

Universitätsklinikum Hamburg - Eppendorf

Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer-, und Gesichtschirurgie

Komm. Direktor der Klinik:

Priv.-Doz. Dr. med. Dr. med. dent. Henning Hanken

Dreidimensionale, volumetrische Analyse der Fossa pterygopalatina mittels digitaler Volumentomographie

DISSERTATION

zur

Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin
der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg

dem Fachbereich Medizin der Universität Hamburg
vorgelegt von

Dr. med. Christian Lohse
aus Bad Oldesloe

Hamburg 2018

Angenommen von der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg am: 12.04.2018

Veröffentlicht mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.

Prüfungsausschuss, der Vorsitzende: Priv.-Doz. Dr. Dr. A. Gröbe

Prüfungsausschuss, Gutachter: Prof. Dr. Roland Bender

Prüfungsausschuss, Prüfer: Prof. Dr. Dr. Marco Blessmann

Prüfungsausschuss, stellv. Mitglied: Priv.-Doz. Dr. Dr. Henning Hanken

Datum der Promotion: 22.06.2018

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

Widmung	III
Inhaltsverzeichnis	IV
1. Einleitung	1
1.1. Anatomie und technische Grundlagen	1
1.1.1. Topographische Anatomie der seitlichen Kopfregion	1
1.1.2. Topographie der Fossa pterygopalatina	4
1.1.3. Ganglion pterygopalatinum	6
1.2. Digitale Volumentomographie	8
1.2.1. Entwicklungsgeschichte	8
1.2.2. Funktionsprinzip	10
1.2.3. Rekonstruktionsverfahren	12
1.3. Die Fossa pterygopalatina im klinischen Kontext	15
1.3.1. Clusterkopfschmerz	15
1.3.2. Neurostimulation bei Clusterkopfschmerz	17
2. Material und Methoden	20
2.1. DVT-Scanner	20
2.1.1. Aufbau und Leistungsparameter des DVT-Scanners	20
2.1.2. Patientenpositionierung	22
2.1.3. Aufnahmeeinstellungen	23
2.1.4. Bildaufbereitungssoftware und Hardware	23
2.2. Patientenkollektiv	24
2.3. Methoden der Auswertung	25
2.3.1. Summation-of-area Verfahren	25
2.3.2. Vermessungsparameter der Fossa pterygopalatina	25
2.3.3. Statistische Auswertung	28
3. Ergebnisse	30

3.1. Volumetrische Ergebnisse	31
3.1.1. Altersspezifische volumetrische Analyse	31
3.1.2. Geschlechtsspezifische volumetrische Analyse	35
3.2. Messergebnisse oberer und unterer pterygopalatinaler Winkel	36
3.2.1. Altersspezifische Analyse des oberen pterygopalatinalen Winkels	37
3.2.2. Geschlechtsspezifische Analyse des oberen pterygopalatinalen Winkels	38
3.2.3. Altersspezifische Analyse des unteren pterygopalatinalen Winkels	39
3.2.4. Geschlechtsspezifische Analyse des unteren pterygopalatinalen Winkels	41
3.3. Messergebnisse Eingangswinkel der Fossa pterygopalatina	42
3.3.1 Altersspezifische Analyse des Eingangswinkels	42
3.3.2 Geschlechtsspezifische Analyse des Eingangswinkels	44
4. Diskussion	45
4.1. Digitale Volumentomographie	45
4.2. Volumen der Fossa pterygopalatina	47
4.3. Geometrie der der Fossa pterygopalatina	49
4.4. Schlussfolgerung	51
5. Zusammenfassung	52
6. Abkürzungsverzeichnis	55
7. Literaturverzeichnis	57
8. Danksagung	65
9. Lebenslauf	66
10.Eidesstattliche Erklärung	69

1. Einleitung

1.1. Anatomische und technische Grundlagen

Im Folgenden soll zunächst ein Überblick über die komplexen anatomischen Gegebenheiten der untersuchten Körperregion gegeben werden. Dazu wird die Anatomie der Fossa pterygopalatina (Flügelgaumengrube) und deren umgebenden Strukturen sowie die Grundlagen der technischen Untersuchungseinheit beschrieben. Zudem wird ein Überblick über den Clusterkopfschmerz (CH) gegeben – für den die anatomischen Besonderheiten dieser Region für die präoperative Planung und der postoperativen Kontrolle mittels DVT bei der Therapie mittels Neurostimulator von besonderer Bedeutung sind.

1.1.1. Topographische Anatomie der seitlichen Kopfregion

Die seitliche Kopfregion ist anatomisch eine der hochkomplexen Regionen des menschlichen Körpers. Zur besseren Orientierung lässt sie sich topographisch in eine oberflächliche und eine tiefe Region unterteilen. Hierbei zählen die Schläfenregion und die Fossa retromandibularis zu der oberflächlichen Region, die Fossa infratemporalis und die Fossa pterygopalatina sowie das Spatium peripharyngeum zu der tiefen Region. Die Schläfenregion definiert sich entlang ihres Leitmuskels, dem M. temporalis. Sie wird nach medial durch das Os temporale (Schläfenbein) sowie ventral durch das Os sphenoidale (Keilbeinflügel) knöchern begrenzt. Die Fossa retromandibularis liegt zwischen dem Ramus mandibulae sowie dem M. sternocleidomastoideus. Die kraniale Begrenzung bildet der äußere Gehörgang, die kaudale Begrenzung der Venter posterior des M. digastricus sowie der M. stylohyoideus. Als anatomisch und klinisch wichtiges Organ innerhalb der Fossa retromandibularis liegt die Glandula parotis (Ohrspeicheldrüse).

Ferner liegen in ihr Anteile des N. facialis (Gesichtsnerv), welche die Glandula parotis entsprechend in einen medialen und lateralen Drüsenanteil aufteilen.

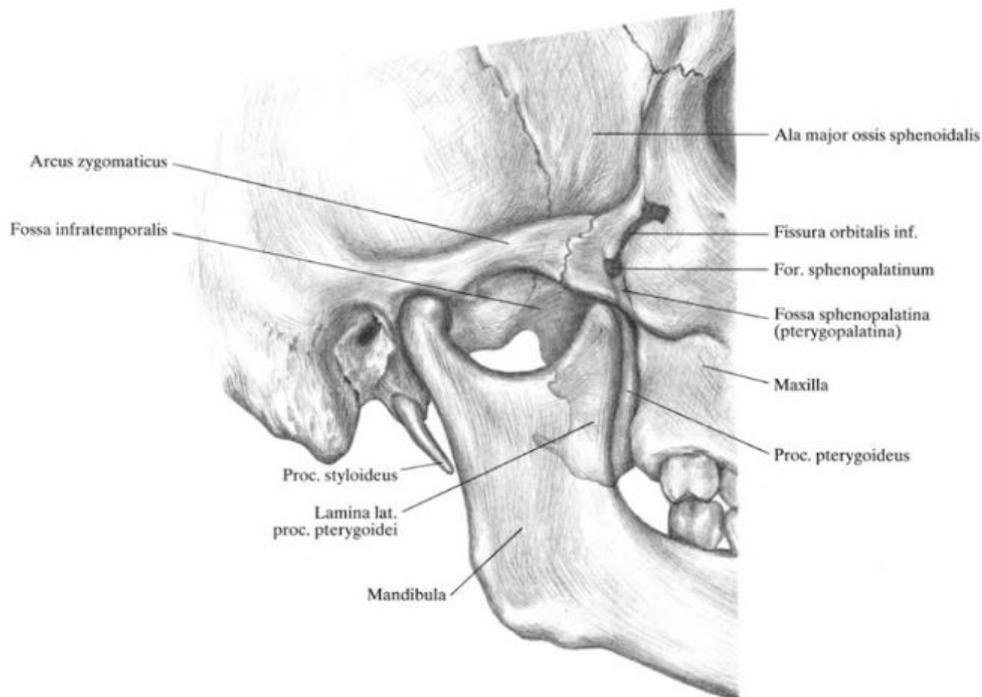


Abbildung 1.1: Die Zeichnung zeigt knöcherne Anteile des Gesichtsschädels, Viscerocranium, in sagittaler Abbildung, von medial rechts. Zu erkennen ist die Fossa pterygopalatina in Ihrer Beziehung zu den umgebenen knöchernen Strukturen. Der Unterkiefer ist im Anteil des Processus coronoideus transparent dargestellt (nach J. Krmpotic-Nemanic, W. Draf, J. Helms, Chirurgische Anatomie des Kopf-Hals-Bereiches, Springer 1985).

Die Fossa infratemporalis wird lateral durch den Ramus mandibularis begrenzt. Das knöcherne Dach wird vom Os temporale sowie dem Os sphenoidale gebildet. Im Weiteren ist die Fossa infratemporalis deskriptiv nicht gut abgrenzbar. In der Fossa infratemporalis liegt der M. pterygoideus lateralis. Der N. mandibularis spaltet sich hier in den N. meningeus sowie den N. auriculotemporalis auf. Als weitere anatomisch und klinisch wichtige vaskuläre Struktur verläuft die A. maxillaris in der Fossa infratemporalis. Die A. maxillaris zieht in Ihrem Verlauf durch die beiden M. pterygoideus lateralis-Bäuche hindurch und gibt weitere, das Mittelgesicht versorgende Gefäßäste ab. Die Pars

mandibularis versorgt dabei den Unterkiefer und die in der Nähe des Kiefergelenks liegenden Strukturen, die Pars pterygoidea die Kaumuskeln und die Wangenschleimhaut und die Pars pterygopalatina die Zähne, den Gaumen und die Wände der Nasenhöhle. In der Fossa infratemporalis liegt zudem das Ganglion oticum, in dem parasymphatische Äste des N. glossopharyngeus verschaltet werden. Die Fossae pterygopalatina, infratemporalis und pterygoidea bilden gemeinsam den so genannten retromaxillären Raum (Zehm 1970).

