menschenähnlichkeit des frühkindlichen Menschenaffenschädels bezüglich des Verhältnisses Gehirn- zu Gesichtsschädel ausgeht. Diese reduziere sich in der späteren Entwicklung.

Um die einzelnen Nasennebenhöhlenstrukturen ins Verhältnis zur Schädelgröße des Schimpansen setzen zu können, wurde das Gesichtsschädelvolumen (GSV) als rechnerische Größe aus den Längenmaßen L2 und L3, dem Breitenmaß B1 sowie dem Höhenmaß H1 bestimmt. Diese Analysemethode fand bereits in früheren Arbeiten zur Untersuchung von

Nasennebenhöhlenvolumina bei Primaten Anwendung (u.a. MOORMANN, 2004). Auch das Gesichtschädelvolumen nimmt bei nicht signifikantem Geschlechtsunterschied mit dem Alter zu.

Unsere Untersuchungen zum Wachstum des Schimpansenschädels, der Siebbeinzellen und der Stirnhöhle sowie die Entwicklung des Schädelbasisknickungswinkels beim Schimpansen gehen in Übereinstimmung mit anderen Arbeiten über verschiedene Regionen des Schimpansenschädels (u.a. ANEMONE and SWINDLER, 1999; BERGE and PENIN, 2004) von einem sehr geringen Geschlechtsdimorphismus aus.

5.4 Korrelationsanalyse zur Beziehung der Nasennebenhöhlen zur Schädelarchitektur

Bei den Korrelations- und Regressionsanalysen wurde die Unterteilung des Untersuchungsgutes in Altersgruppen und Geschlechter als nicht sinnvoll erachtet. Setzt man mittels der bivariaten Korrelationsanalyse den Sinus frontalis ins Verhältnis zu den Schädelmaßen, so weisen die Höhen- und Längenmaße eine besonders hohe Korrelation auf. Etwas geringer ist sie bei den Breitenmaßen. Je höher und länger der Schimpansenschädel ist, desto größer ist auch der Sinus frontalis. In nicht ganz so eindrucksvoller Form gilt diese Aussage auch für die Breitenmaße. Keine Rückschlüsse lassen sich von der Größe des Schädelbasisknickungswinkels auf das Volumen der Stirnhöhle ziehen, da deren Korrelation nicht signifikant ist.

Die gleichen Ergebnisse zeigt die Korrelation der Schädelmaße zu den Siebbeinzellenvolumina. Eine sehr hohe Korrelation liegt bei den Höhen- beziehungsweise Längenmaßen mit den Siebbeinzellen vor. Etwas geringer, aber noch immer sehr deutlich, ist die Korrelation mit den Breitenmaßen. Auch hier kann von der Größe des Schädelbasisknickungswinkels nicht auf ein mögliches Volumen der Siebbeinzellen geschlossen werden. Es gibt keinen statistisch signifikanten Zusammenhang.

Anhand der partiellen Korrelationsanalyse wurde die Korrelation der einzelnen Nasennebenhöhlenvolumina untersucht, um mögliche Scheinkorrelationen auszuschließen. Betrachtet man die Volumina untereinander, so findet sich überall eine hohe Korrelation. Verfügt ein Tier beispielsweise über eine große Stirnhöhle, so kann erwartet werden, dass auch die Bulla ethmoidalis und die Siebbeinzellen als Gesamtheit große Volumina aufweisen.

Zur Ermittlung von Scheinkorrelationen wurde der Korrelationskoeffizient der bivariaten Korrelationsanalyse dem der partiellen Analyse gegenüber gestellt. Es wurden dabei einzeln die größte Schädellänge (L1), die Mittelgesichtsbreite (B1) und die Obergesichtshöhe (H1) konstant gesetzt. So können sie als möglicher Störfaktor identifiziert werden. Dies war nur bei der Korrelation der Siebbeinzellen (ohne Bulla ethmoidalis) mit der Bulla ethmoidalis für die größte Schädellänge (L1) der Fall. Beide Volumina scheinen sich somit nicht direkt zu beeinflussen, sondern jede für sich weist eine hohe Korrelation zur größten Schädellänge (L1) auf.

5.5 Schlussfolgerungen

Unter Beachtung der in der Einleitung genannten Ziele dieser Arbeit können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Das Siebbeinlabyrinth von *Pan troglodytes*, eine in Form und Volumen sehr variable Struktur, verfügt im Vergleich zum menschlichen Labyrinth über deutlich weniger Zellen. Konnte bei einem Tier nur die Bulla ethmoidalis gefunden werden und bei vier Tieren vier Siebbeinzellen pro Seite, so fanden sich bei 15 Tieren zwei bis drei Siebbeinzellen pro Seite. Bei fünf Köpfen war die Anzahl linker und rechter Siebbeinzellen nicht identisch. Die Größenunterschiede aufgrund des Geschlechts zeigten keine signifikanten Unterschiede. Die Bulla ethmoidalis, deren Existenz beim Schimpansen in der Literatur kontrovers diskutiert wird, konnte bei allen 21 Köpfen als konstanteste Struktur der Siebbeinpneumatisation vermessen werden. Der paarig angelegte, durch ein knöchernes Septum voneinander getrennte sowie in Form und Größe sehr variable Sinus frontalis konnte bei allen Tieren gefunden werden. Der Rauminhalt bei den männlichen Tieren war auf nicht signifikantem Niveau größer.

2. Die Siebbeinzellen und der Sinus frontalis nehmen mit zunehmendem Alter und Schädelwachstum an Volumen zu. Hier ist die Größenzunahme des Sinus frontalis wesentlich schneller und deutlicher. Alle Siebbeinzellen sind bei der Geburt bereits angelegt. Es kommt postnatal nicht zur Bildung neuer Zellen. Es finden sich des Weiteren keine Zeichen der Resorption einzelner Zellen durch den Sinus maxillaris. In einem Fall konnte die Verschmelzung einer Siebbeinzelle mit dem Sinus frontalis gefunden werden.

Dies kann auf eine Reduktion der Siebbeinzellanzahl aufgrund eines starken Stirnhöhlenwachstums hindeuten.

3. Die vorderen und hinteren Siebbeinzellen grenzen an die Fossa cranialis anterior, die Orbita und den Sinus maxillaris. Die vorderen Zellen weisen des Weiteren eine enge Nachbarschaft zum Sinus frontalis, die hinteren zum Sinus sphenoidalis auf. Der Sinus frontalis verfügt über enge Nachbarschaftsbeziehungen zur Fossa cranialis anterior, der Orbita, dem Ductus nasolacrimalis, dem Sinus maxillaris, der Bulla ethmoidalis und weiteren Zellen des vorderen Siebbeinkomplexes. Die Cellulae ethmoidales anteriores, die Sinus frontales und maxillares kommunizieren mit dem mittleren Nasengang über das Infundibulum ethmoidale im Bereich des Hiatus semilunaris. Die hinteren Zellen drainieren kaudal der Grundlamelle direkt in den oberen Nasengang der Nasenhaupthöhle.

