

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

Zur Topografie des Foramen rotundum des Menschen (*Homo sapiens*) im  
Vergleich zu nicht-menschlichen Primaten:  
eine biometrische Studie basierend auf der Computertomographie

Inaugural – Dissertation  
zur

Erlangung des akademischen  
Grades  
Doktor der Medizin  
(Dr. med.)  
der  
Universitätsmedizin  
der  
Universität Greifswald

2022

vorgelegt von  
Thomas Kliewe  
geboren am 03.08.1989  
in Ueckermünde

Dekan:	Prof. Dr. Karlhans Endlich
1. Gutachter:	Prof. Dr. Norbert Hosten
2. Gutachter:	Prof. Dr. Thomas Koppe
3. Gutachter:	PD Dr. Amro Daboul
Ort, Raum:	Institut für diagnostische Radiologie und Neuroradiologie; Ferdinand-Sauerbruch-Straße, Greifswald, Demonstrationsraum F0.23.1
Tag der Disputation:	18.09.2023

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung und Fragestellung</b> .....	1
<b>2. Literaturübersicht</b> .....	3
2.1. Systematik der Primaten .....	3
2.2. Morphologie des Primatenschädels.....	7
2.3. Morphologie des Foramen rotundum.....	11
<b>3. Material und Methoden</b> .....	15
3.1. Material.....	15
3.2. Methoden.....	18
3.2.1. Computertomographische Untersuchung.....	18
3.2.2. Definition der Grundebenen.....	19
3.2.3. Metrische Untersuchung am Foramen rotundum.....	21
3.2.3.1. Messung in der Koronarebene .....	22
3.2.3.2. Messung in der Transversalebene .....	23
3.2.3.3. Messung in der Sagittalebene .....	26
3.2.3.4. Gesichtsschädelmaße .....	28
3.2.4. Biostatistische Auswertung .....	29
<b>4. Ergebnisse</b> .....	32
4.1. Reproduzierbarkeit der Ergebnisse .....	32
4.2. Untersuchungsergebnisse am Foramen rotundum.....	32
4.2.1. Altweltaffen (Catarrhini).....	32
4.2.2. Neuweltaffen (Platyrrhini).....	46
4.2.3. Feuchtnasenaffen (Strepsirrhini).....	51
4.3. Indizes des Foramen rotundum .....	54
4.4. Ergebnisse der Korrelationsanalyse .....	56
4.5. Regressionsanalyse .....	57
<b>5. Diskussion</b> .....	61

5.1. Topografie des Foramen rotundum .....	61
5.2. Nachbarschaftsbeziehungen des Foramen rotundum .....	64
5.3. Verlauf des Foramen rotundum .....	69
5.4. Vergleich der Maße des Foramen rotundum des Menschen mit nicht- menschlichen Primaten .....	70
5.5. Limitationen der Studie .....	74
5.6. Schlussfolgerungen .....	75
<b>6. Zusammenfassung .....</b>	<b>78</b>
<b>7. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>81</b>
<b>8. Anhang</b>	

## 1. Einleitung und Fragestellung

Das Foramen rotundum stellt einen kleinen knöchernen Kanal in der Ala major des Os sphenoidale dar und verbindet die Fossa cranii media mit der Fossa pterygopalatina (Lang 2001, Zilles und Tillmann 2010). Die genaue Kenntnis seiner Topografie und seiner Nachbarschaftsbeziehungen, wie z.B. zum Sinus sphenoidalis und zum Canalis pterygoideus, sind von unmittelbarem klinischen Interesse für verschiedene Fachgebiete wie Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde und Neurochirurgie. Abgesehen von seiner Bedeutung für die Behandlung von Schädelbasisprozessen ist auch der durch das Foramen rotundum verlaufende N. maxillaris immer wieder Bestandteil verschiedener anatomischer und klinischer Studien (Yanagi 1987, Liu et al. 2016, Mohebbi et al. 2017).

Insbesondere durch Fragestellungen nach der Entstehung und Behandlung der Trigeminusneuralgie gewinnt das Foramen rotundum in den letzten Jahren vermehrt an Interesse. So befassten sich Liu et al. (2016) mit der Ätiologie dieser Krankheit und untersuchten, inwiefern anatomische Dimensionen des Foramen rotundum wie Länge, Breite und Durchmesser mit der Entstehung der Trigeminusneuralgie in Zusammenhang stehen. Wang et al. (2019) hingegen beschäftigten sich mit der klinischen percutanen Radiofrequenz-Thermocoagulation des N. maxillaris (V2) mit Bezug zum Foramen rotundum bei der Behandlung der isolierten V2-Trigeminusneuralgie. In den letzten Jahren wurden verschiedene morphologische und biometrische Studien mit Bezug zur Fossa pterygopalatina sowohl beim Menschen als auch bei einigen Primaten durchgeführt, in denen auch Lageverhältnisse und der Verlauf des Foramen rotundum berücksichtigt wurden (Nonnenmacher 2014, Nommensen 2014).

Systematische vergleichend-anatomische Untersuchungen über das Foramen rotundum finden sich in der zur Verfügung stehenden Literatur jedoch kaum. Während die Morphologie des Foramen rotundum und seiner Variabilität beim Menschen bereits vielfach im Mittelpunkt von anatomischen und klinischen Studien standen (Hauser and DeStefano 1989, Lang 2001, Mohebbi et al. 2017, Wang et al. 2019), wurde die Morphologie des Foramen rotundum bei nicht-menschlichen Primaten kaum berücksichtigt. Das trifft insbesondere auch auf seine Lagebeziehungen zum Sinus sphenoidalis sowie dem Canalis pterygoideus zu.

Solche Kenntnisse sind jedoch von Bedeutung, um mögliche Faktoren herauszuarbeiten, welche die Morphologie des Foramen rotundum in der Anthropogenese beeinflusst haben können.

Vor diesem Hintergrund verfolgt die vorliegende Studie im Einzelnen die folgenden Zielstellungen:

1. Biometrische und topografische Untersuchung des Foramen rotundum beim Menschen und nicht-menschlichen Primaten mittels verschiedener linearer Maße und Winkelmessungen
2. Darstellung und Beschreibung von Nachbarschaftsbeziehungen des Foramen rotundum, insbesondere zum Sinus sphenoidalis und Canalis pterygoideus
3. Darstellung und Beschreibung von Unterschieden in Form, Lage und Verlauf des Foramen rotundum zwischen Menschen und nicht-menschlichen Primaten
4. Diskussion der Bedeutung dieser Untersuchungen

## 2. Literaturübersicht

### 2.1. Systematik der Primaten

Die Ordnung der Primaten weist im Vergleich zu anderen Säugetieren einige Besonderheiten auf. So ist der Körperschwerpunkt weiter nach kaudal verlagert, wodurch das Fortbewegen auf der hinteren Extremität im Vordergrund steht. Weiterhin sind die Augen nach vorne gerichtet, was das stereoskopische Sehen unterstützt (Maier 1993, Boaz and Almquist 2002). Die Extremitäten der Primaten sind sehr gut an das Greifen adaptiert.

Nicht-menschliche Primaten weisen im Gegensatz zum Menschen nicht nur opponierbare Daumen, sondern auch opponierbare Großzehen auf. Das ermöglicht vielen Primatenspezies das Umgreifen von Ästen während des Kletterns. Finger und Zehen sind außerdem mit Nägeln bedeckt (Boaz and Almquist 2002, Swindler 2012, Schröpel 2015). Alle Primaten verfügen über eine ausgebildete Clavicula. Weiterhin ist das Gehirn im Vergleich zur Körpergröße vergrößert, was vermutlich auf eine Betonung des Gesichtssinnes zurückzuführen ist (Geissmann 2003, Swindler 2012). Primaten weisen eine relativ lange Tragezeit bei kleiner Wurfgröße ihres Nachwuchses auf. Auch das fetale und postnatale Wachstum ist im Vergleich zu anderen Säugern verlangsamt, wodurch die Jungtiere in einem relativ unreifen Entwicklungszustand zur Welt kommen (Geissmann 2003).

Da in dieser Arbeit keine Taxonomie relevanten Untersuchungen durchgeführt werden, soll hier die kontrovers geführte Debatte über die Klassifikation der Primaten nicht näher erörtert werden. Vielmehr geht es hier um eine Übersichtsdarstellung der Primatentaxonomie. In dieser Arbeit soll die Taxonomie nach Geissmann (2003) Anwendung finden.

Primaten werden in die zwei Unterordnungen der Feuchtnasenprimaten (*Strepsirrhini*) und Trockennasenprimaten (*Haplorrhini*) unterteilt. Die Strepsirrhini weisen besonders viele ursprüngliche Primatenmerkmale auf. Dazu gehören z.B. die Nachtaktivität sowie ein reflektierender Augenhintergrund (*Tapetum lucidum*). Eine weitere Besonderheit stellt der Orbitaring dar, ein knöcherner, ringförmiger Zusammenschluss des Os zygomaticus mit dem Os frontale (Swindler 2012). Ihren Namen erhielten sie aufgrund ihres feuchten, drüsenreichen Nasenspiegels

(*Rhinarium*), welcher eine mediale Spalte (*Philtrum*) aufweist, wobei die Nase mit echten Nüstern angelegt ist (Geissmann 2003).

Im Gegensatz zu den Strepsirrhini sind die Haplorrhini überwiegend tagaktive Primaten. Ihre Augen besitzen keine reflektierende Schicht und die Orbita ist in Trichterform angelegt, gebildet aus einem Knochenmosaik aus den folgenden Knochen: Maxilla, Os frontale, Os sphenoidale, Os zygomaticus, Os ethmoidale und Os lacrimale. Ihren Namen erhielten sie durch den trockenen Nasenspiegel ohne bzw. mit nur noch rudimentär vorhandenen Philtrum. Weiterhin besitzen Haplorrhini im Vergleich zu den Strepsirrhini keinen Zahnkamm im Unterkiefer. Zwischen den mittleren oberen Schneidezähnen besteht im Gegensatz zu den Strepsirrhini kein Diastema (Geissmann 2003, Swindler 2012).

Die Strepsirrhini können weiter in die Infraordnungen der Lemuriformes, der Loriformes und der Adapiformes unterteilt werden. Letztere finden in dieser Arbeit jedoch keine Anwendung, da es sich um eine ausschließlich fossile Form handelt. Diese beiden Infraordnungen unterscheiden sich in einigen Merkmalen, wie z.B. in der kranialen Blutversorgung, hauptsächlich aber in ihrer Herkunft. So findet man Lemuriformes ausschließlich auf Madagaskar, die Loriformes hingegen in tropischen sowie subtropischen Waldgebieten Asiens und Afrikas (Geissmann 2003).

Die Haplorrhini werden nach Geissman (2003) in die Infraordnungen der Omomyiformes (fossile Form), Tarsiiformes, Afrotaarsiiformes (fossile Form), Eosimiiformes (fossile Form) und Anthropeidea (eigentliche Affen) untergliedert. In dieser Arbeit werden ausschließlich die Anthropeidea untersucht, weshalb auf die anderen Infraordnungen nicht weiter eingegangen werden soll. Die Anthropeidea lassen sich weiterhin unterteilen in die Ränge der Neuweltaffen (*Platyrrhini*) und Altweltaffen (*Catarrhini*).

Zu den Platyrrhini gehören die für diese Arbeit wichtigen Unterfamilien der *Cebus apella* (ungehaupte Kapuziner) und der *Alouatta* (Brüllaffen) (Geissmann 2003, Schröpel 2015). Sie weisen im Vergleich zu den Catarrhini eine eher kleine bis mittelgroße Körpergröße auf (120g-10kg). Den Namen erhielten die Platyrrhini auf Grund der divergierenden äußeren Nasenlöcher.



Die äußere Nase der Catarrhini weist parallel verlaufende und nach unten gerichtete Nasenöffnungen mit einer schmalen Nasenscheidewand auf. Auch in der Bezahnung unterscheiden sich die Platyrrhini und Catarrhini voneinander. Hierauf wird weiter unten eingegangen. Die Catarrhini besitzen im Gegensatz zu den Platyrrhini einen ausgebildeten knöchernen äußeren Gehörgang. Weiterhin sind die Unterarme im Bezug zur Gliedmaßenproportion verkürzt sowie die Gesamtkörpergröße deutlich erhöht. Die Catarrhini lassen sich in die für diese Arbeit wichtige Gruppe der Hominoidea (Menschenaffen) sowie die Cercopithecoidea (geschwänzte Altweltaffen) unterteilen. Die Cercopithecoidea werden in zwei Gruppen eingeteilt, die Cercopithecinae (Backentaschenaffen) und die Colobinae (Stummelaffen und Languren). Im Rahmen dieser Arbeit wurden aus der Gruppe der Colobinae adulte Mantelaffen untersucht. Alle Mantelaffen ist gemein, dass sie keinen Sinus maxillaris aufweisen (Rae et al. 2002).

Die Menschenaffen weisen im Gegensatz zu anderen nicht-menschlichen Primaten eine vergleichsweise breitere Nase (Geissmann 2003) sowie ein vergrößertes Gehirn auf. Sie sind schwanzlos, die Anzahl der Lendenwirbelkörper ist reduziert. Der Brustkorb ist verbreitert und die Arme verlängert. Zur Gruppe der Hominoidea gehören die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Gattungen Mensch (*Homo sapiens*), Orang-Utan (*Pongo pygmaeus*), Gorilla (*Gorilla gorilla*) und Schimpanse (*Pan troglodytes*) (Geissmann 2003, Swindler 2012, Schröpel 2015).

Tab. 1: Übersicht über die Taxonomie der Primaten mit den für diese Arbeit relevanten Familien und Gattungen.

Ordnung	Infraordnung	Rang	Spezies/Gattung
Primaten	Strepsirrhini	Lemuriformes	<i>Avahi laniger</i>
			<i>Aye Aye</i>
			<i>Cheirogaleus Species</i>
			<i>Microcebus murinus</i>
			<i>Eulemur Species</i>
			<i>Hapalemur griseus olivaceus</i>
			<i>Indri indri</i>
			<i>Lemur catta</i>
			<i>Lepilemur Species</i>
			<i>Otolemur crassicaudatus</i>
			<i>Phaner furcifer</i>
			<i>Propithecus Species</i>
			Loriformes
	<i>Galago senegalensis</i>		
	<i>Galagoides demidovii</i>		
	<i>Loris tardigradus</i>		
	<i>Nycticebus coucang</i>		
	<i>Perodicticus potto</i>		
	Haplorrhini	Catarrhini	Mensch ( <i>Homo sapiens</i> )
			<i>Gorilla gorilla</i>
			<i>Pongo pygmaeus</i> (Orang)
			<i>Pan troglodytes</i> (Schimpanse)
			<i>Colobus guereza</i> (Mantelaffen)
<i>Hylobatidae</i> (Gibbon)			
Platyrrhini		<i>Cebus apella</i> (ungeh. Kapuzineraffen)	
	<i>Alouatta</i> (Brüllaffen)		

## 2.2. Morphologie des Primatenschädels

### *Schädelentwicklung*

Die grundsätzliche Entstehung des Schädels ist bei allen Primaten ähnlich und kann während seiner embryonalen Entwicklung in das Desmocranium und das Chondrocranium unterteilt werden (Starck 1975b, Lieberman et al. 2000, Schröpel 2015). Im Folgenden soll daher die Entwicklung des menschlichen Schädels als Basis dienen.

Beim Menschen entsteht im zweiten Embryonalmonat als zunächst knorpelige Grundlage für die Knochen der späteren Schädelbasis das Chondrocranium. (Lieberman et al. 2000) beschreiben die Bildung der Schädelbasis aus zunächst 41 Knorpelzentren. Sie bilden die Grundlage für die verschiedenen Knochen der Schädelbasis wie das Os ethmoidale, Os sphenoidale, Os occipitale und Os temporale. Während die chondrale Ossifikation von einem knorpeligen Grundgerüst ausgeht, erfolgt die desmale Ossifikation direkt aus dem embryonalen Bindegewebe und bildet das Desmocranium. Zum diesem gehören überwiegende Anteile des Gesichtsschädels sowie die Schädelkalotte (Starck 1975b, Hanken and Hall 1993, Lieberman et al. 2000, Bronner et al. 2010, Dixon et al. 2017). Andrew et al. (2017) heben den Einfluss von intrinsischen Faktoren, beispielsweise Hormone, auf das Wachstum des Chondrocraniums hervor. Im Gegensatz dazu üben epigenetische Faktoren auf das Desmocranium einen größeren Wachstumseinfluss aus. Auf detailliertere Angaben zu Ossifikationsprozessen soll im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden und auf entsprechende Literatur verwiesen werden (Jiang et al. 2002, Bourne 2014, Dixon et al. 2017).

Mit dem 2. Monat der embryonalen Entwicklung beginnt sich auch die Schädelbasis zu entwickeln. Lieberman et al. (2000) beschreiben ein Wachstum der anterioren Anteile der Schädelbasis parallel zur neuronalen Wachstumsphase des Gehirns. Demgegenüber erfolgt das Wachstum der unteren vorderen Anteile der Schädelbasis parallel zum Gesichtsschädelwachstum. Die laterale Ausweitung der Schädelbasis findet nach Lieberman et al. (2000) unter Beeinflussung der umgebenden neuronalen Strukturen statt. Parallel zum Wachstum der Schädelbasis nimmt auch das Gehirns an Größe zu. Diese Größenzunahme des Gehirns führt zur Beeinflussung der umgebenden Knochenstrukturen, wodurch

diese um die verschiedenen entstehenden Nervenstrukturen und Gefäße herum wachsen. Dies führt wiederum zur Entstehung einer Vielzahl an Foramina und Kanälen des Schädels (Luckett and Szalay 1976, Hanken and Hall 1993, Lieberman 2011)

Die Schädelbasis erfährt während ihres Wachstum verschiedene Veränderungen, die abhängig von genetischen und epigenetischen Faktoren sind. So beschreiben Hanken and Hall (1993), dass insbesondere Umwelteinflüsse, wie kältere Lebensräume sowie Ernährungsgewohnheiten Einfluss auf die Entwicklung des Schädels haben. Das Wachstum der Schädelbasis erfährt im Verlauf seiner Entwicklung eine antero-posteriore Elongation sowie eine medio-laterale Ausweitung (Lieberman 2011). Dieses Wachstum unterscheidet sich jedoch deutlich bei den verschiedenen Primatenarten. Durch das ebenfalls parallel ablaufende Gehirnwachstum wirkt dieses wachstumsbeeinflussend auf die Schädelbasis (Biegert 1957). Mit zunehmenden Gehirnvolumen beschreiben sowohl Hanken and Hall (1993) als auch McCarthy (2001) eine zunehmende Flexion der Schädelbasis. Diese Flexion ist bei den Hominoidea und insbesondere beim Menschen deutlich stärker ausgeprägt, als bei allen anderen Säugetieren (Hofer 1960, Ross and Ravosa 1993, McCarthy 2001). Ross and Ravosa (1993) erwähnen außerdem, dass diese verstärkte Schädelbasisflexion mit dem aufrechten Gang, der Fähigkeit einer kodierten Sprache sowie der Betonung des Gesichtssinns korreliert. Hingegen verursacht ein vermehrtes frontal-gerichtetes Wachstum des Gesichts eine nur geringe bis nicht vorhandene Flexion der Schädelbasis. Das lässt sich insbesondere bei den Strepsirrhini beobachten (Lieberman 2011).

Die Bildung des Gesichtsschädels geht überwiegend vom Desmocranium aus und umfasst in etwa 20 verschiedene Knochen, die wiederum von weitaus mehr Wachstumszentren ausgehen (Starck 1975a, Scheuer and Black 2004, Rohen und Lütjen-Drecoll 2006). Das Obergesicht wächst auf Grund seiner Nähe zur Schädelbasis eng mit dieser verknüpft (Enlow and Hans 1996, Rohen und Lütjen-Drecoll 2006). Neaux et al. (2013) konnten beim Menschen einen Zusammenhang zwischen der antero-posterioren Verkürzung der Schädelbasis mit einer supero-inferioren Reduktion des Gesichtsschädels sowie den Zusammenhang einer medio-

lateralen Verbreiterung der Schädelbasis mit einer medio-lateralen Verbreiterung des Gesichtsschädels nachweisen.

### *Faktoren der Schädelmorphogenese*

Anpassungen an verschiedene Umweltbedingungen sowie Art und Verfügbarkeit der Nahrung führten bei den Primaten zu verschiedenen Adaptationsprozessen, die sich auch in der Schädelmorphogenese widerspiegeln. Diese Adaptationsprozesse sind eine Erklärung für die bemerkenswerte artenspezifischen Diversität (Hanken and Hall 1993, Lieberman et al. 2004).

Corruccini and Beecher (1982) untersuchten die Auswirkungen der Konsistenz der Nahrung auf die Schädelentwicklung an Totenkopffaffen (*Saimiri sciureus*), wobei einige Tiere weiche Nahrung, andere Tiere harte Nahrung erhielten. Bei den Totenkopffaffen, welche vorwiegend harte Nahrung erhielten, zeigte sich ein höherer und breiter geformter Gesichtsschädel mit ausgeprägter Kaumuskulatur und Kieferknochen. Diese morphologische Adaptation konnte im Gegensatz dazu bei Tieren, die sich von weicher Kost ernährten, nicht beobachtet werden. In einer ähnlichen Studie von Corruccini and Beecher (1984) an Pavianen (*Papio cynocephalus*) konnte dieses Phänomen der morphologischen Anpassung erneut nachgewiesen werden.

### *Unterschiede und Besonderheiten der Schädelmorphologie in Primaten*

Eine große Anzahl von Studien zeigt die morphologischen Merkmale und Besonderheiten im Aufbau des Schädels der verschiedenen Primatengruppen (Starck 1975b, Geissmann 2003). So beschreibt Starck (1975b) eine über das hintere Drittel der Regio nasalis ragende abgerundete Fossa cranii an Schädeln der Strepsirrhini. Diese reicht somit deutlich weiter nach anterior als bei anderen Primaten. Die Stirn der Strepsirrhini ist gewölbt und die Orbita bildet einen abgerundeten Knochenring, der je nach Gattung mit oder ohne Septum interorbitalis auffindbar ist (Starck 1975b). Geissmann (2003) erwähnt bei den Strepsirrhini den im Vergleich zu den Haplorrhini eher schnauzenartigen Gesichtsschädel. In der Nasenhöhle der Strepsirrhini befinden sich bis zu zehn Ethmoturbinalia (ethmoidale

Nasenmuscheln). Im Gegensatz dazu ist die Zahl der Ethmoturbinalia bei den Trockennasenprimaten auf maximal vier Ethmoturbinalia reduziert. Dieses Merkmal spiegelt eine Reduktion des olfaktorischen Systems der Haplorrhini gegenüber den Strepsirrhini wider (Geissmann 2003).

Die Platyrrhini und Catarrhini weisen hingegen abgeflachtere Gesichtsschädel ohne ausgeprägte Schnauze auf. Ausnahmen bilden hier Paviane und Mandrills. Weiterhin ist die Orbita trichterförmig und vollkommen geschlossen. Die Cavitas cranii und somit auch das Gehirn der Catarrhini ist weiter nach rostro-occipital verlängert, wodurch es zu den typischen rundlichen Strukturen innerhalb des Chondrocraniums kommt. Die Schädelbasis der Catarrhini ist relativ breiter als die der Platyrrhini und diese wiederum breiter als die der Strepsirrhini (Starck 1975b, Geissmann 2003).

### *Bezahnung der Primaten*

Das Gebiss der Primaten gliedert sich in ein Wechselgebiss mit vier verschiedenen Zahntypen, wobei sich die Anzahl der Zähne innerhalb der Primaten unterscheidet. Nach dem Zahnwechsel weisen die Neuweltaffen je nach Spezies maximal 36 Zähne auf. Die Kapuzinerartigen besitzen beispielsweise 36 Zähne, aufgeteilt in zwei Inzisivi, einem Caninus, drei Prämolaren sowie drei Molaren je Quadrant (Zahnformel 2-1-3-3) (Swindler and George 2002, Swindler 2012). Demgegenüber zeigen die Krallenaffen (*Callitrichidae*) nur 32 permanente Zähne aufgeteilt in zwei Inzisivi, einen Caninus, drei Prämolaren und zwei Molaren je Quadrant (Zahnformel 2-1-3-2). Als Besonderheit der Krallenaffen sei erwähnt, dass sich die Länge der Eckzähne je nach Ernährungsart unterscheidet. So weisen fruchtfressende Krallenaffen einen deutlich verlängerten Eckzahn im Vergleich zu den Schneidezähnen auf, wohingegen die Eckzähne der allesfressenden Vertreter dieser Familie etwa gleichlang mit den Schneidezähnen sind. Dies ermöglicht letzteren besonders auch kleine Käfer zu fressen sowie die Rinde von Bäumen mit den Zähnen zu lösen. Bei den Altweltaffen, dem auch der Mensch angehört, ist die Zahnanzahl der permanenten Zähne auf 32 reduziert. Sie umfassen je Kieferquadrant zwei Inzisivi, einen Caninus, zwei Prämolaren sowie drei Molaren (Zahnformel 2-1-2-3). Die beiden Schneidezähne sind transversal angeordnet und

es findet sich eine spezielle Anordnung an Höckern auf den Molaren. Diese als Dryopithecus-Muster bezeichnete Anordnung zeigt sich bei den Molaren des Unterkiefers in Form von fünf durch feine Fissuren getrennte Höcker, bei den Molaren des Oberkiefers hingegen als nur vier getrennte Höcker (Alt 1997, Swindler and George 2002).

Das Gebiss der Feuchtnasaffen besteht aus zwei Inzisivi, einem Caninus, drei Prämolaren sowie drei Molaren je Quadrant (Zahnformel 2-1-3-3). Lediglich das Gebiss der Lepilemuren stellt hier eine Sonderform dar, da die Schneidezähne des Oberkiefers fehlen. Die mittleren Schneidezähne des Oberkiefers der übrigen Feuchtnasaffen stehen separiert, sodass zwischen diesen eine Lücke (*Diastema*) entsteht. Die Schneidezähne des Unterkiefers sind nach vorne geneigt (Swindler and George 2002, Swindler 2012, Thenius 2020).

### 2.3. Morphologie des Foramen rotundum

Das Foramen rotundum ist eine Öffnung in der Ala major des Os sphenoidale und verbindet die Fossa cranii media mit der Fossa pterygopalatina. Es beinhaltet den N. maxillaris (Shapiro and Robinson 1967, Garlick et al. 2009). Das Os sphenoidale bildet eine wesentliche Grundlage der Fossa cranii media und beteiligt sich sowohl an der Bildung der knöchernen Orbita, als auch der äußeren Schädelbasis. Seine verschiedenen Anteile stehen über Suturen mit einer Vielzahl der Knochen des Gesichts- und Hirnschädels in Kontakt (Vogl 1999, Garlick et al. 2009, Drake et al. 2017).

Das Os sphenoidale entsteht während der Schädelentwicklung aus einem Presphenoid sowie einem Basissphenoid, wobei letzteres weiterhin in zwei mediale und zwei laterale Anteile gegliedert wird (Kodama 1976, Kier and Rothman 1976, Sperber et al. 2000, Scheuer und Black 2004). Kodama (1976) beschreibt eine beginnende Verknöcherung sowie Verbindung des Presphenoids mit dem Basissphenoid zum Sphenoidkörper ab dem dritten fetalen Monat. Parallel hierzu kommt es zur Ossifikation des Alisphenoids, welcher den Vorläufer der Ala major bildet sowie zur Ossifikation des Orbitosphenoids, dem Vorläufer der späteren Ala minor (Sperber et al. 2000). Die komplette Ossifikation ist zum Zeitpunkt der Geburt noch nicht abgeschlossen. Sie dauert bis zur Pubertät an (Sperber et al. 2000).

Durch den Zusammenschluss der Ossifikationszentren mit dem Sphenoidkörper entsteht das von Kodama (1976) als *Corpus sphenoidale primitivum* bezeichnete Grundkonstrukt des Os sphenoidale mit der typischen dreiecksähnlichen Form. Hier sind bereits typische Strukturen, wie die Fossa hypophysialis, die Sella turcica, das Dorsum sellae, Processus pterygoideus und der Sulcus caroticus vorhanden (Kodama 1976, Sperber et al. 2000).

Da die Entwicklung des Os sphenoidale parallel zur Gehirnentwicklung stattfindet, wachsen die einzelnen Knochenanteile um auswachsende Nerven herum (Luckett and Szalay 1976, Hanken and Hall 1993, Sperber et al. 2000). Der Bereich zwischen Orbitosphenoid (Ala minor) und Alisphenoid (Ala major) wird zur Fissura orbitalis superior mit den hier entlang ziehenden Nervi oculomotorius, trochlearis, ophthalmicus und abducens (Sperber et al. 2000, Aumüller et al. 2010, Dähnert 2012). Weiterhin entsteht in der Ala major neben dem Foramen ovale auch das Foramen spinosum. Im nach kaudal wachsenden Processus pterygoideus entsteht der Canalis pterygoideus um den Nervus canalis pterygoideus (Vogl 1999). Er wird im klinischen Sprachgebrauch meist mit dem englischen Terminus *Vidian nerve* bezeichnet (Mafee et al. 2005). Der Bereich zwischen dem Alisphenoid und Presphenoid wird von Ästen des N. maxillaris durchbrochen, wodurch das Foramen rotundum (N. maxillaris) und das Foramen ovale (N. mandibularis) entstehen (Kodama 1976, Kier and Rothman 1976, Sperber et al. 2000, Dähnert 2012).

Das Foramen rotundum verbindet bekanntlich die mittlere Schädelgrube mit der Fossa pterygopalatina. Seine Länge variiert. Das Foramen imponiert dabei eher als ein Knochenkanal. Es liegt in nachbarschaftlicher Beziehung zur Seitenwand des Sinus sphenoidales sowie unterhalb der Fissura orbitalis superior (Sperber et al. 2000, Dähnert 2012, Mohebbi et al. 2017). Vogl (1999) beschreibt den Verlauf des Foramens innerhalb des Os sphenoidale als schräg nach außen und unten verlaufend. Im Rahmen einer CT-Studie an menschlichen Schädeln untersuchten Mohebbi et al. (2017) die Position des Foramen rotundum insbesondere zum Sinus sphenoidalis und definierten drei Lagetypen. So kann das Foramen rotundum als Knochenkanal innerhalb des Sinus sphenoidalis liegen, diesen nur tangieren oder aber vollkommen außerhalb des Sinus sphenoidalis verlaufen. Weiterhin trafen Mohebbi et al. (2017) ebenfalls Aussagen zur anatomischen Lage des Foramen rotundum zur Basis der Lamina lateralis des Processus pterygoideus ossis



sphenoidalis. In der Mehrheit der untersuchten Schädel tangiert das Foramen rotundum den Sinus sphenoidalis an seiner lateralen Wand.

Innerhalb des Foramen rotundum verläuft der N. maxillaris, der zweite Hauptast des N. trigeminus. Der N. maxillaris teilt sich nach der Durchquerung des Foramens innerhalb der Fossa pterygopalatina in die Hauptäste N. zygomaticus und N. infraorbitalis. Außerdem entlässt er die Rr. alveolares superiores posteriores, die zum hinteren Bereich der Maxilla ziehen. Weiterhin gibt er Rr. ganglionares an das Ganglion pterygopalatinum ab, die ohne weitere Verschaltung als Nervus nasopalatinus und Rr. nasalis posteriores superiores weiter zum Foramen sphenopalatinum ziehen. Parasympathische postganglionäre Fasern des Ganglion pterygopalatinum lagern sich dem N. zygomaticus an und ziehen von hier ausgehend zum N. lacrimalis (Vogl 1999, Fanghänel et al. 2009, Dähnert 2012, Koppe et al. 2016). Zum Versorgungsgebiet des N. maxillaris zählt der Großteil des Obergesichts von der Schläfe bis zu den Lippen, aber auch die Schleimhäute der Nasennebenhöhlen und des Gaumens (Aumüller et al. 2010, Drake et al. 2017).