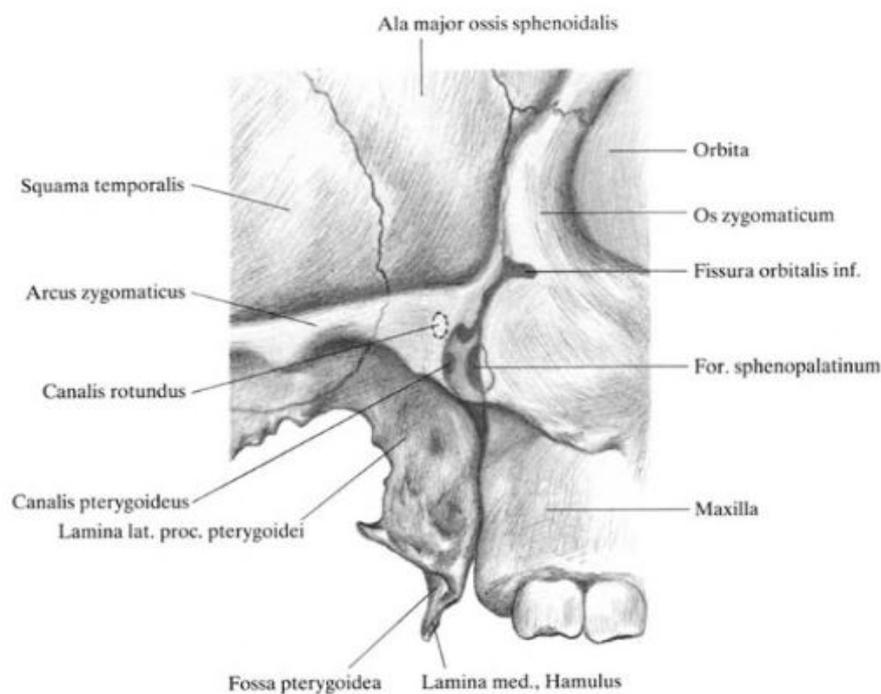


Abbildung 1.2: Dargestellt ist die Fossa pterygopalatina, der diese umgebenden Strukturen sowie Foramina in sgittaler Ansicht von medial rechts (nach J. Krmpotic-Nemanic, W. Draf, J. Helms, Chirurgische Anatomie des Kopf-Hals-Bereiches, Springer 1985).

1.1.2. Topographie der Fossa pterygopalatina

Die Fossa pterygopalatina (Flügelgaumengrube), synonym auch als Fossa sphenopalatina bezeichnet, liegt in der tiefen seitlichen Kopfregion und bildet einen dreieckigen Raum zwischen der Kieferhöhlenhinterwand und dem Processus pterygoideus des Os sphenoidale. Die Fossa pterygopalatina lässt sich topographisch in ein anteriores und ein posteriores Kompartiment unterteilen (Roberti et al. 2007). Im anterioren Kompartiment liegen als Leitstruktur die A. maxillaris und ihre abgehenden Äste, im posterioren Kompartiment der N. maxillaris sowie das Ganglion pterygopalatinum. Nach dorsal und lateral wird die Fossa pterygopalatina durch die Fossa infratemporalis begrenzt. Nach cranial wird die Fossa pterygopalatina durch die Crista infratemporalis und nach medial durch die Lamina perpendicularis ossis palatinii begrenzt. Eine anatomische eindeutige laterale Begrenzung fehlt.

Tabelle 1.1 Anatomische Begrenzungen der Fossa pterygopalatina

Begrenzung	Struktur
kranial	Ala major ossis sphenoidalis, Übergang in die Fisura orbitalis
dorsal	Proc. Pterygoideus (Lamina lateralis)
ventral	Tuber maxillae
medial	Lamina perpendicularis ossis palatinii
lateral	Offen zur Fossa infratemporalis, Übergang zur Fisura pterygomaxillaris
kaudal	Offen in den Retropharygealraum

Die Fossa pterygopalatina kommuniziert über angrenzende Fissuren und Foramina mit den zahlreichen, sie umgebenden Räumen. Die Fissura orbitalis inferior verbindet die Fossa pterygopalatina mit der Orbita (Augenhöhle). Durch diese verlaufen die Hauptendäste des N. maxillaris, der N. infraorbitalis und N. zygomaticus, begleitet von der A. infraorbitalis und der V. infraorbitalis. Das Foramen sphenopalatinum stellt die Verbindung mit dem Cavum nasi (Nasenhöhle) her, durch welches die A. sphenopalatina und die nasalen Nerven aus dem Ganglion sphenopalatinum in die Nasenhöhle eintreten. In dem oberen Anteil der Fossa pterygopalatina liegt als wichtige nervale Struktur das Ganglion pterygopalatinum und als wichtige vaskuläre Struktur die terminale Verzweigung der A. maxillaris. Neben dem Foramen sphenopalatinum zur Nase hin mündet in der Fossa pterygopalatina mit dem Foramen rotundum der Canalis rotundum sowie der Canalis pterygoideus (Canalis Vidii). In diesem vereinigen sich der N. petrosus major und der N. petrosus profundus zu dem N. canalis pterygoidei (N. vidianus) und treten mit der gleichnamigen A. canalis pterygoideus von hinten unterhalb des Foramen rotundum in die Fossa pterygopalatina ein. Der N. vidianus führt postganglionäre sympathische Fasern sowie präganglionäre parasympathische Fasern, welche in das Ganglion pterygopalatinum einstrahlen. Die sympathischen Fasern ziehen lediglich durch das Ganglion hindurch, wohingegen die parasympathischen Fasern in dem Ganglion pterygopalatinum verschaltet werden. Nach kaudal öffnet sich die Fossa pterygopalatina über den Canalis palatinus major, in welchem der N. canalis palatinus major gemeinsam mit der A. palatina descendens verläuft (vgl. Abbildung 1.2 und Abbildung 1.3).

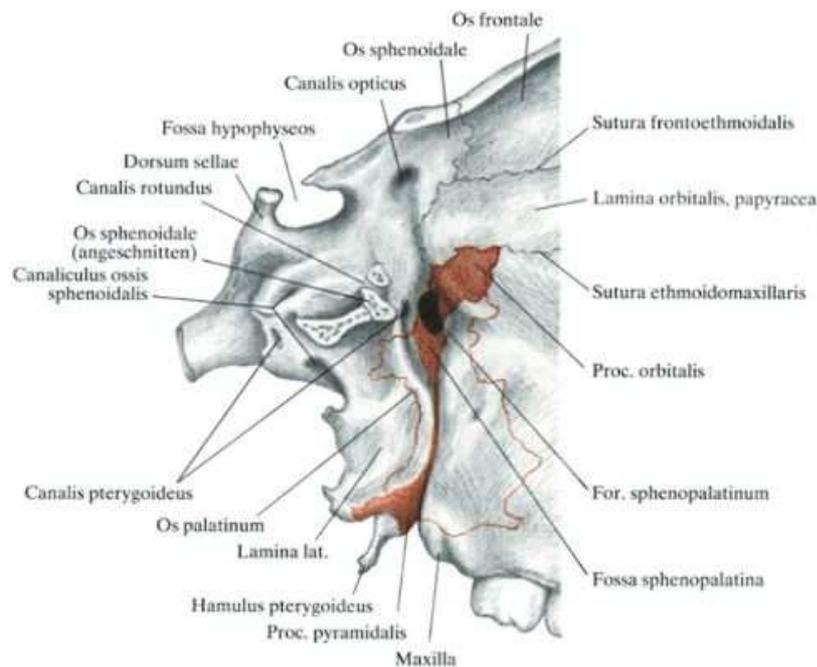


Abbildung 1.3: Die Abbildung zeigt die Fossa pterygopalatina, rot markiert (hier als Fossa sphenopalatina bezeichnet) sowie deren Begrenzungen nach ventral, medial und dorsal (nach J. Krmpotic-Nemanic, W. Draf, J. Helms, Chirurgische Anatomie des Kopf-Hals-Bereiches, Springer 1985).

1.1.3. Ganglion pterygopalatinum

Das Ganglion pterygopalatinum (Flügelgaumenganglion), auch als Ganglion sphenopalatinum bezeichnet, liegt im posterior-inferioren Kompartiment der Fossa pterygopalatina (Roberti et al. 2007) und steht innerhalb der Fossa somit in enger Lagebeziehung zum N. maxillaris (V2), der sich hier, wie in Abbildung 1.4 gezeigt in seine drei Äste aufteilt sowie zur A. maxillaris (Alvernia et al. 2007). Das Ganglion pterygopalatinum lässt sich, abhängig von der morphologischen Struktur sowie dem Eintrittsbereich des N. canalis pterygoidei (N. vidianus) in vier Subtypen unterteilen. Demnach liegt das Ganglion in 70% als Einzelstruktur vor (Subtyp B und Subtyp C) und in 30% als Doppelstruktur (Subtyp A und Subtyp D).

In den Subtypen A und B erreicht der N. canalis pterygoidei (N. vidianus) das Ganglion in den oberen Teilbereichen, in den Subtypen C und D jeweils in den unteren Teilbereich (Rusu et al. 2009). Als vegetatives Ganglion empfängt es parasymphatische, sympathische und sensible Fasern. Seine parasymphatischen Fasern stammen aus dem N. petrosus major des N. facialis. Im Ganglion erfolgt die Verschaltung der präganglionären parasymphatischen Fasern auf die zweiten Neurone. Postganglionär schließen sich diese dem Ramus communicans des N. zygomaticus (N. maxillaris) an und innervieren sekretorisch unter anderem die Glandula lacrimalis (Tränendrüse). Die postganglionären sympathischen Fasern werden durch den N. petrosus profundus (Plexus caroticus internus) zum Ganglion geführt. Diese werden im Ganglion nicht verschaltet sondern laufen, wie auch die sensiblen Fasern aus dem N. maxillaris lediglich durch das Ganglion hindurch und innervieren sekretorisch und sensibel die Glandula nasalis, sowie die Drüsen der Nasennebenhöhlen und des Gaumens.