4. Bis auf Kopf Nr. 35 konnten für sämtliche Werte keine Seitendifferenzen gefunden werden. Es handelt sich hier durchweg um zufällige Asymmetrien. Die Werte der erhobenen Nasennebenhöhlenvolumina und der morphologischen Schädeluntersuchung ergaben zumeist für die männlichen Tiere größere Werte im nicht signifikanten Bereich.

5. Die Untersuchung der Beziehung zwischen den Schädelmaßen und den Cellulae ethmoidales sowie dem Sinus frontalis weist eine enge Korrelation auf. Innerhalb der Schädelmaße ist die Korrelation der Nasennebenhöhlenvolumina mit den Schädelbreiten am geringsten. Kein deutlicher statistischer Zusammenhang besteht zwischen der Größe des Schädelbasisknickungswinkels und den Nasennebenhöhlenvolumina.

6. *Pan troglodytes* verfügt über einen gut ausgebildeten Siebbeinzellkomplex. Die Anzahl von zwei bis drei Siebbeinzellen pro Seite ist mit dem Gorilla vergleichbar. Im Vergleich zum Menschen allerdings deutlich geringer. Der Rauminhalt des Siebbeinlabyrinthes ist unter Beachtung schädelmorphologischer Parameter deutlich größer als beim Gorilla, aber geringer als beim Menschen. Die These einer fehlenden Bulla ethmoidalis im Bereich des vorderen Siebbeinzellkomplexes bei *Pan troglodytes* konnte widerlegt werden.

6 Zusammenfassung

Zur Vermessung und morphologischen Analyse des Siebbeinlabyrinthes und des Sinus frontalis beim Schimpansen (*Pan troglodytes*) standen Computertomographiedatensätze von 21 Köpfen unterschiedlichen postnatalen Alters und beiderlei Geschlechts zur Verfügung.

Die Datensätze wurden mittels der 3D-Rekonstruktionssoftware WinSurf® 4.1.0 ausgewertet. Um die gewonnenen Volumina in Bezug zu schädelmorphologischen Eigenschaften setzen zu können sind verschiedene Längen-, Breiten-, und Höhenmaße des Schädels ermittelt worden. Des Weiteren wurde der Schädelbasisknickungswinkel bestimmt und das Gesichtsschädelvolumen berechnet.

Die Nasennebenhöhlenverhältnisse bei *Pan troglodytes* sind den menschlichen sehr ähnlich. Alle 21 Tiere verfügten über einen paarig angelegten, durch ein knöchernes Septum getrennten, Sinus frontalis. Der Rauminhalt bei den männlichen Tieren war auf nicht signifikantem Niveau größer.

Das Siebbeinlabyrinth des *Pan troglodytes* verfügt im Vergleich zum Menschen über deutlich weniger Zellen. Die Bulla ethmoidalis, eine zu den vorderen Siebbeinzellen gehörige Struktur, wurde bei allen 21 Köpfen gefunden. Sie stellt die konstanteste Struktur der vorderen Siebbeinpneumatisation dar. Darüber hinaus fanden sich bei 10 Tieren zwei weitere Siebbeinzellen pro Seite. Bei 20 der 21 Tiere konnten hintere Siebbeinzellen gefunden werden. Bei fünf Präparaten unterschied sich die Anzahl der Zellen zwischen rechter und linker Seite.

Die Prüfung auf einen möglichen Geschlechtsdimorphismus erfolgte anhand des T- und des U-Tests. Die zumeist dezent höheren Werte der männlichen Tiere waren dabei nicht signifikant. Die Seitengleichheit wurde mittels eines Asymmetrieindexes analysiert. Es wurden dabei lediglich zufällige Asymmetrien gefunden.

Mit zunehmender postnataler Entwicklung nimmt der Rauminhalt der Siebbeinzellen und des Sinus frontalis an Volumen zu. Hier ist die Größenzunahme des Sinus frontalis wesentlich schneller und deutlicher. Alle Cellulae ethmoidales sind bei der Geburt bereits angelegt. Es

kommt postnatal nicht zur Bildung neuer Zellen. Es konnte keine Resorption einzelner Siebbeinzellen durch den Sinus maxillaris gefunden werden.

Zur Untersuchung eines möglichen Zusammenhangs zwischen den Volumina und den schädelmorphologischen Daten wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Anhand einer einfachen linearen Regressionsanalyse wurden die Zusammenhänge graphisch dargestellt. Es konnte für die Cellulae ethmoidales sowie den Sinus frontalis eine enge Korrelation zu den Schädelmaßen gefunden werden, was die These zur biomechanischen Funktion der Nasennebenhöhlen stützt. Innerhalb der Schädelmaße ist die Korrelation der Nasennebenhöhlenvolumina mit den Schädelbreiten am geringsten. Zwischen der Größe des Schädelbasisknickungswinkels und den Nasennebenhöhlenvolumina findet sich nur eine sehr geringe Korrelation und somit kein statistisch eindeutiger Zusammenhang.

Setzt man die gemessenen Volumina der Stirnhöhle des Schimpansen, Gorilla und Menschen jeweils in Beziehung zur größten Schädellänge zeigt sich eine deutliche Korrelation. Gleiches gilt bei Betrachtung der Siebbeinzellen in Relation zur größten Schädellänge. Bei der Analyse der Siebbeinzellen wurden auch die pneumatischen Strukturen im Siebbein des Orang-Utans berücksichtigt. Der kleinere Rauminhalt beim Schimpansen im Vergleich zu Gorilla und Mensch lässt sich vermutlich auf seinen insgesamt kleineren Schädel zurückführen.

Die Siebbeinzellen werden in der Literatur zur Evolution der Nasennebenhöhlen bei den Hominiden wenig beachtet. Die vorliegende Studie konnte jedoch zeigen, dass die Siebbeinpneumatisation des Schimpansen der des Menschen strukturell sehr ähnelt. Auch beim Schimpansen können vordere und hintere Siebbeinzellen identifiziert werden. Die Anzahl der Zellen ist allerdings deutlich geringer. Innerhalb der vorderen Zellen sind die bereits beim Menschen beschriebene Bulla ethmoidalis sowie eine Hallerzelle anzutreffen. Das Vorliegen solcher Strukturen auch bei nichtmenschlichen Primaten, sollte in weiterführenden Studien zur Analyse der evolutionsbedingten Veränderungen der Pneumatisation des Gesichtsschädels der Hominiden stärker berücksichtigt werden.

7 Literaturverzeichnis

van Alyea, O.E.: Ethmoid labyrinth**.** Arch Otolaryngol; 1939; 29: 881-902.

Andrews, P. & Harrison, T.: The Last Common Ancestor of Apes and Humans. In: Interpreting the past: Essays on human, primate, and mammal evolution in Honor of David Pilbeam et al.; Smith, R. J; Kelley, J. & Lieberman, D. E. (ed.); Brill Academic Publishers, Boston 2005; 103-121.