Aufgrund seines Innervationsgebiets ist der N. maxillaris immer wieder Bestandteil klinischer Studien, z.B. zur Behandlung der Trigeminusneuralgie. Dabei dient insbesondere das Foramen rotundum als Angriffspunkt für die perkutane Radiofrequenzthermokoagulationstherapie des N. maxillaris (Wan et al. 2018, Wang et al. 2019, Xue et al. 2019). Als möglichen Auslöser für das Auftreten der durch den N. maxillaris verursachten Trigeminusneuralgie beschreiben Edwards et al. (2018) ein oftmals rechtsbetontes Missverhältnis zwischen dem Durchmesser des Foramen rotundum und dem des Nerven, mit resultierender Irritation. Edwards et al. (2018) geben die durchschnittliche Fläche des Foramen rotundum beim Menschen mit 9,48 mm<sup>2</sup> für die rechte Seite und 9,45 mm<sup>2</sup> für die linke Seite an, wobei die Fläche des N. maxillaris zwischen 4,6 bis 15,3 mm<sup>2</sup> beschrieben wird. Kastamoni et al. (2021) beschreiben die Fläche des Foramen rotundum hingegen mit nur 3,42 mm<sup>2</sup> und 3,53 mm<sup>2</sup> für die rechte und linke Seite. Als selten auftretendes Phänomen beschreiben Edwards et al. (2018) einen aus dem Foramen rotundum aufsteigenden kleinen Kanal, der diagonal zur Orbita zieht. Die Funktion dieses Kanals ist jedoch ungeklärt. Eine weitere seltene Besonderheit zeigen mehrere klinische Fälle, bei denen es durch Fistelgangbildung zum Austreten

zerebrospinaler Flüssigkeit aus dem Foramen rotundum kam (Harley et al. 2019, Luong et al. 2020).

### 3. Material und Methoden

#### 3.1. Material

Grundlage dieser Arbeit bilden 94 computertomographische Datensätze von Primatenschädeln unterschiedlicher Gattungen, einschließlich menschlicher Schädel. Auf Grund der Bildqualität wurden drei Schädel von der Untersuchung ausgeschlossen. Somit konnten 91 CT-Datensätze in die Untersuchung einbezogen werden. Davon waren 81 adulte Schädel und 10 Schädel juvenil. Insgesamt wurden 22 männliche und 39 weibliche Schädel untersucht (s. Tab. 2 und 3). 30 Schädeln konnten keinem Geschlecht zugeordnet werden. Die Schädel wurden entsprechend ihrer taxonomischen Zuordnung den Unterordnungen Haplorrhini (Trockennasenprimaten) und Strepsirrhini (Feuchtnasenprimaten) zugeordnet.

Die Schädel von *Pan troglodytes*, *Pongo pygmaeus*, *Gorilla gorilla*, der Gibbons, *Cebus apella* und der Brüllaffen stammen aus der Sammlung des Instituts für Anatomie und Zellbiologie der Universitätsmedizin Greifswald. Die Schädel von *Colobus guereza* sind Teil der Sammlung der Universität Hildesheim. Die Schädel der Strepsirrhini entstammen den Sammlungen des Grant Museum of Zoology, University College London, des Hunterian Museum of Zoology, Royal College of Surgeons, London, des Natural History Museum, Zoology, London. Die menschlichen Schädel aus Alytus entstammen dem Department of Anatomy, Histology and Anthropology der Universität Vilnius, Litauen und die menschlichen Schädel aus Kyoto aus der Sammlung des Laboratory of Anthropology der Kyoto University, Japan.

Tab. 2: Einteilung des Untersuchungsmaterials der Haplorrhini

Rang/Infraordnung	Gattung/Spezies	Geschlecht			Anzahl
		M	W	O	
Catarrhini					
	<i>Homo sapiens</i> (Alytus)	5	5		10
	<i>Homo sapiens</i> (Kyoto)	5	5		10
	<i>Hylobates lar</i>			1	1
	<i>Hylobates agilis</i>			1	1
	<i>Symphalangus syndactylus</i>			1	1
	<i>Pongo pygmaeus</i>		10		10
	<i>Gorilla gorilla</i>		4		4
	<i>Pan troglodytes</i>	2	4	1	7
	<i>Colobus guereza</i>	5	8	2	15
Platyrrhini					
	<i>Cebus apella</i>	2	1	1	4
	<i>Alouatta seniculus</i>				
	<i>Alouatta caraya</i>	2	2	1	5
Gesamt		21	39	8	68

M=männlich, W=weiblich, O= Geschlecht unbekannt

Tab. 3: Einteilung des Untersuchungsmaterials der Strepsirrhini

Rang/Infraordnung	Gattung/Spezies	Geschlecht		
		M	W	O
Lemuriformes				
	<i>Avahi laniger</i>			1
	<i>Aye aye</i>			1
	<i>Cheirogaleus major</i>			1
	<i>Cheirogaleus medius</i>			1
	<i>Eulemur fulvus</i>			1
	<i>Eulemur macaco</i>			1
	<i>Eulemur mongoz</i>			1
	<i>Eulemur rubriventer</i>			1
	<i>Hapalemur griseus olivaceus</i>			1
	<i>Indri indri</i>			1
	<i>Lemur catta</i>			1
	<i>Lepilemur microdon</i>			1
	<i>Lepilemur mustelinus leucopus</i>			1
	<i>Otolemur crassicaudatus</i>			1
	<i>Phaner furcifer</i>			1
	<i>Propithecus coronatus</i>			1
<i>Propithecus diadema</i>			1	
<i>Varecia varigata</i>			1	
Loriformes				
	<i>Euoticus elegantulus</i>			1
	<i>Galago senegalensis</i>			1
	<i>Loris tardigradus</i>			1
	<i>Nycticebus coucang</i>			1
	<i>Perodicticus potto</i>			1
Gesamt				23

M=männlich, W=weiblich, O= Geschlecht unbekannt

## 3.2. Methoden

### 3.2.1. Computertomographische Untersuchung

Die CT-Schichtaufnahmen von *Pan troglodytes*, *Gorilla gorilla*, *Pongo pygmaeus*, *Cebus apella*, *Hylobater lar* und *Hylobater agilis* sowie der menschlichen Schädel aus Litauen wurden im Institut für Diagnostische Radiologie der Universitätsmedizin Greifswald mittels eines Sensation 16 CT der Firma SIEMENS (Siemens, Erlangen, Germany) bei einer Stromstärke von 74-75 mA und einer Spannung von 120 kV mit 1,0 mm Schichtdicke aufgenommen. Die Schnittbilder des *Hylobater lar* und *Hylobater agilis* wurden mit einer Stromstärke von 1 mA bei 110 kV und einer Schichtdicke von 0,5mm aufgenommen.

Die CT-Aufnahmen der menschlichen Schädel aus Kyoto wurden mittels des TOSHIBA Alexion (Toshiba, Tokio, Japan) bei 130 mA und 120 kV mit einer Schichtdicke von 1,0 mm am Laboratory of Physical Anthropology der Kyoto University, Japan erstellt.

Die Datensätze von den *Colobus guereza*, *Symphalangus syndactylus* und *Alouatta caraya* sowie *Alouatta seniculus* wurden mit Hilfe des 3D Accuitomo F17 CT Morita (J Morita Corp. Kyoto, Japan) bei 3 mA und 80 kV in der Poliklinik für MKG-Chirurgie/Zahnärztliche Chirurgie des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Universitätsmedizin Greifswald erstellt. Die Schichtdicke für den Schädel von *Symphalangus syndactylus* und die Schädel der Brüllaffen betrug 0,25 mm, die der Colobus Schädel betrug 0,16 mm bzw. 0,48 mm. Für eine höhere Genauigkeit wurden in dieser Arbeit ausschließlich die Colobus-Schnittbildserien mit einer Schichtdicke von 0,16 mm verwendet.

Die computertomographischen Schichtaufnahmen der Strepsirrhini wurden mit Hilfe des Stratec XCT Research SA+ (Stratec Medizintechnik GmbH, Pforzheim, Deutschland) mit einer Schichtdicke von 0,5 mm bzw. bei zwei Schädeln mit 0,2 mm bei 50,6 kV und 0,284 mA an der University of Roehampton London, von Dr. Todd C. Rae angefertigt.

Alle Aufnahmen lagen im DICOM-Format vor und wurden mittels der Software RadiAnt DICOM Viewer (v4.6.9 ©) vermessen. Hierfür kamen die in der Software

integrierten Messtools zur Erhebung der Schädelparameter zum Einsatz. Zur nachfolgenden grafischen Veranschaulichung der Parameter und Ebenen wurden die Aufnahmen mit Hilfe der Software CorelDRAW 11 (Corel Corporation v.11.633 ©) verarbeitet.

### 3.2.2. Definition der Grundebenen

Alle Datensätze wurden vorab mittels der integrierten 3D-MPR Funktion der Software RadiAnt DICOM Viewer (v4.6.9 ©) unter Kontrolle aller drei Schnittebenen ausgerichtet. Um eine bessere Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden definierte Ebenen bestimmt. Nachfolgend definierte Ebenen (s. Tab. 4) wurden für die Vermessung des Foramen rotundum verwendet.

In der koronaren Schnittebene diente in Anlehnung an Mohebbi et al. (2017) die von uns definierte Rostrum-Sphenoidal-Ebene (RSE) als Grundlage für weitere Messungen. RSE stellt eine Sagittalebene dar, welche in den koronaren Schichtaufnahmen vertikal durch den Kontaktpunkt des dorsalsten Randes des Vomers mit dem Rostrum sphenoidale und den Mittelpunkt der Sphenoidalbreite verläuft (s. Abb. 1)

Des Weiteren markierten wir in der oben beschriebenen sagittalen Schnittebene RSE die Punkte Prosthion und Spina nasalis posterior (s. Abb. 2). Mit Hilfe der 3D-MPR Funktion der Software RadiAnt DICOM Viewer (v4.6.9 ©) konstruierten wir senkrecht zu der Verbindungslinie dieser Punkte die horizontale Prosthion-Spina-Ebene (PSE).

Beide Ebenen (RSE und PSE) konnten mittels der integrierten Funktion von RadiAnt DICOM Viewer (v4.6.9 ©) auf alle Schnittbilder der Ebene übertragen werden. Die Ebenen RSE und PSE wurden anschließend mittels Parallelverschiebung über die 3D-MPR-Funktion von RadiAnt an definierte Orte für die metrische Messung verschoben.

Tab. 4: Definition der Grundebenen

Grundebene	Definition
Rostrum-Sphenoidal-Ebene (RSE)	Sagittale Ebene, welche durch den Kontaktpunkt des dorsalsten Randes des Vomers mit dem Rostrum sphenoidale und den Mittelpunkt der Sphenoidalbreite verläuft (s. Abb. 1)
Prosthion-Spina-Ebene (PSE)	Ebene in der Verbindungslinie von Prosthion und Spina nasalis posterior

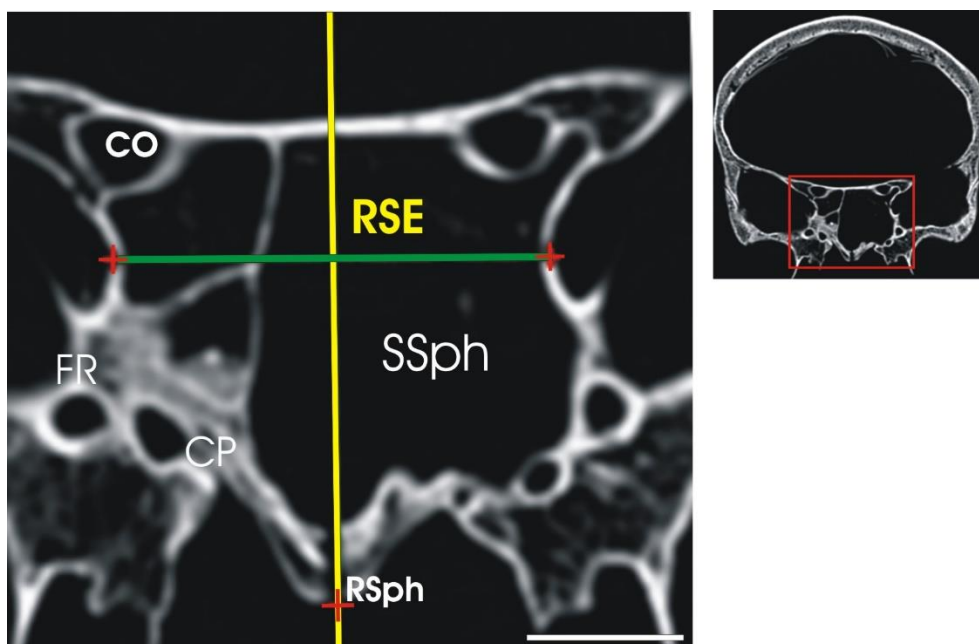


Abb. 1: Ausschnittvergrößerung einer koronaren CT-Schichtaufnahme (siehe Inset) durch den Sinus sphenoidalis (SSph) eines adulten menschlichen Schädels der Population Alytus mit Beschriftung von Foramina auf der rechten Seite. Die gelbe Senkrechte stellt die Rostrum-Sphenoidal-Ebene (RSE) dar, welche durch den Mittelpunkt der Sphenoidalbreite und den untersten Punkt des Rostrum sphenoidale (RSpH) verläuft. CO: Canalis opticus; FR: Foramen rotundum; CP: Canalis pterygoideus; SSph: Sinus sphenoidalis; RSpH: Rostrum sphenoidale. Balkenlänge: 1 cm



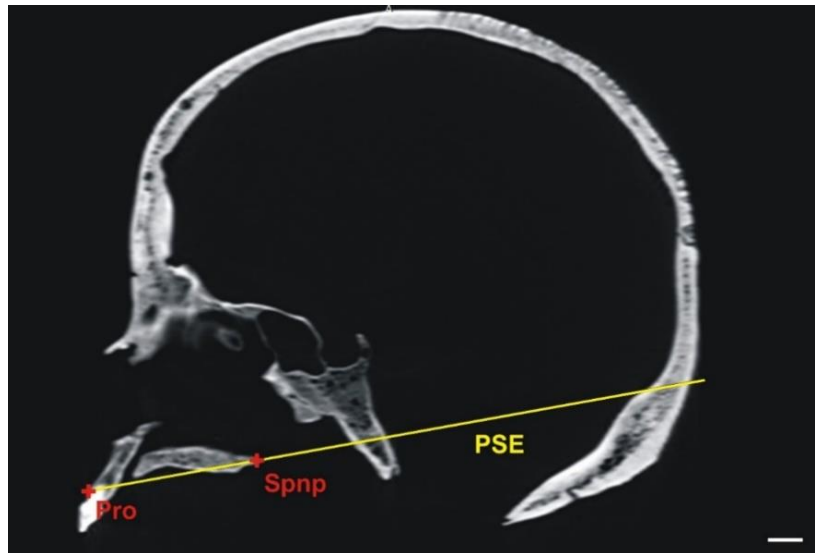


Abb. 2: Sagittale CT-Schichtaufnahme eines adulten menschlichen Schädels der Population Alytus zur Darstellung der Position der transversalen Prosthion-Spina-Ebene (PSE). PSE schneidet sowohl das Prosthion (Pro) als auch die Spina nasalis posterior (Spnp). Balkenlänge: 1 cm

### 3.2.3. Metrische Untersuchung am Foramen rotundum

Bei der Vermessung des Foramen rotundum galt es zu berücksichtigen, dass es sich bei dieser Öffnung um einen Knochenkanal mit einem Eingang und einem Ausgang handelt. Deshalb wurden die Öffnungen wie folgt bezeichnet:

- Eingang - Öffnung des Foramen rotundum in der Fossa cranii media
- Ausgang - Öffnung des Foramen rotundum in der Fossa pterygopalatina

Für die Ausrichtung der Ebenen wurde die 3D-MPR-Funktion von RadiAnt genutzt. Zunächst wurde die transversale Prosthion-Spina-Ebene nach kranial durch den am weitesten medial gelegenen Punkt der Öffnung des Foramen rotundum in der Fossa pterygopalatina parallelverschoben. Die so entstandene axiale Schichtaufnahme, in welcher das Foramen rotundum als komplett durchgängiger Kanal deutlich wurde, wurde als PSEt1 bezeichnet (s. Abb. 3a). In der so definierten axialen Schichtaufnahme wurde der Verlauf des Foramen rotundum der einzelnen Primatengattungen in der transversalen Raumebenen beidseits vermessen.

Die RSE wurde in den koronaren Schichtaufnahmen durch den am weitesten medial gelegenen Punkt am Ausgang des Foramens verschoben. Gewählt wurde hier die rostralste Schnittebene, die das Foramen rotundum als vollkommen knöchern umhüllt darstellte (s. Abb. 3). In dieser koronaren Schichtaufnahme stellten sich in der Regel die Ausgänge von Canalis pterygoideus und Foramen rotundum beider Seiten dar, so dass Flächeninhaltsbestimmungen durchgeführt werden konnten (s. Abb. 3).

Die RSE wurde im Anschluss jeweils zu beiden Seiten mittels lateraler Parallelverschiebung durch die am weitesten kaudal liegende Knochenkante des Foramen rotundum verschoben. Auf diese Weise entstand eine axiale Schichtaufnahme, in welcher das Foramen rotundum als komplett durchgängiger Kanal mit dessen vertikalen Verlauf dargestellt werden konnte. Diese Schichtaufnahme wurde genutzt, um vertikale Abstands- und Winkelmessungen durchführen zu können (s. Abb. 6)

### 3.2.3.1. Messung in der Koronarebene

#### *Fläche des Foramen rotundum*

Die Flächenbestimmung des Foramen rotundum erfolgte in der oben definierten Koronarebene. Die Aufnahme wurde dazu in das Programm ImageJ (v.1.52a) überführt und die Fläche des Foramen rotundum, nach Kalibrierung, mittels des integrierten Flächentools von ImageJ bestimmt (s. Abb. 3).

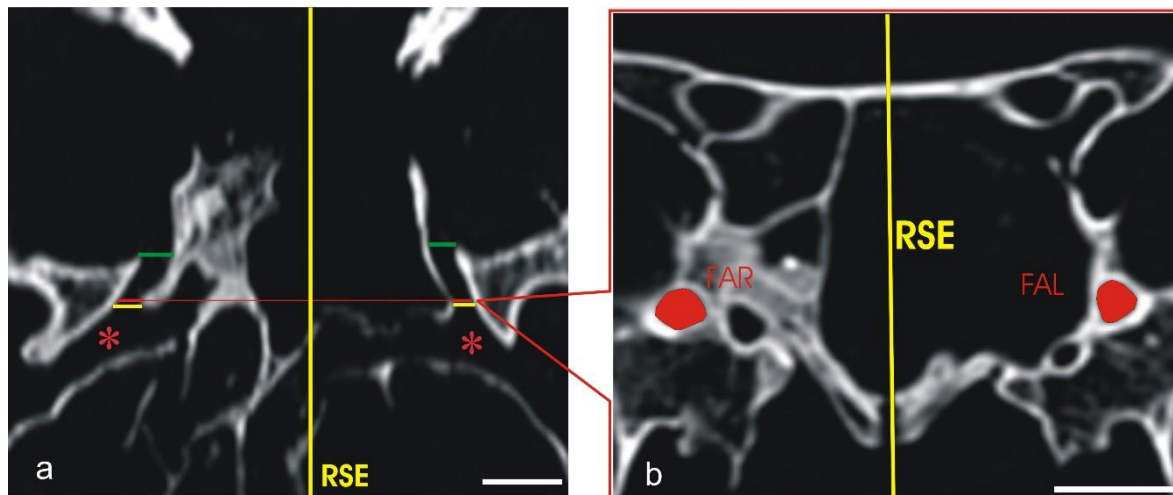


Abb. 3: **a** - Axiale CT-Schichtaufnahme durch den Ausgang des Foramen rotundum in der Fossa pterygopalatina (roter Asterisk). Diese Schicht ist die nach kranial parallel verschobene Prosthion-Spina-Ebene (PSEt1) durch den Ausgang des Foramen rotundum. Das Foramen stellt sich hier als ein Kanal mit einem Eingang in der Cavitas cranii media (grüne Linie) und einem Ausgang in der Fossa pterygopalatina (gelbe Linie) dar. **b**: Koronare CT-Schnittbildaufnahme eines *Homo sapiens* Schädels zur Darstellung der Flächenmaße des rechten und linken Foramen rotundum. FAR: Fläche des rechten Foramen rotundum; FAL: Fläche des linken Foramen rotundum; Balken: 1cm

### 3.2.3.2. Messung in der Transversalebene

#### *Streckenmessungen*

Um die dafür notwendige axiale Schichtaufnahme zu erhalten, wurde die Prosthion-Spina-Ebene (s. Abb. 2) mit Hilfe der 3D MPR Funktion von RadiAnt nach kranial durch den am weitesten medial gelegenen Punkt der Öffnung des Foramen rotundum in der Fossa pterygopalatina verschoben (s. Abb. 4).

Zur Bestimmung der Lage des Foramen rotundum in der Horizontalebene wurden verschiedene Messpunkte definiert und Messpunkte am Eingang als auch am Ausgang des Knochenkanals definiert. Diese Messpunkte wurden als FR1 für den Eingang des Foramens der rechten Seite und als FL1 für den Eingang der linken Seite sowie als FR2 für den Ausgang des Foramens auf der rechten Seite und als FL2 für den Ausgang der linken Seite bezeichnet. Ausgehend von diesen

Messpunkten wurden die Abstände zur RSE vermessen. Diese Abstände wurden folgend als TFrD1 für den Eingang und TFrD3 für den Ausgang der rechten Seite und als TFrD2 für den Eingang und TFrD4 für den Ausgang der linken Seite bezeichnet (s. Abb. 4a).

Tab. 5: Übersicht der Messpunkte und Messstrecken des Foramen rotundum in der Transversalebene

Messpunkt/Strecke	Definition
FR1	Messpunkt am Eingang der medialen Knochenkante des rechten Foramen rotundum
FR2	Messpunkt am Ausgang der medialen Knochenkante des rechten Foramen rotundum
FL1	Messpunkt am Eingang der medialen Knochenkante des linken Foramen rotundum
FL2	Messpunkt am Ausgang der medialen Knochenkante des linken Foramen rotundum
TFrD1	Abstand zwischen FR1 und RSE
TFrD2	Abstand zwischen FL1 und RSE
TFrD3	Abstand zwischen FR2 und RSE
TFrD4	Abstand zwischen FL2 und RSE

### *Winkelmessungen*

In Bezug zur RSE wurde der Winkel zwischen den Messpunkten der medialen Knochenpunkt des Eingangs des Foramen rotundum (FR1/FL1) zum Messpunkt der medialen Knochenkante des Ausgangs (FR2/FL2) vermessen und als TFrW1 für den Winkel der rechten Seite und TFrW2 für die linke Seite bezeichnet (s. Tab. 6). Die Winkelmessung erfolgte in der oben definierten Ebene und sind in Abbildung 4b visualisiert. Die Messung wurde mittels der integrierten Winkel-Funktion des RadiAnt DICOM Viewer (v4.6.9 ©) durchgeführt.

Tab. 6: Winkelmessungen des Foramen rotundum in der Transversalebene

Strecke	Definition
TFrW1	horizontaler Verlaufswinkel des Foramen rotundum in der PSEt1 zwischen den Messpunkten der medialen Knochenkante des Eingangs und Ausgangs der rechten Seite in Bezug zur RSE
TFrW2	horizontaler Verlaufswinkel des Foramen rotundum in der PSEt1 zwischen den Messpunkten der medialen Knochenkante des Eingangs und Ausgangs der linken Seite in Bezug zur RSE

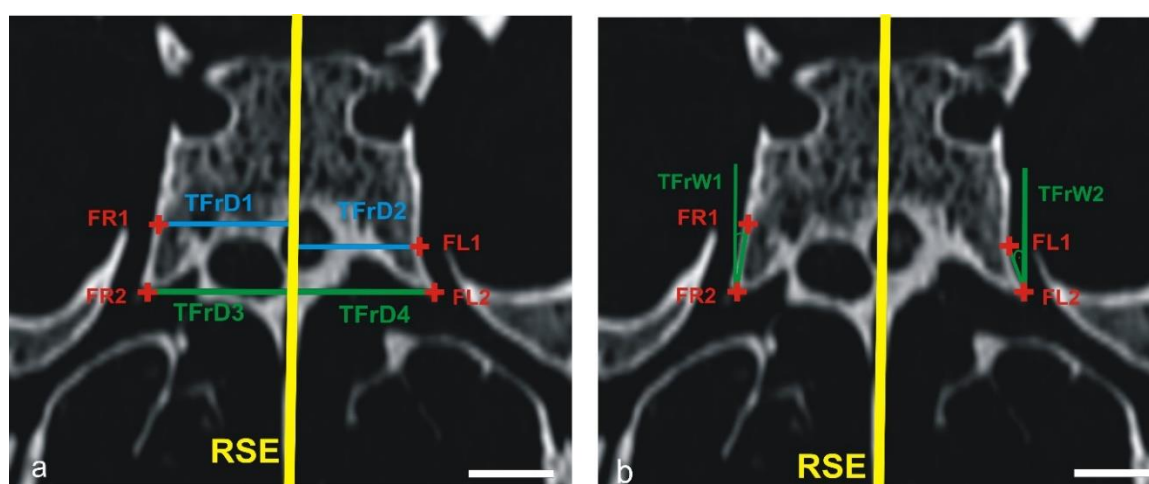


Abb. 4: Axiale CT-Aufnahme in der nach kranial verschobenen Prosthion-Spina-Ebene durch den am weitesten medial gelegenen Knochenpunkt am Ausgang des rechten Foramen rotundum (FR2). **a**: Messpunkte und –strecken in der Transversalebene. **b**: Winkelmaße in der Transversalebene zwischen der medialen Knochenkante des Eingangs und Ausgangs in Bezug zur Rostrum-Sphenoidal-Ebene. RSE: Rostrum-Sphenoidal-Ebene; FR1: Messpunkt Eingang des Foramen rotundum der rechten Seite; FR2: Messpunkt Ausgang des Foramen rotundum der rechten Seite; FR3: Messpunkt rostralster Knochenpunkt der rechten Seite; FL1: Messpunkt Eingang des Foramen rotundum der linken Seite; FL2: Messpunkt Ausgang des Foramen rotundum der linken Seite; FL3: Messpunkt rostralster Knochenpunkt der linken Seite; TFrD1: Abstand FR1 zur RSE; TFrD2: Abstand FL1 zur RSE; TFrD3: Abstand FR2 zur RSE; TFrD4: Abstand FL2 zur RSE; TFW1: Winkel zwischen der medialen Knochenkante des rechten Eingangs und Ausgangs im Bezug zur RSE; TFW2 - Winkel zwischen der medialen Knochenkante des linken Eingangs und Ausgangs im Bezug zur RSE. Balken: 1 cm

### 3.2.3.3. Messung in der Sagittalebene

#### *Streckenmessungen*

Für diese Messung wurde mittels der 3D-MPR-Funktion von RadiAnt die RSE nach lateral durch die am weitesten kaudal liegende Knochenkante des jeweiligen Foramen rotundum verschoben und als RSEa bezeichnet (s. Abb. 5). Für die Vermessung dienten als Messpunkte die am weitesten kaudal liegenden Knochenpunkte des Eingangs und Ausgangs des Foramen rotundum. Die Messpunkte und Messstrecken sind in Tabelle 6 zusammengefasst und in der Abbildung 6a visualisiert.

Tab. 7: Übersicht der Messpunkte und Strecken des Foramen rotundum in der Sagittalebene

Messpunkt/Strecke	Definition
FR4	Messpunkt an der kaudalen Knochenkante am Eingang des rechten Foramen rotundum
FR5	Messpunkt an der kaudalen Knochenkante am Ausgang des rechten Foramen rotundum
FL4	Messpunkt an der kaudalen Knochenkante am Eingang des linken Foramen rotundum
FL5	Messpunkt an der kaudalen Knochenkante am Ausgang des linken Foramen rotundum
SFrL1	Abstand zwischen FR4 und FR5
SFrL2	Abstand zwischen FL4 und FL5

#### *Winkelmessungen*

Da sich das Foramen rotundum in der oben definierten sagittalen Schichtaufnahme (s. Abb. 5) als Knochenkanal darstellte, wurde die Ausrichtung des Foramen rotundum zur Prosthion-Spina-Ebene als Winkel vermessen (s. Tab. 8, Abb. 6b). Die Messung wurde mittels der integrierten Winkel-Funktion des RadiAnt DICOM Viewer (v4.6.9 ©) durchgeführt.

Tab. 8: Winkelmessungen des Foramen rotundum in der Sagittalebene

Strecke	Definition
SFrW1	vertikaler Verlaufswinkel des rechten Foramen rotundum zwischen den Messpunkten der kaudalen Knochenkanten des Eingangs und Ausgangs im Bezug zur PSE
SFrW2	vertikaler Verlaufswinkel des linken Foramen rotundum zwischen den Messpunkten der kaudalen Knochenkanten des Eingangs und Ausgangs im Bezug zur PSE

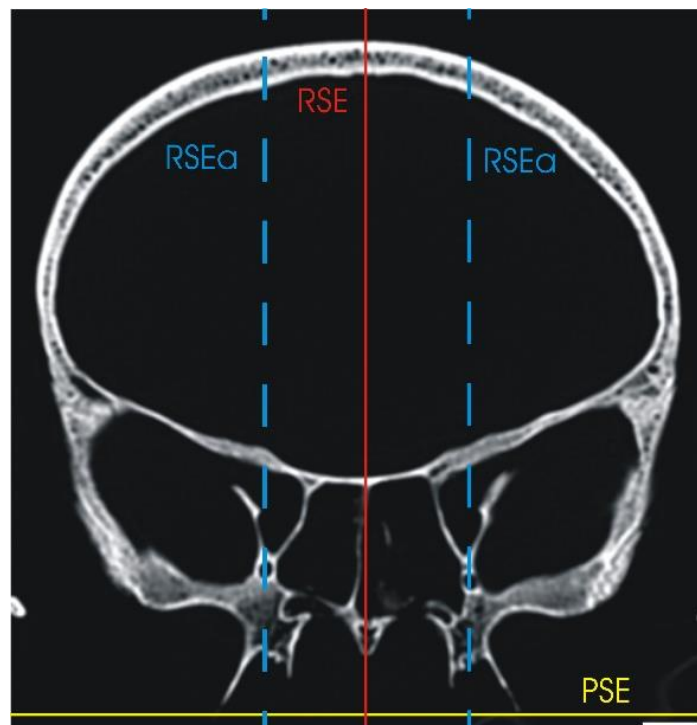


Abb. 5: Koronare CT-Schnittaufnahme mit der beidseits nach lateral parallelverschobenen Rostrum-Sphenoidal-Ebene (RSEa) durch das rechte bzw. linke Foramen rotundum. RSE: Rostrum-Sphenoidal-Ebene; PSE: Prosthion-Sphenoidal-Ebene; Balken: 1cm

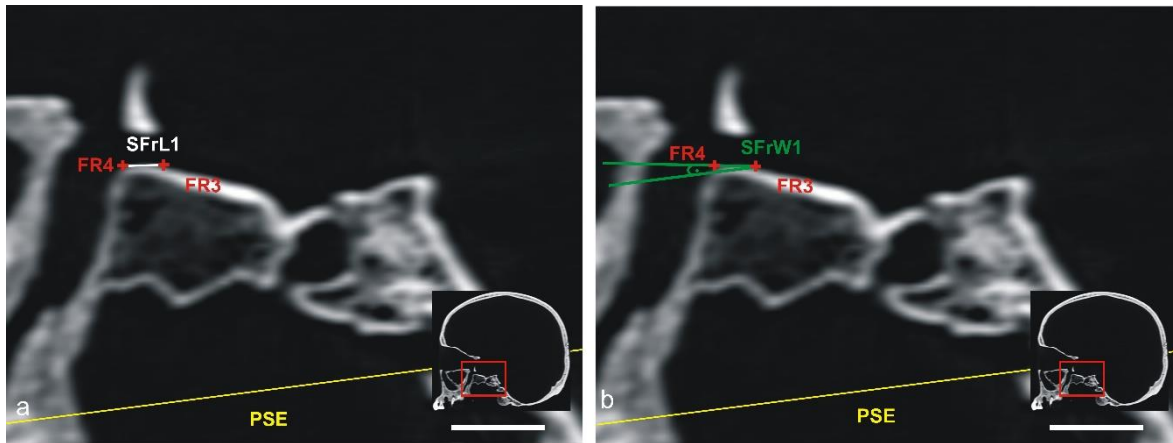


Abb. 6: Sagittale CT-Schnittebene in der Ebene RSEa des rechten Foramen rotundum (s. Abb. 5). Markiert sind die Messpunkte des Eingangs und Ausgangs sowie die Messstrecken zur PSE. **a:** Streckenmessung, definiert als Länge des Foramen rotundum. **b:** Winkelmessungen, definiert als sagittaler Verlauf des Foramen rotundum. FR3: Messpunkt an der kaudalen Knochenkante des Eingangs des Foramen rotundum; FR4: Messpunkt an der kaudalen Knochenkante des Ausgangs des Foramen rotundum; SFrL1: Abstand FR3 und FR4; SFrW1: Verlaufswinkels des rechten Foramen rotundum zwischen den Punkten FR3 und FR4; RSE: Rostrum-Sphenoidal-Ebene; PSE: Prosthion-Spina-Ebene; Balken: 1cm

#### 3.2.3.4. Gesichtsschädelmaße

Obgleich es sich bei den untersuchten Foramina um Strukturen der Schädelbasis handelt, versorgen die durch sie ziehenden Nerven und Gefäße hauptsächlich Strukturen des Gesichtsschädels. Deshalb erfolgte eine vergleichende Auswertung unter Berücksichtigung der Gesichtsschädelgröße. Dazu wurden folgende Maße erhoben: Schädelbasislänge (SBL), Gesichtsschädellänge (GSL), Obergesichtshöhe (OGH) und Mittelgesichtsbreite (MGB). Außerdem haben wir den Schädelbasisknickungswinkel (SBKW) bestimmt. In folgender Tabelle 9 sind die einzelnen Gesichtsschädelmaße definiert.