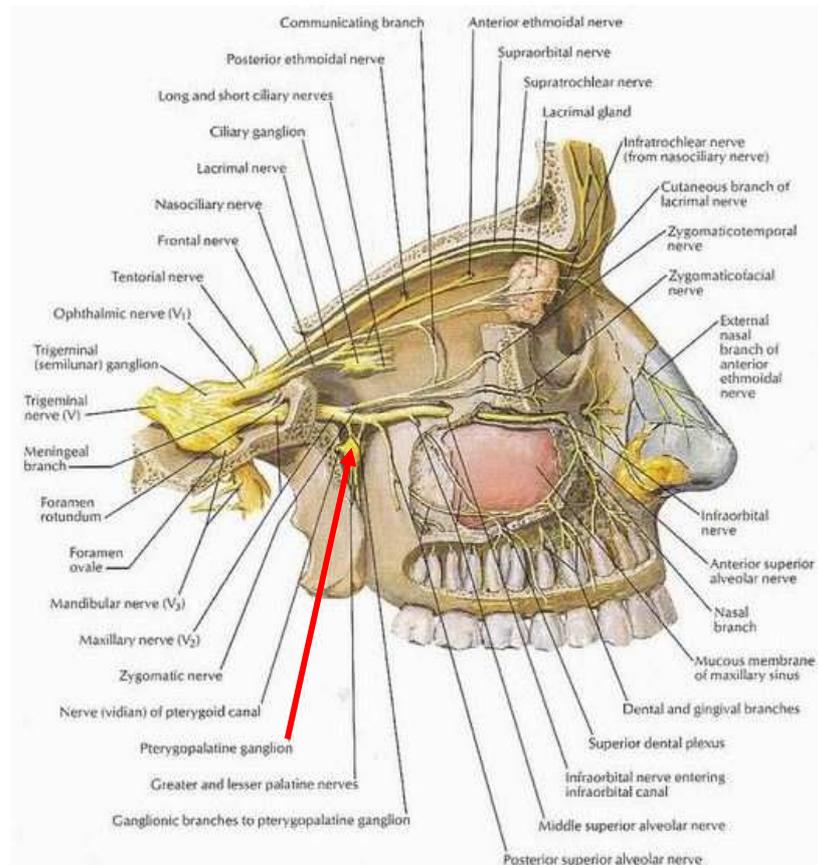


Abbildung 1.4: Die Abbildung zeigt das Ganglion pterygopalatinum (Pfeil) mit seinen Wurzeln, Sagittalschnitt, nach Freilegung des N. trigeminus, von lateral (nach Frank H. Netter, Atlas of Human Anatomy, 3. Edition, Saunders Elsevier 2003).

1.2. Digitale Volumentomographie

1.2.1. Entwicklungsgeschichte

Mit der Entdeckung der zunächst so genannten X-Strahlen im Jahre 1895 eröffnete Wilhelm C. Röntgen mit der nach ihm benannten Technik das Feld der bildgebenden Diagnostik der Medizin. Seither unterliegt die Röntgentechnik einer beständigen Weiterentwicklung. Nachdem zunächst lediglich zweidimensionale Röntgenaufnahmen angefertigt werden konnten, erfolgte im Verlauf die Entwicklung dreidimensionaler Röntgenaufnahmen wie

beispielsweise der Computertomographie. Der englische Ingenieur Godfrey N. Hounsfield entwickelte 1968 den ersten Prototypen eines Röntgenscanners und 1971 den ersten Computertomographen (CT). Die Schichtbildaufnahmen wurde durch die Entwicklung der Spiraltomographie 1989 (SSCT) und folgend der Entwicklung des Mehrzeilendetektors 1998 (MSCT) weiterentwickelt. Im zahnmedizinischen Bereich wurde die Computertomographie zur dreidimensionalen Darstellung des Mund- und Kieferbereiches zwischenzeitlich fast vollständig durch die Entwicklung der digitalen Volumentomographie (DVT) in Deutschland seit 1997 abgelöst. Der zunächst ausschließliche Einsatz in der Zahnmedizin hatte den Grund, dass die digitale Volumentomographie anfangs als dentale Volumentomographie bezeichnet wurde. Dieses dreidimensionale, bildgebende Tomographieverfahren nutzt ebenfalls Röntgenstrahlen zur Erzeugung der Schnittbilder, dies aber bei wesentlich geringerer Strahlendosis als bei einer Computertomographie. Auch im Bereich der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie sowie in der Hals-Nasen-Ohrenheilkunde hat die digitale Volumentomographie als Erweiterung der radiologischen Diagnostik einen großen Stellenwert erreicht (Schulze 2006, Dreiseidler 2009, Frahsek 2013). Hier vor allem zur präoperativen Planung (Lagebeziehung von dentalen Strukturen zum N. alveolaris inferior oder der Kieferhöhle, dentale Implantologie), Frakturdiagnostik sowie zur Kontrolle nach operativen Interventionen (postoperative Lagekontrolle von Osteosynthesen oder nach Implantation von Neurostimulatoren). Bis heute unterliegt die Entwicklung der digitalen Volumentomographie einer enormen Weiterentwicklung. Aktuell existieren mehr als zehn verschiedene Herstellerfirmen für digitale Volumentomographen und es befinden sich zwischenzeitlich mehr als 30 verschiedene DVT-Geräte auf dem Markt. Diese unterscheiden sich hauptsächlich durch die Ausführung als reines DVT-Gerät oder als so genanntes Hybrid-Gerät (Kombination aus DVT und OPT), Größe des Sichtfeldes (Field of View, FOV), Art der Patientenpositionierung (stehend, sitzend oder liegend) und dem verwendeten Aufnahmesensortyp (Bildverstärker/CCD-Sensor oder Flachdetektor) und dem Röhrentyp (Hochfrequenz gepulst oder nicht gepulst).

Zudem bietet nahezu jeder Hersteller eine eigene Verarbeitungs- und Betrachtungssoftware zu dem jeweiligen Gerät an.

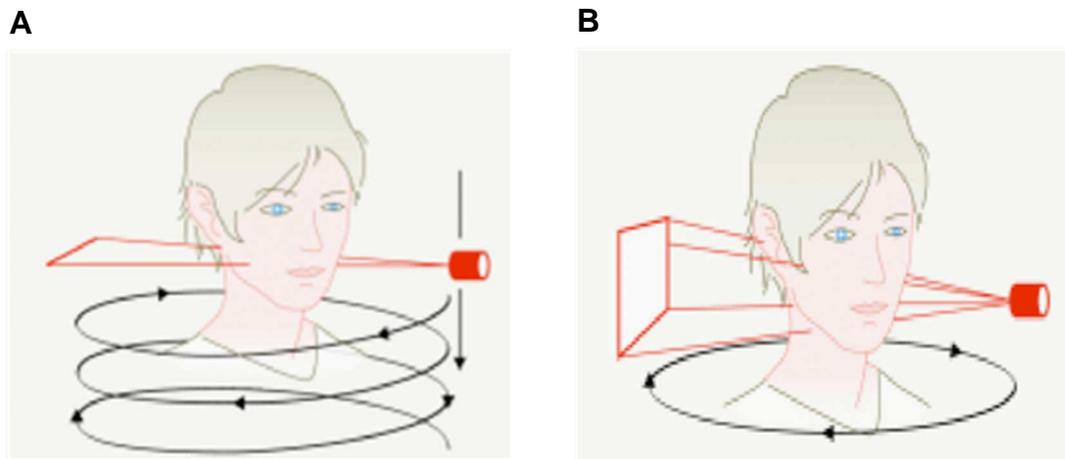


Abbildung 1.5 A-B: Die vergleichende Abbildung zeigt schematisch den Umlauf entlang der Körperachse eines SSCT mit eng kollimierten Strahlenbündel (A), und den Patientenumlauf einer DVT mit konusförmigen Strahlenbündel (B) (aus Zahnmedizin up2date 2008; 2(3): 247-259)

1.2.2. Funktionsprinzip

Die digitale Volumentomographie (DVT) bietet die Möglichkeit, das untersuchte Volumen als Schnittbilder aufzunehmen, in drei Ebenen darzustellen sowie dreidimensionale Rekonstruktionen zu erstellen und diese zu befunden. Im Gegensatz zur Computertomographie, welche mit einem eng kollimierten Röntgenstrahl arbeitet um einzelne, eindimensionale Projektionsprofile mit Hilfe eines oder mehrerer Zeilensensoren in mehreren Umläufen aufzunehmen, benutzt die DVT ein konusförmiges Strahlenbündel - den so genannten Cone-Beam (engl. cone beam computed tomography (CBCT)) (vgl. Abbildung 1.5). Das konusförmige Strahlenbündel bietet im Gegensatz zu einem zylindrischen Strahlenbündel die Möglichkeit ein dreidimensionales Volumen in lediglich einem Umlauf zu erfassen und zu verarbeiten. Der Patient wird, anders als bei

der Computertomographie nicht entlang der Körperachse durch die Gantry des Gerätes bewegt. So entstehen während eines Umlaufes fortlaufend Einzelaufnahmen, die folgend das untersuchte Volumen dreidimensional darstellen. Das Gebiet, das durch die konischen Strahlenbündel durchleuchtet und untersucht wird, hat in der Summation ebenfalls eine zylindrische Form. Das abgebildete Areal wird als Field of View (FOV) bezeichnet und variiert je nach Gerätetyp und Aufnahmemodus von 3cm x 4cm bis 19cm x 24 cm. Die Ortsauflösung, also die Genauigkeit der Darstellung einzelner Strukturen, nimmt mit zunehmender Größe des Field of View ab. Je niedriger die Ortsauflösung, desto kleiner ist auch das Risiko der Bewegungsunschärfe (Schulze 2009). Die Strahlenquelle mit dem Strahlenfokus bewegt sich zum Sensor in einem isozentrischen Umlauf um den Kopf des Patienten. Der Sensor zur Aufnahme und Verwertung der Strahlung weist herstellerspezifische Unterschiede auf. Hersteller wie beispielsweise des Gerätes NewTom (Fa. QR s.r.l., Verona, IT) verwenden aktuell Bildverstärkersysteme (image intensifier, der Größe 9 oder 12 Zoll) mit digitaler 12 bit Festkörper CCD-Kamera. Die Röntgenquanten treffen hier auf den Röntgenbildverstärker und die Röntgenstrahlung wird in Elektronenstrahlung umgewandelt. Diese wird dann erfasst und auf einen Schirm beschleunigt, welcher mit der CCD-Kamera verbunden ist, der die Fluoroskopien aufzeichnet. Der CCD-Sensor berechnet folgend für alle Pixel der Aufnahmematrix die entsprechenden Ladungen und setzt diese mit einer Röntgenintensität gleich um daraus ein Bild zu generieren. In anderen Geräten kommen Flachdetektoren, so genannte Flat Panel Systeme (FPD) zum Einsatz. In diesen Systemen nehmen selenbasierte Detektoren die Röntgenquanten direkt auf und wandeln diese in Photonen um. Die Photonen werden dann direkt von Photodioden registriert und aufgezeichnet. Jedes der auf dem Markt befindlichen Systeme bietet dem Anwender jeweils spezifische Vor- und Nachteile. Durch die Möglichkeit der Verstärkung bei röntgenbildverstärkerbasierten CCD-Kamera-Systemen kann beispielsweise die effektive Strahlendosis pro Aufnahme verringert werden. Dies ist bei Flat Panel Systemen nicht möglich, sodass hier eine größere effektive Strahlendosis zur Aufnahme notwendig ist (Ritter et al. 2007). Ein Vorteil bei Flat Panel