Andrews, P. & Martin, L.: Cladistic relationships of extant and fossil hominoids. J Hum Evol; 1987; 16: 101-118.

Anemone, R.L. & Swindler, D.R.: Heterochrony and sexual dimorphism in skull of the Liberian chimpanzee (*Pan troglodytes verus*). Int J Anthropol; 1999; 14: 19-30.

Angst, R.: Ursprung des Menschen. Fortschr Kieferorthop; 1988; 49: 2-15.

Ankel, F.: Einführung in die Primatenkunde. Fischer Verlag, Stuttgart 1970.

Arslan, H., Aydinlioğlu, A., Bozkurt, M. & Egeli, E.: Anatomic variations of the paranasal sinuses: CT examination for endoscopic sinus surgery. Auris Nasus Larynx; 1999; 26: 39-48.

Baker, M.A.: A braincooling system in mammals. Sci Am; 1979; 240: 114-122.

Balczun, J.: Computertomographische Untersuchung zum postnatalen Wachstum der Nasenhöhle von Macaca fuscata -eine biometrische Studie-. Inaug. Diss. Greifswald; 2008.

Barrett, L. & Dunbar, R.: Affen, unsere haarigen Vettern. Egmont vgs Verlagsgesellschaft, Köln 2001.

Bartsch, H.J.: Taschenbuch mathematischer Formeln. Carl Hanser Verlag, München 1984.

Basić, N., Basić, V., Jukić, T., Basić, M., Jelić, M. & Hat, J.: Computed tomographic imaging to determine the frequency of anatomical variations in pneumatization of the ethmoid bone. Eur Arch Otorhinolaryngol; 1999; 256: 69-71.

Behrbohm, H., Winter, S., Dalchow, C. & Birke, H.: Biostatische endoskopische Chirurgie des Siebbeins (BES) – von der Architektur des zentralen Gesichtsschädelbeins. Face; 2009; 1: 6-15.

Berge, C. & Penin, X.: Ontogenetic allometry, heterochrony, and interspecific differences in the skull of African apes, using tridimensional Procrustes analysis. Am J Phys Anthropol; 2004; 124: 124-138.

Berger, G. & Tylinek, E.: Das große Affenbuch. Landbuch Verlagsgesellschaft, Hannover 1984.

Bezold, K.: Über den Rauminhalt der Nebenhöhlen der menschlichen Nase unter Berücksichtigung der gegenseitigen volumetrischen Beziehungen. Inaug. Diss. Greifswald; 1945.

Blaney, S.P.: An allometric study of the frontal sinus in Gorilla, Pan and Pongo. Folia Primatol; 1986; 47: 81-96.

Blaney, S.P.: Why paranasal sinuses? J Laryngol Otol; 1990; 104: 690-693.

Blanton, P.L. & Biggs, N.L.: Eighteen hundred years of controversy: the paranasal sinuses. Am J Anat; 1969; 124: 135-147.

Bolger, W.E., Butzin, C.A. & Parsons, D.S.: Paranasal sinus bony anatomic variations and mucosal abnormalities: CT analysis for endoscopic sinus surgery. Laryngoscope; 1991; 101: 56-64.

Braun, H. & Stammberger, H.: Pneumatization of turbinates. Laryngoscope; 2003; 113: 668-672.

Braune, W. & Clasen, F.: Die Nebenhöhlen der menschlichen Nase in ihrer Bedeutung für den Mechanismus des Riechens. Anat Entwicklungsgesch; 1877; 2: 1-28.

Brown, W.A., Molleson, T.I. & Chinn, S.: Enlargement of the frontal sinus. Ann Hum Biol; 1984; 11: 221-226.

Bühl, A. & Zöfel, P.: SPSS Version 10. Addison-Wesley, München 2000.

Cave, A.J. & Haines, R.W.: The paranasal sinuses of the anthropoid apes. J Anat; 1940; 74: 493-523.

Cave, A.J.E.: Notes on the nasal fossa of a young Chimpanzee. Proc Zool Soc; 1949; 119: 61-63.

Cave, A. J. E.: Pneumatic osteolysis in the elephant skull. Proc Zool Soc; 1959; 132: 655-664.

Cave, A.J.E.: The frontal sinus of the gorilla. Proc Zool Soc; 1961; 136: 359-373.

Cave, A.J.E.: Observations on the platyrrhine nasal fossa. Am J Phys Anthropol; 1967; 26: 277-288.

Conlee, K. & Boysen, S.: Chimpanzees in research: past present and future. In: The State of the Animals III; Salem, D.J. & Rowan, A.N. (eds.); Humane Society Press, Washington, D.C. 2005.

Coolidge, H.J.: Pan paniscus, pygmy chimpanzee from the Congo River. Am Phys Anthropol; 1933; 18: 1-59.

Daniels, D.L., Mafee, M.F., Smith, M.M., Smith, T.L., Naidich, T.P., Brown, W.D., Bolger, W.E., Mark, L.P., Ulmer, J.L., Hacein-Bey, L. & Strottmann, J.M.: The frontal sinus drainage pathway and related structures. Am J Neuroradiol; 2003; 24: 1618-1627.

Demuth, J.P., Bie, T.D., Stajich, J.E., Cristianini, N. & Hahn, M.W.: The evolution of mammalian gene families. PLoS One; 2006; 1: e85.

Doll, S. & Lozanoff, S.: 3D - Rekonstruktionen von anatomischen Strukturen. Der Präparator; 2003; 3: 129-136.

Edler, D.: Die Konfiguration des menschlichen Hirnschädels in Relation zur Pneumatisation des Schläfen- und Stirnbeins. Inaug. Diss. Bochum; 2006.

Eller, H.: Der Sinus maxillaris und seine Nachbarorgane bei verschiedenen Affen und beim Hunde. Z Anat Entwicklungsgesch; 1932; 97: 725-756.

Escher, F.: Zur operativen Therapie der Ozaena. Pract oto-rhinolaryng (Basel); 1948; 10: 503.

Fanghänel, J. & Schumacher, G.H.: Schädelwachstum und Statistik. In:Craniogenesis and Craniofacial Growth; Schumacher G.H. (ed.); Nova acta Leopoldina; 1986; 58: 585-595.

Farke, A. A.: Morphology, constraints, and scaling of frontal sinuses in the hartebeest, *Alcelaphus buselaphus* (Mammalia: Artiodactyla, Bovidae). J Morphol; 2007; 268: 243-253.

Fatterpekar, G.M., Delman, B.N. & Som, P.M.: Imaging the paranasal sinuses: where we are and where we are going. Anat Rec; 2008; 291: 1564-1572.

Frenkert, K.: Zur postnatalen Entwicklung des Gaumengewölbes des Schimpansen (*Pan troglodytes*) -eine biometrische Studie-. Inaug. Diss. Greifswald; 2009.

Freyschmidt, J. & Vogl, T.: Handbuch diagnostische Radiologie, 3. Band. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2002.

Geissmann, T.: Vergleichende Primatologie. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2003.