Tab. 9: Definition der Gesichtsschädelmaße

Maß	Definition
Schädelbasislänge (SBL)	Abstand zwischen Basion und Nasion
Gesichtsschädellänge (GSL)	Abstand zwischen Prosthion und Basion
Obergesichtshöhe (OGH)	Abstand zwischen Nasion und Prosthion
Mittelgesichtsbreite(MGB)	Abstand zwischen Zygomaxillare dexter und Zygomaxillare sinistra
Schädelbasisknickungswinkel (SBKW)	Winkel zwischen der Clivusebene und der Planum-Sphenoidal-Ebene

Die Daten der Gesichtsschädel der *Cebus apella*, *Alouatta*, *Colobus guereza*, *Pongo pongo* und der *Homo sapiens* aus Kyoto wurden von Herrn Prof. Dr. Th. Koppe (Institut für Anatomie und Zellbiologie der Universität Greifswald) zur Verfügung gestellt. Die entsprechenden Datensätze der Gesichtsschädelmaße der *Homo sapiens* der Population Alytus wurden der Arbeit von Herrn Dr. M. Bärenklau (2016) entnommen, die der Feuchtnasenprimaten entstammen der Arbeit von Frau Dr. S. Pfeleiderer (2014), die der Gibbons und *Gorilla gorilla* aus der Arbeit von Frau Dr. E. Nonnenmacher (2014) und die der *Pan troglodytes* aus der Arbeit von Frau Dr. B. Nommensen (2014).

#### 3.2.4. Biostatistische Auswertung

Grundlage der vorliegenden Arbeit bilden lineare Vermessungen von Schädeln verschiedener Primaten. Diese wurden zunächst auf Reproduzierbarkeit geprüft. Hierfür wurden fünf zufällig ausgewählte Schädel jeweils drei weitere Male vermessen. Um das Einprägen der Daten zu verhindern, wurde kein Schädel zweimal hintereinander gemessen. Anschließend wurden die Mittelwerte sowie die Standardabweichungen der Daten berechnet.

Auf Grund der großen Diversität der Gattungen erfolgte die statistische Analyse zunächst innerhalb der einzelnen Gruppen. Hier wurden mittels des Kolmogorov-Smirnov-Testes die Daten zunächst auf Normalverteilung geprüft. Das Geschlecht wurde nicht weiter berücksichtigt. Die Messungen aus der Familie *Pongo pygmaeus*

wurden lediglich innerhalb ihrer Gruppe analysiert und ausgewertet, da es sich hier zum Teil um juvenile Schädel handelt und diese das Ergebnis verfälschen würden. Sie wurden nicht in den direkten Vergleich mit den anderen Primatenspezies einbezogen.

Weiterhin wurden die Gesichtsschädelmaße mit den erhobenen Parametern des Foramen rotundum auf einen möglichen Zusammenhang zueinander geprüft. Hierzu wurde eine Korrelationsanalyse nach Pearson auf einem Signifikanzniveau von  $p < 0,05$  durchgeführt.

Außerdem wurde das Gesichtsschädelvolumen der einzelnen Primaten berechnet. Als Berechnungsgrundlage für das Gesichtsschädelvolumen dient die HERONische Formel (Bartsch 2007).

Formel 1: HERONische Formel

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

Formel 2: Definition von s in der HERONischen Formel

$$s = \frac{(a + b + c)}{2}$$

Formel 3: Formel für das Gesichtsschädelvolumen (GSV)

$$A = MGB * (\sqrt{s(s - SBL)(s - GSL)(s - OGH)})$$

Formel 4: Definition von s innerhalb der Berechnung des GSV

$$s = \frac{(SBL + GSL + OGH)}{2}$$

Mit Hilfe des errechneten Gesichtsschädelvolumens wurde zum besseren Vergleich der Größe des Foramen rotundum dessen Flächeninhalt in Relation zum Gesichtsschädelvolumen (GSV) gesetzt. Außerdem wurden die Längen des Foramen rotundum (FL) in Relation zur Schädelbasislänge (SBL) gesetzt. Hierfür wurden Indizes berechnet:

*Flächenindex des Foramen rotundum*

Index Fläche =  $CFRF \cdot 100 / GSV$

*Längenindex des Foramen rotundum*

Index Länge FR =  $SFR3 \cdot 100 / SBL$

Die Gesichtsschädelmaße und ausgewählte Parameter mit signifikanter Korrelation wurden auf mögliche Zusammenhänge geprüft. Hierfür wurde eine einfache lineare Regression durchgeführt. Ausgewählte Ergebnisse wurden in Streudiagrammen dargestellt.

Die Ergebnisse der biostatistischen Auswertung wurden innerhalb der einzelnen Gruppen verglichen. Hierfür wurden die menschlichen Schädel der Populationen aus Alytus und Kyoto als *Homo sapiens* zusammengefasst und nachfolgend mit den restlichen Primatengruppen verglichen.

Für ausgewählte Parameter wurden vergleichende Boxplots und Balkendiagramme angefertigt. Die biostatistische Auswertung wurde mit Hilfe des Programms Microsoft Excel 2016 ® durchgeführt.

## 4. Ergebnisse

### 4.1. Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

Die fünf zufällig ausgewählten Schädel wurden jeweils drei weitere Male vermessen. Hier ergaben die Streckenmessungen eine mittlere Abweichung von 0,25 mm vom Erwartungswert. Die beste Reproduzierbarkeit erzielten die Messungen des Abstands des Ausgangs des Foramen rotundum der rechten Seite zur Prosthion-Spina-Ebene (TFrD3) mit einer Abweichung von 0,17 mm. Das schlechteste Ergebnis zeigte sich bei der Streckenmessung der Länge des Foramen rotundum der rechten Seite (SFrL1) mit 0,48 mm

Die Winkelmessungen zeigten in der Untersuchung auf Reproduzierbarkeit eine mittlere Gesamtabweichung vom Erwartungswert von 1,95°. Die geringste Abweichung erzielte die Abweichung vom Erwartungswert des Anstiegswinkels des Foramen rotundum (SFrW1) mit 1,33°. Der Anstiegswinkel der linken Seite (SFrW2) verzeichnete mit 2,35° die größte Abweichung der Winkelmessungen.

### 4.2. Untersuchungsergebnisse am Foramen rotundum

#### 4.2.1. Altweltaffen (Catarrhini)

##### *Homo sapiens*

Das Foramen rotundum stellt einen Knochenkanal dar, der die Fossa cranii media mit der Fossa pterygopalatina verbindet. Am Boden der Fossa cranii media imponiert die Öffnung des Foramen rotundum als kleine, rundliche und schmale Öffnung innerhalb der Ala major des Os sphenoidale. Der Knochenkanal verläuft nach seinem Austritt aus der mittleren Schädelgrube unterhalb der kaudalen Spitze der Fissura orbitalis superior sowie lateral des unteren Drittels des Sinus sphenoidalis. Der Knochenkanal verläuft dabei in den meisten Fällen kaudo-medial der Orbita und mündet schließlich im oberen Bereich der Fossa pterygopalatina (s. Abb. 7, 8). Gemeinsam hatten alle untersuchten Schädel die latero-kraniale Lage zum Canalis pterygoideus (s. Abb. 9). Während seines Durchtritts durch das Os sphenoidale zeigte das Foramen rotundum in der überwiegenden Zahl der Schädel einen ansteigenden und lateral gerichteten Verlauf an, sodass der Ausgang des

Foramen rotundum in der Fossa pterygopalatina leicht kranio-lateral des Eingangs in der Fossa cranii media lag. In drei Fällen verlief das Foramen rotundum beidseits von lateral nach medial, in vier Fällen zeigte sich ein unterschiedlicher horizontaler Verlauf zwischen linker und rechter Seite. Hier verliefen die beiden Seiten entgegengesetzt zueinander. Die übrigen 13 Schädel wiesen einheitlich einen nach lateral verlaufendes Foramen rotundum auf. Die Größe der eingenommenen Fläche der Öffnung schwankte von Schädel zu Schädel unterschiedlich stark. Die Ergebnisse der Strecken- und Winkelmessungen sind in Tabelle 10 und 11 dargestellt. Der typische Verlauf sowie die klassischen Lagebeziehungen wurden in den Abbildungen 7 bis 10 dargestellt.

Tab. 10: Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Standardabweichungen der Streckenmessungen des Foramen rotundum der *Homo sapiens*

	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
FA	20	3,1	11,5	7,76	2,04
TFrD1/2	20	12,5	20,8	16,80	1,94
TFrD3/4	20	11,9	20,8	17,57	1,83
FL	20	3,3	8,0	5,53	1,18

Die *Homo sapiens* Populationen Alytus und Kyoto wurden zusammengefasst. Die Messwerte der rechten und linken Seite wurden zusammengefasst. FA: FAR und FAL zusammen betrachtet; TFrD1/2: TFrD1 und TFrD2 zusammen betrachtet; TFrD3/4: TFrD3 und TFrD4 zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; Maßeinheiten in mm und mm<sup>2</sup>. N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung

Tab. 11: Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Standardabweichungen der Winkelmessungen des Foramen rotundum der *Homo sapiens*

	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
TFrW	20	-25,5	10,8	-6,62	10,04
SFrW	20	-39,4	2,5	-16,11	10,72

Die Populationen Alytus und Kyoto wurden zusammen betrachtet. Die Messwerte der rechten und linken Seite wurden zusammengefasst. Die negativen Winkelangaben zeigen an, dass sich der Kanal in der jeweiligen Raumbene von der hier definierten Messebene entfernt. Entsprechend zeigen positive Werte einen zur Messebene gerichteten Verlauf des Foramens. Maßeinheiten in Grad. TFrW: TFrW1 und TFrW2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung

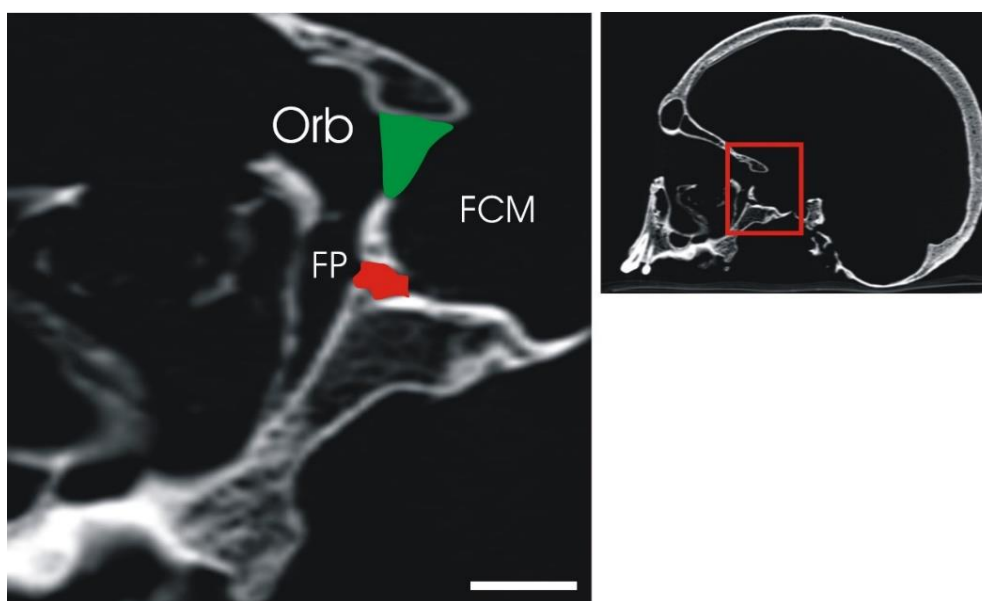


Abb. 7: Sagittale CT-Schichtaufnahme durch die Fossa pterygopalatina mit Darstellung des rechten Foramen rotundum (rot) eines menschlichen Schädels der Population aus Alytus. Beachte den typischen ansteigenden Verlauf. Grün: Fissura orbitalis superior; Orb: Orbita; FP: Fossa pterygopalatina; FCM: Fossa cranii media. Das Inset rechts zeigt die Position des Bildausschnittes. Balken: 1cm

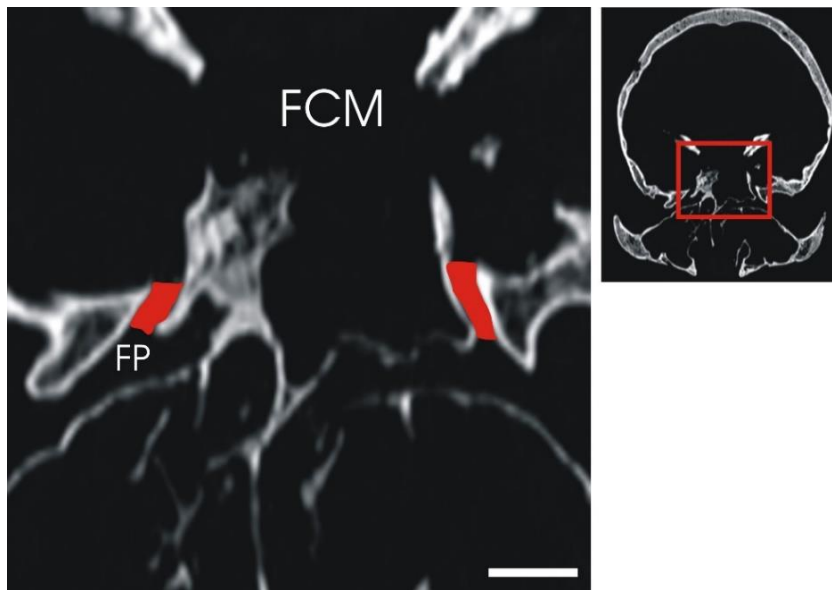


Abb. 8: Axiale CT-Schichtaufnahme eines menschlichen Schädels der Population aus Alytus in Höhe des Foramen rotundum. Das Inset rechts zeigt die Position des Bildausschnittes. Beachte den typischen Verlauf des Foramens. FP: Fossa pterygopalatina; FCM: Fossa cranii media; Balken: 1cm

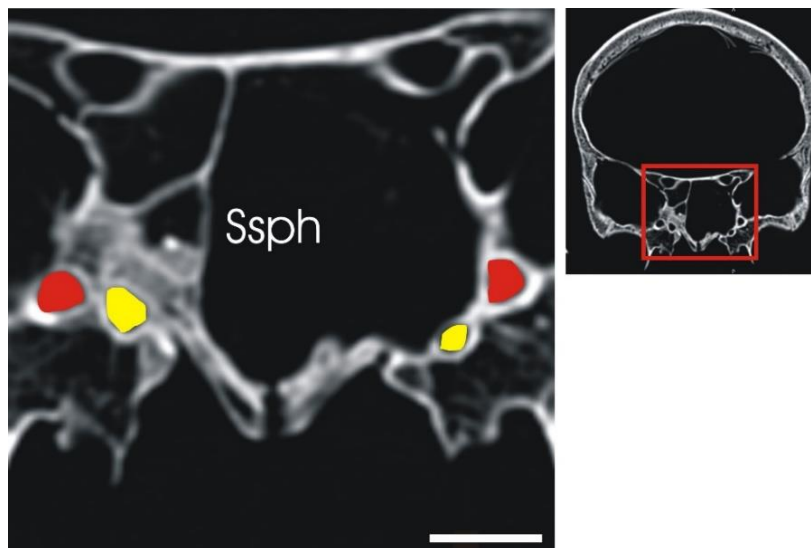


Abb. 9: Koronare CT-Schichtaufnahme eines menschlichen Schädels der Population aus Alytus. Beachte die typische latero-kraniale Lagebeziehung des Foramen rotundum (rot) zum Canalis pterygoideus (gelb) sowie dessen Lagen zum Sinus sphenoidalis (Ssph). Das Inset rechts zeigt die Position des Bildausschnittes. Balken: 1cm

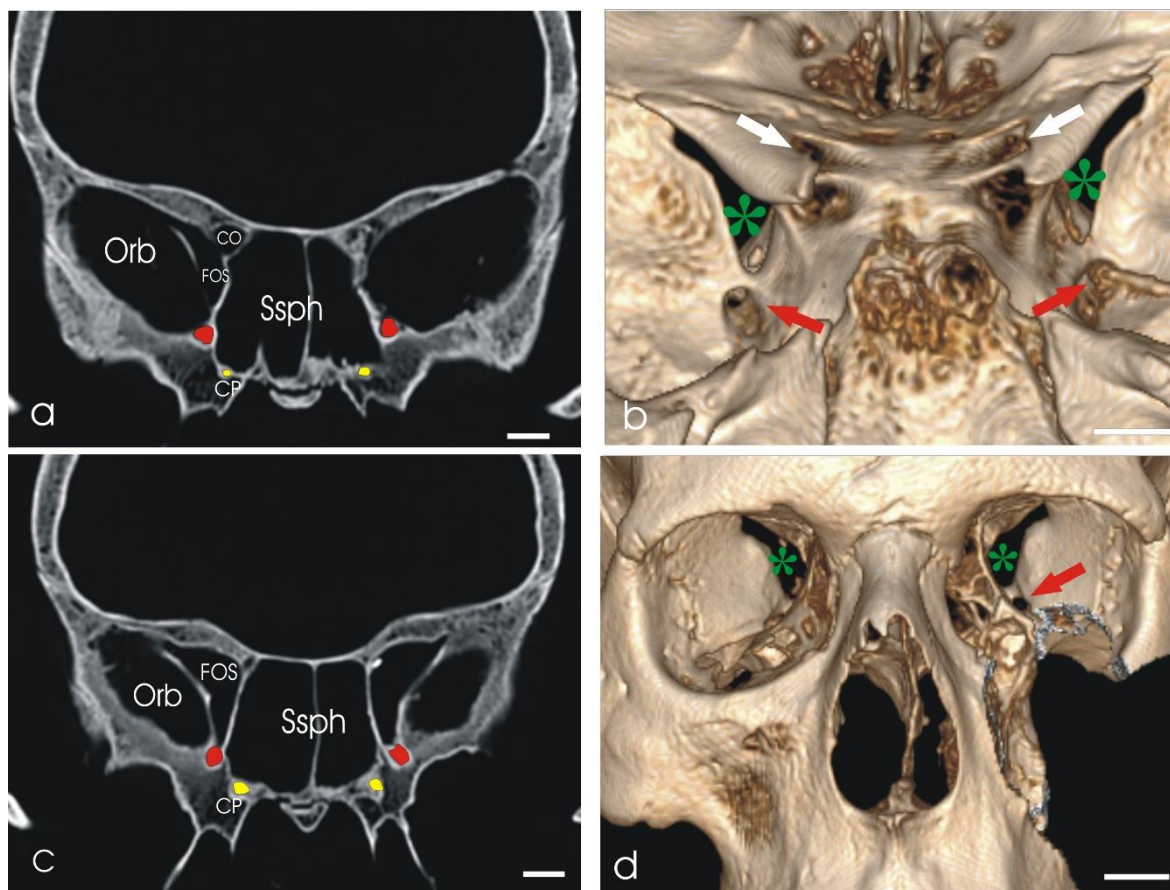


Abb. 10: Koronare CT-Schichtaufnahmen (a, c) sowie 3D Rekonstruktionen (b, d) eines menschlichen Schädels der Population aus Alytus. **a**: CT-Schichtaufnahme in Höhe der Basis des Processus pterygoideus mit Darstellung des Eingangs des Foramen rotundum an der Fossa cranii media (rot) und der Lagebeziehung zum Canalis pterygoideus (gelb). **b**: 3D Rekonstruktion der Fossa cranii media mit Darstellung des Eingangs in das Foramen rotundum (roter Pfeil) und Lagebeziehung zur Fissura orbitalis superior (grüner Asterisk) und Canalis opticus (weißer Pfeil). **c**: CT-Schichtaufnahme in Höhe des Ausgangs des Foramen rotundums (rot) in die Fossa pterygopalatina mit Lagebeziehung zum Canalis pterygoideus (gelb). **d**: 3D Rekonstruktion mit eröffneter linker Fossa pterygopalatina mit Darstellung des Ausgangs des Foramen rotundum (roter Pfeil) und Lagebeziehung zur Fissura orbitalis superior (grüner Asterisk). Orb: Orbita; CO: Canalis opticus; FOS: Fissura orbitalis superior; Ssph: Sinus sphenoidalis; CP: Canalis pterygoideus; Balken: 1cm



*Pan troglodytes*

Die hier untersuchten Schimpansen sollen im Folgenden als Vergleichsgruppe für die anderen untersuchten *Catarrhini* dienen. Folglich werden nur die Unterschiede der Altweltaffen zum Schimpansen erläutert.

Das Foramen rotundum der Schimpansen zeigte sich als rundliche Öffnung. Es begann in der Fossa cranii media und zog durch die Ala major des Os sphenoidale zum oberen hinteren Pol der Fossa pterygopalatina. Der Kanal verlief in enger Nachbarschaftsbeziehung zum Sinus sphenoidalis. Auf Grund der starken Pneumatisation durch den Sinus sphenoidalis umschloss es das Foramen an der lateralen, medialen und kaudalen Knochenkante. Weiterhin bestand eine enge Lagebeziehung zur kranial des Kanals liegenden Fissura orbitalis superior und zur kranio-lateral gelegenen Orbita. Der Canalis pterygoideus konnte bei 3 von 7 Schädeln dargestellt werden und befand sich hier einheitlich medial des Foramen rotundum. Während seines Durchtritts durch das Os sphenoidale stellte sich das Foramen ausgehend von der Fossa cranii media als ein leicht nach lateral gerichteter und gering beidseits ansteigender Kanal dar.

Die Ergebnisse der Strecken- und Winkelmessungen für *Pan troglodytes* sind in den Tabellen 12 und 13 zusammengefasst. Der typische Verlauf des Foramen rotundum sowie seine Nachbarschaftsbeziehungen wurden in den Abbildungen 11 a-c grafisch dargestellt.

Tab. 12: Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Standardabweichungen der Streckenmessungen des Foramen rotundum von *Pan troglodytes*

	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
FA	7	1,6	10,1	5,7	2,92
TFrD1/2	7	8,7	14,7	11,8	1,9
TFrD3/4	7	10,9	14,3	12,5	1,16
FL	7	3,7	9,4	5,9	1,79

Die Messwerte der rechten und linken Seite wurden zusammengefasst. Maßeinheiten in mm und mm<sup>2</sup>. FA: FAR und FAL zusammenbetrachtet; TFrD1/2: TFrD1 und TFrD2 zusammen betrachtet; TFrD3/4: TFrD3 und TFrD4 zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; Maßeinheiten in mm und mm<sup>2</sup>. N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung; N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung

Tab. 13: Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Standardabweichungen der Winkelmessungen des Foramen rotundum von *Pan troglodytes*

	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
TFrW	7	-26,8	21,6	-2,6	13,98
SFrW	7	-25,1	3,9	-5,8	10,31

Die Messwerte der rechten und linken Seite wurden zusammengefasst. Die negativen Winkelangaben zeigen an, dass sich der Kanal in der jeweiligen Raumebene von der hier definierten Messebene entfernt. Entsprechend zeigen positive Werte einen zur Messebene gerichteten Verlauf des Foramens. Maßeinheiten in Grad. TFrW: TFrW1 und TFrW2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung;

*Gorilla gorilla*

Der Verlauf sowie die Lagebeziehungen des Foramen rotundum bei *Gorilla gorilla* ähnelte denen von *Pan troglodytes*. Lediglich der Canalis pterygoideus konnte bei den untersuchten Gorillaschädeln nicht zweifelsfrei aufgefunden werden, sodass hier keine Angaben zur Lagebeziehung zum Foramen rotundum gemacht werden können.

Die Ergebnisse der Strecken- und Winkelmessungen sind in den Tabellen 14 und 15 zusammengefasst. Der typische Verlauf des Foramen rotundum sowie seine Nachbarschaftsbeziehungen wurden in den Abbildungen 11 d-f grafisch dargestellt.

Tab. 14: Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Standardabweichungen der Streckenmessungen des Foramen rotundum bei *Gorilla gorilla*

	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
FA	4	2,9	8,8	5,6	2,25
TFrD1/2	4	14,9	19,1	15,9	1,43
TFrD3/4	4	15,1	20,0	17,2	1,67
FL	4	8,7	16,1	13,5	2,61

Die Messwerte der rechten und linken Seite wurden zusammengefasst. Maßeinheiten in mm und mm<sup>2</sup>. FA: FAR und FAL zusammenbetrachtet; TFrD1/2: TFrD1 und TFrD2 zusammen betrachtet; TFrD3/4: TFrD3 und TFrD4 zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; Maßeinheiten in mm und mm<sup>2</sup>. N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung

Tab. 15: Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Standardabweichungen der Winkelmessungen des Foramen rotundum bei *Gorilla gorilla*

	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
TFrW	4	-10,0	-1,1	-5,6	3,37
SFrW	4	-11,1	2,7	-2,0	5,6

Die Messwerte der rechten und linken Seite wurden zusammengefasst. Die negativen Winkelangaben zeigen an, dass sich der Kanal in der jeweiligen Raumebene von der hier definierten Messebene entfernt. Entsprechend zeigen positive Werte einen zur Messebene gerichteten Verlauf des Foramens. Maßeinheiten in Grad. TFrW: TFrW1 und TFrW2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung

#### *Hylobatidae (Gibbon)*

Im Gegensatz zu *Pan troglodytes* verlief das Foramen rotundum der untersuchten Gibbonschädel unmittelbar lateral des Sinus sphenoidalis. Der Kanal lag kaudal der Fissura orbitalis superior sowie kaudo-occipital der Orbita. Der horizontale Verlauf des Foramen rotundum unterschied sich in den untersuchten Schädeln stark voneinander. Während der Schädel des *Hylobates agilis* einen leicht nach medial gerichteten Verlauf aufwies, zeigte der Schädel des *Hylobates lar* einen entgegengesetzten Verlauf zwischen rechter und linker Seite. Im Gegensatz dazu konnte bei *Symphalangus* ein nach lateral gerichteter Verlauf beobachtet werden. Auffällig war die Lagebeziehung zum Canalis pterygoideus. Zwar konnte nur beim *Symphalangus* ein Canalis pterygoideus zweifelsfrei identifiziert werden, dieser lag jedoch deutlich lateraler des Foramen rotundum und unterschied sich somit von den anderen untersuchten Altweltaffenspezies.

Die Ergebnisse der Strecken- und Winkelmessungen sind in den Tabellen 16 und 17 zusammengefasst. Der typische Verlauf des Foramen rotundum sowie seine Nachbarschaftsbeziehungen wurden in den Abbildungen 11 g-i grafisch dargestellt.

Tab. 16: Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Standardabweichungen der Streckenmessungen des Foramen rotundum der *Hylobatidae*

	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
FA	3	1,8	4,5	3,1	1,19
TFrD1/2	3	6,2	8,9	7,4	1,06
TFrD3/4	3	6,1	9,3	7,5	1,27
FL	3	2,0	3,3	2,6	0,55

Die Messwerte der rechten und linken Seite wurden zusammengefasst. FA: FAR und FAL zusammenbetrachtet; TFrD1/2: TFrD1 und TFrD2 zusammen betrachtet; TFrD3/4: TFrD3 und TFrD4 zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; Maßeinheiten in mm und mm<sup>2</sup>. N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung

Tab. 17: Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Standardabweichungen der Winkelmessungen des Foramen rotundum der *Hylobatidae*

	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
TFrW	3	-7,5	20,6	1,7	10,11
SFrW	3	-6,5	5,2	-1,7	4,14

Die Messwerte der rechten und linken Seite wurden zusammengefasst. Die negativen Winkelangaben zeigen an, dass sich der Kanal in der jeweiligen Raumbene von der hier definierten Messebene entfernt. Entsprechend zeigen positive Werte einen zur Messebene gerichteten Verlauf des Foramens. Maßeinheiten in Grad. TFrW: TFrW1 und TFrW2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung

*Colobus guereza*

Im Gegensatz zu den *Schimpansen* verlief das Foramen rotundum der untersuchten Mantelaffen unmittelbar lateral des Sinus sphenoidalis. Der Kanal lag dabei kaudal der Fissura orbitalis superior sowie kaudo-occipital der Orbita. Ein Colobusschädel zeigte einen zur Prosthion-Spina-Ebene nach vorn abfallenden Verlauf. Fünf Schädel zeigten einen entgegengesetzten Verlauf zwischen linker und rechter Seite. Der horizontale Verlauf war bei sieben der untersuchten Schädel leicht nach medial gerichtet. Zwei der untersuchten Colobusschädel zeigten einen entgegengesetzten Verlauf zwischen rechter und linker Seite. Die restlichen sechs Schädel der *Colobus* zeigten einen nach lateral gerichteten Verlauf des Foramen rotundum. Auffällig war die Lagebeziehung zum Canalis pterygoideus, da dieser deutlich lateraler zum Foramen rotundum lag.

Die Ergebnisse der Strecken- und Winkelmessungen sind in den Tabellen 18 und 19 zusammengefasst. Der typische Verlauf des Foramen rotundum sowie seine Nachbarschaftsbeziehungen wurden in den Abbildungen 12 a-c grafisch dargestellt.

Tab. 18: Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Standardabweichungen der Streckenmessungen des Foramen rotundum von *Colobus guereza*.

	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
FA	15	0,8	3,1	1,4	0,55
TFrD1/2	15	3,2	6,9	4,7	0,89
TFrD3/4	15	3,3	5,8	4,6	0,64
FL	15	1,5	6,8	3,7	1,27

Die Messwerte der rechten und linken Seite wurden zusammengefasst. FA: FAR und FAL zusammen betrachtet; TFrD1/2: TFrD1 und TFrD2 zusammen betrachtet; TFrD3/4: TFrD3 und TFrD4 zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; Maßeinheiten in mm und mm<sup>2</sup>. N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung

Tab. 19: Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Standardabweichungen der Winkelmessungen des Foramen rotundum von *Colobus guereza*.