Systemen ist die geringere Beeinflussung der Bildschärfe durch Strahlungsartefakte, was zu einem rauschfreieren und kontraststärkerem Bildergebnis führt. Auch kann im Vergleich zu einem Bildverstärkersystem eine erhöhte Anzahl an Sichtfeldern (FOV) abgebildet werden. Zudem sind Flat Panel Systeme bauartbedingt kleiner, leichter und weisen eine höhere Lebensdauer als CCD-Sensoren auf (Hofmann 2008). Aus den generierten Rohdatensätzen erfolgt die digitale Rekonstruktion eines primären, axialen Schnittbildes. Aus dieser Rekonstruktion können sekundär alle weiteren Rekonstruktionen (sagittal, coronal) sowie die eine dreidimensionale Darstellung errechnet werden (Rother 2006).

1.2.3. DVT Rekonstruktionsverfahren

Die im Aufnahmeumlauf gewonnenen, zweidimensionalen Daten werden durch ein dreidimensionales Rekonstruktionsverfahren zu den Schichtaufnahmen und zur Weiterverarbeitung notwendigen Daten verrechnet, welches auf dem von L.A. Feldkamp entwickelten und nach ihm benannten Feldkampalgorithmus basiert (Feldkamp et al. 1984). Die Basis der aus diesem Verfahren rekonstruierten Daten bilden die, bei der DVT in der Regel isotropen Voxel (engl. Volumetric element).

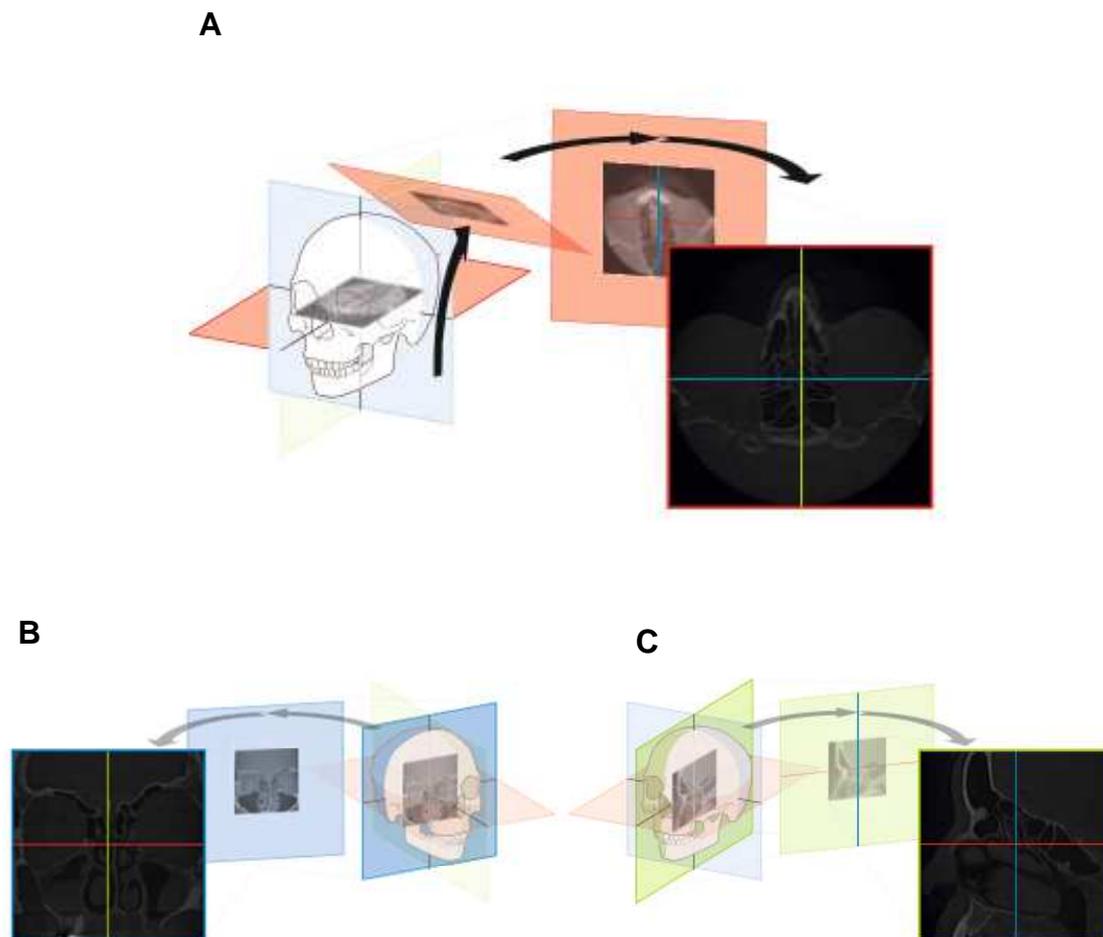


Abbildung 1.6 A-C: Exemplarische Darstellung der Bildverarbeitung in den drei Körperebenen zu einer multiplanaren Ansicht. Axiale Schicht oder Z-Ebene (A), koronare Schicht oder Y-Ebene (B) und sagittale Schicht oder X-Ebene (C). Aufnahme mit dem DVT Gerät Morita 3D Accuitomo 170 DVT (Fa. Morita, Kyoto, Japan, Prospekt).

Aus den generierten Rohdatensätzen erfolgt die digitale Rekonstruktion eines primären, axialen Schnittbildes. Aus dieser Rekonstruktion können sekundär alle weiteren multiplanaren Rekonstruktionen sowie eine dreidimensionale Darstellung errechnet werden (Rother 2006). Hierbei wird das Volumen durch senkrecht zueinander stehenden Ebenen geteilt, wodurch zusätzlich zur axialen, dann sagittale und coronale Ansichten erzeugt werden können (vgl. Abbildung 1.6 A-D und 1.7). Die so gewonnenen Datensätze können und müssen auf geeigneten Speichermedien gesichert und archiviert werden. Zur Weiterbearbeitung oder Archivierung lassen sich die Daten auf digitale, optische

Massenspeicher wie z.B. eine DVD (Digital Versatile Disc) schreiben. Das allgemein anerkannteste Format zur Speicherung und Verbreitung derartiger medizinischen Bilddaten ist das offene DICOM-Format (engl. Digital Imaging and Communications in Medicine). Mit Hilfe von entsprechenden Verarbeitungsprogrammen (DICOM-Viewern) können diese Daten visualisiert werden. Zusätzlich ergeben sich je nach Programm ergänzende diagnostische Funktionen zum Ausmessen von Strecken, Volumina und Winkeln, zur Bildoptimierung sowie zusätzliche Analysetools (Scherer et al. 2007).

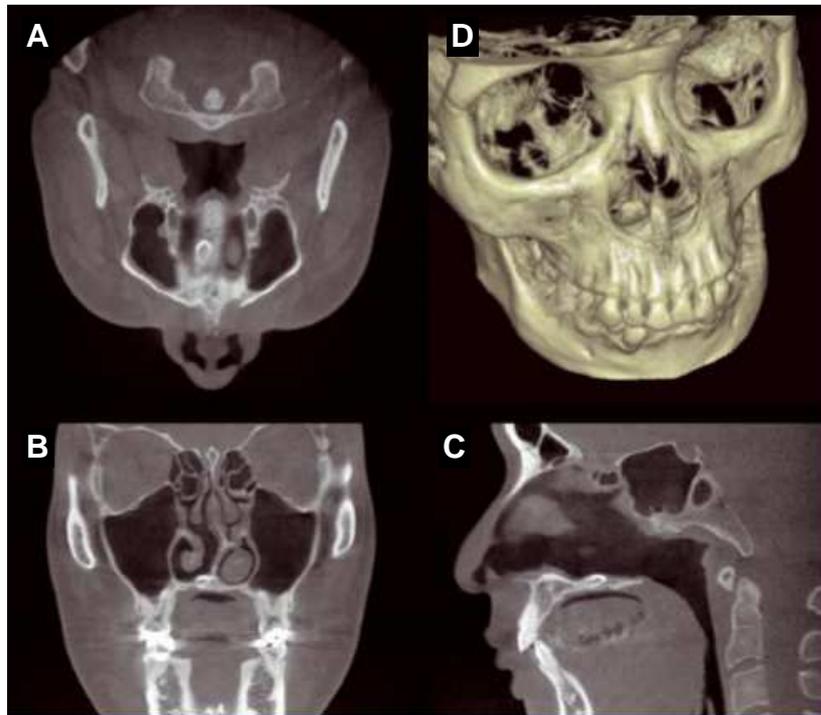


Abbildung 1.7 A-D: Exemplarische Darstellung einer, aus den DVT-Umlaufdaten errechneten multiplanaren Ansicht. Axiale Schicht (A), koronale Schicht (B), sagittale Schicht (C) sowie 3D-Rekonstruktion (D). Hier mit einem Fields of View (FOV) von $\text{\O}170 \times \text{H}120 \text{mm}$, Voxelgröße $0,25 \text{mm}$ ($250 \mu\text{m}$). Aufnahme mit dem DVT Gerät Morita 3D Accuitomo 170 DVT (Fa. Morita, Kyoto, Japan, Prospekt).