Geißler, F.: Biometrische Untersuchungen zum Wachstum des harten Gaumens von *Macaca fuscata*. Inaug. Diss. Greifswald; 2007.

Geurkink, N.: Nasal anatomy, physiology, and function. J Allergy Clin Immunol; 1983; 72: 123-128.

Gonder, M.K., Oates, J.F., Disotell, T.R., Forstner, M.R., Morales, J.C. & Melnick, D.J.: A new west African chimpanzee subspecies? Nature; 1997; 388: 337.

Gotwald, T.F., Zinreich, S.J., Corl, F. & Fishman, E.K.: Three-dimensional volumetric display of the nasal ostiomeatal channels and paranasal sinuses. Am J Roentgenol; 2001; 176: 241-245.

Grupe, G., Christiansen, K., Schröder, I. & Wittwer-Backofen, U.: Anthropologie: Ein Einführendes Lehrbuch. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2005.

Gustafsson, L.E., Leone, A.M., Persson, M.G., Wiklund, N.P. & Moncada, S.: Endogenous nitric oxide is present in the exhaled air of rabbits, guinea pigs and humans. Biochem Biophys Res Commun; 1991; 181: 852-857.

Göllrich, R.: Zum postnatalen Wachstum der Nasenhöhle des Schimpansen (*Pan troglodytes*) - eine biometrische Studie -. Inaug. Diss. Greifswald; 2010.

Götte, K. & Nicolai, T.: Pädiatrische HNO-Heilkunde. Elsevier, München 2009.

Haike, H.: Röntgenuntersuchungen der Nasennebenhöhlen der Kinder und ihrer Ergebnisse für die Entwicklung, Diagnostik und Pathologie. Arch Laryng Rhinol; 1910; 23: 206.

Henke, W. & Rothe, H.: Stammesgeschichte des Menschen - Eine Einführung. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1998.

Hosemann, W. & Kühnel, T.: Nase und Nasennebenhöhlen. In: Praxis der HNO-Heilkunde, Kopf- und Halschirurgie; Strutz, J. & Mann, W. (eds.); Thieme Verlag, Stuttgart 2001; 76-86.

Hosemann, W. & Fanghänel, J.: Präparierkurs zur endoskopischen endonasalen Nasennebenhöhlenchirurgie; Verlag Endo-Press; Tuttlingen; 2004.

House, E.L., Pansky, B., Jacobs, M.S. & Wagner, B.M.: Gross structure of the ear, nasal cavity and paranasal sinuses of the chimpanzee. Anat Rec; 1966; 155: 77-88.

Hönig, J.F., Schütt, R. & Merten, H.A.: Tierexperimentelle Untersuchungen zur Stirnhöhlenentwicklung nach kraniofazialer Austauschplastik des Os frontale beim Göttinger Miniaturschwein. Mund Kiefer GesichtsChir; 1999; 3: 325-330.

Ihle, J.E.W., Nierstrasz, H.F., van Kampen, P.N. & Versluys, J.: Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere. Aus dem holländischen von Gottwald Christian Hirsch. Springer Verlag, Berlin 1927.

Jiang, R.S., Hsu, C.Y. & Leu, J.F.: Bacteriology of ethmoid sinus in chronic sinusitis. Am J Rhinol; 1997; 11: 133-137.

Johnson, S.C.: Bonobos: Generalized hominoid proto-types or specialized insular dwarfs? Current Anthropology; 1981; 22: 363-375.

Kayalioglu, G., Oyar, O. & Govsa, F.: Nasal cavity and paranasal sinus bony variations: a computed tomographic study. Rhinology; 2000; 38: 108-113.

Keir, J.: Why do we have paranasal sinuses? J Laryngol Otol; 2009; 123: 4-8.

Killian, G.: Zur Anatomie der Nase menschlicher Embryonen. Arch Laryng u Rhinol; 1895-96.

Kipp, F.A.: Die Evolution des Menschen im Hinblick auf seine lange Jugendzeit. Verlag Freies Geistesleben, Stuttgart 1991.

Kleinschmidt, O.: Stirnbeinhöhlen und Siebbeinzellen beim Orang. Z Säugetierkd; 1933; 8: 70-79.

Knauer, F.I.: Menschenaffen: ihr Frei- und Gefangenleben. Theod. Thomas Verlag, Leipzig ca. 1915.

Knußmann, R.: Anthropologie. Handbuch der vergleichenden Biologie des Menschen. Fischer Verlag, Stuttgart, New York 1988.

Kocher, T. D. & Wilson, A. C.: Sequence evolution of mitochondrial DNA in humans and chimpanzees: control region and protein coding region. In: Evolution of life: Fossils Molecules and Culture; Osawa, S. & Honjo, T. (eds.); Springer Verlag, Tokio 1991; 391–413.

Koertvelyessy, T.: Relationships between the frontal sinus and climatic conditions: a skeletal approach to cold adaptation. Am J Phys Anthropol; 1972; 37: 161-172.

Koppe, T. & Schumacher, K.-U.: Untersuchungen zum Pneumatisationsgrad des Viscerocraniums beim Menschen und bei den Pongiden. Acta Anat Nippon; 1992; 67: 725-734.

Koppe, T. & Nagai, H.: Growth pattern of the maxillary sinus in the Japanese macaque (*Macaca fuscata*): reflections on the structural role of the paranasal sinuses. J Anat; 1997; 190: 533-544.

Koppe, T., Nagai, H. & Rae, T.C.: Factors in the Evolution of the Primate Pneumatic Cavities: Possible Roles of the Paranasal Sinuses. In: The Paranasal Sinuses of Higher Primates; Koppe, T., Nagai, H. & Alt, K.W. (eds.); Quintessence, Chicago 1999; 151-175.

Koppe, T. & Ohkawa, Y.: Pneumatization of the facial skeleton in catarrhine primates. In: The Paranasal Sinuses of Higher Primates; Koppe, T., Nagai, H. & Alt, K.W. (eds.); Quintessence, Chicago 1999; 7-119.

Koppe, T., Rae, T.C. & Swindler, D.R.: Influence of craniofacial morphology on primate paranasal pneumatization. Ann Anat; 1999; 181: 77-80.

Koppe, T., Röhrer-Ertl, O., Breier, S. & Wallner, C.-P.: Maxillary sinus atelectasis in a wild born gibbon (*Hylobates moloch*). Primates; 2006; 47: 140-144.

Koppe, T., Nishimura, T., Töppke, M. & Arndt, M.: New anatomical variants of the ethmoid complex in Pan troglodytes. Am J Phys Anthropol; 2009; Suppl 48: 168-169.

Kortlandt, A.: New perspectives on ape and human evolution. Stichting voor Psychobiologie; Amsterdam 1972.

Kösling, S., Wagner, F., Schulz, H.-G. & Heywang-Köbrunner, S.: Knöcherne Variationen im koronaren Nasennebenhöhlen-CT. RöFo; 1993; 159: 506-510.