	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
TFrW	15	-11,1	10,9	0,1	6,23
SFrW	15	-11,9	4,1	-3,0	3,96

Die Messwerte der rechten und linken Seite wurden zusammengefasst. Die negativen Winkelangaben zeigen an, dass sich der Kanal in der jeweiligen Raumbene von der hier definierten Messebene entfernt. Entsprechend zeigen positive Werte einen zur Messebene gerichteten Verlauf des Foramens. Maßeinheiten in Grad. TFrW: TFrW1 und TFrW2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung

### *Pongo pygmaeus*

Da es sich bei den Schädeln der *Pongo pygmaeus* teilweise um juvenile Exemplare handelte, sollen diese hier zwar mit aufgeführt, jedoch nicht in Vergleich zu den anderen Primaten gestellt werden.

Das Foramen rotundum imponierte bei den untersuchten Orang-Schädeln als ebenfalls rundlicher Kanal und verband die Fossa cranii media mit dem oberen hinteren Pol der Fossa pterygopalatina. Es verlief mit einem leichten Anstieg in Bezug zur Prosthion-Spina-Ebene durch das Os sphenoidale. Von seinem Eingang in der Fossa cranii media bis zu seinem Ausgang in der Fossa pterygopalatina wich der Kanal leicht nach lateral ab. Das Foramen rotundum lag kranio-lateral des Canalis pterygoideus, lateral des Sinus sphenoidalis und kaudo-lateral der Fissura orbitalis superior sowie kaudo-occipital der Orbita .

Die Ergebnisse der Strecken- und Winkelmessungen sind in den Tabellen 20 und 21 zusammengefasst. Der typische Verlauf des Foramen rotundum sowie seine Nachbarschaftsbeziehungen wurden in den Abbildungen 12 d-f grafisch dargestellt.

Tab. 20: Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Standardabweichungen der Streckenmessungen des Foramen rotundum von *Pongo pygmaeus*

	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
FA	10	3,7	21,8	8,3	5,08
TFrD1/2	10	9,1	15,0	12,4	1,40
TFrD3/4	10	8,8	14,3	12,0	1,35
FL	10	2,5	7,3	4,5	1,4

Die Messwerte der rechten und linken Seite wurden zusammengefasst. FA: FAR und FAL zusammenbetrachtet; TFrD1/2: TFrD1 und TFrD2 zusammen betrachtet; TFrD3/4: TFrD3 und TFrD4 zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; Maßeinheiten in mm und mm<sup>2</sup>. N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung

Tab. 21: Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Standardabweichungen der Winkelmessungen des Foramen rotundum von *Pongo pygmaeus*

	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
TFrW	10	-7,2	13,6	4,7	5,76
SFrW	10	-24,2	7,9	-5,3	9,22

Die Messwerte der rechten und linken Seite wurden zusammengefasst. Die negativen Winkelangaben zeigen an, dass sich der Kanal in der jeweiligen Raumbene von der hier definierten Messebene entfernt. Entsprechend zeigen positive Werte einen zur Messebene gerichteten Verlauf des Foramens. Maßeinheiten in Grad. TFrW: TFrW1 und TFrW2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung



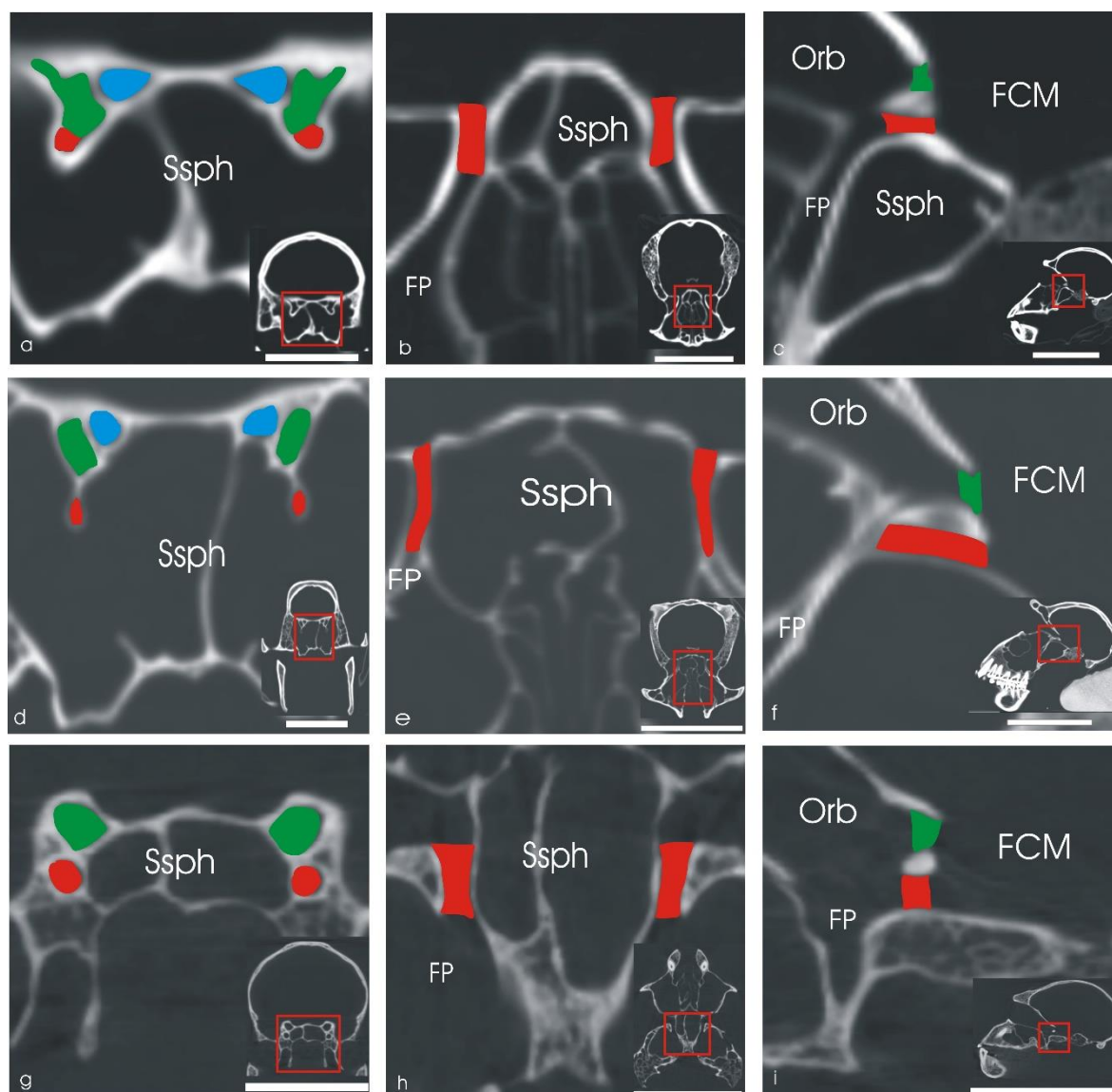


Abb. 11: CT-Schichtaufnahmen ausgewählter Schädel der einzelnen Altweltaffenspezies auf Höhe des Foramen rotundum (rot). Man beachte die typischen Lagebeziehungen und Verläufe der einzelnen Spezies. Erste Spalte (**a,d,g**) zeigt koronare CT-Schichtaufnahmen. Zweite Spalte (**b,e,h**) zeigt transversale CT-Schichtaufnahmen. Dritte Spalte (**c,f,i**) zeigt sagittale CT-Schichtaufnahmen. **a – c**: *Pan troglodytes*; **d – f**: *Gorilla gorilla*; **g – i**: *Gibbon Symphalangus*; Ssph: Sinus sphenoidalis; FP: Fossa pterygopalatina FCM: Fossa cranii media; Orb: Orbita; grün: Fissura orbitalis superior; blau: Canalis opticus, gelb: Canalis pterygoideus, Das Inset rechts unten im jeweiligen Bild zeigt die Position des Bildausschnittes. Balkenlänge: 1cm

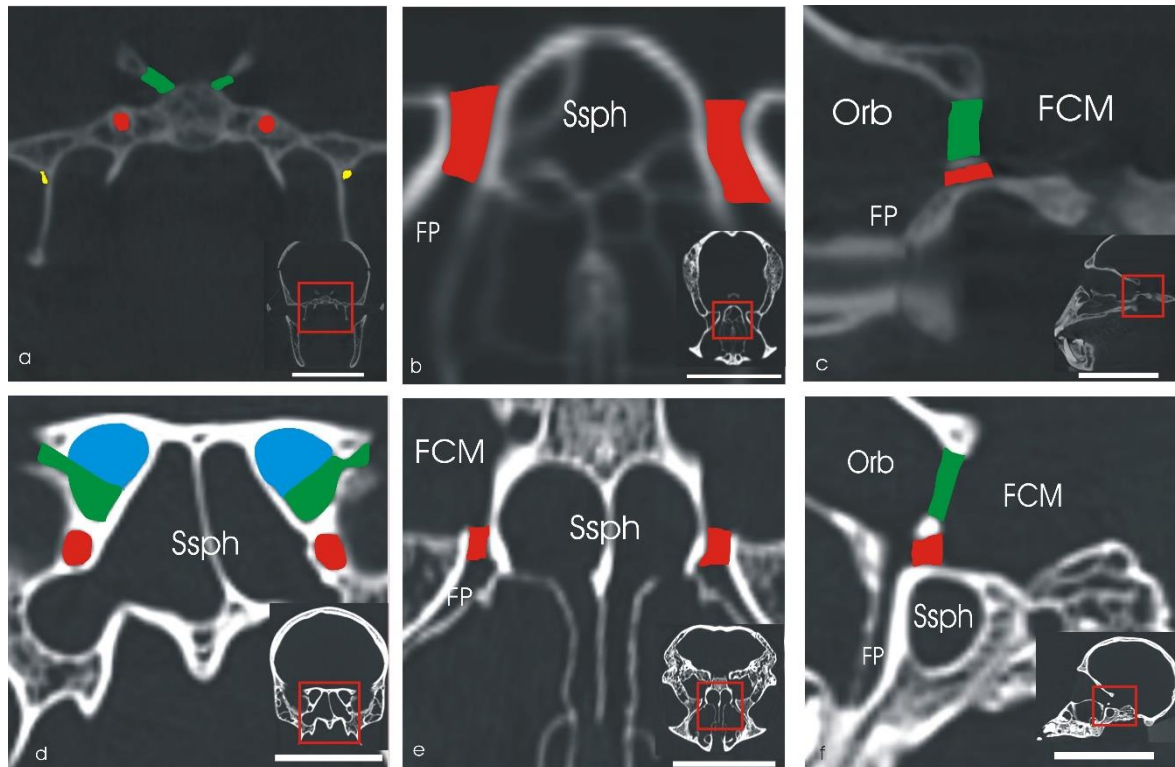


Abb. 12: CT-Schichtaufnahmen ausgewählter Schädel der einzelnen Altweltaffenspezies auf Höhe des Foramen rotundum (rot). Man beachte die typischen Lagebeziehungen und Verläufe der einzelnen Spezies. Erste Spalte (**a,d**) zeigt koronare CT-Schichtaufnahmen. Zweite Spalte (**b,e**) zeigt transversale CT-Schichtaufnahmen. Dritte Spalte (**c,f**) zeigt sagittale CT-Schichtaufnahmen. **a – c**: *Colobus guereza*; **d – f**: *Pongo pygmaeus*; Ssph: Sinus Sphenoidalis; FP: Fossa pterygopalatina FCM: Fossa cranii media; Orb: Orbita; grün: Fissura orbitalis superior; blau: Canalis opticus, gelb: Canalis pterygoideus. Das Inset rechts unten im jeweiligen Bild zeigt die Position des Bildausschnittes. Balkenlänge: 1cm

#### 4.2.2. Neuweltaffen (Platyrrhini)

##### *Cebus apella*

Das Foramen rotundum imponierte als rundlicher Kanal innerhalb der Ala major des Os sphenoidale. Es befand sich stets lateral des Sinus sphenoidalis und kaudal der Fissura orbitalis superior. Das Foramen verband als Kanal die Fossa cranii media mit dem hinteren oberen Pol der Fossa pterygopalatina. Auffällig ist die Lagebeziehung zum Canalis pterygoideus, da dieser weit kaudo-lateral des

Foramen rotundum zu finden war. Während des Durchtritts durch das Os sphenoidalis stellte sich der Kanal in zwei Schädel mit einem beidseits nach lateral gerichteten Verlauf dar, die anderen zwei Schädel zeigten beidseits einen medial gerichteten Verlauf. Weiterhin wiesen drei der vier untersuchten Schädel einen leicht ansteigenden Verlauf auf. Lediglich ein Schädel zeigte Seitenunterschiede. Während der Kanal hier auf der rechten Seite nach vorn ansteigt, fällt er links minimal ab.

Die Ergebnisse der Strecken- und Winkelmessungen sind in den Tabellen 22 und 23 zusammengefasst. Der typische Verlauf des Foramen rotundum sowie seine Nachbarschaftsbeziehungen wurden in den Abbildungen 13 a-c grafisch dargestellt.

Tab. 22: Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Standardabweichungen der Streckenmessungen des Foramen rotundum von *Cebus apella*

	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
FA	4	4,2	5,9	5,1	0,57
TFrD1/2	4	4,8	5,8	5,2	0,41
TFrD3/4	4	4,5	6,2	5,2	0,5
FL	4	3,7	7,8	5,3	1,48

Die Messwerte der rechten und linken Seite wurden zusammengefasst. FA: FAR und FAL zusammenbetrachtet; TFrD1/2: TFrD1 und TFrD2 zusammen betrachtet; TFrD3/4: TFrD3 und TFrD4 zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; Maßeinheiten in mm und mm<sup>2</sup>. N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung

Tab. 23: Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Standardabweichungen der Winkelmessungen des Foramen rotundum von *Cebus apella*

	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
TFrW	4	-3,1	8,6	-1,0	8,69
SFrW	4	-11,1	0,3	-9,6	4,39

Die Messwerte der rechten und linken Seite wurden zusammengefasst. Die negativen Winkelangaben zeigen an, dass sich der Kanal in der jeweiligen Raumbene von der hier definierten Messebene entfernt. Entsprechend zeigen positive Werte einen zur Messebene gerichteten Verlauf des Foramens. Maßeinheiten in Grad. TFrW: TFrW1 und TFrW2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung

### *Alouatta*

Das Foramen rotundum imponierte als rundlicher Kanal innerhalb der Ala major des Os sphenoidale und verband die Fossa cranii media mit der Fossa pterygopalatina. Ausgehend von der mittleren Schädelgrube stellte sich das Foramen als nach lateral gerichteter und leicht abfallender Kanal dar. Einer der untersuchten Schädel zeigte einen beidseits aufsteigenden Verlauf. Bei keinem der untersuchten *Alouatta* war ein Sinus sphenoidalis nachweisbar. Das Foramen rotundum verlief in unmittelbarer Nachbarschaft zur kranial liegenden Fissura orbitalis superior und Orbita. Da bei den *Alouatta* kein eindeutiger Canalis pterygoideus aufgefunden werden konnte, können keine Angaben zur Lagebeziehung zum Foramen rotundum getroffen werden.

Die Ergebnisse der Strecken- und Winkelmessungen sind in den Tabellen 24 und 25 zusammengefasst. Der typische Verlauf des Foramen rotundum sowie seine Nachbarschaftsbeziehungen wurden in den Abbildungen 13 d-f grafisch dargestellt.

Tab. 24: Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Standardabweichungen der Streckenmessungen des Foramen rotundum bei *Alouatta*

	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
FA	5	4,8	14,4	10,4	2,93
TFrD1/2	5	6,1	10,3	7,8	1,29
TFrD3/4	5	3,2	7,4	5,5	1,25
FL	5	6,4	11,4	7,6	1,76

Die Messwerte der rechten und linken Seite wurden zusammengefasst. FA: FAR und FAL zusammenbetrachtet; TFrD1/2: TFrD1 und TFrD2 zusammen betrachtet; TFrD3/4: TFrD3 und TFrD4 zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; Maßeinheiten in mm und mm<sup>2</sup>. N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung

Tab. 25: Minimal-, Maximal-, Mittelwerte und Standardabweichungen der Winkelmessungen des Foramen rotundum bei *Alouatta*.

	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
TFrW	5	0,0	26,1	13,9	8,33
SFrW	5	-19,9	24,4	10,4	16,26

Die Messwerte der rechten und linken Seite wurden zusammengefasst. Die negativen Winkelangaben zeigen an, dass sich der Kanal in der jeweiligen Raumbene von der hier definierten Messebene entfernt. Entsprechend zeigen positive Werte einen zur Messebene gerichteten Verlauf des Foramens. Maßeinheiten in Grad. TFrW: TFrW1 und TFrW2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung

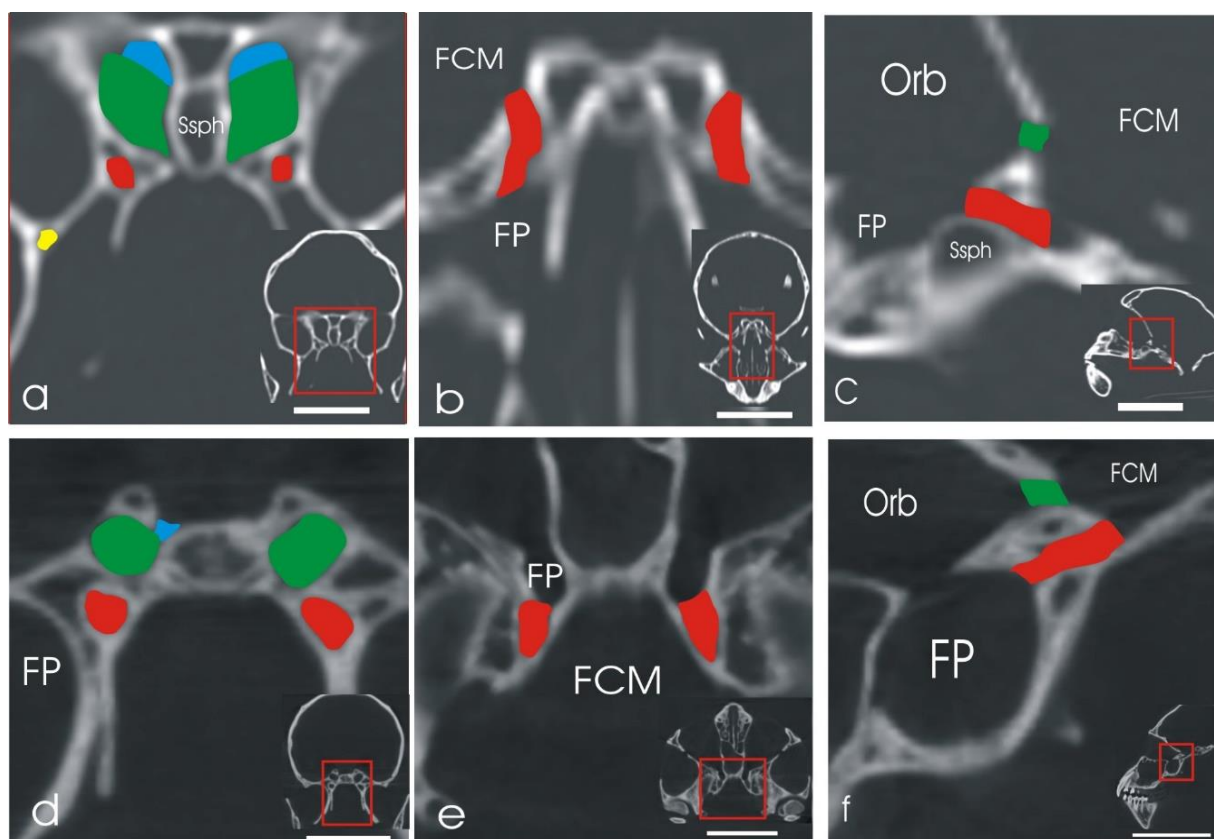


Abb. 13: CT-Schichtaufnahmen ausgewählter Schädel der Neuweltaffen auf Höhe des Foramen rotundum (rot). Man beachte die typischen Lagebeziehungen und Verläufe der Spezies. Erste Spalte (a,d) zeigt koronare CT-Schichtaufnahmen. Zweite Spalte (b,e) zeigt transversale CT-Schichtaufnahmen. Dritte Spalte (c,f) zeigt sagittale CT-Schichtaufnahmen. a – c: *Cebus apella*; d – f: *Alouatta*; Ssph: Sinus Sphenoidalis; FP: Fossa pterygopalatina FCM: Fossa cranii media; Orb: Orbita; grün: Fissura orbitalis superior; blau: Canalis opticus, gelb: Canalis pterygoideus. Das Inset rechts unten im jeweiligen Bild zeigt die Position des Bildausschnittes. Balkenlänge: 1cm

#### 4.2.3. Feuchtnasenaffen (Strepsirrhini)

Im Folgenden werden die untersuchten Schädel der verschiedenen Gattungen der *Strepsirrhini* vereinfacht in ihre Infraordnungen der *Loriformes* und *Lemuriformes* zusammengefasst und ausgewertet. Bezüglich der Lagebeziehung zum Canalis pterygoideus konnte keine Aussage getroffen werden, da dieser in keinem der untersuchten CT-Aufnahmen zweifelsfrei identifiziert werden konnte.

Das Foramen rotundum zeigte sich bei allen *Strepsirrhini* als kleine, rundliche Öffnung innerhalb des Os sphenoidale. Es befand sich kaudal der Fissura orbitalis superior und kaudo-lateral des Sinus sphenoidalis. Als Besonderheit der *Loriformes* verlief das Foramen rotundum entlang der medialen Seitenwand der Fissura orbitalis superior und schien mit dieser direkt zu kommunizieren, bevor es in die Hinterwand der Fossa pterygopalatina mündete. Während das Foramen rotundum durch das Os sphenoidale zog, entfernte es sich im Verlauf bei beiden untersuchten Infraordnungen der Feuchtnasenprimaten von der Rostrum-Sphenoidal-Ebene. Somit befand sich seine Öffnung in der Fossa cranii media medialer als sein Ausgang in die Fossa pterygopalatina. Weiterhin nahm es gleichzeitig einen ansteigenden Verlauf an und entfernt sich somit von der Prosthion-Spina-Ebene. Dieser Anstieg war bei den *Loriformes* deutlich steiler ausgeprägt als bei den *Lemuriformes*.

Die Ergebnisse der Strecken- und Winkelmessungen sind in den Tabellen 26 und 27 zusammengefasst. Der typische Verlauf des Foramen rotundum sowie seine Nachbarschaftsbeziehungen wurden in den Abbildungen 14 grafisch dargestellt.

Tab. 26: Mittelwerte der Streckenmessungen des Foramen rotundum der *Lemuriformes* und *Loriformes*

	Lemuriformes					Loriformes				
	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
FA	19	0,4	8,1	3,5	1,9	6	0,3	7,2	3,6	3,1
TFrD1/2	19	2,4	6,5	4,3	1,4	6	1,5	3,2	2,2	0,6
TFrD3/4	19	2,5	7,9	5,0	1,8	6	1,9	3,0	2,4	0,4
FL	19	0,8	5,8	2,2	1,4	6	0,3	2,7	1,2	0,9

Die Messwerte der rechten und linken Seite wurden zusammengefasst. FA: FAR und FAL zusammen betrachtet; TFrD1/2: TFrD1 und TFrD2 zusammen betrachtet; TFrD3/4: TFrD3 und TFrD4 zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; Maßeinheiten in mm und mm<sup>2</sup>. N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung

Tab. 27: Mittelwerte der Winkelmessungen des Foramen rotundum der *Lemuriformes* und *Loriformes*

	Lemuriformes					Loriformes				
	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD	N	Min	Max	$\bar{x}$	SD
TFrW	19	-31,0	22,0	12,8	14	6	-40,9	28,2	2,3	21,2
SFrW	19	32,7	37,1	-8,0	13,5	6	-52,5	-3,7	-22,1	17,9

Die Messwerte der rechten und linken Seite wurden zusammengefasst. Die negativen Winkelangaben zeigen an, dass sich der Kanal in der jeweiligen Raumebene von der hier definierten Messebene entfernt. Entsprechend zeigen positive Werte einen zur Messebene gerichteten Verlauf des Foramens. Maßeinheiten in Grad. TFrW: TFrW1 und TFrW2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; N: Anzahl; Min: Minimalwert; Max: Maximalwert;  $\bar{x}$ : Mittelwert; SD: Standardabweichung



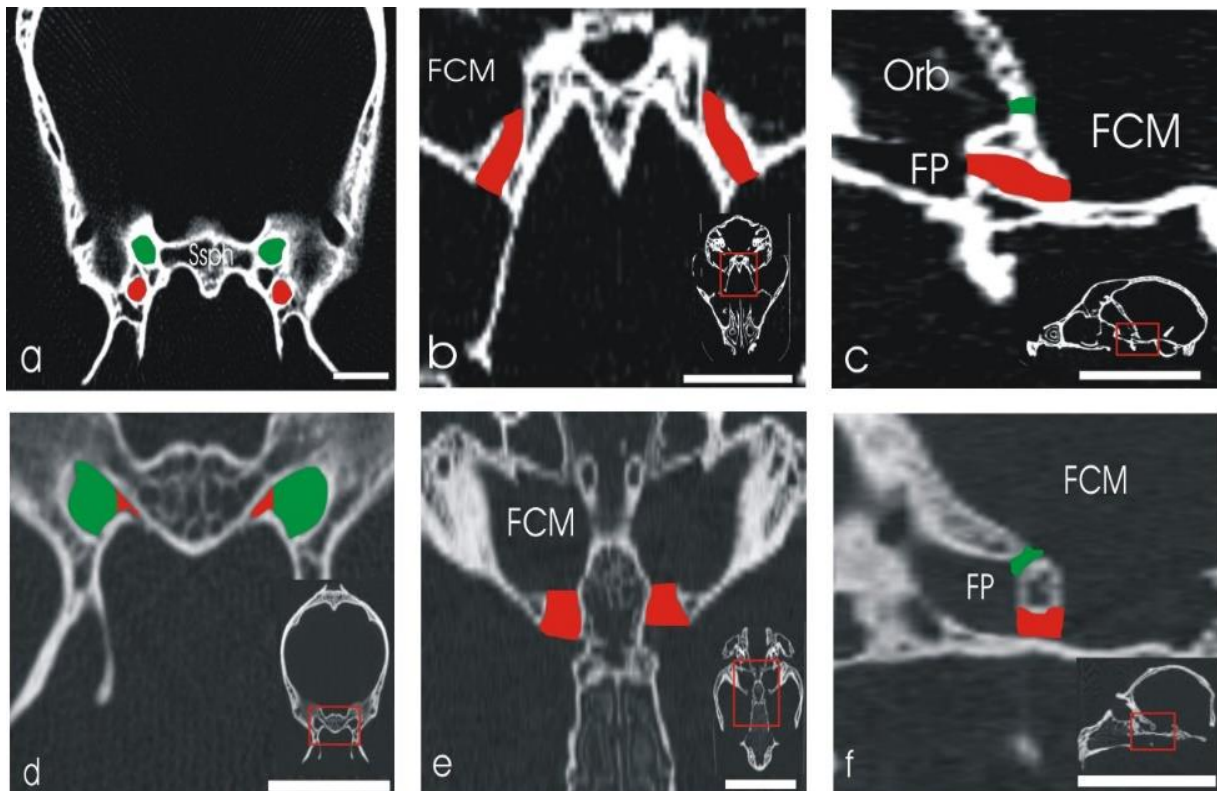


Abb. 14: CT-Schichtaufnahmen ausgewählter Schädel der *Strepsirrhini* auf Höhe des Foramen rotundum (rot). Man beachte die typischen Lagebeziehungen und Verläufe der Spezies. Erste Spalte (**a,d**) zeigt koronare CT-Schichtaufnahmen. Zweite Spalte (**b,e**) zeigt transversale CT-Schichtaufnahmen. Dritte Spalte (**c,f**) zeigt sagittale CT-Schichtaufnahmen. **a – c**: *Eulemur mongoz* der *Lemuriformes*; **d – f**: *Nycticebus coucang* der *Loriformes*; Ssph: Sinus Sphenoidalis; FP: Fossa pterygopalatina FCM: Fossa cranii media; Orb: Orbita; grün: Fissura orbitalis superior; blau: Canalis opticus. Das Inset rechts unten im jeweiligen Bild zeigt die Position des Bildausschnittes. Balkenlänge: 0,5cm

#### 4.3. Indizes des Foramen rotundum

Zum besseren Vergleich der untersuchten Primatenarten wurden zwei Indizes erstellt. Der Längenindex beschreibt die Relation der durchschnittlichen Länge des Foramen rotundum zur durchschnittlichen Schädelbasislänge der jeweiligen Spezies. Der Flächenindex beschreibt die Relation des Flächeninhalts des Foramen rotundum an seiner Ausgangsöffnung in die Fossa pterygopalatina zum Gesichtschädelvolumen. Die Mittelwerte der Ergebnisse wurden für alle Species der untersuchten Ränge bzw. Infraordnungen erstellt und sind in den Tabellen 28 bis 30 aufgeführt. Weiterhin wurden die Ergebnisse in den Abbildungen 15 und 16 in Form von Säulendiagrammen grafisch dargestellt. Hier sei zu erwähnen, dass in der Abbildung 16 die Lemuriformes auf Grund ihrer enormen flächenmäßigen Größe des Foramen rotundum zur besseren Veranschaulichung nicht mit einbezogen wurden.

Tab. 28: Vergleich der Mittelwerte von Längen- und Flächenindizes der Altweltaffenpopulationen

	Mittelwert des Längenindex des Foramen rotundum	Mittelwert des Flächenindex des Foramen rotundum
<i>Homo sapiens</i>	5,65	0,0028
<i>Gorilla gorilla</i>	15,79	0,0001
<i>Pan troglodytes</i>	6,9	0,0003
<i>Colobus guereza</i>	6,02	0,0002
<i>Gibbon</i>	5,13	0,0006
<i>Pongo pygmaeus</i>	5,70	0,0005

Tab. 29: Vergleich der Mittelwerte von Längen- und Flächenindizes der Neuweltaffenpopulationen

	Mittelwert des Längenindex des Foramen rotundum	Mittelwert des Flächenindex des Foramen rotundum
<i>Cebus apella</i>	19,92	0,0021
<i>Alouatta</i>	11,5	0,0011

Tab. 30: Vergleich der Mittelwerte von Längen- und Flächenindizes der Feuchtnasenaffen

	Mittelwert des Längenindex des Foramen rotundum	Mittelwert des Flächenindex des Foramen rotundum
<i>Lemuriformes</i>	5,6	0,0016
<i>Loriformes</i>	4,18	0,0491

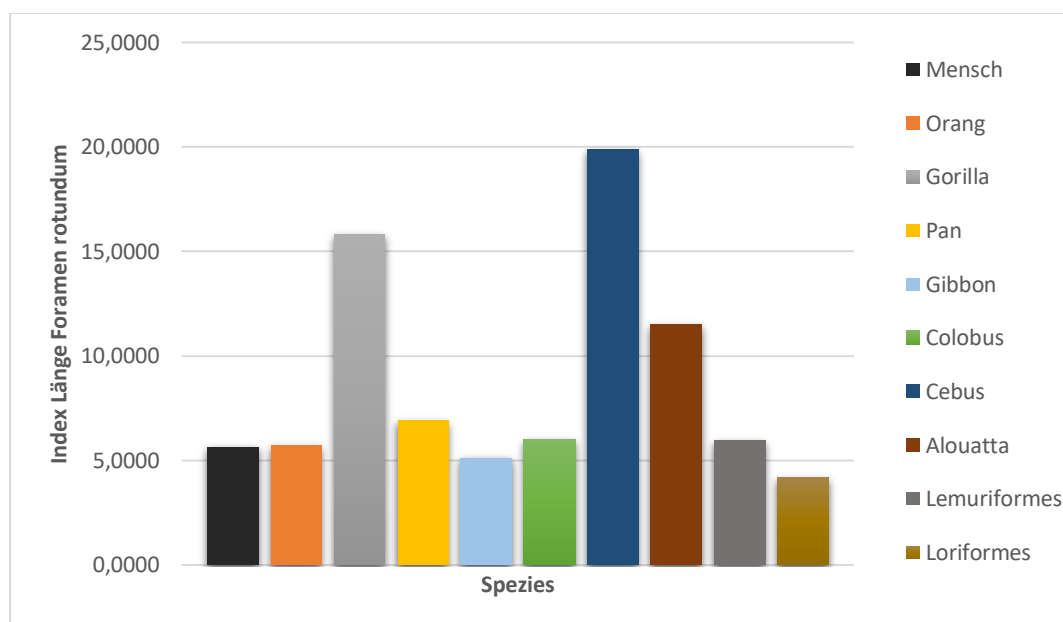


Abb. 15: Säulendiagramm zur Darstellung der Mittelwerte der Längenindizes des Foramen rotundum aller untersuchten Primaten. Der Längenindex beschreibt die Relation zwischen der Länge des Foramen rotundum und der Schädelbasislänge.