1.3. Die Fossa pterygopalatina im klinischen Kontext

Neben fortgeleiteten Entzündungen der Nasennebenhöhlen in die Fossa pterygopalatina und benignen sowie malignen neoplastischen Erkrankungen welche sich in die Fossa pterygopalatina ausbreiten oder primär in ihr entstehen spielt die Fossa pterygopalatina und das in ihr gelegene Ganglion pterygopalatinum bei der neuromodulierenden Therapie des Clusterkopfschmerzes eine bedeutende Rolle. Ein sicherer Zugang zur Fossa pterygopalatina ist ohne das Wissen um die komplexe Anatomie dieser Struktur nicht möglich.

1.3.1. Clusterkopfschmerz

Kopfschmerzen gehören zu den häufigsten klinischen Symptomen und körperlichen Beeinträchtigungen unserer Gesellschaft. Der Clusterkopfschmerz, auch als Bing-Horton-Neuralgie bezeichnet (engl. Cluster headache, CH) gehört als primäre Kopfschmerzerkrankung den sogenannten trigeminoautonomen Kopfschmerzen (TAK) an und ist gegenwärtig nicht heilbar (May 2005). Er ist in Deutschland mit einer Zahl von ca. 120000 Betroffenen der häufigste trigeminoautonome Kopfschmerz (Headache Classification Subcommittee of the International Headache Society 2004). Für Kopfschmerzen dieser Gruppe sind die meist kurz andauernden Schmerzattacken und die nahezu immer vorhandene autonome Begleitsymptomatik charakteristisch (Goadsby 1999, Sjaastad 1992) (vgl. Tabelle 1.3). Die Bezeichnung Clusterkopfschmerz ist in dem episodischen Auftreten der Symptomatik begründet. Der Kopfschmerz tritt hierbei durch extreme, streng einseitige, temporale und periorbitale Schmerzen in Erscheinung. Die Schmerzattacken treten hierbei meist spontan von einer Dauer von 15-180 Minuten auf (Headache Classification Subcommittee of the International Headache Society 2013, Schönen et al. 2013). Bei ca. 15 % der Patienten besteht ein chronischer Verlaufstyp, welcher für die Betroffenen mit einer erheblichen Beeinträchtigung der Lebensqualität einhergeht. Häufig

beschrieben wird eine tages- und jahreszeitliche Rhythmik der Schmerzattacken. Die 1-Jahres-Prävalenz des Clusterkopfschmerzes liegt bei 0,1% und 0,2%. Das Verhältnis von betroffenen Männern zu Frauen beträgt hierbei 3:1. Vererbungsfaktoren sind für den Clusterkopfschmerz bislang nicht bekannt, es wird jedoch eine familiäre Häufung von ca. 2–7% angenommen (May 2006). Die Diagnose des Clusterkopfschmerz ist verlässlich gestellt, wenn bei einem Patienten wenigsten fünf Schmerzattacken auftreten, die die in Tabelle 1.3 dargestellten Kriterien erfüllen.

Tabelle 1.3: Diagnosekriterien des Clusterkopfschmerz. Es müssen wenigsten 5 Schmerzattacken auftreten, welche modifiziert nach der IHS Classification, ICHD-3BETA die folgenden Kriterien erfüllen:

1.	Starke oder stärkste, einseitige Schmerzen orbital, supraorbital und/oder temporal, welche unbehandelt für 15-180 Minuten andauern
2.	Gleichzeitiges Auftreten von wenigstens einer der folgenden Begleitsymptomaten: <ul style="list-style-type: none"> - ipsilaterale konjunktivale Injektion und/oder Lakrimation - ipsilaterale nasale Kongestion und/oder Rhinorrhoe - ipsilaterales Lidödem - ipsilaterale Hyperhidrose im Bereich des Gesichts - ipsilaterale Miosis und/oder Ptosis - körperliche Unruhe
3.	Frequenz der Schmerzattacken zwischen einer Attacke alle zwei Tage und acht pro Tag
4.	Der Kopfschmerz ist nicht auf eine andere Erkrankung zurückzuführen

Der Clusterkopfschmerz tritt im Mittel in einem Lebensalter von 28 – 30 Jahren erstmalig auf. Grundsätzlich kann die Erstmanifestation aber in jedem Lebensalter auftreten und besteht häufig lebenslang. Bei einigen Patienten ist die Remission in einem höheren Lebensalter beschrieben. Ein Übergang von einer

primär-episodische in eine chronische Verlaufsform wird in 12% der Fälle beschrieben (May 2004). Gegenwärtige Behandlungsmethoden zur Linderung der Symptome umfassen schmerzstillende Bedarfsmedikamente, injizierbare Präparate und Sauerstoffinhalation, wobei die Medikation mit Sumatriptan und die Sauerstoffinhalation die effektivsten, konservativen Maßnahmen in der Behandlung des Clusterkopfschmerzes darstellen (Cohen 2009). Für Patienten bei denen diese Therapiemaßnahmen keinen ausreichenden Behandlungserfolg erzielen (10-20% der Fälle) oder die aufgrund von bestehenden Kontraindikationen nicht für eine medikamentöse Therapie in Frage kommen besteht die Möglichkeit einer neurostimulativen Therapie des Ganglion pterygopalatinum (engl. sphenopalatine Ganglion (SPG)).

1.3.2. Neurostimulation bei Clusterkopfschmerz

Bereits Anfang des 20. Jahrhunderts stellte das Ganglion sphenopalatinum (SPG) einen erfolgsversprechenden Zielort für Therapieansätze des Clusterkopfschmerzes dar. Sluder führte hier die erste erfolgreiche medikamentöse Nervenblockade im Ganglion sphenopalatinum mittels Injektion von 20 prozentiger Kokain-Lösung in die Fossa pterygopalatina (Sluder 1908). Im Folgenden wurden Nervenblockaden des Ganglion sphenopalatinum auch durch Injektion von Alkohollösungen oder mittels Radiofrequenzablation durchgeführt (Chua 2011, Narouze et al. 2009). Hierbei kommt es allerdings immer zu einer destruktiven und irreversiblen Schädigung des Ganglion sphenopalatinum. Aktuell stellt die elektrische Neurostimulation des Ganglion sphenopalatinum (SPG) als reversible und patientenkontrollierte Maßnahme einen in der Behandlung und zur Kontrolle vielversprechenden Therapieansatz des Clusterkopfschmerzes dar (Schoenen 2013). Klinische Studien konnten zeigen, dass der Clusterkopfschmerz einer komplexen Pathophysiologie unterliegt, wobei das Ganglion sphenopalatinum durch die vermittelte Quervernetzung zwischen afferenten Ästen des N. trigeminus mit

den efferenten parasympathischen Fasern des Nucleus salivatorius superior eine entscheidende Rolle für die Initiation und Unterhaltung des Schmerzes einnimmt. (Goadsby et al. 2002). Ferner innervieren die postganglionären Fasern aus dem Ganglion sphenopalatinum die Tränendrüsen sowie die konjunktivale und nasopharyngeale Schleimhaut was die bereits erwähnten, im Rahmen einer Schmerzattacke bei Clusterkopfschmerz charakteristischen Begleitsymptome pathophysiologisch erklärt (Nozaki et al. 1993, Ruskell 2003, Schoenen et al. 2013).

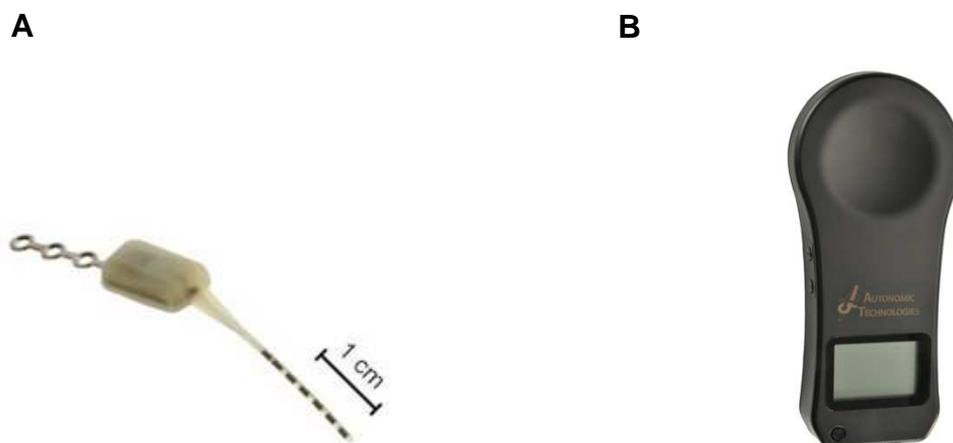


Abbildung 1.8: Ganglion pterygopalatinum (SPG) Neurostimulator Pulsante™ der Firma ATI für die chirurgische Implantation in die Fossa pterygopalatina. Der Neurostimulator besteht aus einer Fixierplatte, dem Stimulationsprozessor sowie der Stimulationselektrode (A). Abbildung B zeigt die induktive Funkfernbedienung zur Modulation des Neurostimulators. (Fa. ATI Autonomic Technologies, Inc., San Francisco, USA, Prospekt)

Der Therapieansatz bei der elektrischen Neuromodulation mittels eines implantierbaren SPG-Neurostimulators geht davon aus, die durch das Ganglion pterygopalatinum vermittelten Nervensignale, welche den Clusterkopfschmerz auslösen oder unterhalten reversibel zu unterbrechen und zu blockieren. Hierfür erfolgt die minimalinvasive Implantation eines Mikrostimulator-Systems mit einer Elektrode, welche in der Fossa

pterygopalatina, in enger Lagebeziehung zum Ganglion pterygopalatinum platziert wird (vgl. Abb. 1.8). Dabei erfolgt die Stimulation nicht permanent, sondern patientenkontrolliert mittels einer programmierbaren Fernbedienung gepulst mehrfach am Tag oder während der Schmerzattacke. In verschiedenen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass 70% der Patienten unter der Therapie entweder eine abortive Wirkung auf die Attacken und/oder eine signifikant sinkende Attackenfrequenz zeigten (Schoenen et al. 2013, Marteletti et al. 2013).