Krmpotic-Nemanic, J., Vinter, I. & Judas, M.: Transformation of the shape of the ethmoid bone during the course of life. Eur Arch Otorhinolaryngol; 1997; 254: 347-349.

Laitman, J.T., Reidenberg, J.S., Marquez, S. & Gannon, P.J.: What the nose knows: new understandings of Neanderthal upper respiratory tract specializations. Proc Natl Acad Sci USA; 1996; 93: 10543-10545.

Lang, J.: Clinical Anatomy of the Nose, Nasal Cavity and Paranasal Sinuses. Thieme Verlag, Stuttgart 1989.

Lecointre, G. & Le Guyader, H.: Biosystematik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2006.

Levine, H.L., May, M., Rontal, M. & Rontal, E.: Complex Anatomy of the Lateral Nasal Wall: Simplified for the Endoscopic Sinus Surgeon. In: Endoscopic Sinus Surgery; Levine, H.L. & May, M. (eds.); Thieme Verlag, New York 1993; 1- 28.

Lovich, J.E. & Gibbons, J.W.: A review of techniques for quantifying sexual size dimorphism. Growth Dev Aging; 1992; 56: 269-281.

Lund, V.J.: The maxillary sinus in the higher primates. Acta Otolaryngol; 1988; 105: 163-171.

Lundberg, J.O., Farkas-Szallasi, T., Weitzberg, E., Rinder, J., Lidholm, J., Anggård, A., Hökfelt, T., Lundberg, J.M. & Alving, K.: High nitric oxide production in human paranasal sinuses. Nat Med; 1995; 1: 370-373.

Mafee, M.F.: Preoperative imaging anatomy of nasal-ethmoid complex for functional endoscopic sinus surgery. Radiol Clin North Am; 1993; 31: 1-20.

Mafee, M.F.: Imaging of the Nasal Cavity and Paranasal Sinuses. In: Imaging of head and neck; Mafee, M.F., Valvassori, G.E. & Becker, M. (eds.); Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1995; 353-476.

Maniscalco, M., Sofia, M. & Pelaia, G.: Nitric oxide in upper airways inflammatory diseases. Inflamm Res; 2007; 56: 58-69.

Markefsky, U. & Markefsky, D.: Beitrag zum Wachstum des Schädels- eine quantitative Studie zur Erfassung des Wachstums und von Korrelationsbeziehungen. Inaug. Diss. Greifswald; 1989.

Martin, R.: Lehrbuch der Anthropologie. Fischer Verlag, Stuttgart 1928.

Martin, R.: Primate origins and evolutions. A phylogenetic reconstruction. Chapman and Hall, London 1990.

May, M.: Frontal sinus surgery: Endonasal endosopic ostioplasty rather than external osteoplasty. Op Tech Otolaryngol Head Neck Surg; 1991; 2: 247-256.

Mayr, E.: Principles of Systematic Zoology. McGraw-Hill, New York 1969.

Miethke, R.R.: Schädelentwicklung. In: Kieferorthopädie I, Praxis der Zahnheilkunde 11; Schmuth G. (ed.); Urban & Schwarzenberg, München 1990; 95-127.

Miyamoto, M.M., Slightom, J.L. & Goodman, M.: Phylogenetic relations of humans and African apes from DNA sequences in the psi eta-globin region. Science; 1987; 238: 369-373.

Moore, W.J.: The Mammalian Skull. Cambridge University Press, Cambridge, London, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney 1981.

Moormann, T.: Funktionelle Morphologie der Nasennebenhöhlen des Brüllaffen *Alouatta caraya* (Primates, Platyrrhini). Inaug. Diss. Greifswald; 2004.

Morin, P. A.; Moore, J. J. & Woodruff, D. S.: Identification of chimpanzee subspecies with DNA from hair and allele-specific probes. Proc Biol Sci; 1992; 249: 293-297.

Moss, M.L.: A theoretical analysis of the functional matrix. Acta Biotheor; 1968; 18: 195-202.

Moss, M.L.: Funktionelle Schädelanalyse und die funktionelle Matrix. Fortschr Kieferorthop; 1973; 34: 48-63.

Moss-Salentijn: Anatomy and embryology. In: Surgery of the Paranasal Sinuses; Blitzer, A., Lawson, W. & Friedman, W. (eds.); Saunders, Philadelphia 1991; 1-24.

Mündnich, K.: Zum Pneumatisationsproblem der Nasennebenhöhlen. Zeitschrift für Hals-Nasen- und Ohrenheilkunde; 1938; 43.

Muntz, H.R. & Lusk, R.P.: Bacteriology of the ethmoid bullae in children with chronic sinusitis. Arch Otolaryngol Head Neck Surg; 1991; 117: 179-181.

Negus, V.: The function of the paranasal sinuses**.** Am Arch Otolaryngol; 1957; 66: 430-442.

Negus, V.: The comparative anatomy and physiology of the nose and the paranasal sinuses. E. & S. Livingstone, Edinburgh 1958.

Niederer-Loher, A.: Rezidivierende Infektionen der oberen Atemwege-Immundefekt. Pädiatrie; 2010; 1: 4-7.

Nowak, R. & Mehlis, G.: Untersuchungen zum Verhalten der Pneumatisation des Sinus maxillaris. Anat Anz; 1975; 138: 143-151.

O'Malley, C.D. & Saunders, J.B.C.M.: Leonardo da Vinci on the human body: The anatomical, physiological, and embryological drawings of Leonardo da Vinci: with translations, emendations and a biographical introduction. Greenwich House, New York 1982.

Paulli, S.: Über die Pneumaticität des Schädels bei den Säugethieren - Eine morphologische Studie. Gegenbaurs Morphol Jahrb, Leipzig 1900 (a, b, c).

Peter, K.: Atlas der Entwicklung der Nase und des Gaumens beim Menschen; Fischer Verlag, Jena 1913.

Peter, K.: Vergleichende Anatomie und Entwicklung der Nebenhöhlen; In: Handbuch der HNO-Heilkunde, 1. Band; Denker, A. & Kahler, O. (eds.); Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1925.

Pforr, M.: Lokomotorisches und Positionsverhalten bei Schimpansen im Zoologischen Garten Berlin. Grin Verlag für akademische Texte, München 2005.

Pilbeam, D.: Hominoid systematics: the soft evidence. Proc Natl Acad Sci USA; 2000; 97: 10684-10686.

Pilbeam, D.R.: Perspectives on the Miocene Hominoidea. In: The Primate Fossil Record; Hartwig, W.C. (ed.); Cambridge University Press, Cambridge, London, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney 2002; 303-310.

Preuschoft, H. & Witzel, U.: Functional shape of the skull in vertebrates: which forces determine skull morphology in lower primates and ancestral synapsids? Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol; 2005; 283: 402-413.

Proetz, A.W.: Applied physiology of the nose. Annals Publishing Co., St. Louis 1953.