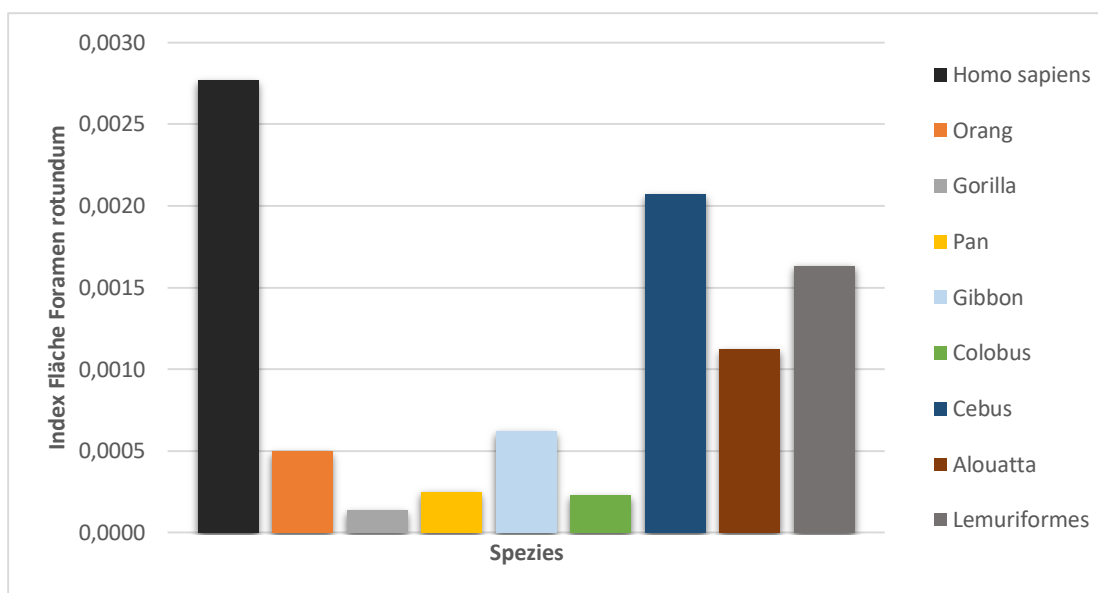


Abb. 16: Säulendiagramm zur Darstellung der Mittelwerte der Flächenindizes des Foramen rotundum aller untersuchten Primaten. Der Flächenindex beschreibt die Relation zwischen der Fläche des Foramen rotundum und dem Gesichtsschädelvolumen. Beachte, die *Loriformes* sind auf Grund ihrer enorm großen Fläche des Foramen rotundum zur Verbesserung der Veranschaulichung hier nicht dargestellt.

#### 4.4. Ergebnisse der Korrelationsanalyse

Zur Feststellung möglicher Zusammenhänge zwischen den erhobenen Maßen des Foramen rotundum und den Schädelmaßen der einzelnen Primaten wurde eine Korrelationsanalyse nach Pearson durchgeführt. Die hierzu genutzten Schädelmaße sind in der Tabelle A1 bis A9 im Anhang aufgeführt. Eine Korrelationsanalyse wurde nur durchgeführt, wenn mindestens vier Exemplare einer Gattung vorhanden waren, was auf alle untersuchten Gattungen bis auf die *Hylobatidae* zutraf.

Die Ergebnisse mit einem Signifikanzniveau von  $p < 0,05$  wurden in Tabelle 31 zusammengefasst. Zur besseren Übersicht signifikanter Korrelationen erhielt jede Gattung in dieser Tabelle eine Zahl.

Tab. 31: Darstellung signifikanter Korrelation ( $p < 0,05$ ) zwischen den Parameter des Foramen rotundum und verschiedenen Gesichtsschädelmaßen beim Menschen und nicht-menschlichen Primaten

	TFrD1/2	TFrD3/4	FL	TFrW	SFrW	FA
GSL	9	9	7,8,10		4	10
SBL	8,9	9	7,8,10		1	10
OGH	9	2,9	2,10		1	5,10
MGB	9	2,9	2		1,4	
GSV	9	2,9	2,7,8,10		4	
GL	9	9	4,8			2
GB	8	10	7,8			
SBKW	3		10	9	4	10
GSKW	9	9	2,7			3

1: *Homo sapiens (Alytus)*, 2: *Homo sapiens (Kyoto)*, 3: *Pongo pygmaeus*, 4: *Gorilla gorilla*, 5: *Pan troglodytes*, 6: *Colobus guereza*, 7: *Cebus apella*, 8: *Alouatta*, 9: *Lemuriformes*, 10: *Loriformes*; Erklärungen der Parameter sind in Tabelle 31 aufgeführt

#### 4.5. Regressionsanalyse

Um die in der Tabelle 31 aufgezeigte Korrelationen der verschiedenen Primaten besser zu charakterisieren, wurde eine einfache lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Hierfür wurden alle Parameter logarithmisch transformiert.

Variablenpaare, die nicht mindestens in zwei Gattungen signifikante Korrelationen aufwiesen, wurden in die Analyse nicht mit einbezogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 32 zusammengefasst und ausgewählte Beispiele in den Abbildungen 17 bis 20 grafisch dargestellt.

Tab. 32: Ergebnisse der einfachen linearen Regressionsanalyse für korrelierende Merkmalspaare des Foramen rotundum

y	x	N	R	R <sup>2</sup>	y=bx + a	t-Wert
TFrD1/2	SBL	23	0,6162*	0,3798	y=0,6793x-0,4186	3,5861
TFrD3/4	OGH	28	0,8687*	0,7546	y = 1,1135x - 0,8797	8,9409
TFrD3/4	MGB	28	0,9146*	0,8364	y = 1,0411x - 0,8315	11,5295
TFrD3/4	GSV	28	0,9411*	0,8856	y = 0,4266x - 1,0937	14,1876
FL	GSL	14	0,8591*	0,7381	y = 2,1544x - 3,1338	5,8157
FL	SBL	14	0,4392	0,1929	y = 1,6209x - 1,7839	2,4925
FL	OGH	15	0,7459*	0,5565	y = 0,585x - 0,3401	4,0385
FL	GSV	24	0,4985	0,2485	y = 0,2309x - 0,3515	2,6969
FL	GL	9	-0,3503	0,1227	y = -0,2385x + 1,5987	0,9896
FL	GB	9	0,8299*	0,6888	y = 2,2712x - 1,8139	3,9359
FL	SBKW	14	0,0032	1,0493E-05	y = 0,0035x + 0,7418	0,0112

y: Abhängige Variable, x: Unabhängige Variable, N: Anzahl, R: Pearson'scher Korrelationskoeffizient, R<sup>2</sup>: Bestimmtheitsmaß, a: Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der y-Achse, b: Steigungsmaß, \*p<0,01, GSL: Gesichtsschädellänge; SBL: Schädelbasislänge; OGH: Obergesichtshöhe; GSV: Gesichtsschädelvolumen; SBKW: Schädelbasisknickungswinkel; GL: Gaumenlänge; GB: Gaumenbreite; TFrD1/2 – TFrD1 und TFrD2 zusammen betrachtet; TFrD3/4 – TFrD3 und TFrD4 zusammen betrachtet; FL – SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; TFrW1 und TFrW2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet

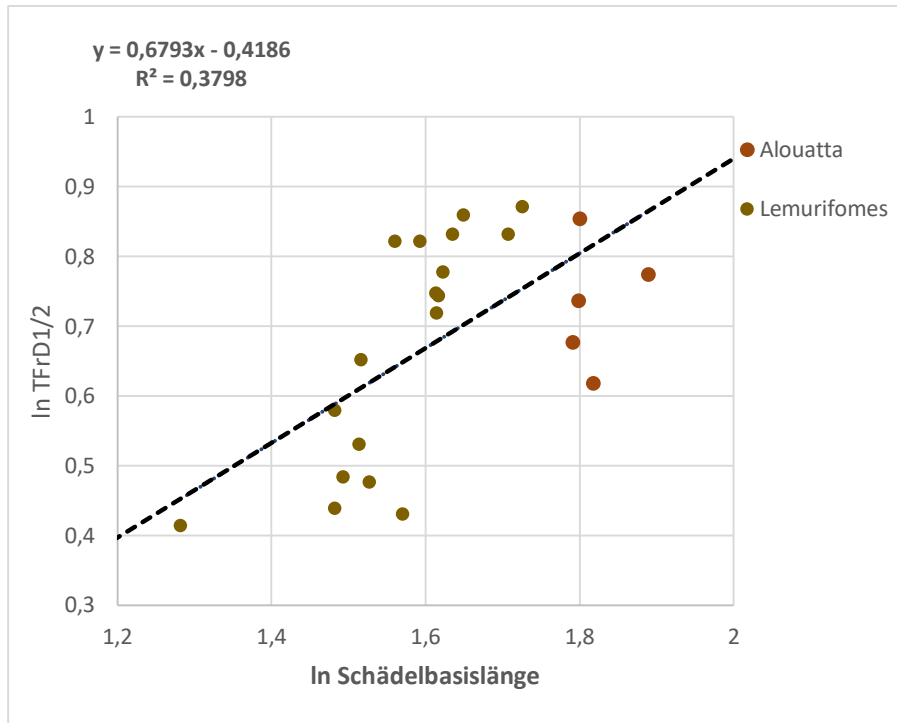


Abb. 17: Grafische Darstellung der einfachen linearen Regression zwischen TFrD1/2 und der Schädelbasislänge.

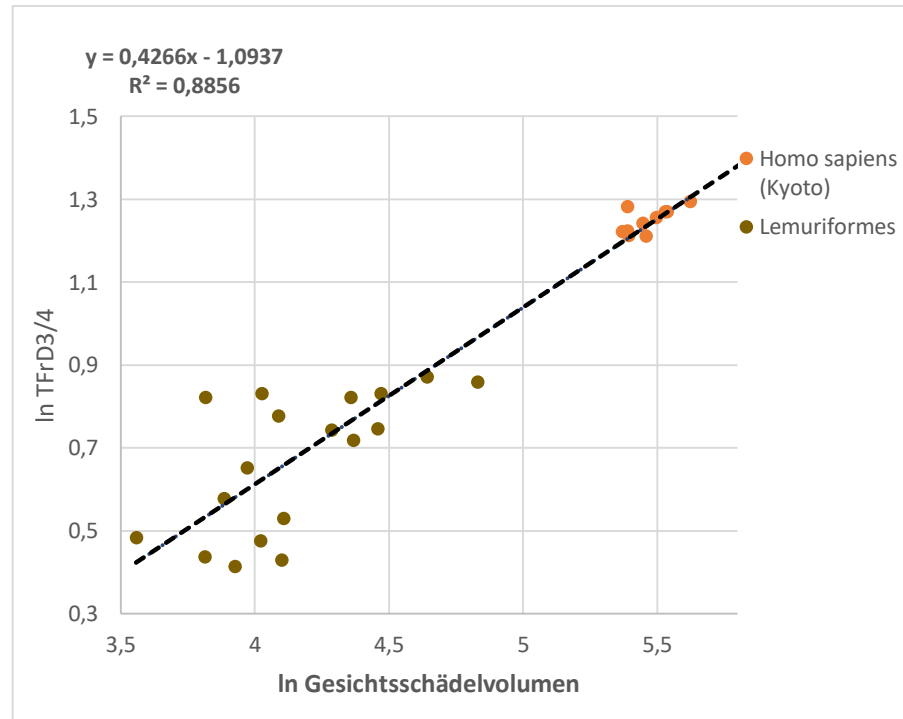


Abb. 18: Grafische Darstellung der einfachen linearen Regression zwischen TFrD3/4 und dem Gesichtsschädelvolumen.

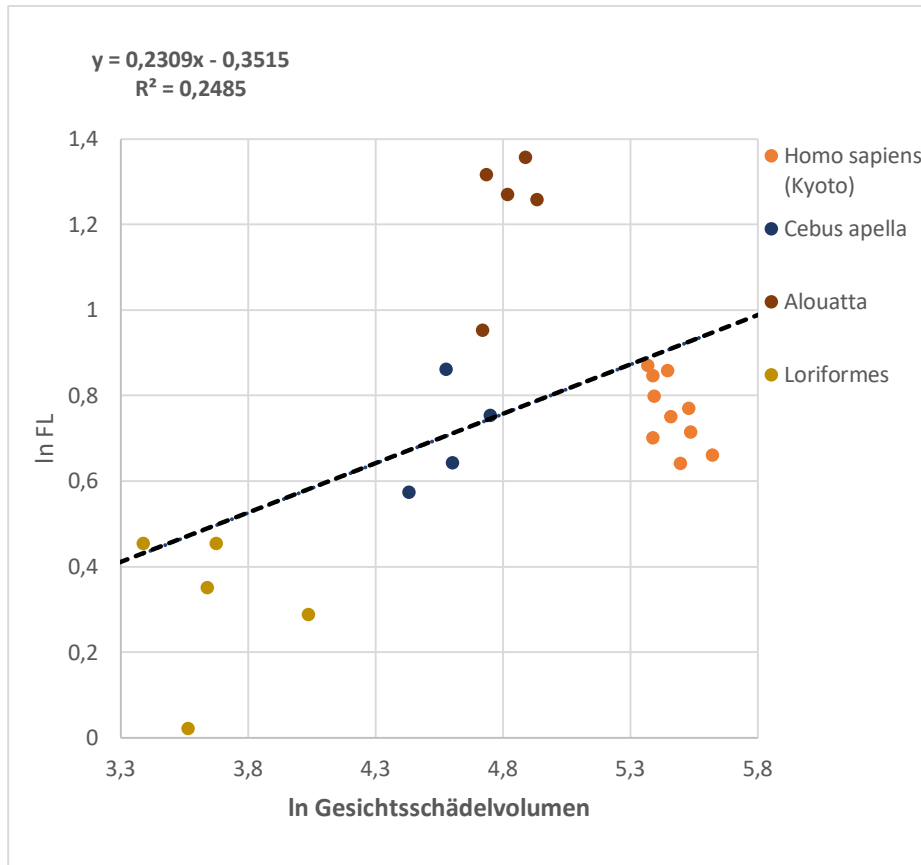


Abb. 19: Grafische Darstellung der einfachen linearen Regression zwischen der Länge des Foramen rotundum und dem Gesichtsschädelvolumen.

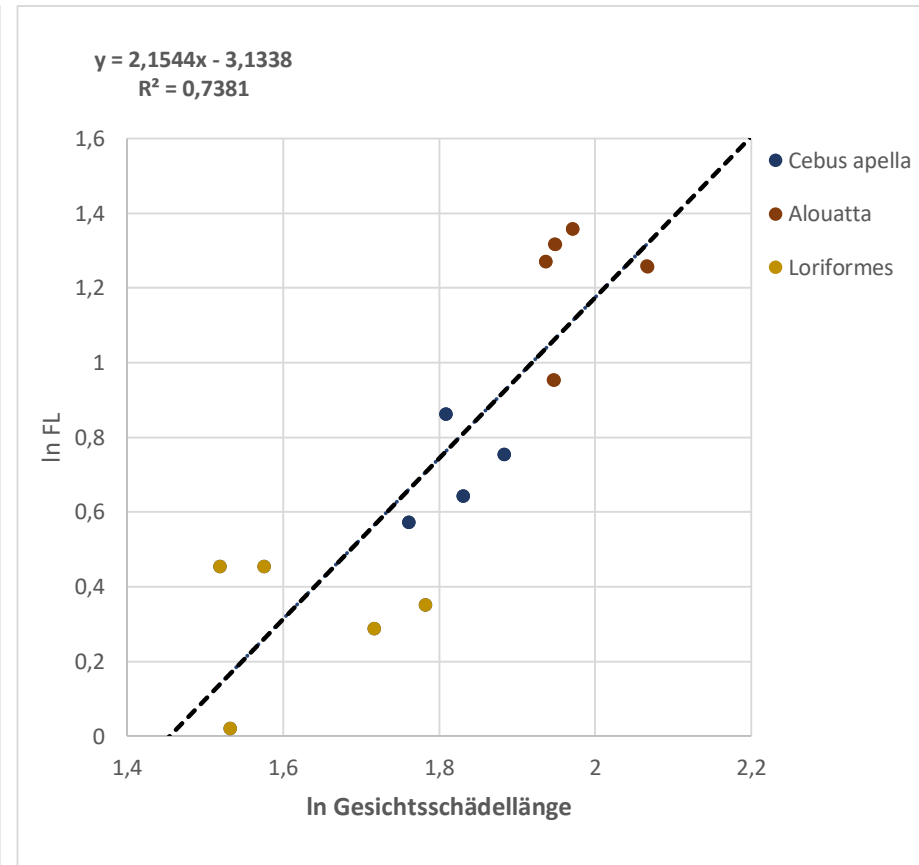


Abb. 20: Grafische Darstellung der einfachen linearen Regression zwischen der Länge des Foramen rotundum und der Gesichtsschädellänge.



## 5. Diskussion

Die Topographie des Foramen rotundum war mehrfach Gegenstand morphologischer und klinischer Studien an menschlichen Schädeln (Mohebbi et al. 2017; Wang et al. 2019; Xue et al. 2019). In diesen Arbeiten wurden hauptsächlich die Lage des Foramen zu seinen Nachbarstrukturen mittels röntgenologischer Schichtaufnahmen beim Menschen untersucht. Im Gegensatz dazu hatte die vorliegende Studie das Ziel, die Topografie anhand definierter anatomischer Landmarken zu beschreiben. Als weitere Besonderheit beschreibt diese Arbeit nicht nur die Topografie des Foramen rotundum am menschlichen Schädel, sondern vielmehr auch an ausgewählten Vertretern anderer Primatenspezies und deckt Gemeinsamkeiten und Unterschiede zum Menschen auf. Um dieses Ziel zu erreichen, legten wir Messpunkte sowohl am Foramen rotundum als auch außerhalb des Foramen rotundum am Schädel fest. Diese Knochenpunkte mussten sowohl beim Menschen als auch bei allen anderen Primaten einheitlich auffindbar sein. Anschließend konnten die einzelnen Maße innerhalb der Koronar-, Transversal- sowie Sagittalebene standardisiert vermessen werden. Zudem war es auf diese Weise möglich, die Ausrichtung des Foramen rotundum zu umliegenden anatomischen Strukturen zu beschreiben.

### 5.1. Topografie des Foramen rotundum

#### *Biometrische Untersuchungen des Foramen rotundum beim Menschen*

Obgleich biometrische Daten über das Foramen rotundum beim Menschen in der Literatur bereits mehrfach erhoben wurden, unterscheiden sich diese teilweise stark voneinander. Auch die von uns erhobenen Messdaten zeigen gewisse Abweichungen. Grund hierfür sind die oftmals nicht einheitlich verwendeten Schnittbild- und Grundebenen, in denen diese Maße erhoben wurden, sodass ein direkter Vergleich mitunter mit Unsicherheiten behaftet ist.

Auch die von uns bestimmte Fläche des Foramen rotundum unterscheidet sich teilweise von anderen Untersuchungen. Unsere Untersuchungen zufolge beträgt die Größe der Fläche des Foramen rotundum an menschlichen Schädeln  $7,76 \text{ mm}^2$  ( $\pm 2,04$ ). Im Gegensatz dazu ermittelten Edwards et al. (2018) eine durchschnittliche

Fläche von 9,48 mm<sup>2</sup> und Kastamoni et al. (2021) eine Fläche von nur 3,47 mm<sup>2</sup> ( $\pm 1,59$ ). Die Unterschiede in den Größen der Fläche ergeben sich möglicherweise aufgrund eines unterschiedlichen methodischen Vorgehens. In der vorliegenden Studie trugen wir der Beobachtung Rechnung, dass es sich beim Foramen rotundum um einen knöchernen Kanal handelt. Für die Flächenmessung dieses Kanals vermaßen wir diejenigen CT-Schnittbildebene, in der das Foramen erstmalig als vollkommen geschlossener, knöcherner Kanal am Übergang zur Fossa pterygopalatina darstellbar war.

Die Kenntnis des Flächeninhaltes des Foramen rotundum ist von klinischem Interesse. So soll die Größe des Foramen rotundum eine Rolle in der Entstehung bei der Trigeminusneuralgie spielen. Einige Autoren vermuten, dass ein Missverhältnis zwischen der Größe des Foramen und der Größe des N. maxillaris zur Entstehung dieses Krankheitsbildes beitragen kann (Liu et al. 2016; Edwards et al. 2018; Kastamoni et al. 2021).

Im Gegensatz zum Menschen ermittelten wir für die Flächen des Foramen rotundum bei Primaten deutlich andere Werte. Vergleichende Messungen des Foramen rotundum in nicht-menschlichen Primaten sind in der Literatur nicht existent. Unter den von uns untersuchten nicht-menschlichen Primatenschädeln zeigten die Brüllaffen (*Alouatta*) mit 10,5 mm<sup>2</sup> ( $\pm 2,9$ ) die größte Fläche des Foramen rotundum. Hingegen konnten wir bei den etwa gleich großen, jedoch etwas schwereren Mantelaffen (*Colobus guereza*) (Swindler 1998; Boaz and Almquist 2002) die mit Abstand kleinste Fläche des Foramen rotundum mit 1,4 mm<sup>2</sup> ( $\pm 0,5$ ) messen. Dieses Ergebnis spricht dafür, dass Körpergröße und Körpermasse offenbar keinen Einfluss auf die Maße des Foramen rotundum, zumindest bei Mantelaffen haben. Vor diesem Hintergrund sollten zukünftige Untersuchungen den Einfluss der Körpermaße auf die Größe des Foramen rotundum beim Menschen und insbesondere auch bei Menschenaffen zum Inhalt haben.

Wir untersuchten weiterhin den Abstand des Foramen rotundum von der vorab definierten Prosthion-Spina-Ebene sowie von der Rostrum-Sphenoidal-Ebene. Die von uns erhobenen Daten bezogen sich zum einen auf den Abstand der Eingangsöffnung des Foramen zur jeweiligen Ebene, ausgehend von der Fossa cranii media und zum anderen auf die Ausgangsöffnung an der Fossa

pterygopalatina. Diese metrischen Messungen erlaubten es uns, eine räumliche Beschreibung des Knochenkanals bei allen untersuchten Primaten vorzunehmen. Weiterhin erlauben im Rahmen unserer Untersuchungen erhobenen Daten anatomische Vergleiche der verschiedenen Spezies.

Insbesondere beim Menschen sind die erhobenen Daten zur Topografie und zur Größe des Foramen rotundum auch deshalb von Interesse, weil das Foramen rotundum auch zur Durchführung von Interventionen, wie die der Radiofrequenz-Thermokoagulation bei der Behandlung der isolierten N. maxillaris- Trigemini neuralgie (Wan et al. 2018; Wang et al. 2019; Xue et al. 2019) genutzt wird. Darüber hinaus findet die Radiofrequenz-Thermokoagulation ebenso Anwendung bei isolierten Trigemini neuralgien des N. ophthalmicus sowie des N. mandibularis. Für Interventionen wird hier hingegen die Fissura orbitalis superior für den N. ophthalmicus (Wang et al. 2021) bzw. das Foramen ovale für den N. mandibularis bzw. das Ganglion trigeminale (Demartini et al. 2021; Gunduz et al. 2021) genutzt.

In der uns zugänglichen Literatur wird häufig nur ein vorher definierter Punkt für Abstandsmessungen des Foramen rotundum zur Medianebene verwendet. Rückschlüsse auf den Verlauf bzw. eine exakte räumliche Einordnung sind unseren Untersuchungen zufolge damit jedoch nicht möglich. Unter Verwendung koronarer CT-Schichtaufnahmen beschreiben Mohebbi et al. (2017) den Abstand zwischen dem Foramen rotundum und der Mittellinie beim Menschen mit durchschnittlich 19 mm ( $\pm 2,07$ ) für die rechte Seite und 19,34 mm ( $\pm 2,17$ ) für die linke Seite. Auch Reiche (2017) berichtet in einer ähnlichen Studie über Abstandsmessungen des Foramen rotundum beim Menschen und gibt für dieses Maß 19,4 mm ( $\pm 1,9$ ) von der Mittellinie an. Da es sich beim Foramen rotundum jedoch um einen Knochenkanal handelt, der wie wir zeigen konnten, keinen geradlinigen Verlauf aufweist, erlauben diese Werte keine genaue anatomische Einordnung des Foramen rotundum, sondern stellen lediglich einen Knochenpunkt im Verlauf des Kanals dar. Entsprechende metrische Daten über das Foramen rotundum bei nicht-menschlichen Primatenschädeln wurden unseres Wissens nach bisher nicht publiziert.

## 5.2. Nachbarschaftsbeziehungen des Foramen rotundum

Anhand der durch uns vorgenommenen Untersuchungen an menschlichen Schädeln konnten wir die bereits aus der Literatur (Guttman and Sperber 2000; Zilles und Tillmann 2010; Aumüller et al. 2010; Mohebbi et al. 2017) bekannte Lage bzw. die anatomischen Nachbarschaftsbeziehungen des Foramen rotundum grundsätzlich bestätigen. Vogl (1999) beschreibt das Foramen rotundum als stets innerhalb der Ala major des Os sphenoidale gelegen, was auch den Ergebnissen unserer Untersuchungen entspricht. Weiterhin können wir die von Sperber (2000) und Mohebbi et. al (2017) beschriebene Lage des Knochenkanals am unteren Drittel, lateral des Sinus sphenoidalis, bestätigen. Basierend auf einer Studie an 100 menschlichen Schädeln mittels Computertomographie unterzogen Mohebbi et al. (2017) diese Lagebeziehung zum Sinus sphenoidalis einer genaueren Betrachtung. Mohebbi et al. (2017) teilten die Lagebeziehung des Foramen rotundum zum Sinus sphenoidalis in drei Typen ein, wobei der Typ 1 außerhalb des Sinus verläuft, Typ 2 die laterale Wand des Sinus tangiert und Typ 3 vollständig innerhalb des Sinus verläuft.

In der Mehrheit der untersuchten Schädel dominierte der zweite Typus. Von besonderem Interesse ist weiterhin die Beziehung des Foramen rotundum zum Canalis pterygoideus. Beim Menschen liegt der Knochenkanal des Foramen rotundum leicht kranio-lateral des Canalis pterygoideus (Fanghänel et al. 2009; Dähnert 2012; Mohebbi et al. 2017), was auch unseren Untersuchungsergebnissen entspricht. Dähnert (2012) beschreibt das Foramen in menschlichen Schädeln als kaudal lateral der Fissura orbitalis superior gelegen, was wir ebenfalls durch unsere Untersuchungen bestätigen konnten. Weiterhin liegt die Orbita kranio-lateral des Foramen rotundum, der Canalis opticus befindet sich kranio-medial des Knochenkanals (s. Abb. 10).

Obgleich die Lage und die damit verbundenen Nachbarschaftsbeziehungen des Foramen rotundum beim Menschen als sicher bekannt gelten, finden sich Studien mit ähnlichen Angaben zu nicht-menschlichen Primaten in der Literatur nicht. Somit erlaubt unsere Studie eine bessere anatomische Einordnung des Foramen rotundum bei den von uns untersuchten Primaten. Wir konnten zeigen, dass die Lage des Foramen rotundum zum Sinus sphenoidalis bei den untersuchten

Schädeln der gehauften Kapuziner (*Cebus apella*) weitestgehend der Lage bei menschlichen Schädeln entspricht (s. Abb. 13a). Kritisch muss an dieser Stelle jedoch die kleine Anzahl an der uns zur Verfügung stehenden Schädel dieser Primatenspezies betrachtet werden. Weitere Studien mit einer größeren Anzahl an Schädeln der *Cebus apella* könnten die von uns beschriebene Lage des Foramen rotundum verifizieren. Bei den von uns untersuchten Schädeln von Gibbon, Orang-Utan (*Pongo pygmaeus*), Mantelaffen (*Colobus guereza*) sowie Loriformes befand sich das Foramen rotundum stets lateral des Sinus sphenoidalis. Im Gegensatz zur Situation beim Menschen lag der Knochenkanal des Foramen rotundum jedoch in Höhe des mittleren Drittels des Sinus sphenoidalis und somit etwas höher als bei menschlichen Schädeln (s. Abb. 11, 14). Innerhalb der untersuchten Schimpansen (*Pan troglodytes*) und Gorillas hingegen war das Foramen rotundum an drei Seiten (lateral, medial, kaudal) vom Sinus sphenoidalis umschlossen (s. Abb. 11), was einer Typ 3 Lage gemäß der von Mohebbi et al. (2017) vorgenommenen Klassifizierung in menschlichen Schädeln gleich kommt. Eine Besonderheit der untersuchten Primaten stellen die Brüllaffen (*Alouatta caraya*) dar. Auf Grund der fehlenden Pneumatisierung des Os sphenoidale können hier keine Angaben zur Lagebeziehung des Sinus sphenoidalis gemacht werden. Weiterhin weist die Lage des Foramen rotundum bei den Lemuren ebenfalls eine Besonderheit auf, da das Foramen hier kaudo-lateral des Sinus sphenoidalis verläuft (s. Abb. 13d).

Aufgrund der unsicheren Identifikation des Canalis pterygoideus in Schädeln der Gorillas und Brüllaffen (*Alouatta caraya*) sowie den Feuchtnasenprimaten konnten hier keine topografischen Aussagen zur Lagebeziehung zum Foramen rotundum getroffen werden. Als einzige der untersuchten Primaten war die Lage des Foramen rotundum zum Canalis pterygoideus bei den Orang-Utan (*Pongo pygmaeus*) dem der Menschen vergleichbar. Hier fanden wir das Foramen rotundum kranio-lateral des Canalis pterygoideus. Bei den Schädeln der Schimpansen befand sich das Foramen rotundum lateral des Canalis pterygoideus, jedoch etwa auf gleicher Höhe. Auch in Schädeln der gehauften Kapuziner (*Cebus apella*) war eine laterale Lage nachweisbar. Jedoch befand sich das Foramen rotundum deutlich weiter kaudal des Canalis pterygoideus. Eine vollständig andere Situation beobachteten wir in Schädeln der Gibbon und Mantelaffen (*Colobus guereza*). Hier befand sich das Foramen rotundum medial vom Canalis pterygoideus gelegen (s. Abb. 12a).

Als anatomisch umliegende Struktur soll weiterhin die Fissura orbitalis superior thematisiert werden. Hier lässt sich einheitlich in allen untersuchten Primatenschädeln, mit Ausnahme der Loriformes, eine kaudale Lage des Foramen rotundum zur Fissura orbitalis superior beschreiben. Lediglich beim Orang (*Pongo pygmaeus*) fanden wir zusätzlich eine leicht laterale Lage des Foramen rotundum (s. Abb. 12d). Als Besonderheit muss an dieser Stelle die Topografie des Foramen rotundum in Schädeln der Loriformes beschrieben werden. Im Verlauf des Kanals öffnete sich dieser mit der medialen Wand zur Fissura orbitalis superior, wodurch der Anschein erweckt wird, als würde der N. maxillaris kurzzeitig innerhalb der Fissura orbitalis superior verlaufen und somit ein Teil dieser Struktur sein (s. Abb. 14d). Somit ist das Foramen rotundum bei den Loriformes nicht als komplett knöcherner Kanal, wie es in den anderen Primatenschädeln der Fall ist, zu sehen, sondern als partiell knöcherner Kanal. Wünschenswert wären weitere Studien zu diesem Verhalten des Foramen rotundum mit gezielter vergleichender Betrachtung diverser Vertreter der Loriformes, um dieses Phänomen genauer zu untersuchen. Beim Menschen werden Verläufe des Foramen rotundum innerhalb des Sinus sphenoidalis beschrieben (Vogl 1999; Mohebbi et al. 2017), jedoch wird eine partielle Öffnung des Knochenkanals des Foramen rotundum, wie es die Loriformes zeigen, in keiner uns bekannten Literatur erwähnt.