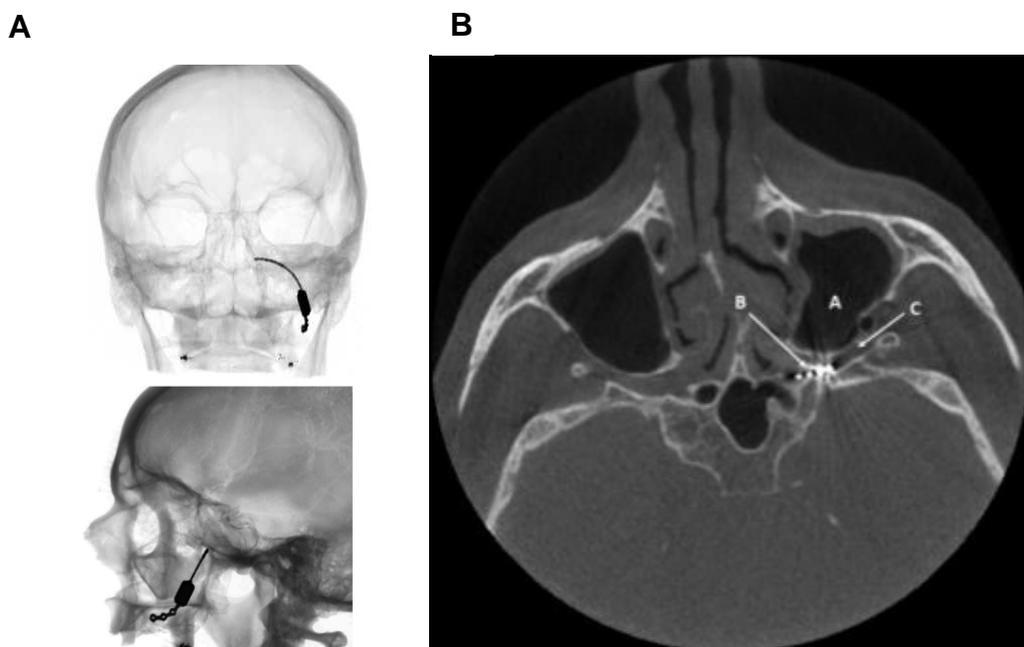


Abbildung 1.9: In (A) digital Rekonstruierte (DRR) Computertomographie (CT) nach Implantation eines SPG-Neurostimulators in die Fossa pterygopalatina. Die Stimulationselektrode in enger Lagebeziehung zum Ganglion pterygopalatinum (SPG), oben in der Ansicht von anterior, unten in der Ansicht von lateral. In (B) postoperative, digitale Volumentomographie (DVT) zur Lagekontrolle der Stimulationselektrode. (a) Kieferhöhle, (b) Elektrodenspitze in der Fossa pterygopalatina, (c) Eingang zur linken Fossa pterygopalatina. (Assaf et al. 2015)

2. Material und Methoden

2.1. DVT-Scanner

Alle für diese Studie verwendeten Röntgenaufnahmen wurden mit dem DVT-Scanner 3D Accuitomo 170 (Modell MCT-1-EX-1) der Firma Morita, Kyoto, Japan erstellt.

2.1.1. Aufbau und Leistungsparameter des DVT-Scanners

Der DVT Scanner 3D Accuitomo 170 (Fa. Morita, Kyoto, Japan) ist als stationäres Röntgengerät konzipiert. Der DVT Scanner lässt sich in zwei Einheiten unterteilen. Die Aufnahmeeinheit besteht aus der entsprechenden Röntgenstrahlenquelle und dem Flat-Panel-Detektor (FPD). Die Patienteneinheit besteht aus dem Patientensitz mit Kinn- und Kopfstütze zum sicheren und reproduzierbaren Ausrichten der Patienten, dem Bedienfeld und der Kontrolleinheit mit Auslöser und Fernbedienung (vgl. Abbildung 3). Der DVT Scanner bietet dem Anwender fünf Auflösungsstufen an. Die maximale Auflösung wird mit mehr als zwei Linienpaaren pro mm angegeben, dies ergibt eine effektive Voxelgröße von 0,08mm bis 0,25mm. Voxel sind definiert als Quader, die dem Produkt Pixelgröße x Schichtdicke entlang der Aufnahmeachse entsprechen (Hofer 2003). Die Schichtdicke ist hierbei variabel und beträgt 0,125mm bis 2mm. Daraus ergeben sich neun Sichtfelder, so genannte Field of Views (FOV). Diese bilden den anatomischen Ausschnitt, der mit dem Scanner abgebildet werden kann. Das in dieser Studie verwendete Gerät ist in der Lage Sichtfelder einer Größe von 40mm x 40mm bis zu 170mm x 120mm abzubilden. Die Expositionszeit für eine umlaufende Aufnahme liegt zwischen 10,5 Sekunden und 30,8 Sekunden. In dem in dieser Studie angewandten Aufnahmemodus betrug die Expositionszeit 17,5 Sekunden. Der Hersteller gibt die durchschnittliche Strahlendosis bei einem FOV von 40mm x 40mm mit $20\mu\text{Sv}$ an (vgl. Abbildung 4B). Im Vergleich

zu einer Orthopantomographie (syn. Panoramaschichtaufnahme) ist die effektive Dosis somit ungefähr 1,6-mal höher. Der Computed Tomography Dose Index eines konventionellen CT-Scans beträgt circa das Siebenfache der Strahlendosis einer Standardaufnahme mit dem hier verwendeten Gerät 3D Accuitomo 170 (Fa. Morita, Kyoto, Japan).



Abbildung 2.1: Mit diesem Gerät erfolgte die radiologische Untersuchung der Patienten dieser Studie. Abgebildet ist das DVT Gerät Morita 3D Accuitomo 170 DVT (Fa. Morita, Kyoto, Japan, Prospekt).

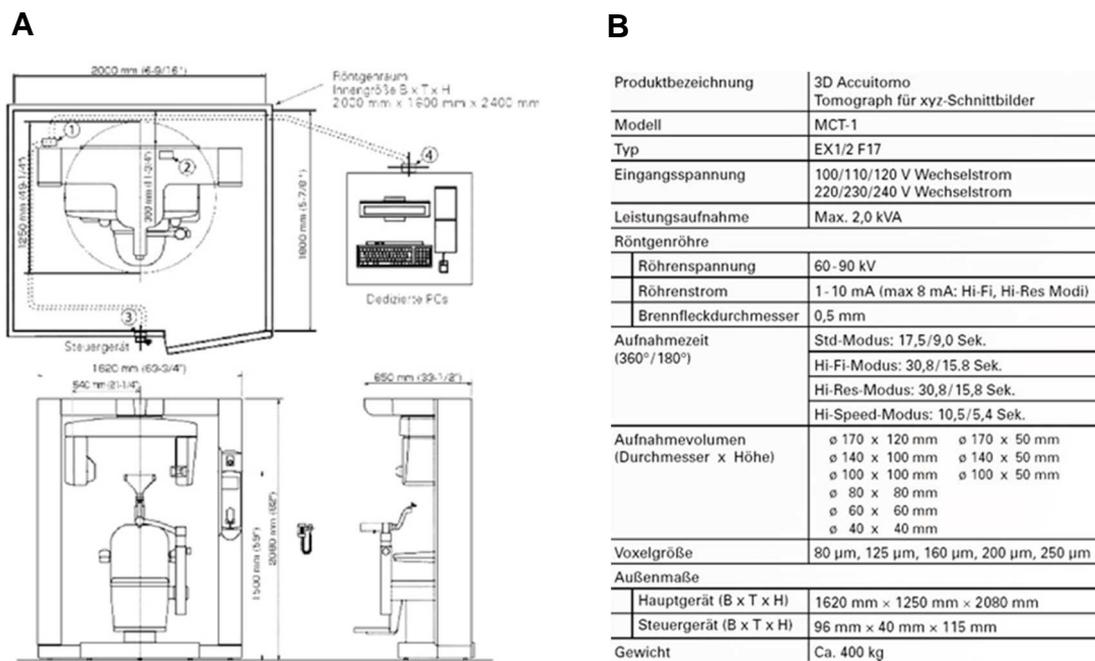


Abbildung 2.2 A-B: In (A) abgebildet die technische Zeichnung des DVT Scanners 3D Accuitomo 170 der Firma Morita. Die Abbildung (B) zeigt das technische Datenblatt des DVT Scanners 3D Accuitomo 170 der Firma Morita (Fa. Morita, Kyoto, Japan, Prospekt).

2.1.2. Patientenpositionierung

Die Positionierung des Patienten erfolgte nach Standardprotokoll in aufrecht sitzender Position. Mit Hilfe von drei Laserlichtlinien wurde der Kopf gemäß der Frankfurter Horizontalen und der sagittalen sowie frontalen Ebene ausgerichtet. Der Kopf des Patienten wurde für die Dauer des Scanvorgangs zur Erstellung der Aufnahme mittels Kopfstütze, Kopfhaltband und Kinnauflage in alle Richtungen in der korrekten Lage fixiert. Vor der definitiven, dreidimensionalen Aufnahme werden zur Übersicht der Einstellung des zu scannenden Volumens standardmäßig zwei Übersichtsaufnahmen (Scout-Aufnahmen) aus posterior-anterior (pa) und seitlicher (seitl.) Position angefertigt. Anhand dieser Aufnahmen konnte das Field of View (FOV) auf die zu untersuchende Region angepasst und die achsengerechte Patientenpositionierung sichergestellt werden.

2.1.3. Aufnahmeeinstellungen

Die untersuchten Röntgenaufnahmen für diese Studie wurden ausnahmslos im 360°-Aufnahmemodus durchgeführt. Ein Umlauf benötigte hierbei 17,5 Sekunden (Expositionszeit) und das Field of View (FOV) betrug $\varnothing 170\text{mm} \times \text{H}120\text{mm}$ bei einer Auflösung von 2 Linienpaaren pro mm und einer Voxelgröße von 0,25mm (250 μm). Die Röntgenstromstärke betrug von 1 bis 10mA, die Röhrenspannung 60 bis 90 kV. Der Brennfleck des Gerätes betrug für die Aufnahmen einen halben Millimeter im Durchmesser (vgl. Abbildung 4B).