Prossinger, H. & Bookstein, F.L.: Statistical estimators of frontal sinus cross section ontogeny from very noisy data. J Morphol; 2003; 257: 1-8.

Radoievitch, S., Jovanovic, S. & Lotric, N.: Variations in the sella turcica, the body of the sphenoid and the sphenoid sinus as a function of variations in the sphenoid angle. Acta Anat; 1961; 44: 354-362.

Reike, R.: Osteometrische Untersuchung zur postnatalen Entwicklung des Sinus maxillaris von *Pongo satyrus borneensis* von Wurmb, 1784 unter Berücksichtigung des Geschlechtsdimorphismus. Inaug. Diss. Rostock; 1991.

Rettinger, G.: Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde. Berghaus, A., Rettinger, G. & Böhme, G. (eds.); Thieme Verlag, Stuttgart 1996.

Rombaux, P., Collet, S., Hamoir, M., Eloy, P., Bertrand, B., Jamart, F. & Gigi, J.: The role of nasal cavity disinfection in the bacteriology of chronic sinusitis. Rhinology; 2005; 43: 125-129.

Ross, C. & Henneberg, M.: Basicranial flexion, relative brain size, and facial kyphosis in Homo sapiens and some fossil hominids. Am J Phys Anthropol; 1995; 98: 575-593.

Rossie, J.B.: Anatomy of the nasal cavity and paranasal sinuses in Aegyptopithecus and early Miocene African catarrhines. Am J Phys Anthropol; 2005; 126: 250-267.

Salinger, S.: The paranasal sinuses. Arch Otolaryngol; 1939; 30: 442-479.

Schaffer, W. M. & Reed, C. A.: The co-evolution of social behavior and cranial morphology in sheep and goats (Bovidae, Caprini). Fieldiana; 1972; 61: 1-88.

Scheaffer, J.P.: The Nose, Paranasal Sinuses, Nasolacrimal Passageways, and Olfactory Organ in Man. Kessinger Pub Co (Nachdruck; Whitefish 2007); 1920.

Schiwall, O.: Zur funktionelle Morphologie der Sinus paranasales von *Callithrix jacchus* (Primates, Platyrrhini). Inaug. Diss. Greifswald; 2005.

Schumacher, G.H.: Der maxillo-mandibuläre Apparat unter dem Einfluss formgestaltender Faktoren. Nova Acta Leopoldina; 1973; 33: 1-175.

Schumacher, G.H.: Factors influencing craniofacial growth. Prog Clin Biol Res; 1985; 187: 3-22.

Schumacher, G.H.: Anatomie für Zahnmediziner. Hüthig Verlag, Heidelberg 1997.

Schwarz, E.: On the local races of chimpanzee. Ann Mag Nat Hist; 1934; 1: 576-583.

Schürch, O.: Grössenvariationen der Highmorshöhlen. Arch f Laryng; 18, 1906.

Sercer, A. & Krmpotic, J.: The transformation of the cranial base during life. Contribution to the study of otospongiosis. Rev Laryngol Otol Rhinol (Bord); 1960; 81: 323-381.

Seydel, O.: Über die Nasenhöhle der höheren Säugetiere und des Menschen. Gegenbaurs Morphol Jahrb, Leipzig 1891.

Shankar, L., Evans, K., Hawke, M. & Stammberger, H.: An atlas of imaging of the paranasal sinuses. Martin Dunitz, London 1994.

Simoens, P., Lauwers, H., De Geest, J. & De Schaepdrijver, L.: Funktional morphology of the cranial retia mirabilia in the domestic mammals. Schweiz Arch Tierheilkd; 1987; 129: 295-307.

Simpson, G.: Principles of Animal Taxonomy. Columbia University Press; New York; 1961.

Sokal, R.R. & Rohlfs, F.J.: Biometry: the principles and practice of statistics in biological research. W. H. Freeman and Co., New York 1995.

Sommer, F.: Anatomische Varianten der Nasennebenhöhlen - Bedeutung und Vorteile multiplanarer CT-Rekonstruktionen. Inaug. Diss. München; 2009.

Sommer, V. & Ammann, K.: Die großen Menschenaffen - Orang-Utan, Gorilla, Schimpanse, Bonobo - die neue Sicht der Verhaltensforschung. BLV Verlagsgesellschaft, München 1998.

Sommer, V.: Bruder Affe - Affen gehören in die Familie der Menschen oder Menschen in die Familie der Affen. Was bedeutet das für uns - und was für sie? Textarchiv der Forschungsgruppe Weltanschauungen in Deutschland; 2003; 7: 1-5.

Spaeth, J.; Krügelstein, U. & Schlöndorff, G.: The paranasal sinuses in CT-imaging: development from birth to age 25. Int J Pediatr Otorhinolaryngol; 1997; 39: 25-40.

Stammberger, H., Hosemann, W. & Draf, W.: Anatomische Terminologie und Nomenklatur für die Nasenchirurgie. Laryngo Rhino Otol; 1997; 76: 435-449.

Starck, D.: Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere auf evolutionsbiologischer Grundlage. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1978/1979.

Storch, V.; Welsch, U. & Wink, M.: Evolutionsbiologie. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York 2001.

Strutz, J. & Mann, W.: Praxis der HNO-Heilkunde, Kopf- und Halschirurgie. Thieme Verlag, Stuttgart 2001.

Szilvássy, J.: Zur Variation, Entwicklung und Vererbung der Stirnhöhlen. Ann Naturhist Mus Wien; 1982; 84: 97-125.

Takahashi, R.: The formation of the human paranasal sinuses. Acta Otolaryngol Suppl; 1984; 408: 1-28.

Terrier, F., Weber, W., Ruefenacht, D. & Porcellini, B.: Anatomy of the ethmoid: CT, endoscopic, and macroscopic. Am J Roentgenol; 1985; 144: 493-500.

Thenius, E.: Die Evolution der Säugetiere. Fischer Verlag, Stuttgart 1979.

Titz, M. & Röhl, B.: Beitrag zum Wachstum des menschlichen Schädels- eine biomathematische Studie an Fernröntgenseitaufnahmen. Inaug. Diss. Greifswald; 1996.

Töpke, M.: Quantitative Untersuchungen zum postnatalen Wachstum der Nasennebenhöhlen von Pan troglodytes unter Berücksichtigung des Geschlechtsdimorphismus. Inaug. Diss.; Greifswald; 2010.

Valvassori, G.E., Mafee, M.F. & Carter, B.L.: Imaging of the head and neck. Thieme Verlag; Stuttgart, New York 2004.

Virchow, R.: Gesammelte Abhandlung zur wissenschaftlichen Medicin. Meidinger, Frankfurt/Main 1856.

Voß, W.: Praktische Statistik mit SPSS. Carl Hanser Verlag, München/Wien 1997.

Wang, T., Kebir, D.E. & Blaise, G.: Inhaled nitric oxide in 2003: a review of its mechanisms of action. Can J Anaesth; 2003; 50: 839-846.