Im Rahmen unserer Studie untersuchten wir auch die Lage des Foramen rotundum zur Orbita. Bei den Schädeln der Schimpansen, Gorillas, gehauften Kapuziner, Brüllaffen sowie der Feuchtnasenprimaten konnten wir eine anatomische Lagebeziehung zur Orbita ähnlich der beim Menschen beobachten. Das Foramen rotundum stellt sich bei diesen Primaten kaudo-medial der Orbita dar. Bereits Nommensen (2014) beschrieb diese Lage des Foramen rotundum zur Orbita explizit für Schimpansen. Bei den Schädeln der Gibbons, Mantelaffen und Orang fanden wir das Foramen rotundum ebenfalls kaudal der Orbita, jedoch weiter occipital als in den anderen Primaten (s. Abb. 11-14). Vergleichbare Angaben in der Literatur zur anatomischen Lage der Orbita zum Foramen rotundum bei nicht-menschlichen Primaten lagen uns nicht vor.

Die anatomische Lagebeziehung zum Canalis opticus, als weitere umliegende Struktur, war ebenfalls Bestandteil unserer Untersuchungen. Mit Ausnahme der Loriformes lässt sich einheitlich eine kaudo-laterale Lage des Foramen rotundum

zum Canalis opticus beschreiben. Somit entspricht diese Lage der in menschlichen Schädeln. In den Schädeln der untersuchten Loriformes lag das Foramen unmittelbar kaudal des Canalis opticus. Darüber hinaus wird eine relative Rückverlagerung des Canalis opticus zum Foramen rotundum bei Schädeln der Menschenaffen von Bienvenue et al. (2011) beschrieben. Vermutet wird, dass diese Lagebeziehung mit einer Vergrößerung des Nasen-Kieferskeletts sowie einer ausgeprägteren Prognathie in Zusammenhang steht.

Einen besseren Überblick über die Lagebeziehungen des Foramen rotundum zu umliegenden anatomischen Strukturen der im Rahmen dieser Studie untersuchten Primatenschädel soll Tabelle 33 liefern.

Tab. 33: Lagebeziehungen des Foramen rotundum zu umliegenden Strukturen in Primaten

Spezies	Sinus sphenoidalis	Canalis pterygoideus	Canalis opticus	Fissura orbitalis superior	Orbita
Homo sapiens	lateral des unteren Drittels	kranio-lateral	kaudo-lateral	kaudal lateral	kaudo-medial
Pan troglodytes	teilweise umschlossen (lateral,medial,caudal)	lateral	kaudo-lateral	Kaudal	kaudo-medial
Gorilla gorilla	teilweise umschlossen (lateral,medial,caudal)	nicht auffindbar	kaudo-lateral	Kaudal	kaudo-medial
Pongo pygmaeus	unmittelbar lateral	kranio-lateral	kaudo-lateral	kaudo-lateral	kaudo-anterior
Gibbon ( <i>Hylobatidae</i> )	unmittelbar lateral	medial	kaudo-lateral	Kaudal	kaudo-anterior
Colobus guereza	unmittelbar lateral	medial	kaudo-lateral	Kaudal	kaudo-anterior
Cebus apella	lateral des unteren Drittels	kaudo-lateral	kaudo-lateral	Kaudal	kaudo-medial
Alouatta caraya	nicht vorhanden	nicht vorhanden	kaudo-lateral	Kaudal	kaudo-medial
Lemuriformes	kaudo-lateral	nicht auffindbar	kaudo-medial	Kaudal	kaudo-lateral
Loriformes	lateral			nach medial geöffneter Kanal	kaudal



### 5.3. Verlauf des Foramen rotundum

Obgleich der Verlauf des Foramen rotundum beim Menschen mehrfach untersucht wurde und als bekannt gelten kann (Kim and Chung 1996; Vogl 1999; Dähnert 2012), liegen gezielte Studie bezüglich des Verlaufs bei nicht-menschlichen Primaten nicht vor. Mittels hochauflösender CT-Schnittbilder und der für alle Primaten einheitlich definierten Grundebenen war es uns möglich, gezielte Untersuchungen am Foramen rotundum vorzunehmen. Anhand der so gewonnenen Messungen in den transversalen und sagittalen Raumebenen konnten wir ein Verlaufsprofil des Foramen rotundum in Bezug zu den definierten Grundebenen für alle untersuchten Primaten erstellen.

Mittels der von uns erhobenen Daten an 20 menschlichen Schädeln beschreiben wir einen in der Mehrheit der Untersuchungen leicht nach kranial sowie lateral gerichteten Verlauf des Knochenkanals mit Mündung in den oberen hinteren Anteil der Fossa pterygoidea. Kim et al. (1996) beschrieben ebenfalls einen anterioren und lateralen Verlauf des Foramen rotundum, was durch unsere Arbeit bestätigt werden konnte. Einer der untersuchten menschlichen Schädel zeigte jedoch einen nach kranio-medial gerichteten Verlauf (s. Abb. A1 im Anhang). Bei vier weiteren Schädeln beobachteten wir einen in Bezug auf die Horizontalebene entgegengesetzt gerichteten Verlauf zwischen linker und rechter Seite. Weiterhin zeigte einer dieser vier Schädel als Besonderheit einen in der Sagittalebene linksseitigen Anstieg, während das Foramen rotundum rechtsseitig zur Grundebene gerichtet verlief (s. Abb. A2 im Anhang).

Anhand der untersuchten nicht-menschlichen Primatenschädel konnten wir einen dem Menschen ähnlichen Verlauf des Foramen rotundum auch bei den Vertretern der Schimpansen (*Pan troglodytes*) sowie Gorillas feststellen. Starke Unterschiede zeigten sich innerhalb der untersuchten Gibbon. Während der Verlauf des Foramen rotundum beim Siamang (*Symphalangus syndactylus*) dem des Menschen sehr ähnelt, beobachteten wir beim Schwarzhandgibbon (*Hylobates agilis*) einen in der Sagittalebene kranial gerichteten, jedoch in der Horizontalebene beidseits medialen Verlauf. Auch ein Weißhandgibbon (*Hylobates lar*) wies einen ansteigenden Verlauf auf, jedoch war hier das Foramen rotundum rechtsseitig medial und linksseitig lateral gerichtet. Auf Grund der jedoch geringen Anzahl an untersuchten Schädeln

der Gibbon sollen die hier beschriebenen Verläufe als Tendenzen verstanden werden.

#### 5.4. Vergleich der Maße des Foramen rotundum des Menschen mit nicht-menschlichen Primaten

Von besonderem Interesse war eine Betrachtung der unterschiedlichen Längen des Foramen rotundum sowie dessen Flächeninhalt der untersuchten Primaten. Auf Grund der unterschiedlichen Körperproportionen der untersuchten Primaten konnte ein direkter Vergleich der erhobenen Messdaten jedoch nicht stattfinden. Aus diesem Grund definierten wir verschiedene Indizes, die einen artenübergreifenden Vergleich ermöglichten. Zum einen definierten wir einen Längenindex, berechnet aus dem Verhältnis der durchschnittlichen Länge des Foramen rotundum zur Schädelbasislänge der Primatenart. Weiterhin definierten wir den Flächenindex, gebildet aus dem Verhältnis des Flächeninhalts des Foramen rotundum zum Gesichtsschädelvolumen der jeweiligen Primatenart. Eine ähnliche Methode zum Vergleich von Maßen der Fossa pterygopalatina beim Menschen und Menschenaffen wurde bereits von Nonnenmacher (2014) verwendet. Weiterhin verglichen wir anhand einer definierten koronaren Schnittbildaufnahme die anatomische Lage des Foramen rotundum zum Canalis pterygoideus.

Mit Hilfe der berechneten Indizes in insgesamt zehn verschiedenen Primatenarten fanden wir unter allen untersuchten Schädeln den mit Abstand größten Anteil der Fläche des Foramen rotundum im Verhältnis zum Gesichtsschädelvolumen in den Loriformes. Wir beobachteten, dass der relative Anteil des Foramen rotundum zum Gesichtsschädelvolumen bei Loriformes im Vergleich zum Menschen ca. 17-fach größer war. Somit lässt sich vereinfacht zusammenfassen, dass der Mensch ein vielfach kleineres Foramen rotundum aufweist, als die Loriformes. Dennoch zeigte sich der zweitgrößte Flächenindex bei den Menschen, gefolgt von den gehauften Kapuzinern (*Cebus apella*) sowie den Lemuriformes. Mit Abstand die kleinste Fläche im Verhältnis zum Gesichtsschädelvolumen war bei den Gorillas zu bestimmen.

Zum besseren Vergleich dieses Index soll die Abbildung 16 aus dem Ergebnisteil dieser Studie dienen. Weiterhin haben wir in Tabelle 34 die Relationen des Flächenindex der einzelnen Primaten zum Menschen dargestellt.

Tab. 34: Mittelwerte des Flächenindex des Foramen rotundum der Primaten sowie Größenrelationen des Flächenindex der Primaten im Vergleich zum Menschen

	Mittelwert des Flächenindex des Foramen rotundum	Größenrelationsfaktor zum Menschen
<i>Homo sapiens</i>	0,0028	1
<i>Pan troglodytes</i>	0,0003	0,11
<i>Gorilla gorilla</i>	0,0001	0,03
<i>Pongo pygmaeus</i>	0,0005	0,18
<i>Gibbon (Hylobatidae)</i>	0,0006	0,21
<i>Colobus guereza</i>	0,0002	0,07
<i>Cebus apella</i>	0,0021	0,75
<i>Alouatta caraya</i>	0,0011	0,39
<i>Lemuriformes</i>	0,0016	0,57
<i>Loriformes</i>	0,0491	17

Als weiterer artenübergreifender vergleichender Index diene der Längenindex, der das Verhältnis der Länge des Foramen rotundum zur Schädelbasislänge quantifiziert. Den größten Wert konnten wir bei den Schädeln der gehauften Kapuziner (*Cebus apella*) berechnen. Unsere Untersuchungen zeigten, dass das Foramen rotundum bei *Cebus apella* ca. 3,5-fach länger ist, als beim Menschen. Im artenübergreifenden Vergleich aller untersuchten Primaten ordnete sich der Längenindex des Menschen im Mittelfeld, etwa gleich mit den Orang-Utan, den *Colobus guereza* sowie den Lemuriformes ein. Die Schädel der Loriformes wiesen ein Foramen rotundum mit dem kleinsten Längenindex auf.

Zum besseren Vergleich dieses Index soll die Abbildung 15 aus dem Ergebnisteil dieser Studie dienen. Weiterhin haben wir in Tabelle 35 die Relationen des Längenindex der einzelnen Primaten zum Menschen dargestellt.

Tab. 35: Mittelwerte des Längenindex des Foramen rotundum der Primaten sowie Größenrelationen des Längenindex der Primaten im Vergleich zum Menschen

	Mittelwert des Längenindex des Foramen rotundum	Größenrelationsfaktor zum Menschen
<i>Homo sapiens</i>	5,65	1
<i>Pan troglodytes</i>	6,9	1,22
<i>Gorilla gorilla</i>	15,79	2,79
<i>Pongo pygmaeus</i>	5,70	1,01
<i>Gibbon (Hylobatidae)</i>	5,13	0,91
<i>Colobus guereza</i>	6,02	1,07
<i>Cebus apella</i>	19,92	3,53
<i>Alouatta caraya</i>	11,5	2,04
<i>Lemuriformes</i>	5,6	0,99
<i>Loriformes</i>	4,18	0,74

Als weiterer anatomischer Vergleich soll die Lage des Foramen rotundum zum Canalis pterygoideus dienen. Obgleich wir in der uns vorliegenden Literatur keine Angaben zur anatomischen Lage des Foramen rotundum zum Canalis pterygoideus in nicht-menschlichen Primaten fanden, stellte sich das Foramen rotundum bei den menschlichen Schädeln einheitlich kranio-lateral des Canalis pterygoideus dar. Dies entspricht der anatomischen Lage, welche bereits in der Literatur beschrieben wurde (Vogl 1999; Dähnert 2012). Dieser dem Menschen ähnlichen Lagebeziehung entspricht auch das Foramen rotundum der untersuchten Schädel der Orang-Utan (*Pongo pygmaeus*). Zwar konnten wir auch in Schädeln der Schimpansen (*Pan troglodytes*) das Foramen rotundum lateral des Canalis pterygoideus ausmachen, jedoch in etwa auf gleicher Höhe mit diesem. Auch bei den Vertretern der gehauften Kapuziner (*Cebus apella*) stellte sich das Foramen rotundum als lateral zum Canalis pterygoideus gelegen dar, verlief jedoch weit kaudal zu diesem.

Als Besonderheit im Vergleich zum Menschen fanden wir das Foramen rotundum in Schädeln der Gibbon (*Hylobatidae*) sowie Mantelaffen (*Colobus guereza*) medial

des Canalis pterygoideus. In den übrigen untersuchten Primatenspezies konnte der Canalis pterygoideus nicht eindeutig identifiziert werden, sodass hier keine vergleichenden Angaben gemacht werden können. Ein Überblick über diese sowie weitere anatomische Lagebeziehungen ist in Tabelle 33 aufgeführt.

Von Interesse war ebenfalls eine vergleichende Verlaufsanalyse des Foramen rotundum beim Menschen zu den nicht-menschlichen Primaten. Eine ausführliche Diskussion mit vergleichbaren Verlaufsbeschreibungen konnte nicht erfolgen, da Beschreibungen zum Verlauf des Foramen rotundum der nicht-menschlichen Primaten aus der Literatur nicht bekannt waren. Bezüglich der von uns definierten Grundebenen ähneln die Verläufe des Foramen rotundum von Schimpanse, Gorilla, Orang-Utan, Siamang sowie der Strepsirrhini denen des Menschen. Hier nahm das Foramen rotundum einheitlich einen kranio-lateralen Verlauf zu den Grundebenen an. Ebenfalls nach lateral verläuft das Foramen rotundum in Schädeln der *Alouatta caraya*. Im Gegensatz zum Menschen verläuft das Foramen rotundum innerhalb dieser Primatenspezies jedoch nach kaudal gerichtet. Bei Schwarzhandgibbons (*Hylobates agilis*) verläuft das Foramen rotundum, ähnlich dem Menschen, nach kranial, jedoch ist es nach medial gerichtet. Die untersuchten Schädel der Mantelaffen (*Colobus guereza*) zeigten große Variationen an Verläufen des Foramen rotundum. Vier der untersuchten Schädel wiesen einen nach lateral gerichteten Verlauf des Foramen rotundum. Hierunter zeigten zwei der Schädel einen medialen Verlauf, wohingegen die übrigen zwei Schädel einen entgegengesetzten Verlauf der beiden Schädelhälften aufzeigten. In den weiteren acht Colobus-Schädeln beobachteten wir einen kaudal gerichteten Verlauf des Foramen rotundum. Hierunter fanden wir in fünf Schädeln einen zusätzlich nach lateral gerichteten Verlauf, in zwei Schädeln einen horizontal entgegengesetzten Verlauf beider Seiten sowie in einem Schädel einen medialen Verlauf des Foramen rotundum. Die übrigen drei Colobus-Schädel zeigten einen in der Sagittalebene entgegengesetzten Verlauf zwischen beiden Seiten. Zwei dieser Schädel zeigten weiterhin einen lateralen, einer einen entgegengesetzten horizontalen Verlauf. Auf Grund dieser großen Variationen der Verläufe des Foramen rotundum bei Mantelaffen (*Colobus guereza*) soll hier kein direkter Vergleich zum Menschen stattfinden.

### 5.5. Limitationen der Studie

Unter Berücksichtigung verschiedener im folgenden erwähnten Aspekte soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die Daten dieser Arbeit einer gewissen Limitation in ihrer Aussagekraft unterliegen.

CT-Scanner: Die CT-Schichtaufnahmen der *Pan troglodytes*, *Gorilla gorilla*, *Pongo pygmaeus*, *Cebus apella*, *Hylobater lar* und *Hylobater agilis* sowie der menschlichen Schädel aus Litauen wurden mittels eines Sensation 16 CTs der Firma SIEMENS erstellt. Hingegen wurden die CT-Schichtaufnahmen der menschlichen Schädel aus Kyoto mittels eines TOSHIBA Alexion, die *Colobus guereza*, *Symphalangus syndactylus*, *Alouatta caraya* und *Alouatta seniculus* wurden mit Hilfe des 3D Accuitomo F17 CT Morita sowie die Strepsirrhini mit Hilfe des Stratec XCT Research SA+ erstellt. Mögliche Unterschiede in der Qualität der einzelnen CT-Schichtaufnahmen, die wiederum Auswirkungen auf die Datenerhebung sowie vergleichende Analyse haben, können sich durch die Verwendung verschiedener CT-Scanner ergeben.

Schichtdicken: Weiterhin ergeben sich mögliche Limitationen der Aussagekraft unserer erhobenen Datensätze durch unterschiedliche Schichtdicken der einzelnen CT-Schichtaufnahmen. Die Aufnahmen der menschlichen Schädel sowie der Schädel von *Pan troglodytes*, *Gorilla gorilla*, *Pongo pygmaeus* und *Cebus apella* wurden mit einer Schichtdicke von 1,0 mm erstellt. Hingegen wurden die Aufnahmen der *Hylobater lar* und *Hylobater agilis* sowie der Strepsirrhini mit einer Schichtdicke von 0,5 mm erstellt. Zwei Schädel der Strepsirrhini wurden mit einer Schichtdicke von 0,2 mm aufgenommen. Die Schichtdicke der Brüllaffen und des *Symphalangus syndactylus* betrug 0,25 mm, die der *Colobus* Schädel 0,16 mm.

Asymmetrien: Mögliche Asymmetrien fanden im Rahmen dieser Studie keine Beachtung.

Geschlechtsdimorphismus: Im Rahmen dieser Studie wurde 21 männliche sowie 39 weibliche Primaten untersucht. 31 Primatenschädeln konnte jedoch keinem Geschlecht zugeordnet werden. Das betraf insbesondere die Strepsirrhini. Wir verzichteten auf eine individuelle Betrachtung und Bewertung der Unterschiede bezüglich eines möglichen vorhandenen Geschlechtsdimorphismus, sodass alle erhobenen Daten geschlechtsunabhängig zusammengefasst und ausgewertet

wurden. Somit ergeben sich aus den Daten und Analysen dieser Studie zwar ein genereller Überblick über das Foramen rotundum sowie dessen Verlauf der einzelnen untersuchten Primaten, ohne jedoch mögliche geschlechtsabhängige Besonderheiten zu gestatten.

### 5.6. Schlussfolgerungen

Unter Bezugnahme auf die in der Einleitung formulierten Ziele lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Das Foramen rotundum stellt einen knöchernen Kanal dar, der die Fossa cranii media mit dem oberen Drittel der Fossa pterygopalatina verbindet. Als Besonderheit zeigte das Foramen rotundum der Loriformes eine partielle Öffnung der medialen Wand des knöchernen Konstrukts in der Fissura orbitalis superior. Mittels der erhobenen biometrischen Daten ließ sich eine große Variabilität in der Länge des Foramen rotundum der verschiedenen Primatenspezies beobachten, wobei die gehaupte Kapuziner (*Cebus apella*) das scheinbar längste, die Loriformes das kürzeste Foramen rotundum aufweisen. Der Mensch ordnete sich bei Betrachtung der Länge des Foramen rotundum auf etwa einer Ebene mit den Orang-Utans, den Mantelaffen sowie den Lemuriformes ein. Die Öffnungsfläche des Foramen rotundum in die Fossa pterygopalatina zeigte bei den Loriformes eine vergleichsweise große Fläche. Bei den Lemuriformes hingegen zeigte sich die kleinste Öffnungsfläche. Der Mensch wies die zweitgrößte Fläche des Foramen rotundum auf.
2. Das Foramen rotundum zeigte in allen untersuchten Primaten eine unmittelbare Lagebeziehung zum Sinus sphenoidalis. Die Schimpansen und Gorillas wiesen ein am kranialen Knochenrand des Sinus sphenoidalis liegendes und dreiseitig vom Sinus umschlossenes Foramen rotundum auf. Bei den übrigen Primaten, einschließlich den Menschen, lag das Foramen rotundum lateral zum Sinus sphenoidalis. Auf Grund der fehlenden Pneumatisierung des Os sphenoidale der untersuchten *Alouatta caraya* konnten hier keine Lagebeziehung zum Sinus sphenoidalis erhoben werden.

Der Canalis pterygoideus konnte in Schädeln der Gorilla gorilla und Loriformes nicht zweifelsfrei aufgefunden werden. Beim Menschen sowie Orang-Utan lag das Foramen rotundum kranio-lateral zum Canalis pterygoideus, beim Schimpansen direkt lateral. Als Besonderheit liegt das Foramen rotundum beim Gibbon und *Cebus apella* medial des Canalis pterygoideus. Der Canalis opticus befand sich bei allen Primaten, außer den Loriformes, einheitlich kranio-lateral des Foramen rotundum. Die Loriformes zeigten eine kranio-mediale Lage des Foramen zum Canalis opticus. Die Orbita befand sich in allen untersuchten Primaten kranial des Foramen rotundum. Beim Orang-Utan, Gibbon sowie *Cebus apella* war die Orbita etwas weiter nach posterior verlagert, wohingegen sie bei den anderen Vertretern kranio-lateral des Foramen rotundum lag. Als Besonderheit fand sich das Foramen rotundum der Lemuriformes kaudo-medial der Orbita. Die Fissura orbitalis superior konnte bei allen Primaten einheitlich kranial des Foramen rotundum identifiziert werden.

3. Das Foramen rotundum stellte sich beim Menschen als auch bei allen nicht-menschlichen Schädeln als rundlicher bis ovaler knöcherner Kanal dar. Die Loriformes wichen auf Grund einer partiellen Öffnung des Knochenkanals in der Fissura orbitalis superior von dieser typischen Form ab. Der Verlauf des Foramen rotundum beim Schimpansen, Siamang, Gorilla, Orang-Utan sowie Strepsirrhini entspricht im Wesentlichen dem kranio-lateralen Verlauf des Menschen. Abweichend vom typischen Verlauf des Menschen zeigen die *Alouatta caraya* einen kaudo-lateralen Verlauf sowie die Schwarzhandgibbons einen kranio-medialen Verlauf. Lediglich den Mantelaffen (*Colobus guereza*) konnte auf Grund der hohen Variationen der Verläufe innerhalb der untersuchten Schädel kein einheitlich definierter Verlauf des Foramen rotundum zugeordnet werden.

In Relation zum Gesichtsschädelvolumen zeigte das Foramen rotundum des Menschen die zweitgrößte Fläche aller untersuchten Primaten. Lediglich die Fläche der Loriformes war um ein 17-faches größer. In absteigender Reihenfolge folgten die Flächen der gehauften Kapuziner, Gorillas, Brüllaffen, Gibbons, Orang-Utans, Schimpansen, Mantelaffen und



Lemuriformes. Bei Betrachtung der Länge des Foramen rotundum in Relation zur Schädelbasislänge zeigte der Mensch ein etwa ähnlich langes Foramen auf, wie es auch bei Orang-Utan, *Colobus guereza* sowie den Lemuriformes der Fall war. Die Länge des Foramen rotundum der Schimpansen, Brüllaffen, Gorillas sowie gehaupten Kapuziner war größer als die des Menschen. Hingegen zeigten die Gibbons sowie die Loriformes ein im Vergleich kürzeres Foramen rotundum.

4. Die vorliegende Studie zeigt mittels computertomographischer Schichtaufnahmen eine Übersicht der typischen Anatomie des Foramen rotundum bei menschlichen als auch ausgewählten nicht-menschlichen Primaten und stellt diese in einen direkten Vergleich zueinander. Publierte anatomische Kenntnisse über das Foramen rotundum beim Menschen konnten bestätigt werden. Weiterhin wurden bei nicht-menschlichen Primaten erstmalig Verlaufsbeschreibungen des Foramen rotundum anhand definierter Grundebenen erstellt sowie eine reproduzierbare Einordnung des Knochenkanals in den anatomischen Kontext umliegender Strukturen vorgenommen. Es konnten signifikante Unterschiede der einzelnen Primaten untereinander, als auch zum Menschen erarbeitet werden.

Die erhobenen biometrischen Daten sowie die herausgearbeiteten topografisch-anatomischen Besonderheiten des Foramen rotundum der untersuchten Spezies können somit einen Beitrag zur weiteren Erforschung der funktionell anatomischen Besonderheiten der Schädelbasis der Primaten, einschließlich des Menschen liefern. Solche Kenntnisse sind nicht nur von Interesse für Fachgebiete wie Anatomie, Anthropologie, Primatologie und Evolutionsbiologie, sondern auch für verschiedene klinische Fachgebiete wie Neurochirurgie, Hals-Nasen-Ohrenheilkunde, Mund-Kiefer-Gesichts-Chirurgie, Radiologie und Forensische Medizin.

## 6. Zusammenfassung

Die vorliegende Studie befasst sich mit der Lage und der Ausrichtung des Foramen rotundum beim Menschen und nicht-menschlichen Primaten. Letztere umfasste sowohl Strepsirrhini als auch Platyrrhini und Catarrhini. Die Untersuchungen basieren auf insgesamt 94 computertomographischen Datensätzen von Schädeln unterschiedlicher Gattungen von Primaten, einschließlich menschlicher Schädel beider Geschlechter. Mit Hilfe der Software RadiAnt DICOM Viewer (v4.6.9 ©) wurden zunächst geeignete Grund- und Messebenen definiert. Dabei galt es zu berücksichtigen, dass es sich beim Foramen rotundum nicht um eine einfache Öffnung der Schädelbasis handelt, sondern um einen Knochenkanal mit einer bestimmten Ausrichtung. Basierend auf diesen vorab definierten Grund- und Messebenen wurden verschiedene Strecken-, Winkel- als auch Flächenmessungen vorgenommen, um die Lage sowie den Verlauf des Foramen rotundum zu bestimmen. Weiterhin wurde die anatomische Lage des Foramen rotundum zu umliegenden Strukturen untersucht. Speziell erstellte Indizes erlaubten einen artenübergreifenden Vergleich der Maße des Foramen rotundum. Die vielfältigen statischen Beziehungen zwischen den Maßen des Foramen rotundum und des Gesichtsschädels wurden zunächst mit Hilfe einer Korrelationsanalyse untersucht. Basierend auf diesen Ergebnissen erfolgten für ausgewählte signifikante Korrelationen weitere Untersuchungen mit Hilfe einer einfachen linearen Regression.

Das Foramen rotundum zeigte sich als rundlicher bis ovaler, geschlossener Knochenkanal. Lediglich innerhalb der Loriformes wies der knöcherne Kanal eine partielle Öffnung innerhalb der Fissura orbitalis superior auf. In Bezug zu den vorab definierten Grundebenen läuft das Foramen rotundum beim Menschen, ausgehend von seiner Öffnung in der Fossa cranii media, nach kranio-lateral. Es befindet sich beim Menschen vorrangig lateral des Sinus sphenoidalis sowie kaudal der Fissura orbitalis superior und kranio-lateral des Canalis pterygoideus. Eine ähnliche räumliche Beziehung zu umliegenden Strukturen zeigte das Foramen rotundum auch bei Orang-Utan und *Cepus apella*. Auch bei Schimpansen und Gorillas stellten sich dem Menschen sehr ähnliche anatomische Beziehungen des Foramen rotundum dar. Im Gegensatz zur Situation beim Menschen ist das Foramen rotundum der afrikanischen Menschenaffen jedoch am oberen Rand des Sinus

sphenoidalis lokalisiert und wird von diesem an drei Seiten umgeben. Bei Gibbons und Mantelaffen befand sich das Foramen rotundum stets medial vom Canalis pterygoideus.

Die durchschnittliche Fläche des Foramen rotundum beim Menschen beträgt ca. 7,76 mm<sup>2</sup>. In Bezug zum Gesichtsschädelvolumen hat das Foramen rotundum des Menschen die zweitgrößte Fläche aller untersuchten Primaten. Als einziger Primat war die Fläche des Foramen rotundum der Loriformes in Bezug zu dessen Gesichtsschädelvolumen etwa 17-fach größer als beim Menschen. Im artenübergreifenden Vergleich zeigten die Gorillas die kleinste Flächen-Gesichtsschädel-Relation des Foramen rotundum. Diese war ca. 33-fach kleiner gegenüber dem Menschen. In Bezug zur Schädelbasislänge sind die Kanallängen des Foramen rotundum beim Menschen, Orang-Utan, Mantelaffen sowie den Lemuriformes in etwa gleich lang. Mit einem in Bezug zur Schädelbasislänge etwa 3,5-fach längeren Foramen rotundum, als es der Mensch besitzt, wiesen die gehaupten Kapuziner zugleich das längste Foramen rotundum der untersuchten Primaten auf. Die Gorillas, Brüllaffen und Schimpansen ordneten sich bezüglich der Kanallänge in absteigender Reihenfolge zwischen den *Cebus apella* und den Menschen ein. Ein im Vergleich zum Menschen relativ kürzeres Foramen rotundum fand sich bei den Gibbons sowie den Loriformes.

Im Ergebnis der Korrelationsanalyse konnten signifikante Zusammenhänge zwischen dem Foramen rotundum und den Schädelmaßen Gesichtsschädelvolumen, Gesichtsschädellänge sowie Schädelbasislänge bei Mantel- und Brüllaffen sowie den Loriformes beobachtet werden. Beim Menschen korreliert die Länge des Foramen rotundum signifikant mit dem Gesichtsschädelvolumen, der Obergesichtshöhe sowie der Mittelgesichtsbreite. Darüber hinaus korreliert die Fläche des Foramen rotundum signifikant mit der Gaumenlänge.

Diese Studie ermöglicht einen detaillierten Vergleich zwischen der Morphologie des Foramen rotundum des Menschen und nicht-menschlichen Primaten. Die im Rahmen dieser Arbeit erhobenen biometrischen Daten sowie anatomischen Einordnungen können als Grundlage zur weiteren Erforschung der menschlichen, aber auch nicht-menschliche Strukturen der Schädelbasis sowie evolutionärer

Anpassungsprozesse dienen. Die herausgearbeiteten Erkenntnisse über die Topographie des Foramen rotundum können sowohl für die Grundlagenforschung, als auch für verschiedene klinische Fachgebiete wie Neurochirurgie, Hals-Nasen-Ohrenheilkunde, Mund-Kiefer-Gesichts-Chirurgie, Radiologie und Forensische Medizin von Interesse sein.