2.1.4. Bildaufbereitungssoftware und Hardware

Zur Darstellung und Verarbeitung des erhobenen Rohdatensatzes wurde ein Computer des Herstellers Dell Technologies (Fa. Dell Technologies Inc., Round Rock, USA) mit einem 2,67GHz Intel Xeon Prozessor, 3,25GB RAM verwendet. Das Betriebssystem stellte Windows XP Professional. Die Bildverarbeitung erfolgte mit dem Programm i-Dixel (Fa. Morita, Kyoto, Japan) auf dem oben genannten Computer. Die Software bietet eine Vielzahl von Funktionen und ist zur Umrechnung des Rohdatensatz in einen dreidimensionalen Datensatz notwendig. Diese errechnet Bilder in drei Schichtebenen (sagittal, koronar, axial), welche die Betrachtung des gescannten Objektes in jeweils 1mm Schichtdicke ermöglichen. Die Betrachtung erfolgte auf einem Monitor des Herstellers Dell Technologies (Fa. Dell Technologies Inc., Round Rock, USA), 27 Zoll Größe mit einer Bildauflösung von 2560 x 1600 Bildpunkten. Die Datensätze der untersuchten Patienten wurden zur Durchführung der volumetomographischen Analyse auf ein digitales Speichermedium exportiert und folgend auf ein Apple Macbook Pro (Fa. Apple, Cupertino, USA) in die Software OsiriX 3.7.1 (Fa. Pixmeo, Genf, Schweiz) importiert. Dieser Rechner arbeitete mit dem Prozessor Intel Core i7 mit 2,66 GHz, 4GB Ram, 256GB SSD-Festplatte. Die Auflösung betrug 1440 x 900 Bildpunkte auf einem 15 Zoll Monitor. Das Betriebssystem stellte Mac OS 10.8.3 (Fa. Apple, Cupertino, USA). Die dreidimensionale,

volumentomographische Analyse erfolgte mit der Software OsiriX 3.7.1 (Fa. Pixmeo, Genf, Schweiz).

2.2. Patientenkollektiv

Die Untersuchung der anatomischen Region der Fossa pterygopalatina erfolgte mittels Analyse von DVT-Röntgenaufnahmen. Insgesamt wurden digitale Volumentomographien von 100 Patienten in gleicher Alters- und Geschlechtsverteilung in dieser Studie analysiert. Die Röntgenaufnahmen erfolgten studienunabhängig und bei fachärztlich gestellter, rechtfertigender Indikation gemäß §23 Röntgenverordnung (RöV) in der Klinik und Poliklinik der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie der Universitätsklinik Hamburg-Eppendorf (Direktor Prof. Dr. Dr. M. Heiland). Bei allen Patienten erfolgte die vollständige Abbildung des knöchernen Mittelgesichts, der Schädelbasis, der Nasennebenhöhlen sowie der Orbita mit jeweils allen knöchernen Begrenzungen. Bei allen durchgeführten Aufnahmen wurde ein FOV von 170x120mm verwendet. Ausschlusskriterien für den Einschluss in die Untersuchung der vorliegenden Studie waren pathologische Befunde der zu untersuchenden Region sowie knöcherne Läsionen oder das Vorhandensein von Fremdmaterialien. Patienten, welche anamnestisch eine den Knochenstoffwechsel beeinflussende Medikation eingenommen haben, wurden ebenfalls aus der Studie ausgeschlossen. Das Patientenkollektiv bestand aus je 50 Frauen und 50 Männern mit einer Altersverteilung von 20 - 70 Jahren. Das Durchschnittsalter lag in dem männlichen Kollektiv bei 44,9 Jahren, in dem weiblichen Kollektiv bei 45,7 Jahren. Es wurden 5 Altersgruppen gebildet [Altersgruppe 1: 20-29 ($24,05 \pm 2,8$), Altersgruppe 2: 30-39 ($34,5 \pm 3,1$), Altersgruppe 3: 40-49 ($45,6 \pm 3,2$), Altersgruppe 4: 50-59 ($53,3 \pm 1,7$) und Altersgruppe 5: 60-70 ($65,4 \pm 3,2$)]. Es wurden insgesamt 20 Patienten einer Subgruppe zugeteilt. Dabei wurden jeweils 10 Männer und 10 Frauen pro Altersgruppe zugeordnet.

2.3. Methoden der Auswertung

Die dreidimensionale, volumetomographische Analyse erfolgte mit der Software OsiriX 3.7.1 (Fa. Pixmeo, Genf, Schweiz). Zur volumetrischen Untersuchung der Fossa pterygopalatina wurden die das Volumen der Fossa pterygopalatina begrenzenden Strukturen in jeder Schicht manuell umfahren. Die weichgewebigen Begrenzungen wurden anhand röntgenologischer Landmarken gesetzt und somit das Volumen komplettiert. Um bei der Analyse einen stets gleichbleibenden Kontrast zwischen der knöchernen Begrenzung und dem Weichgewebe zu schaffen und so die Differenzierung von Knochen- und Weichgewebe sicherzustellen wurde standardmäßig der identische Ausschnitt (Fensterung) der Skala der gemessenen Dichtewerte im Bild zur Ansicht innerhalb des Programms OsiriX gewählt.

2.3.1. Summation-of-area Verfahren

Die volumetrischen Messungen in dieser Studie erfolgten ausschließlich in der axialen Ebene. Dies ermöglichte eine annähernd wirklichkeitsgetreue Analyse der Fossa pterygopalatina, da sich die weichgewebigen Begrenzungen in der axialen Schichtung anhand knöcherner Landmarken besser definieren und darstellen lassen als in transversaler oder sagittaler Ebene (Vogl und Balzer 2002). Durch die definierte Schichtdicke von 1mm wurde so für jede Schicht das gemessene Areal mit der Schichtdicke verrechnet. Die Summation dieser geschichteten Volumina ergab das Gesamtvolumen der vermessenen Struktur.

2.3.2. Vermessungsparameter der Fossa pterygopalatina

Um die volumetrische Vermessung der Fossa pterygopalatina durchzuführen musste diese zunächst in den axialen Schichtungen definiert werden. Hierbei wurden die anatomischen Grenzen in den einzelnen Schichtaufnahmen identifiziert und gekennzeichnet. Die ventrale Vermessungsbegrenzung der

Fossa pterygopalatina bildete hierbei die dorsale Fläche der Maxilla (Tuber maxillae). Die dorsale Vermessungsbegrenzung bildete das Os sphenoidale mit dem Processus pterygoideus ossis sphenoidalis. Als kraniale Vermessungsbegrenzung wurde die Ala major ossis sphenoidalis des Os sphenoidale identifiziert. Die radiologisch durch die Fisura orbitalis inferior hervorgerufenen, knöchernen Unterbrechungen im Bereich der definierten kranialen Vermessungsbegrenzung wurden ignoriert und durch Einfügen von Verbindungslinien interpoliert. Nach kaudal und lateral existieren keine definitiven knöchernen Begrenzungen. Nach kaudal ist die Fossa pterygopalatina in den Retropharyngealraum offen, nach lateral, zur Fossa infratemporalis ist sie über die Fissura pterygomaxillaris offen. Die so lediglich weichgewebigen Begrenzungen der Fossa pterygopalatina nach kaudal und lateral machten die Etablierung von radiologischen Landmarken (engl. landmarks) notwendig, um so reproduzierbare Vermessungsgrenzen zu generieren und vergleichbare Messungen durchzuführen. Die kaudale Begrenzung bildete hier der Eingang in die Fossa pterygopalatina in Höhe des Processus pyramidalis os palatinum, nach lateral die Fissura pterygomaxillaris (vgl. Abbildung 2.3).



Abbildung 2.3: Exemplarische Darstellung der Vermessung des Volumens der Fossa pterygopalatina. Hier grün dargestellt die Vermessungsgrenze in der axialen Schicht entlang der definierten knöchernen Landmarken der rechten und linken Fossa pterygopalatina.

Neben der volumetrischen Vermessung erfolgte die Analyse weiterer anatomischer Gegebenheiten, welche für eine präoperative Planung vor Implantation eines SPG-Neurostimulators wichtig sein können. So wurden zum einen der obere und untere pterygomaxilläre Winkel sowie der sagittale Eingangswinkel der Fossa pterygopalatina bezogen auf die kaudale und dorsale Begrenzung der Fossa pterygopalatina vermessen (vgl. Abbildung 2.4 A-B. und 2.5).

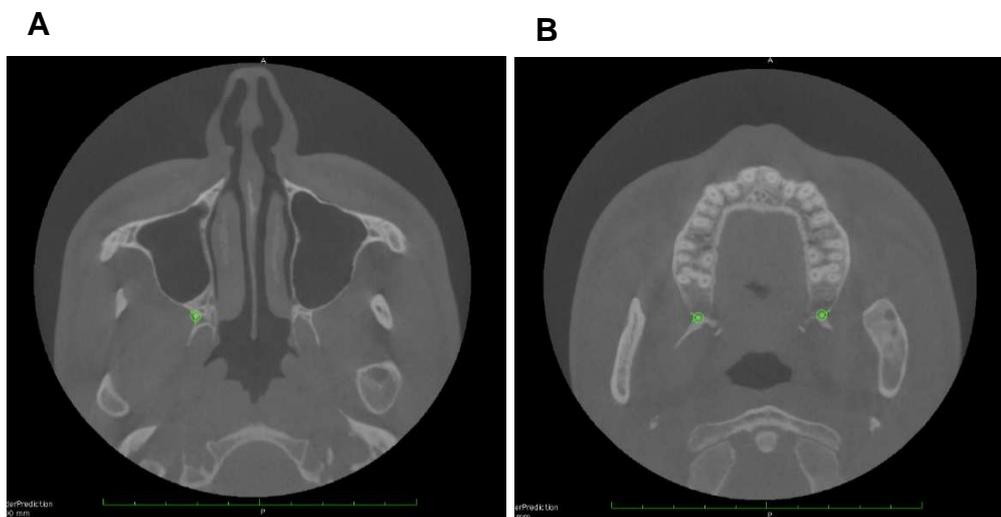


Abbildung 2.4 A-B: Exemplarische Darstellung der Bestimmung des oberen (A) und des unteren pterygomaxillären Winkels (B) der Fossa pterygopalatina. Hier grün dargestellt die jeweiligen Vermessungsgrenzen in der axialen Schicht entlang der definierten knöchernen Landmarken der rechten Fossa pterygopalatina (A) bzw. der rechten und linken Fossa pterygopalatina (B).