Wegner, R.N.: Sonderbildungen der Kieferhöhle bei Anthropoiden. Anatomischer Anzeiger; 1936; 83: 161-240.

Wegner, R.N.: Studien über Nebenhöhlen des Schädels. Verschmelzungen der Nebenhöhlen der Nase und Abänderungen ihrer Öffnungen beim Primaten. Wiss Z Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald; Math.-Naturwiss R Greifswald; 1955/1956; 5: 53-127.

Weidenreich, F.: Die Sonderformen des Menschenschädels als Anpassung an den aufrechten Gang. Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie; 1924; 24: 157-190.

Weidenreich, F.: The brachycephalization of recent mankind. Southwestern Journal of anthropology; 1945; 1: 1-54.

Weidenreich, F.: Significant factors affecting the growth and development of the face. J Am Dent Assoc; 1950; 40: 193-196.

Weiglein, A. H.: Development of the Paranasal Sinuses in Humans. In: The Paranasal Sinuses of Higher Primates; Koppe, T., Nagai, H. & Alt, K.W. (eds.); Quintessence, Chicago 1999; 151-175.

Weinert, H.: Die Ausbildung der Stirnhöhlen als stammesgeschichtliches Merkmal. Z Morphol Anthropol; 1927; 25, 243-357.

Wildman, D.E., Uddin, M., Liu, G., Grossman, L.I. & Goodman, M.: Implications of natural selection in shaping 99.4% nonsynonymous DNA identity between humans and chimpanzees: enlarging genus Homo. Proc Natl Acad Sci USA; 2003; 100: 7181-7188.

Will, B.: Beitrag zu Wachstumsverhältnissen am Hydrocephalus - eine quantitative Studie -. Inaug. Diss. Greifswald; 2001.

Witmer, L.M.: Homology of facial structures in extant archosaurs (birds and crocodilians), with special reference to paranasal pneumaticity and nasal conchae. J Morphol; 1995; 225: 269-327.

Witmer, L.M.: The evolution of the antorbital cavity of Arachnosaurs: A study in soft-tissue reconstruction in the fossil record with an analysis of the function of pneumaticity. J Verteb Paleont; 1997; 17; Suppl. 1.

Witmer, L.M.: The phylogenetic history of paranasal air sinuses. In: The paranasal sinuses of higher primates; Koppe, T., Nagai, H. & Alt, K.W. (eds.); Quintessence, Chicago 1999; 21-34.

Won, Y.-J. & Hey, J.: Divergence population genetics of chimpanzees. Mol Biol Evol; 2005; 22: 297-307.

Zenker, W. & Kubik, S.: Brain cooling in humans--anatomical considerations. Anat Embryol (Berl); 1996; 193: 1-13.

Zihlman, A.L.: Body build and tissue composition in *Pan paniscus* and *Pan troglodytes*, with comparisons to other hominoids. In: The pygmy chimpanzee: Evolutionary Biology and Behavior; Susman, R. (ed.); Plenum Press, New York 1984; 179-200.

Zuckerkandl, E.: Normale und pathologische Anatomie der Nase und ihrer pneumatischen Anhänge. Braumüller, Wien 1882–92.

Tab. 19: Anzahl der Siebbeinzellen und Stirnhöhlen

Pan	Sinus frontalis		Bulla ethmoidalis		Cc. ethmoidales ant.		Cc. ethmoidales post.		Cc. ethmoidales gesamt	
	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links
31	1	1	1	1	2	2	1	1	4	4
32	1	1	1	1	2	1	1	1	4	3
33	1	1	1	1	1*	1*	1*	1*	3	3
34	1	1	1	1	1	1	1**	1**	3	3
35	1	1	1	1	0	0	1***	0	2	1
36	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1
37	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
38	1	1	1	1	1*	1*	1*	1**	3	3
39	1	1	1	1	2	1	1	1	4	3
40	1	1	1	1	0	0	1	1	2	2
41	1	1	1	1	1	1	1**	1	3	3
42	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
43	1	1	1	1****	1	1	1	1	3	3
44	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
45	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3
46	1	1	1	1	1	1	2	1	4	3
47	1	1	1	1	0	0	1	1	2	2
48	1	1	1	1	0	0	1	1	2	2
49	1	1	1	1	1	1	2	2	4	4
50	1	1	1	1	0	0	1	1	2	0
51	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3

*: nicht separat vermessen; **: mit Sinus sphenoidalis verbunden; ***: mit Sinus frontalis verbunden;
****: Hallerzelle

Tab. 20: Geschlecht, Altersgruppe, Katalognummer und Aufnahmeparameter der CT-Datensätze

Pan	Patient ID/Katalog-Nr.	Sex	sd	mA	kV	Altersgruppe
31	10426-01	m		150		infantil
32	020430-01	w		100		juvenil
33	020523-01	m		100		juvenil
34	020524-01	m		100		juvenil
35	020527-01	m		150		infantil
36	020530-01	w		100		juvenil
37	020531-01	w		150		infantil
38	050113-01	o		100		juvenil
39	50324	m	0,2	100		adult
40	100014	w		150	120	infantil
41	100015	m		150		infantil
42	970904-3	m		150		juvenil
43	970904-5	w		100		juvenil
44	970911-10-01	w		150		infantil
45	970911-10-02	w		150		juvenil
46	970911-10-03	w		150		juvenil
47	970911-10-04	o		150		juvenil
48	970919-03	w		150		juvenil
49	990913	m	0,4	80		adult
50	995281	m		100		juvenil
51	995282	w	0,2	100		juvenil

Pan: in Arbeit verwendete Nummern der Köpfe; Patient ID/Katalog-Nummer: Nummern der CT- Rohdatensätze; m: männlich; w: weiblich; o: ohne Geschlechtsangabe; sd: Schichtdicke in mm; mA: Röntgenröhrenstrom; kV: Röntgenröhrenspannung

Tab. 21: Ergebnisse der Vermessung der Nasennebenhöhlen in cm^3 von *Pan troglodytes*