## 7. Literaturverzeichnis

- Alt KW (1997): Odontologische Verwandtschaftsanalyse. Individuelle Charakteristika der Zähne in ihrer Bedeutung für Anthropologie, Archäologie und Rechtsmedizin. Stuttgart: G. Fischer
- Aumüller G, Aust G, Doll A, Engele J, Kirsch J, Mense S (2010): Duale Reihe - Anatomie. 2. Auflage. Stuttgart: Thieme
- Bärenklau M (2016): Biometrische Untersuchungen zum Einfluss klimatischer Faktoren auf die Morphologie der Nasennebenhöhlen des Menschen. Med. Diss., Universität Greifswald
- Bartsch H (2007): Taschenbuch mathematischer Formeln. 21. Auflage. München: Carl-Hanser-Verlag
- Biegert J (1957): Der Formwandel des Primatenschädels und seine Beziehungen zur ontogenetischen Entwicklung und den phylogenetischen Spezialisierungen der Kopforgane. Gegenbaurs Morphol Jahrb: 77–199
- Biennu T, Guy F, Coudyzer W, Gilissen E, Roualdès G, Vignaud P, Brunet M (2011): Assessing endocranial variations in great apes and humans using 3D data from virtual endocasts. *Am J Phys Anthropol* 145: 231–246
- Boaz NT, Almquist AJ (2002): *Biological Anthropology. A Synthetic Approach to Human Evolution*. 2nd Edition. Upper Saddle River: Prentice Hall
- Bourne GH (2014): *The Biochemistry and Physiology of Bone*. Burlington: Elsevier Science
- Bronner F, Farach-Carson MC, Roach HI (2010): *Bone and Development*. London: Springer
- Corruccini RS, Beecher RM (1982): Occlusal variation related to soft diet in a nonhuman primate. *Science* 218: 74–76
- Corruccini RS, Beecher RM (1984): Occlusofacial morphological integration lowered in baboons raised on soft diet. *J Craniofac Genet Dev Biol* 4: 135–142
- Dähnert W (2012): *Radiology Review Manual*. 7th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer Health

- Demartini L, Conversa G, Bettaglio R, Bonezzi C, Marchesini M (2021): Retrogasserian radiofrequency thermocoagulation. A repeatable treatment in trigeminal neuralgia unresponsive to drug therapy. *Saudi J Anaesth* 15: 109–115
- Dixon A, Hoyte N, Ronning O (2017): *Fundamentals of Craniofacial Growth*. Florida: CRC Press
- Drake RL, Vogl W, Mitchell AWM, Horn A, Tibbitts RM, Richardson PE, Bräuer L (2017): *Gray's Atlas der Anatomie*. 2. Auflage. München: Urban & Fischer-Verlag
- Edwards B, Wang JM, Iwanaga J, Loukas M, Tubbs RS (2018): Cranial Nerve Foramina Part I. A Review of the Anatomy and Pathology of Cranial Nerve Foramina of the Anterior and Middle Fossa. *Cureus* 10: e2172
- Enlow DH, Hans MG (1996): *Essentials of Facial Growth*. Philadelphia: Saunders
- Fanghänel J, Pera F, Anderhuber F, Nitsch R (2009): *Waldeyer Anatomie des Menschen*. 18. Aufl. Berlin: De Gruyter
- Garlick JA, Pfeiffer LD, Phelan JN (2009): *The Clinical Skull Manual*. Bloomington: AuthorHouse
- Geissmann T (2003): *Vergleichende Primatologie*. Berlin: Springer
- Gunduz HB, Cevik OM, Asilturk M, Gunes M, Uysal ML, Sofuoglu OE, Emel E (2021): Percutaneous radiofrequency thermocoagulation in trigeminal neuralgia. Analysis of early and late outcomes of 156 cases and 209 interventions. *J Korean Neurosurg Soc* 64: 827–836
- Hanken J, Hall BK (Hg.) (1993): *The Skull*. Chicago: University of Chicago Press
- Harley B, Wickremesekera A, Tan N, Davies E, Robinson S, Baguley C, Wormald PJ (2019): Endoscopic transnasal repair of two cases of spontaneous cerebrospinal fluid fistula in the foramen rotundum. *J Neurosurg Soc Austral* 59: 350–352

- Hauser G, DeStefano GF (1989): Epigenetic variants of the human skull. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
- Hofer H (1960): Studien zum Problem des Gestaltwandels des Schädels der Säugetiere, insbesondere der Primaten. *Z Morph Anthropol* 50: 299-316
- Jiang X, Sachiko I, Maxson RE, Sucov HM, Morriss-Kay GM (2002): Tissue origins and interactions in the mammalian skull vault. *Dev Biol* 241: 106–116
- Karthikeyan G, Sankaran P, Raghunath G, Yuvaraj M, Arathala R (2017): Morphometric study of various foramina in the middle cranial fossa of the human skull. *Ind J Clin Ana Physio*: 574–578
- Kastamoni Y, Dursun A, Ayyildiz VA, Ozturk K (2021): An investigation of the morphometry and localization of the foramen ovale and rotundum in asymptomatic individuals and patients with trigeminal neuralgia. *Turk Neurosurg* 31: 771–778
- Kier EL, Rothman SLG (1976): Radiologically significant anatomic variations of the developing sphenoid in humans. In: Bosma J (Ed.) *Symposium on Development of the Basiscranium. Developmental Studies on the Postsphenoide of the Human Sphenoid Bone*. Bethesda: U.S. Department of Health, Education and Welfare, pp 107–138
- Kim HS, Kim DI, Chung IH (1996): High-resolution CT of the pterygopalatine fossa and its communications. *Neurorad* 38: 120–126
- Kodama G (1976): Developmental studies on the body of the human sphenoid bone. In: J Bosma (Ed.): *Symposium on Development of the Basiscranium. Developmental Studies on the Postsphenoide of the Human Sphenoid Bone*. Bethesda: U.S. Department of Health, Education and Welfare , pp 156–189
- Koppe T; Nonnenmacher E; Kaduk W; Flohr S (2016): Functional morphology of the hominoid pterygopalatine fossa. In Flohr S (Hrsg.) *Beiträge zur Archäozoologie und Prähistorischen Anthropologie, Band X*. Langenweißbach: Beier & Beran, pp 189-193
- Lang J (2001): Skull base and related structures. *Atlas of clinical anatomy*. 2. ed. Stuttgart: Schattauer

- Lieberman DE (2011): The Evolution of the human head. Epigenetic Intergration, Complexity and Evolvability of the Head. Cambridge: Belknap Press of Harvard University Press
- Lieberman DE, Krovitz GE, Yates FW, Develin M, St. Claire M (2004): Effects of food processing on masticatory strain and craniofacial growth in a retrognathic face. *J Hum Evol* 46: 655–677
- Lieberman DE, Ross CF, Ravosa MJ (2000): The primate cranial base. Ontogeny, function, and integration. *Am J Phys Anthropol* 31: 117–169
- Liu P, Zhong W, Liao C, Liu M, Zhang W (2016): Narrow foramen ovale and rotundum. A role in the etiology of trigeminal neuralgia. *J Craniofac Surg* 27: 2168–2170
- Luckett WP, Szalay FS (1976): Phylogeny of the Primates. A Multidisciplinary Approach. Boston: Springer US
- Luong DH, Chen YC, Tran LNT, Hung S, Ly QX (2020): Spontaneous cerebrospinal fluid leak via foramen rotundum in a non-obese male presented as pseudo-Chiari malformation type I. A case report and literature review. *J Int Med Res* 48
- Mafee MF, Valvassori GE, Becker M (2005): Imaging of the head and neck. Stuttgart: Thieme
- Maier W (1993): Zur Evolutiven und funktionellen Morphologie des Gesichtsschädels der Primaten. *Z Morphol Anthropol* 79: 279–299
- McCarthy RC (2001): Anthropoid cranial base architecture and scaling relationships. *J Hum Evol* 40: 41–66
- Mohebbi A, Rajaeih S, Safdarian M, Omidian P (2017): The sphenoid sinus, foramen rotundum and vidian canal: a radiological study of anatomical relationships. *Braz J Otorhinolaryngol* 83: 381–387
- Neaux D, Guy F, Gilissen E, Coudyzer W, Ducrocq S (2013): Covariation between midline cranial base, lateral basicranium, and face in modern humans and chimpanzees. A 3D geometric morphometric analysis. *Anat Rec* 296: 568–579



- Nommensen BK (2014): Zur postnatalen Entwicklung der Fossa pterygopalatina des Schimpansen (*Pan troglodytes*). Eine biometrische Studie basierend auf der Computertomographie. Med Diss, Universität Greifswald
- Nonnenmacher E (2014): Zur funktionellen Morphologie der Fossa pterygopalatina der Hominoidea. Eine biometrische Studie auf der Grundlage der digitalen Volumetomographie. Med Diss, Universität Greifswald
- Pfleiderer S (2014): Zur funktionellen Morphologie der Nasennebenhöhlen der Feuchtnasenprimaten (*Strepsirrhini*). Eine quantitative Studie auf Grundlage der Mikro-Computertomographie. Med Diss, Universität Greifswald
- Rae T, Koppe T, Spoor F, Benefit B, McCrossin M (2002): Ancestral loss of the maxillary sinus in Old World monkeys and independent acquisition in *Macaca*. *Am J Phys Anthropol* 117:293–296
- Reiche CT (2017): Zur Topografie der Fossa pterygopalatina des Menschen (*Homo sapiens*). Eine biometrische Studie basierend auf der digitalen Volumetomographie (DVT). Med Diss, Universität Greifswald
- Rohen JW, Lütjen-Drecoll E (2006): Funktionelle Embryologie. Die Entwicklung der Funktionssysteme des menschlichen Organismus. Stuttgart: Schattauer
- Ross CF, Ravosa MJ (1993): Basicranial flexion, relative brain size, and facial kyphosis in nonhuman primates. *Am J Phys Anthropol* 91: 305–324
- Scheuer L, Black SM (2004): *The Juvenile Skeleton*. London: Elsevier Academic Press
- Schröpel M (2015): *Bildatlas der Primaten*. Norderstedt: Books on Demand
- Shapiro R, Robinson F (1967): The foramina of the middle fossa. A phylogenetic, anatomic and pathologic study. *Am J Roentgenol Radium* 101: 779–794
- Sperber GH, Guttmann GD, Sperber SM (2000): *Craniofacial development*. London: B C Decker
- Starck D (1975a): *Embryologie. Ein Lehrbuch auf allgemein biologischer Grundlage*. Stuttgart: Thieme

- Starck D (1975b): The development of the chondrocranium in primates. In: Lockett WP, Szalay FS (Eds.): *Phylogeny of the Primates. A Multidisciplinary Approach*. Berlin: Springer, pp 127–155
- Swindler DR (2012): *Introduction to the Primates*. Seattle: University of Washington Press
- Swindler DR, George RM (2002): *Primate dentition. An Introduction to the Teeth of Non Human Primates*. Cambridge: Cambridge University Press
- Thenius E (2020): *Zähne und Gebiß der Säugetiere*. Berlin: De Gruyter
- Vogl TJ (1999): *Differential diagnosis in head and neck imaging. A systematic approach to the radiologic evaluation of the head and neck region and the interpretation of difficult cases*. Stuttgart: Thieme
- Wan Q, Zhang D, Cao X, Zhang Y, Zhu M, Zuo W (2018): CT-guided selective percutaneous radiofrequency thermocoagulation via the foramen rotundum for isolated maxillary nerve idiopathic trigeminal neuralgia. *J Neurosurg* 128: 211–214
- Wang R, Han Y, Lu L (2019): Computer-assisted design template guided percutaneous radiofrequency thermocoagulation through foramen rotundum for treatment of isolated V2 trigeminal neuralgia: A Retrospective Case-Control Study. *Pain Res Manag*, Article ID 9784020
- Wang T, Xu S, He Q, Tao J, Ni H, Zhu J (2021): Efficacy and safety of radiofrequency thermocoagulation with different puncture methods for treatment of V1 trigeminal neuralgia. A prospective study. *Pain Physician* 24: 145–152
- Xue TQ, Zhang QX, Bian H, Zhou PC, Liu C, Niu SF (2019): Radiofrequency thermocoagulation through foramen rotundum versus foramen ovale for the treatment of V2 trigeminal neuralgia. *Pain physician* 22: 609-614
- Yanagi S (1987): Developmental studies on the foramen rotundum, foramen ovale and foramen spinosum of the human sphenoid bone. *Hokkaido J Med Sci* 62: 485–496

Zilles K, Tillmann B (2010): Anatomie. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg

## 8. Anhang

Tab. A1: Einzelwerte der verschiedenen Maße des Foramen rotundum (Teil 1)

G	S	ID	FA R	FAL	TFRD 1	TFRD 2	TFRD 3	TFRD 4	TFRW 1	TFRW 2	SFRl 1	SFRl 2	SFRW 1	SFRW 2
1	M	3574_200 5	6,1	5,1	15,5	14,2	16,6	15,9	-9,5	-14,9	6,6	6,3	-12,8	-22,3
1	M	3593_200 5	9,0	8,3	17,0	14,9	20,4	18,8	-24,2	-24,8	5,6	7,6	-11,4	-13,9
1	F	3595_200 5	4,4	3,5	16,5	14,9	16,8	16,9	-1,5	-22,9	5,3	4,1	0,2	-15,2
1	F	K156	8,4	7,7	16,9	18,4	16,9	19,1	0,0	6,6	5,3	6,6	-28,5	-25,0
1	F	3607	11,2	11, 5	18,4	16,7	18,6	17,2	-3,1	-5,3	5,9	5,3	-12,9	-9,2
1	F	3605	7,1	8,1	16,6	16,0	18,1	17,4	-17,4	-14,1	4,2	5,1	-6,4	-19,6
1	M	3601	8,7	10, 7	17,2	15,8	17,6	16,5	-3,6	-5,5	5,4	4,7	0,0	-10,3
1	F	3610	6,4	7,0	16,3	12,8	15,6	11,9	7,8	10,8	4,7	3,9	-11,3	-24,1
1	M	3613	7,2	7,5	16,3	14,2	17,3	14,4	-11,6	-1,2	3,3	4,1	-11,7	2,5
1	M	3617	10,2	10, 2	20,8	19,8	19,8	20,7	10,2	-8,2	4,4	5,2	-12,8	-15,9
2	M	KUA-897	10,9	8,4	12,5	16,7	14,2	18,4	-22,5	-12,7	5,2	6,1	-11,2	-20,8
2	F	KUA-1047	7,0	6,3	14,2	17,4	15,3	17,4	-10,0	0,0	6,2	6,4	-7,9	-17,4
2	M	KUA-1074	7,1	6,8	16,7	19,9	16,6	19,6	0,6	-2,7	4,9	3,9	-16,5	-6,5
2	M	KUA-1137	9,4	9,6	19,1	18,4	19,1	20,5	0,0	-18,8	5,3	3,9	-30,0	-32,8
2	F	KUA-1271	7,9	7,5	17,1	17,3	16,8	16,8	2,8	5,5	4,6	5,5	-22,5	-3,2
2	F	KUA_1297	8,6	6,9	14,9	15,2	16,7	16,7	-19,1	-11,3	6,9	8,0	-39,4	-28,3
2	F	KUA_1416	6,2	9,0	17,0	19,6	18,1	20,3	-6,7	-8,2	7,8	6,3	-7,8	-13,3
2	M	KUA_2151	8,5	7,4	19,3	17,7	18,3	19,0	2,7	-6,5	6,6	5,2	1,7	-8,1
2	M	KUA_2253	9,9	7,9	15,6	18,7	18,4	18,9	-25,5	-2,2	4,8	5,6	-33,9	-38,4
2	F	KUA_2791	3,7	3,1	16,1	19,2	16,7	18,4	-4,3	6,5	7,8	6,7	-26,4	-21,2

G: Gattung, 1: *Homo sapiens (Alytus)*, 2: *Homo sapiens (Kyoto)*, 3: *Pongo pygmaeus*, 4: *Gorilla gorilla*, 5: *Pan troglodytes*, 6: *Hylobatidae* 7: *Colobus guereza*, 8: *Cebus apella*, 9: *Alouatta*, 10: *Lemuriformes*, 11: *Loriformes*, ID: Identifikation, S: Sex, m: männlich, w: weiblich, u: unbekannt, Maße in mm und mm<sup>2</sup>

Tab. A2: Einzelwerte der verschiedenen Maße des Foramen rotundum (Teil 2)

G	S	ID	FA R	FAL	TFRD 1	TFRD 2	TFRD 3	TFRD 4	TFRW 1	TFRW 2	SFrL 1	SFrL 2	SFrW 1	SFrW 2
3	F	14.4.2	22, 1	16, 1	11,3	11,5	10,7	11,1	9,9	10,4	3,9	2,8	-23,2	-24,2
3	F	14.4.7	72, 2	66, 3	12,0	12,7	12,4	12,5	-6,4	2,7	4,4	4,1	-16,3	-11,2
3	F	14.5.2	-	-	13,1	11,7	12,3	11,4	13,4	4,5	4,2	3,2	3,7	0,0
3	F	14.5.4	10, 7	3,7	13,4	13,0	13,2	12,2	3,2	8,9	4,3	3,9	2,9	6,0
3	F	14.5.6	-	-	9,7	9,1	10,0	8,8	-7,2	10,9	3,3	2,5	6,3	7,9
3	F	14.6.6	-	-	13,5	13,3	13,3	12,7	1,7	4,7	6,4	5,6	-2,4	0,4
3	F	14.6.7	-	-	11,8	11,7	10,8	11,1	13,6	8,4	7,3	4,5	-11,4	-10,9
3	F	14.6.8	-	-	12,7	13,8	12,6	13,7	3,0	1,1	3,3	2,5	-6,3	-7,9
3	F	N8J08	-	-	11,7	12,1	11,8	12,0	-1,0	1,4	5,5	4,7	-10,7	-2,3
3	F	N6J08	-	-	13,9	15,0	13,5	14,3	3,4	6,9	6,1	6,6	-4,3	-1,6
4	F	G1	3,1	2,9	15,4	15,4	15,6	17,1	-1,3	-9,4	8,7	10,3	-0,9	2,5
4	F	G2	7,5	8,8	16,8	15,3	19,0	16,6	-7,5	-6,2	15,2	16,1	2,1	1,5
4	F	G3	6,2	7,4	14,9	15,2	16,3	17,8	-5,3	-10,0	15,3	13,5	-2,7	2,7
4	F	G4	5,0	3,6	19,1	14,9	20,0	15,1	-3,9	-1,1	14,4	14,4	-10,0	-11,1
5	U	?_HGW	1,6	1,6	9,1	8,7	11,0	10,9	19,8	21,6	3,8	4,7	-17,7	-1,7
5	F	F_HGW	1,8	3,3	11,1	9,7	13,1	11,8	-26,8	-25,8	3,9	3,7	3,5	3,5
5	M	M_HGW	10, 1	9,2	11,8	13,9	12,6	14,1	-8,2	1,2	9,4	7,8	3,9	2,0
5	M	M2_HGW	6,9	6,4	11,2	13,6	11,2	13,5	0,0	0,3	4,6	4,9	-25,1	-24,4
5	F	W_1	9,4	8,0	14,3	14,7	14,3	14,0	0,0	7,3	7,8	7,5	-13,7	-3,9
5	F	W_2	3,8	5,6	10,8	11,3	11,7	12,0	-12,2	-10,5	7,0	5,0	-6,8	2,7
5	F	W_3	6,0	6,3	11,8	12,8	12,1	12,7	-2,6	0,2	6,2	6,2	-3,8	0,0
6	U	Hylobates lar 5	2,4	3,6	7,0	6,2	6,6	6,4	20,6	-7,5	2,0	2,1	-5,3	-6,5
6	U	Hylobates agilis 7	1,8	2,1	6,4	8,2	6,1	8,2	4,1	0,5	3,1	2,2	-1,7	-1,7
6	M	Symphalangus	4,5	4,4	8,9	7,7	9,3	8,1	-3,9	-3,8	2,6	3,3	-0,2	5,2

G: Gattung, 1: *Homo sapiens (Alytus)*, 2: *Homo sapiens (Kyoto)*, 3: *Pongo pygmaeus*, 4: *Gorilla gorilla*, 5: *Pan troglodytes*, 6: *Hylobatidae* 7: *Colobus guereza*, 8: *Cebus apella*, 9: *Alouatta*, 10: *Lemuriformes*, 11: *Loriformes*, ID: Identifikation, S: Sex, m: männlich, w: weiblich, u: unbekannt, Maße in mm und mm<sup>2</sup>

Tab. A3: Einzelwerte der verschiedenen Maße des Foramen rotundum (Teil 3)

G	S	ID	FAR	FAL	TFRD1	TFRD2	TFRD3	TFRD4	TFRW1	TFRW2	SFrL1	SFrL2	SFrW1	SFrW2
7	U	C_0_160	1,0	0,8	3,2	3,7	3,8	4,1	-9,6	-8,5	2,9	2,9	-6,7	-5,9
7	M	A 16-66	3,1	2,1	4,8	4,6	5,2	5,3	-4,3	-6,1	3,9	3,8	-2,2	-6,2
7	F	B 27-66	1,2	1,3	3,8	4,3	4,5	4,6	-10,0	-3,3	3,0	3,5	1,3	-0,9
7	M	D 221-69	1,1	0,9	5,7	5,0	4,8	4,9	10,9	2,0	3,7	4,3	-11,9	-9,4
7	F	E 100-67	1,2	1,0	5,4	5,3	5,1	4,4	2,6	9,5	2,8	1,5	-8,9	0,0
7	M	F 166-68	1,6	2,1	5,1	5,8	5,1	5,8	0,4	0,0	4,7	4,7	0,6	2,3
7	F	G fem 271-69	0,9	1,3	3,8	4,5	4,4	4,6	-11,1	-0,3	2,6	2,6	1,4	-0,3
7	F	H ad 95- 67	1,1	1,0	3,8	5,1	3,4	4,8	5,9	4,4	2,0	2,5	-4,6	-4,5
7	F	I 19-66	2,2	1,9	4,2	5,3	5,1	5,2	-10,5	1,6	3,7	4,8	-2,2	-1,8
7	U	J 272-69	1,6	2,2	4,5	3,5	4,4	3,7	3,2	-3,7	3,8	3,7	-2,6	-3,8
7	M	K 430-69	1,2	1,2	4,5	4,3	4,9	4,4	-6,2	0,4	2,6	2,9	4,1	-2,0
7	M	L 22-66	0,8	0,8	4,2	3,5	3,7	3,3	5,0	2,9	5,3	3,9	-5,1	-9,6
7	F	M 429-69	1,7	2,0	6,9	6,0	4,5	5,1	10,4	6,1	4,8	5,2	-4,7	-3,8
7	F	N 17-66	1,4	1,8	4,0	4,4	3,7	4,3	3,2	1,6	2,9	2,7	4,1	-4,5
7	F	O ad fem 158-68	1,6	1,0	4,4	6,2	4,0	5,7	2,3	4,9	6,8	6,8	-2,1	-1,1
8	F	cebus_13	5,9	5,2	5,1	4,8	4,9	5,0	-3,1	-1,3	3,8	3,7	-11,1	-12,9
8	U	cebus_7	5,3	5,1	4,8	4,8	5,6	6,2	-9,0	-16,7	4,0	4,8	-8,9	0,3
8	M	cebus_14	4,2	4,4	5,3	5,6	4,5	4,9	7,7	8,6	5,7	5,7	-12,2	-8,0
8	M	cebus_15	5,1	5,6	5,6	5,8	5,6	5,3	0,0	5,7	7,8	6,9	-11,5	-12,8
9	M	Alouatta 1	11,0	12,8	10,3	8,4	6,0	5,9	11,8	21,4	11,4	10,2	17,1	19,2
9	F	Alouatta 2	9,4	11,7	7,9	6,1	4,8	4,7	17,2	8,2	7,9	6,4	23,1	18,5
9	M	Alouatta 4	10,4	12,9	8,3	6,5	6,3	4,6	11,1	10,6	7,1	6,7	6,2	11,8
9	U	Alouatta 8	14,4	11,1	8,3	7,4	6,9	7,4	7,8	0,0	6,5	6,5	-19,9	-17,5
9	F	Puertp Whatson	6,6	4,8	8,2	6,1	5,1	3,2	26,1	25,0	6,8	6,6	21,3	24,4

G: Gattung, 1: *Homo sapiens* (Alytus), 2: *Homo sapiens* (Kyoto), 3: *Pongo pygmaeus*, 4: *Gorilla gorilla*, 5: *Pan troglodytes*, 6: *Hylobatidae* 7: *Colobus guereza*, 8: *Cebus apella*, 9: *Alouatta*, 10: *Lemuriformes*, 11: *Loriformes*, ID: Identifikation, S: Sex, m: männlich, w: weiblich, u: unbekannt, Maße in mm und mm<sup>2</sup>

Tab. A4: Einzelwerte der verschiedenen Maße des Foramen rotundum (Teil 4)

G	S	ID	FA R	FA L	TFrD 1	TFrD 2	TFrD 3	TFrD 4	TFrW 1	TFrW 2	SFrL 1	SFrL 2	SFrW 1	SFrW 2
1 0	U	<i>Avahi laniger</i>	2,5	3,3	4,2	3,9	4,5	4,5	-19,0	-23,5	2,2	1,7	-12,9	-13,9
1 0	U	<i>Aye aye</i>	2,9	2,6	3,1	2,7	6,5	5,5	-31,0	-26,7	5,6	5,6	0,6	-4,6
1 0	U	<i>Cheirogaleus major</i>	0,4	0,4	3,2	3,6	3,8	3,8	-16,1	-9,1	2,3	2,4	-11,3	-7,1
1 0	U	<i>Cheirogaleus medius</i>	2,9	2,8	2,6	2,9	2,8	3,3	-10,0	-17,7	1,4	0,9	-22,8	-6,8
1 0	U	<i>Eulemur fulvus</i>	1,5	1,3	5,0	5,0	6,8	6,8	-24,5	-25,2	4,1	4,2	-9,5	-11,3
1 0	U	<i>Eulemur macaco</i>	1,8	1,8	4,1	4,2	5,4	5,7	-28,3	-29,1	1,4	2,6	-17,9	-14,5
1 0	U	<i>Eulemur mongoz</i>	2,0	1,8	5,4	5,2	6,5	6,8	-15,0	-15,7	4,9	5,8	-12,5	-8,3
1 0	U	<i>Eulemur rubriventer</i>	2,0	1,5	5,1	4,9	5,6	4,9	-22,8	-0,2	1,5	1,5	-10,8	-10,3
1 0	U	<i>Haplemur griseus olivaceus</i>	3,7	3,7	2,4	2,9	2,6	2,8	-7,4	2,8	1,5	1,7	-18,0	-18,3
1 0	U	<i>Indri indri</i>	5,9	5,3	6,5	6,5	7,6	7,3	-18,7	-17,0	2,7	2,6	1,9	-3,6
1 0	U	<i>Lemur catta</i>	4,2	6,9	6,0	6,1	5,6	5,6	22,0	21,4	1,2	0,8	4,3	6,5
1 0	U	<i>Lepilemur microdon</i>	2,7	2,9	3,0	3,2	3,0	3,0	1,6	12,2	1,0	1,0	-5,6	-7,4
1 0	U	<i>Lepilemur mustelinus leucopus</i>	3,2	3,7	2,8	2,5	2,7	2,5	6,3	1,0	1,5	1,1	5,7	-16,2
1 0	U	<i>Otolemur crassicaudatus</i>	4,1	3,8	3,0	3,5	3,3	3,5	-16,0	-0,5	1,2	0,8	-32,7	-23,9
1 0	U	<i>Phaner furcifer</i>	3,3	3,4	2,6	2,6	2,7	2,8	-5,5	-12,7	0,8	0,9	28,0	37,1
1 0	U	<i>Propithecus coronatus</i>	5,8	6,4	6,2	6,1	6,5	6,8	-18,6	-27,7	2,8	2,2	9,8	-13,5
1 0	U	<i>Propithecus diadema</i>	6,6	8,1	6,3	6,3	6,8	6,8	-19,9	-15,3	2,7	2,9	-19,4	-17,6

G: Gattung, 1: *Homo sapiens* (Alytus), 2: *Homo sapiens* (Kyoto), 3: *Pongo pygmaeus*, 4: *Gorilla gorilla*, 5: *Pan troglodytes*, 6: *Hylobatidae* 7: *Colobus guereza*, 8: *Cebus apella*, 9: *Alouatta*, 10: *Lemuriformes*, 11: *Loriformes*, ID: Identifikation, S: Sex, m: männlich, w: weiblich, u: unbekannt, Maße in mm und mm<sup>2</sup>

Tab. A5: Einzelwerte der verschiedenen Maße des Foramen rotundum (Teil 5)

G	S	ID	FA R	FA L	TFRD 1	TFRD 2	TFRD 3	TFRD 4	TFRW 1	TFRW 2	SFRl 1	SFRl 2	SFRW 1	SFRW 2
1 0	U	<i>Varecia varigata</i>	6,3	5,0	4,7	6,3	6,6	7,9	-25,0	-28,9	1,8	1,6	-16,2	-16,2
1 1	U	<i>Euoticus elegantulus</i>	-	-	2,5	2,3	2,5	2,2	2,8	28,2	0,4	0,3	-4,2	-20,9
1 1	U	<i>Galago senegalensis</i>	-	-	2,3	2,6	2,5	2,7	-40,9	0,0	0,4	0,3	-30,4	-52,5
1 1	U	<i>Loris tardigradus</i>	7,2	7,2	1,5	1,6	2,2	1,9	-37,1	-25,8	1,0	0,9	-43,6	-35,3
1 1	U	<i>Nycticebus coucang</i>	3,2	3,0	2,6	3,2	3,0	3,0	-7,3	8,8	2,0	1,9	-19,9	-5,5
1 1	U	<i>Perodicticus potto</i>	0,3	0,5	1,7	1,7	2,0	1,9	-10,5	-4,9	2,7	1,8	-3,7	-4,5

G: Gattung, 1: *Homo sapiens (Alytus)*, 2: *Homo sapiens (Kyoto)*, 3: *Pongo pygmaeus*, 4: *Gorilla gorilla*, 5: *Pan troglodytes*, 6: *Hylobatidae* 7: *Colobus guereza*, 8: *Cebus apella*, 9: *Alouatta*, 10: *Lemuriformes*, 11: *Loriformes*, ID: Identifikation, S: Sex, m: männlich, w: weiblich, u: unbekannt, Maße in mm und mm<sup>2</sup>



Tab. A6: Mittelwerte der verschiedenen Maße des Gesichtsschädels (Teil 1)

G	S	ID	GSL	SBL	OGH	MGB	GL	GB	SBKW	GSKW	GSV
1	M	3574_2005	10,18	9,61	6,12	9,2	5,14	3,75	104,9	65,2	263,76
1	M	3593_2005	10,04	10,34	6,74	10,06	5,38	4,28	108,1	64,6	325,70
1	F	3595_2005	9,12	9,34	6,21	9,62	4,48	3,92	117,6	61,1	259,47
1	F	K156	8,52	10,01	6,65	9,8	5,14	4,2	115,2	66,3	274,62
1	F	3607	9,24	9,41	6,5	9,17	4,73	3,92	119,7	57,3	260,39
1	F	3605	8,78	9,4	6,25	8,82	4,25	3,54	126,1	47,7	234,11
1	M	3601	10,03	10,07	6,54	9,13	5,08	4,47	103	74,4	283,71
1	F	3610	8,73	9,71	6,17	8,33	4,41	3,72	128,9	50,5	220,44
1	M	3613	9,44	9,38	6,9	9,15	4,89	4,39	122,6	60	276,36
1	M	3617	10,29	10,18	7,77	9,96	5,52	4,12	96,6	63,9	366,36
2	M	KUA-897	9,89	10,35	6,77	8,89	5,34	3,48	100,8	53,3	286,33
2	F	KUA-1047	9,55	9,58	6,23	8,78	4,57	3,58	109,9	58,5	247,33
2	M	KUA-1074	9,37	10,31	7,18	9,61	4,81	3,71	115,8	58,8	313,35
2	M	KUA-1137	10,26	10,67	7,98	10,85	5,16	4,08	119,9	57,4	418,27
2	F	KUA-1271	8,72	9,47	6,41	9	4,36	3,07	124	61,3	243,83
2	F	KUA_1297	8,98	9,63	6,64	8,13	4,43	3,26	125,2	48,1	233,49
2	F	KUA_1416	9,45	9,78	6,35	8,47	4,65	3,15	121,4	56	243,73
2	M	KUA_2151	9,95	10,44	7,03	10,11	5,13	3,76	118	52,6	339,25
2	M	KUA_2253	9,64	9,99	7,33	10,32	5,04	3,78	131,9	53,5	343,98
2	F	KUA_2791	10,13	9,91	6,43	9,14	4,2	3,87	119,4	51,1	278,70