Pan	S.fr.re.	S.fr.li.	S.fr.ges.	B.e.re.	B.e.li.	B.e.ges.	C.e.re.	C.e.li.	C.e.ges.
31	0,097	0,05	0,146	0,095	0,101	0,195	0,332	0,397	0,729
32	0,413	1,052	1,466	0,415	0,556	0,971	1,556	1,687	3,243
33	0,119	0,141	0,26	0,336	0,252	0,589	0,926	0,961	1,887
34	1,249	1,044	2,293	0,337	0,287	0,624	–	–	–
35	0,247	0,447	0,694	0,085	0,088	0,173	0,333	0,088	0,421
36	0,359	0,278	0,637	0,313	0,203	0,516	0,313	0,203	0,516
37	0,085	0,063	0,148	0,126	0,093	0,219	0,422	0,253	0,675
38	0,584	0,399	0,982	0,423	0,449	0,872	–	–	–
39	4,463	2,984	7,446	1,347	0,956	2,303	3,538	2,608	6,146
40	0,087	0,075	0,162	0,052	0,032	0,084	0,181	0,16	0,341
41	0,068	0,037	0,104	0,058	0,036	0,094	0,135	0,154	0,289
42	0,37	0,232	0,602	0,124	0,17	0,295	0,533	0,68	1,213
43	1,341	1,184	2,525	0,735	0,379	1,114	0,989	0,721	1,71
44	0,098	0,186	0,285	0,09	0,072	0,162	0,271	0,206	0,477
45	0,097	0,136	0,234	0,18	0,144	0,323	0,641	0,531	1,172
46	0,016	0,027	0,042	0,209	0,149	0,358	0,592	0,625	1,217
47	0,38	0,274	0,574	0,144	0,072	0,216	0,584	0,578	1,162
48	0,091	0,101	0,192	0,021	0,027	0,048	0,021	0,027	0,048
49	7,633	4,69	12,324	1,478	1,414	2,892	3,519	3,833	7,352
50	0,826	0,543	1,369	0,351	0,433	0,784	0,744	0,894	1,638
51	0,398	0,609	1,007	0,417	0,323	0,74	0,686	0,411	1,097
52	2,18	2,97	5,15	–	–	–	3,76	3,66	7,42
53	1,98	2,21	4,19	–	–	–	2,11	2,43	4,54
54	3,17	2,22	5,39	–	–	–	3,3	3,24	6,54
55	2,07	5,02	7,09	–	–	–	4,61	4,88	9,49
56	1,43	3,51	4,94	–	–	–	2,15	2,69	4,84
57	5,82	6,39	12,21	–	–	–	4,42	4,08	8,5
58	4,98	4,67	9,65	–	–	–	3,8	2,92	6,72
59	2,83	2,5	5,31	–	–	–	3,05	3,84	6,89
60	3,05	2,71	5,76	–	–	–	3,01	3,54	6,55
61	1,82	2,07	3,89	–	–	–	3,5	3,27	6,77
62	3,56	3,72	7,28	–	–	–	1,49	1,35	2,84
63	5,96	8,21	14,17	–	–	–	4,51	4,08	8,59

Pan: Studiennummer; S.fr.re./li./ges.: Sinus frontalis rechts/links/gesamt; B.e.re./li./ges.: Bulla ethmoidalis rechts/links/gesamt; C.e.re./li./ges.: Cellulae ethmoidales rechts/links/gesamt (incl. Bulla ethmoidalis)

Tab. 22: Schädellängen, -breiten und –höhen in cm, Schädelbasisknickungswinkel in Grad und Gesichtsschädelvolumen von *Pan troglodytes*

Pan	L1	L2	L3	L4	B1	B2	B3	B4	H1	H2	H3	W1	GSV
31	13,7	7,1	7,7	3,3	6,7	4,9	2,8	1,4	5	3,1	3,2	141,6	115,8
32	18,7	10	12,5	5,6	7,4	6,1	3,8	2,2	7,3	4,3	4,9	148,9	270
33	16,5	8,2	10,6	4,3	6,6	4,8	2,7	1,9	6,5	3,8	4,7	138,2	175,8
34	15,1	8,1	9,7	4,2	7,3	4,8	2,8	1,5	5,9	3,6	4,1	147,8	174,1
35	13,6	6,7	7,7	3,2	5,2	4,3	2,4	1,2	5,2	2,9	3,4	144,3	89,1
36	15,6	8,2	9,7	4,1	7	4,8	2,9	1,7	6,5	3,8	4,2	143,8	184,6
37	13,9	6,8	7,9	3,2	5,5	4,5	2,7	1,1	5,5	3,3	3,5	144,4	101
38	16,2	7,7	9,4	4,2	7,1	5,4	3,1	1,7	6,8	3,8	4,6	126,1	183,4
39	19,3	10,2	14,8	6,1	7,9	5,8	3,8	2,5	7,2	4,2	5,9	151,4	261,9
40	12,2	6,3	7,7	3,3	5,5	3,9	2	1,3	4	2,6	2,9	143,1	66,6
41	13,7	6,8	7,5	3,8	5,2	4,3	2,5	1,3	4,8	2,5	3,1	141	83,2
42	13,7	6,9	7,9	4,2	6	4,5	2,3	1,4	5,9	3,1	3,6	142,4	118,4
43	16,6	9,3	11	4,5	7,3	5,5	3,3	3,1	7,3	3,9	4,9	139,5	245,4
44	13	6,7	7,2	3,2	5,2	3,9	2,6	1,2	5	2,8	3,2	139	83,9
45	14,3	7,6	8,9	3,7	5,8	4,3	2,5	1,7	5,8	3,1	3,8	134	126,6
46	14,4	7,5	8,6	3,6	5,9	5,1	3	1,5	6,5	3,3	4	137,6	139,2
47	14,4	7,2	8,2	3,7	6,4	4,8	2,6	1,5	5,9	3,3	3,5	136,1	132,3
48	14,2	6,9	8,3	3,6	5,5	4,2	2,5	1,3	5,2	2,8	3,4	145,7	98,4
49	21,7	11,3	16,4	6,8	7,8	6,6	4,1	3,7	9,7	5,6	6,9	144,1	417,5
50	15,9	8,6	10,5	4,3	6,6	5,6	3,4	1,6	6,3	3,8	4,4	137,3	178,7
51	16,3	8,7	11	4,7	7,8	5,6	3,4	1,8	6,7	4,2	4,9	152,8	227,3

Pan: Studiennummer; L1-4: Längenmaße; B1-4: Breitenmaße; H1-3 Höhenmaße, W1: Schädelbasisknickungswinkel; GSV: Gesamtschädelvolumen

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Die Dissertation ist bisher keiner anderen Fakultät, keiner anderen wissenschaftlichen Einrichtung vorgelegt worden.

Ich erkläre, dass ich bisher kein Promotionsverfahren erfolglos beendet habe und eine Aberkennung eines bereits erworbenen Doktorgrades nicht vorliegt.

Matthias Arndt

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in Zusammenarbeit des Institutes für Anatomie und Zellbiologie der Ernst Moritz Arndt Universität in Greifswald und dem Primate Research Institute der Kyoto University in Japan.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. med. Thomas Koppe für die Überlassung des Dissertationsthemas sowie seine Unterstützung und gute Betreuung der Arbeit.

Beim Primate Research Institute, und hier besonders bei Dr. T. Nishimura, möchte ich mich für die Erstellung und Möglichkeit zur Auswertung der CT-Datensätze bedanken.

Ich bin Herrn Prof. Dr. Karlhans Endlich, Direktor des Institutes für Anatomie und Zellbiologie, für die Möglichkeit zur Arbeit an diesem Institut zu großem Dank verpflichtet.

Nicht zu vergessen der Dank an meine wunderbare Familie, deren Rückhalt und Liebe all meinem Streben erst Sinn verleiht. Hier möchte ich im Besonderen meine Ehefrau Maria hervorheben, deren tatkräftige Unterstützung durch Gespräche, Anregungen und Durchsichten zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.