G: Gattung, 1: *Homo sapiens (Alytus)*, 2: *Homo sapiens (Kyoto)*, 3: *Pongo pygmaeus*, 4: *Gorilla gorilla*, 5: *Pan troglodytes*, 6: *Hylobatidae* 7: *Colobus guereza*, 8: *Cebus apella*, 9: *Alouatta*, 10: *Lemuriformes*, 11: *Loriformes*, ID: Identifikation, S: Sex, m: männlich, w: weiblich, u: unbekannt, Maße in cm und cm<sup>3</sup>

Tab. A7: Mittelwerte der verschiedenen Maße des Gesichtsschädels (Teil 2)

G	S	ID	GSL	SBL	OGH	MGB	GL	GB	SBKW	GSKW	GSV
3	F	14.4.2	10,04	8,72	6,77	6,62	5,17	1,9	130,4	42,3	10,04
3	F	14.4.7	9,12	7,29	6,4	7,31	4,34	1,82	132,9	24	9,12
3	F	14.5.2	10,82	8,04	6,85	8,23	5,45	2,8	132,6	22,7	10,82
3	F	14.5.4	9,52	7,6	5,92	7,73	4,81	1,95	126,8	39,1	9,52
3	F	14.5.6	8,57	6,27	4,05	6,5	4,46	1,48	140	32,7	8,57
3	F	14.6.6	11,27	8,56	6,93	8,63	5,24	1,82	126,2	31,3	11,27
3	F	14.6.7	9,68	7,48	6,35	8,07	4,58	1,82	129	32,5	9,68
3	F	14.6.8	10,51	8,15	6,54	7,75	5,23	2,01	121,2	20,5	10,51
3	F	N8J08	10,99	8,36	7,04	8,87	4,48	2,57	127	28,8	10,99
3	F	N6J08	10,05	7,64	6,26	7,53	5,53	2,01	130,6	27,9	10,05
4	F	G1	15,31	8,9	5,56	10,64	8,2	2,6	155	27,6	15,31
4	F	G2	15,23	7,91	5,3	11,07	8,65	2,45	153,7	42,7	15,23
4	F	G3	15,28	8,12	5,73	11,4	9,03	2,89	152,8	36,2	15,28
4	F	G4	17,75	9,24	6,17	12,86	10,2	3,05	128,3	49,3	17,75
5	U	?_HGW	7,74	6,43	4,96	5,47	4,06	1,85	132,7	42,1	7,74
5	F	F_HGW	11,45	8,25	4,61	8,02	6,14	2,3	146,6	32,1	11,45
5	M	M_HGW	14,29	9,48	8,1	9,11	7,84	2,78	133	39,2	14,29
5	M	M2_HGW	14,35	9,54	6,98	9,14	7,85	3,45	144,7	33,3	14,35
5	F	W_1	11,76	8,33	5,98	7,92	6,21	2,76	128,1	36,1	11,76
5	F	W_2	12,81	9,34	6,69	8,73	7,04	2,91	128,1	55,3	12,81
5	F	W_3	11,4	8,45	6,73	7,48	6,13	2,76	149,8	46,6	211,23
6	U	Hylobates lar	6,69	3,52	1,95	3,51	3,52	1,41	150,5	30,4	21,98
6	U	Hylobates	7,03	3,35	2	4,64	3,76	1,49	155,1	18	36,50
6	M	Symphalangus	9,32	8,05	2,15	6,07	4,96	1,6	169,1	17,6	45,38

G: Gattung, 1: *Homo sapiens (Alytus)*, 2: *Homo sapiens (Kyoto)*, 3: *Pongo pygmaeus*, 4: *Gorilla gorilla*, 5: *Pan troglodytes*, 6: *Hylobatidae* 7: *Colobus guereza*, 8: *Cebus apella*, 9: *Alouatta*, 10: *Lemuriformes*, 11: *Loriformes*, ID: Identifikation, S: Sex, m: männlich, w: weiblich, u: unbekannt, Maße in cm und cm<sup>3</sup>

Tab. A8: Mittelwerte der verschiedenen Maße des Gesichtsschädels (Teil 3)

G	S	ID	GSL	SBL	OGH	MGB	GL	GB	SBKW	GSKW	GSV
7	U	C_0_160	5,89	4,65	2,12	4,3	3,08	1,39	-	-	19,08
7	M	A 18-66	8,88	7	4,19	5,77	4,55	1,98	-	-	82,74
7	F	B 27-66	7,95	6,39	3,83	5,15	4,13	1,86	-	-	62,23
7	M	D 221-69	6,44	5,4	3,29	4,75	3,19	1,64	-	-	42,16
7	F	E 100-67	7,64	6,06	3,84	5,23	3,69	1,9	-	-	60,18
7	M	F 166-68	9,06	7,32	4,28	5,74	4,54	1,79	-	-	88,72
7	F	G fem 271-69	7,22	6,08	3,49	5,07	3,44	1,67	-	-	53,66
7	F	H ad 95- 67	7,26	6,13	3,36	5,19	3,64	1,68	-	-	53,22
7	F	I 19-66	8,21	6,74	4,28	5,47	4,45	1,54	-	-	78,74
7	U	J 272-69	8,38	6,63	4,13	5,98	4,14	1,72	-	-	80,71
7	M	K 430-69	5,59	5,61	3,42	4,93	3,58	1,47	-	-	44,95
7	M	L 22-66	8,69	6,89	4,27	5,59	4,38	1,74	-	-	81,08
7	F	M 429-69	8,04	6,46	3,82	5,37	4,04	1,83	-	-	65,31
7	F	N 17-66	8,98	6,75	4,26	5,69	4,38	1,82	-	-	78,18
7	F	O ad fem 158-68	8,04	6,42	3,77	5,14	4,1	1,97	-	-	61,07
8	F	cebus_13	5,76	2,23	1,42	4,24	3,04	1,25	164,8	47,8	26,94
8	U	cebus_7	6,77	2,85	1,92	4,95	3,28	1,34	168,2	36,2	39,87
8	M	cebus_14	7,64	3,15	2,24	5,46	3,62	1,51	179,8	29,4	56,06
8	M	cebus_15	6,43	2,44	1,93	4,99	3,44	1,33	168,6	44	37,72
9	M	Alouatta 1	11,65	7,75	4,76	6,68	4,45	2,67	-143,5	-	85,71
9	F	Alouatta 2	8,88	6,18	3,8	5,56	3,74	1,86	-154,9	-	54,16
9	M	Alouatta 4	8,84	6,29	3,67	5,4	3,57	2,06	-150,3	-	52,30

G: Gattung, 1: *Homo sapiens (Alytus)*, 2: *Homo sapiens (Kyoto)*, 3: *Pongo pygmaeus*, 4: *Gorilla gorilla*, 5: *Pan troglodytes*, 6: *Hylobatidae* 7: *Colobus guereza*, 8: *Cebus apella*, 9: *Alouatta*, 10: *Lemuriformes*, 11: *Loriformes*, ID: Identifikation, S: Sex, m: männlich, w: weiblich, u: unbekannt, Maße in cm und cm<sup>3</sup>

Tab. A9: Mittelwerte der verschiedenen Maße des Gesichtsschädels (Teil 4)

G	S	ID	GSL	SBL	OGH	MGB	GL	GB	SBKW	GSKW	GSV
9	U	Alouatta 8	8,64	6,31	4,59	4,68	3,17	1,94	-167,9	-	65,83
9	F	Puertp Whatson	9,35	6,57	4,32	6,08	3,79	2,12	-	-	77,01
10	U	<i>Avahi laniger</i>	4,4	3,28	2,11	2,83	1,9	1,12	-	-	9,34
10	U	<i>Aye aye</i>	6,04	4,19	2,35	3,38	2,87	0,95	179,7	47,9	12,19
10	U	<i>Cheirogaleus major</i>	4,59	3,03	2,33	2,44	2,12	2,33	-	-	7,66
10	U	<i>Cheirogaleus medius</i>	4,41	3,11	2,2	1,13	2,38	0,95	154,3	39,3	3,61
10	U	<i>Eulemur fulvus</i>	7,61	4,31	4,34	3,76	3,74	1,64	-	-	29,42
10	U	<i>Eulemur macaco</i>	7,34	4,13	4,08	2,86	3,84	1,4	-	-	19,30
10	U	<i>Eulemur mongoz</i>	7,32	3,91	4,18	3,6	3,75	1,56	-	-	22,68
10	U	<i>Eulemur rubriventer</i>	6,86	4,11	3,73	3,58	3,52	1,62	-	-	23,27
10	U	<i>Hapalemur griseus olivaceus</i>	5,12	3,71	2,55	2,8	2,47	1,15	-	-	12,57
10	U	<i>Indri indri</i>	8,7	5,31	4,42	4,63	3,68	1,98	-	-	43,65
10	U	<i>Lemur catta</i>	7,35	4,1	4,17	4,11	3,54	1,76	-	-	28,63
10	U	<i>Lepilemur microdon</i>	5,03	3,36	2,53	2,75	2,41	1,12	-	-	10,45
10	U	<i>Lepilemur mustelinus leucopus</i>	4,13	1,91	0,78	2,7	1,74	0,84	164,3	21,8	8,40
10	U	<i>Otolemur crassicaudatus</i>	5,12	3,26	2,86	2,99	2,49	1,33	-	-	12,79

G: Gattung, 1: *Homo sapiens (Alytus)*, 2: *Homo sapiens (Kyoto)*, 3: *Pongo pygmaeus*, 4: *Gorilla gorilla*, 5: *Pan troglodytes*, 6: *Hylobatidae* 7: *Colobus guereza*, 8: *Cebus apella*, 9: *Alouatta*, 10: *Lemuriformes*, 11: *Loriformes*, ID: Identifikation, S: Sex, m: männlich, w: weiblich, u: unbekannt, Maße in cm und cm<sup>3</sup>

Tab. A10: Einzelwerte der verschiedenen Maße des Gesichtsschädels (Teil 5)

G	S	ID	GSL	SBL	OGH	MGB	GL	GB	SBKW	GSKW	GSV
10	U	<i>Phaner furcifer</i>	4,36	3,03	2,23	2,06	2,08	0,99	-	-	6,49
10	U	<i>Propithecus coronatus</i>	6,58	3,63	3,23	2,05	3,12	0,91	-	-	6,53
10	U	<i>Propithecus diadema</i>	7,53	5,09	2,88	2,25	3,09	1,05	-	-	10,57
10	U	<i>Varecia varigata</i>	9,3	4,45	1,74	4,38	4,91	1,6	179,7	14,2	67,61
11	U	<i>Euoticus elegantulus</i>	3,76	2,03	0,87	2,21	1,91	0,84	166,8	30,5	4,73
11	U	<i>Galago senegalensis</i>	3,3	2,43	1,33	1,74	1,61	0,92	-	-	2,44
11	U	<i>Loris tardigradus</i>	3,4	2,04	2,05	1,89	1,65	0,93	-	-	3,65
11	U	<i>Nycticebus coucang</i>	5,2	3,53	2,38	3,05	5,2	1,2	-	-	10,86
11	U	<i>Perodicticus potto</i>	6,05	3,95	2,34	1,74	2,28	0,72	-	-	4,37

G: Gattung, 1: *Homo sapiens (Alytus)*, 2: *Homo sapiens (Kyoto)*, 3: *Pongo pygmaeus*, 4: *Gorilla gorilla*, 5: *Pan troglodytes*, 6: *Hylobatidae* 7: *Colobus guereza*, 8: *Cebus apella*, 9: *Alouatta*, 10: *Lemuriformes*, 11: *Loriformes*, ID: Identifikation, S: Sex, m: männlich, w: weiblich, u: unbekannt, Maße in cm und cm<sup>3</sup>

Tab. A11: Pearson'sche Korrelationskoeffizienten zwischen Foramen rotundum und den Schädeln der *Homo sapiens (Alytus)*

	FA	TFrD1/2	TFrD3/4	TFrW	FL	SFrW
GSL	0,2	0,2	0,4	-0,3	0,3	0,4
SBL	0,1	-0,1	0,1	-0,4	-0,1	0,6
OGH	0,2	0,4	0,3	0,4	0,2	-0,7
MGB	0,1	0,0	0,3	-0,5	-0,1	0,7
GSV	0,3	0,4	0,5	-0,3	0,0	0,5
GL	0,4	0,5	0,6	-0,1	0,5	-0,2
GB	0,4	0,2	0,3	0,0	0,0	0,3
SBKW	-0,3	-0,5	-0,6	0,1	-0,5	0,0
GSKW	0,2	0,2	0,3	-0,1	0,4	0,1

GSL: Gesichtsschädellänge, SBL: Schädelbasislänge, OGH: Obergesichtshöhe, MGB: Mittelgesichtsbreite, GSV: Gesichtsschädelvolumen, GL: Gaumenlänge, GB, Gaumenbreite, SBKW: Schädelbasisknickungswinkel, Gesichtsschädelknickungswinkel; FA: FAR und FAL zusammen betrachtet; TFrD1/2: TFrD1 und TFrD2 zusammen betrachtet; TFrD3/4: TFrD3 und TFrD4 zusammen betrachtet; TFrW: TFrW1 und TFrW2 zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; Korrelationen mit  $p < 0,05$  wurden grau markiert.

Tab. A12: Pearson'sche Korrelationskoeffizienten zwischen Foramen rotundum und den Schädeln der *Homo sapiens* (Kyoto)

	FA	TFrD1/2	TFrD3/4	TFrW	FL	SFrW
GSL	0,0	0,3	0,4	-0,2	-0,1	-0,1
SBL	0,4	0,4	0,5	-0,2	-0,5	0,0
OGH	0,5	0,4	0,7	-0,3	-0,7	-0,4
MGB	0,3	0,6	0,7	0,1	-0,7	-0,2
GSV	0,4	0,5	0,7	-0,1	-0,6	-0,3
GL	0,8	0,0	0,3	-0,5	-0,5	0,0
GB	-0,1	0,4	0,5	0,0	-0,3	-0,3
SBKW	-0,1	0,4	0,4	0,1	0,0	-0,5
GSKW	0,1	0,3	0,1	0,5	-0,7	0,4

GSL: Gesichtsschädellänge, SBL: Schädelbasislänge, OGH: Obergesichtshöhe, MGB: Mittelgesichtsbreite, GSV: Gesichtsschädelvolumen, GL: Gaumenlänge, GB, Gaumenbreite, SBKW: Schädelbasisknickungswinkel, Gesichtsschädelnickungswinkel; FA: FAR und FAL zusammen betrachtet; TFrD1/2: TFrD1 und TFrD2 zusammen betrachtet; TFrD3/4: TFrD3 und TFrD4 zusammen betrachtet; TFrW: TFrW1 und TFrW2 zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; Korrelationen mit  $p < 0,05$  wurden grau markiert.

Tab. A13: Pearson'sche Korrelationskoeffizienten zwischen Foramen rotundum und den Schädeln der *Pongo pygmaeus*

	FA	TFrD1/2	TFrD3/4	TFrW	FL	SFrW
GSL	-0,2	0,5	0,5	0,1	0,3	-0,1
SBL	0,2	0,5	0,4	0,2	0,2	-0,5
OGH	-0,1	0,6	0,6	0,2	0,4	-0,5
MGB	-0,4	0,5	0,5	-0,1	0,6	0,2
GSV	-0,2	0,5	0,5	0,0	0,4	-0,1
GL	0,1	0,1	0,1	0,1	-0,1	0,0
GB	-0,2	0,6	0,5	0,3	0,2	0,1
SBKW	-0,1	-0,8	-0,8	-0,1	-0,3	0,2
GSKW	0,8	-0,3	-0,4	0,5	0,0	-0,2

GSL: Gesichtsschädellänge, SBL: Schädelbasislänge, OGH: Obergesichtshöhe, MGB: Mittelgesichtsbreite, GSV: Gesichtsschädelvolumen, GL: Gaumenlänge, GB, Gaumenbreite, SBKW: Schädelbasisknickungswinkel, Gesichtsschädelnickungswinkel; FA: FAR und FAL zusammen betrachtet; TFrD1/2: TFrD1 und TFrD2 zusammen betrachtet; TFrD3/4: TFrD3 und TFrD4 zusammen betrachtet; TFrW: TFrW1 und TFrW2 zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; Korrelationen mit  $p < 0,05$  wurden grau markiert.

Tab. A14: Pearson'sche Korrelationskoeffizienten zwischen Foramen rotundum und den Schädeln der *Gorilla gorilla*

	FA	TFrD1/2	TFrD3/4	TFrW	FL	SFrW
GSL	-0,4	0,9	0,4	0,9	0,2	-1,0
SBL	-0,9	0,5	-0,3	0,9	-0,5	-0,8
OGH	-0,5	0,5	0,1	0,7	0,1	-0,9
MGB	-0,1	0,8	0,5	0,7	0,5	-1,0
GSV	-0,4	0,8	0,3	0,9	0,2	-1,0
GL	-0,8	-0,3	-0,9	0,1	-1,0	0,3
GB	-0,3	0,3	0,1	0,5	0,2	-0,8
SBKW	0,3	-0,9	-0,4	-0,9	-0,3	1,0
GSKW	0,3	0,8	0,9	0,5	0,8	-0,7

GSL: Gesichtsschädellänge, SBL: Schädelbasislänge, OGH: Obergesichtshöhe, MGB: Mittelgesichtsbreite, GSV: Gesichtsschädelvolumen, GL: Gaumenlänge, GB, Gaumenbreite, SBKW: Schädelbasisknickungswinkel, Gesichtsschädelnickungswinkel; FA: FAR und FAL zusammen betrachtet; TFrD1/2: TFrD1 und TFrD2 zusammen betrachtet; TFrD3/4: TFrD3 und TFrD4 zusammen betrachtet; TFrW: TFrW1 und TFrW2 zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; Korrelationen mit  $p < 0,05$  wurden grau markiert.



Tab. A15: Pearson'sche Korrelationskoeffizienten zwischen Foramen rotundum und den Schädeln der *Pan troglodytes*

	FA	TFrD1/2	TFrD3/4	TFrW	FL	SFrW
GSL	0,7	0,6	0,5	-0,5	0,5	-0,1
SBL	0,7	0,6	0,5	-0,5	0,4	0,0
OGH	0,8	0,6	0,4	0,0	0,7	0,0
MGB	0,6	0,6	0,5	-0,6	0,4	0,0
GSV	0,7	0,6	0,4	-0,4	0,5	-0,1
GL	0,7	0,6	0,5	-0,5	0,5	-0,1
GB	0,6	0,7	0,4	-0,2	0,3	-0,4
SBKW	-0,2	-0,1	-0,2	-0,3	-0,5	-0,1
GSKW	-0,1	-0,2	-0,4	0,1	0,2	0,3

GSL: Gesichtsschädellänge, SBL: Schädelbasislänge, OGH: Obergesichtshöhe, MGB: Mittelgesichtsbreite, GSV: Gesichtsschädelvolumen, GL: Gaumenlänge, GB, Gaumenbreite, SBKW: Schädelbasisknickungswinkel, Gesichtsschädelknickungswinkel; FA: FAR und FAL zusammen betrachtet; TFrD1/2: TFrD1 und TFrD2 zusammen betrachtet; TFrD3/4: TFrD3 und TFrD4 zusammen betrachtet; TFrW: TFrW1 und TFrW2 zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; Korrelationen mit  $p < 0,05$  wurden grau markiert.

Tab. A16: Pearson'sche Korrelationskoeffizienten zwischen Foramen rotundum und den Schädeln der *Colobus guereza*

	FA	TFrD1/2	TFrD3/4	TFrW	FL	SFrW
GSL	0,0	-0,2	0,0	-0,1	0,0	0,1
SBL	0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,1	0,1
OGH	-0,1	0,0	-0,1	0,1	0,0	0,1
MGB	-0,1	0,0	-0,1	0,1	0,2	-0,1
GSV	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	0,1	0,1
GL	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1
GB	0,1	0,1	0,0	0,3	0,1	-0,3
SBKW	-	-	-	-	-	-
GSKW	-	-	-	-	-	-

GSL: Gesichtsschädellänge, SBL: Schädelbasislänge, OGH: Obergesichtshöhe, MGB: Mittelgesichtsbreite, GSV: Gesichtsschädelvolumen, GL: Gaumenlänge, GB, Gaumenbreite, SBKW: Schädelbasisknickungswinkel, Gesichtsschädelknickungswinkel; FA: FAR und FAL zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; Korrelationen mit  $p < 0,05$  wurden grau markiert.

Tab. A17: Pearson'sche Korrelationskoeffizienten zwischen Foramen rotundum und den Schädeln der *Cebus apella*

	FA	TFrD1/2	TFrD3/4	TFrW	FL	SFrW
GSL	-0,2	0,8	0,2	0,5	1,0	-0,2
SBL	-0,4	0,9	0,0	0,8	1,0	-0,3
OGH	-0,3	0,6	0,4	0,2	0,9	0,1
MGB	-0,2	0,6	0,4	0,2	0,9	0,1
GSV	-0,2	0,8	0,2	0,5	1,0	-0,2
GL	0,0	0,5	0,6	-0,2	0,8	0,2
GB	0,0	0,8	0,3	0,3	1,0	-0,2
SBKW	0,1	0,7	0,3	0,2	0,9	-0,3
GSKW	0,3	-0,9	0,0	-0,7	-1,0	0,3

GSL: Gesichtsschädellänge, SBL: Schädelbasislänge, OGH: Obergesichtshöhe, MGB: Mittelgesichtsbreite, GSV: Gesichtsschädelvolumen, GL: Gaumenlänge, GB, Gaumenbreite, SBKW: Schädelbasisknickungswinkel, Gesichtsschädelnickungswinkel; FA: FAR und FAL zusammen betrachtet; TFrD1/2: TFrD1 und TFrD2 zusammen betrachtet; TFrD3/4: TFrD3 und TFrD4 zusammen betrachtet; TFrW: TFrW1 und TFrW2 zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; Korrelationen mit  $p < 0,05$  wurden grau markiert.

Tab. A18: Pearson'sche Korrelationskoeffizienten zwischen Foramen rotundum und den Schädeln der *Alouatta*

	FA	TFrD1/2	TFrD3/4	TFrW	FL	SFrW
GSL	0,1	0,9	0,0	0,4	1,0	0,4
SBL	0,1	0,9	0,1	0,3	1,0	0,3
OGH	0,1	0,7	0,5	0,1	0,5	-0,3
MGB	-0,4	0,5	-0,5	0,8	0,8	0,8
GSV	0,0	0,8	0,0	0,5	0,9	0,5
GL	-0,1	0,6	-0,3	0,6	0,9	0,7
GB	0,1	0,9	0,1	0,4	0,9	0,3
SBKW	0,3	0,5	-0,1	0,1	0,8	0,6
GSKW	0,2	-0,6	0,3	-0,7	-0,9	-0,7

GSL: Gesichtsschädellänge, SBL: Schädelbasislänge, OGH: Obergesichtshöhe, MGB: Mittelgesichtsbreite, GSV: Gesichtsschädelvolumen, GL: Gaumenlänge, GB, Gaumenbreite, SBKW: Schädelbasisknickungswinkel, Gesichtsschädelnickungswinkel; FA: FAR und FAL zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; Korrelationen mit  $p < 0,05$  wurden grau markiert.

Tab. A19: Pearson'sche Korrelationskoeffizienten zwischen Foramen rotundum und den Schädeln der *Lemuriformes*

	CFRF	TFR1	TFR2	TFRW	SFR3	SFRW
GSL	0,4	0,8	0,9	-0,3	0,4	-0,1
SBL	0,4	0,7	0,8	-0,4	0,4	-0,1
OGH	0,0	0,6	0,6	-0,1	0,3	0,0
MGB	0,1	0,5	0,6	0,0	0,3	0,0
GSV	0,3	0,7	0,8	-0,2	0,3	0,0
GL	0,2	0,7	0,8	-0,4	0,3	-0,2
GB	-0,2	0,4	0,3	0,0	0,1	-0,1
SBKW	-0,1	0,3	0,5	-0,5	0,3	0,0
GSKW	0,0	-0,5	-0,7	0,3	-0,4	-0,1

GSL: Gesichtsschädellänge, SBL: Schädelbasislänge, OGH: Obergesichtshöhe, MGB: Mittelgesichtsbreite, GSV: Gesichtsschädelvolumen, GL: Gaumenlänge, GB, Gaumenbreite, SBKW: Schädelbasisknickungswinkel, Gesichtsschädelknickungswinkel; FA: FAR und FAL zusammen betrachtet; TFrD1/2: TFrD1 und TFrD2 zusammen betrachtet; TFrD3/4: TFrD3 und TFrD4 zusammen betrachtet; TFrW: TFrW1 und TFrW2 zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; Korrelationen mit  $p < 0,05$  wurden grau markiert.

Tab. A20: Pearson'sche Korrelationskoeffizienten zwischen Foramen rotundum und den Schädeln der *Loriformes*

	CFRF	TFR1	TFR2	TFRW	SFR3	SFRW
GSL	-1,0	0,0	0,0	-0,2	0,9	0,8
SBL	-1,0	0,0	0,0	-0,2	0,9	0,8
OGH	-0,1	-0,2	0,1	-0,4	0,5	0,1
MGB	0,0	0,7	0,7	0,6	0,3	0,3
GSV	-0,7	0,4	0,4	0,0	0,9	0,6
GL	-0,3	0,6	0,7	0,3	0,6	0,4
GB	0,3	0,7	0,8	0,4	0,1	-0,1
SBKW	-0,9	-0,4	-0,4	-	0,9	0,6
GSKW	0,6	0,6	0,5	-	-0,8	-0,4

GSL: Gesichtsschädellänge, SBL: Schädelbasislänge, OGH: Obergesichtshöhe, MGB: Mittelgesichtsbreite, GSV: Gesichtsschädelvolumen, GL: Gaumenlänge, GB, Gaumenbreite, SBKW: Schädelbasisknickungswinkel, Gesichtsschädelknickungswinkel; FA: FAR und FAL zusammen betrachtet; FL: SFrL1 und SFrL2 zusammen betrachtet; SFrW: SFrW1 und SFrW2 zusammen betrachtet; Korrelationen mit  $p < 0,05$  wurden grau markiert.

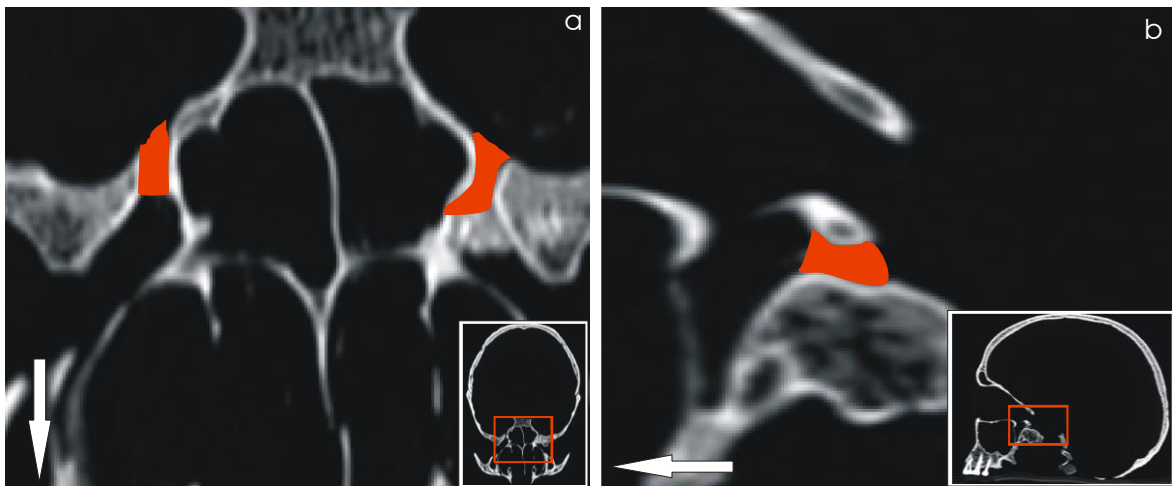


Abb. A1: CT-Schichtaufnahmen eines menschlichen Schädels der Population aus Alytus auf Höhe des Foramen rotundum (rot). Man beachte den untypischen transversalen Verlauf des Foramen rotundum mit medialer Ausrichtung in diesem Schädel. **a** – transversale CT-Schichtaufnahme; **b** - sagittale CT-Schichtaufnahme durch die Fossa pterygopalatina mit Darstellung des rechten Foramen rotundum. Das Inset rechts unten im jeweiligen Bild zeigt die Position des Bildausschnittes. Der Pfeil zeigt nach frontal.

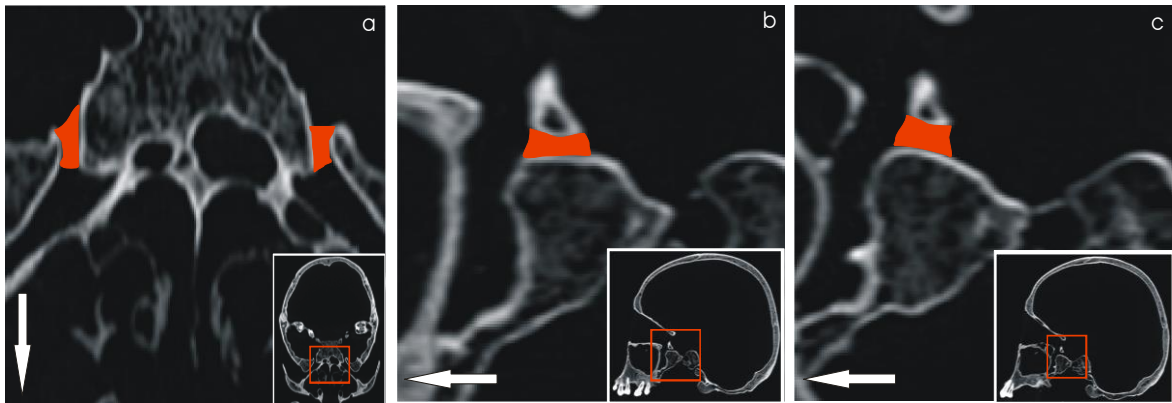


Abb. A2: CT-Schichtaufnahmen eines menschlichen Schädels der Population aus Kyoto auf Höhe des Foramen rotundum (rot). Man beachte den untypischen transversalen und sagittalen Verlauf des Foramen rotundum mit jeweiliger entgegengesetzter Ausrichtung der beiden Seiten in diesem Schädel. **a** – transversale CT-Schichtaufnahme mit rechtsseitig medialen und linksseitig lateral gerichteten Verlauf des Foramen rotundum; **b** - sagittale CT-Schichtaufnahme durch die Fossa pterygopalatina mit Darstellung des rechten nach kaudal ausgerichteten Foramen rotundum; **c** - sagittale CT-Schichtaufnahme durch die Fossa pterygopalatina mit Darstellung des linken nach kranial ausgerichteten Foramen rotundum. Das Inset rechts unten im jeweiligen Bild zeigt die Position des Bildausschnittes. Der Pfeil zeigt nach frontal.

## **Danksagung**

Mein ganz besonderer Dank gilt Herr Prof. Dr. Thomas Koppe, Oberassistent am Institut für Anatomie und Zellbiologie der Universität Greifswald, für die Vergabe des Themas dieser Dissertation und die Bereitstellung verschiedener Schädeln. Zudem möchte ich mich recht herzlich für die sehr geduldige Betreuung sowie die umfangreichen Hilfestellungen und Korrekturen bedanken.

Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr. Karlhans Endlich, Direktor des Instituts für Anatomie und Zellbiologie der Universität Greifswald, für die Ermöglichung der Arbeit am Institut danken.

Weiterhin richtet sich ein besonderer Dank an meine Frau, für die enorme Geduld und Unterstützung sowie die vielen ermutigenden Worte und den stetigen Beistand, was mir in schweren Zeiten half weiterzumachen.

Meinen Eltern, Herr Jürgen Kliewe und Frau Ute Kliewe, möchte ich für die anhaltende Unterstützung und das durchgehende Vertrauen in meine Fähigkeiten danken.

Die letzten dankenden Worte möchte ich an meine Kinder Skadi und Runa Kliewe, richten, die mir eine ausgleichende Abwechslung und kindliche Leichtigkeit im Stress des Alltags vermitteln sowie den innersten Antrieb meiner Motivation darstellen.