Die Vermessung des oberen und unteren pterygomaxillären Winkels erfolgte wie die volumetrische Analyse in den axialen Schichtbildern und innerhalb der definierten Vermessungsgrenzen. Die Bestimmung des sagittalen Eingangswinkels der Fossa pterygopalatina erfolgte in den sagittalen Schichtbildern. Zunächst wurden auch hier die Identifikation und Kennzeichnung und knöchernen Begrenzungen vorgenommen. Diese stellten für die Bestimmung des sagittalen Eingangswinkels die ventrale (Hinterwand der Maxilla) respektive dorsale Begrenzung (Processus pterygoideus ossis

sphenoidalis) der Fossa pterygopalatina dar (vgl. Abbildung 2.5). Entlang dieser knöchernen Strukturen wurden zwei in der Ebene liegenden Linien tangential eingeblendet, welche in einem gemeinsamen Ausgangspunkt, dem so genannten Scheitelpunkt begrenzt sind. Der durch diese Punkte festgelegte Winkel wurde dann digital vermessen.



Abbildung 2.5: Exemplarische Darstellung der Bestimmung des Eingangswinkels der Fossa pterygopalatina. Hier grün dargestellt die Vermessungsgrenze in der sagittalen Schicht entlang der definierten knöchernen Landmarken der rechten und linken Fossa pterygopalatina.

2.3.3. Statistische Auswertung

Die in dieser Studie analysierten Daten wurden patientenspezifisch erfasst, anonymisiert und nach Geschlecht sowie Lebensalter in Subgruppen zugeteilt. Es wurden 5 Altersgruppen gebildet [Altersgruppe 1: 20-29 ($24,05 \pm 2,8$), Altersgruppe 2: 30-39 ($34,5 \pm 3,1$), Altersgruppe 3: 40-49 ($45,6 \pm 3,2$), Altersgruppe 4: 50-59 ($53,3 \pm 1,7$) und Altersgruppe 5: 60-70 ($65,4 \pm 3,2$)] gegliedert und deskriptiv analysiert. Die statistische Analyse der Messdaten

erfolgte mit Hilfe der Software IBM SPSS-Statistics (Fa. IBM, Armonk, USA). Die Ergebnisse wurden als Median und 95%-Konfidenzintervall dargestellt. Es wurden Mittelwertanalysen für Durchschnittswerte durchgeführt. Zur Feststellung der Korrelation zwischen dem Alter der Patienten mit den jeweils gemessenen Volumina der Fossa pterygopalatina wurden die Daten, zur Reduktion des Informationsverlustes auf einer kontinuierlichen Altersachse aufgeführt. Zur Feststellung von Korrelation zwischen den Altersgruppen wurde der Mann-Whitney Signed Rank Test für unabhängige Variablen mit zusätzlicher α -Adjustierung nach Holm-Bonferoni angewendet. Zur Prüfung der Signifikanz, wurde für alle Fragestellungen das Signifikanzniveau $\alpha=0,05$ festgelegt. Die statistische Signifikanz beschreibt mit dem p-Wert, ob zwischen den zu analysierenden Variablen ein Zusammenhang besteht, der nicht zufällig auftritt. p-Werte $< 0,05$ (*) wurden als signifikant, p-Werte $< 0,01$ (**) als hochsignifikant gewertet.

3. Ergebnisse

Für die Analyse der Daten wurden DVT-Scans von insgesamt 100 Patienten ausgewertet. Das Patientenkollektiv bildeten hierbei 50 weibliche und 50 männliche Personen mit einem Durchschnittsalter von 45,1 Jahren im weiblichen Kollektiv und 44,9 Jahren im männlichen Kollektiv (vgl. Tabelle 3.1). Die DVT-Scans entstanden innerhalb eines Zeitraumes von insgesamt 16 Monaten in der Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie der Universitätsklinik Hamburg Eppendorf (Direktor Prof. Dr. Dr. M. Heiland). Insgesamt wurde die Fossa pterygopalatina von 100 Patienten aufeinander folgend beidseits (rechts/links) volumetrisch vermessen und die Winkel korrelierend zu den anatomischen Gegebenheiten analysiert. Die Volumina wurden in der SI-Einheit Kubikzentimeter (cm³) vermessen und angegeben. Die Winkel wurden als Teil des Gradmaßes eines Vollwinkels (360 gleich große Anteile) als Grad (°) vermessen und angegeben.

Tabelle 3.1: Altersverteilung des Patientenkollektivs

	N	Minimum (Lebensalter)	Maximum (Lebensalter)	Mittelwert (Lebensalter)	Standard- abweichung (Lebensalter)
Gesamtes Kollektiv	100	20,0	70,0	44,3	14,4
Weibliches Kollektiv	50	20,0	70,0	45,1	14,7
Männliches Kollektiv	50	20,0	70,0	44,9	15,7

3.1. Volumetrische Ergebnisse

Die Volumenanalyse der Fossa pterygopalatina (PPF) im Gesamtkollektiv (n=100) ergab folgende Einzelergebnisse (vgl. Tabelle 3.1). Die linke und rechte Fossa pterygopalatina wurden jeweils getrennt betrachtet.

Tabelle 3.2: Volumetrische Analyse der Fossa pterygopalatina (PPF) des gesamten Patientenkollektivs (n=100)

	N	Minimum (cm ³)	Maximum (cm ³)	Mittelwert (cm ³)	Standard- abweichung (cm ³)
PPF links	100	0,11	1,70	0,37	0,17
PPF rechts	100	0,11	1,10	0,33	0,13

Der Mittelwert des gemessenen Volumens der Fossa pterygopalatina beträgt links 0,37 cm³ und rechts 0,33 cm³ mit einer Standardabweichung von 0,17 cm³ links und 0,13 cm³ für die rechte Fossa. Die Streuung vom geringsten Volumen zum größten Volumen ist 0,11 cm³ bis 1,70 cm³. Die volumetrische Analyse des Gesamtkollektivs zeigt die deutliche Heterogenität der Fossa pterygopalatina in sich bei annähernd gleichen Mittelwerten für die linke sowie rechte Seite.

3.1.1. Altersspezifische Volumetrische Analyse

Zur Bestimmung der Volumina der Fossa pterygopalatina (PPF) in verschiedenem Lebensalter erfolgte die Analyse nach Einteilung in 5 Altersgruppen (AG1-AG5). Jeder Altersgruppe wurden jeweils 10 weibliche Patienten und 10 männliche Patienten zugeordnet. Jede Altersgruppen umfasste eine Lebensdekade (Altersgruppe 1: 20-29, Altersgruppe 2: 30-39, Altersgruppe 3: 40-49, Altersgruppe 4: 50-59 und Altersgruppe 5: 60-70). Ferner erfolgte die

Messung getrennt nach der linken und rechten Körperseite (vgl. Tabelle 3.2, Tabelle 3.3, Tabelle 3.4, Tabelle 3.5, Tabelle 3.5).

Tabelle 3.3: Volumetrische Analyse der Fossa pterygopalatina (PPF) für die Altersgruppe 1 (AG1) 20 bis 29 Jahre (n=20)

	N	Minimum (cm ³)	Maximum (cm ³)	Mittelwert (cm ³)	Standard- abweichung (cm ³)
PPF links	20	0,14	0,46	0,29	0,09
PPF rechts	20	0,12	0,46	0,28	0,10

In der Altersgruppe 1 (AG1: 20 bis 29 Jahre) beträgt das gemessene Volumen für die linke Fossa pterygopalatina im Mittel 0,29 cm³ und für die rechte Fossa pterygopalatina 0,28 cm³ bei einer Standardabweichung von 0,09 cm³ links und 0,10 cm³ rechts.

Tabelle 3.4: Volumetrische Analyse der Fossa pterygopalatina für die Altersgruppe 2 (AG2) 30 bis 39 Jahre (n=20)

	N	Minimum (cm ³)	Maximum (cm ³)	Mittelwert (cm ³)	Standard- abweichung (cm ³)
PPF links	20	0,20	1,70	0,41	0,30
PPF rechts	20	0,16	1,10	0,38	0,19

In der Altersgruppe 2 (AG2: 30 bis 39 Jahre) beträgt das gemessene Volumen für die linke Fossa pterygopalatina im Mittel 0,29 cm³ und für die rechte Fossa pterygopalatina 0,28 cm³ bei einer Standardabweichung von 0,09 cm³ links und 0,10 cm³ rechts.

Tabelle 3.5: Volumetrische Analyse der Fossa pterygopalatina (PPF) für die Altersgruppe 3 (AG3): 40 bis 49 Jahre (n=20)

	N	Minimum (cm ³)	Maximum (cm ³)	Mittelwert (cm ³)	Standard- abweichung (cm ³)
PPF links	20	0,13	0,61	0,30	0,11
PPF rechts	20	0,11	0,45	0,29	0,11

In der Altersgruppe 3 (AG3: 40 bis 49 Jahre) beträgt das gemessene Volumen für die linke Fossa pterygopalatina im Mittel 0,30 cm³ und für die rechte Fossa pterygopalatina 0,29 cm³ bei einer Standardabweichung von jeweils 0,11 cm³.

Tabelle 3.6: Volumetrische Analyse der Fossa pterygopalatina (PPF) für die Altersgruppe 4 (AG4): 50 bis 59 Jahre (n=20)

	N	Minimum (cm ³)	Maximum (cm ³)	Mittelwert (cm ³)	Standard- abweichung (cm ³)
PPF links	20	0,11	0,42	0,26	0,08
PPF rechts	20	0,13	0,40	0,26	0,08

In der Altersgruppe 4 (AG4: 50 bis 59 Jahre) beträgt das gemessene Volumen für beide Fossae im Mittel 0,26 cm³ bei einer Standardabweichung von jeweils 0,08 cm³.

Tabelle 3.7: Volumetrische Analyse der Fossa pterygopalatina (PPF) für die Altersgruppe 5 (AG5): 60 bis 70 Jahre (n=20)

	N	Minimum (cm ³)	Maximum (cm ³)	Mittelwert (cm ³)	Standard abweichung (cm ³)
PPF links	20	0,18	0,55	0,30	0,10
PPF rechts	20	0,15	0,52	0,29	0,10

In der Altersgruppe 5 (AG5: 60 bis 70 Jahre) beträgt das gemessene Volumen für die linke Fossa pterygopalatina im Mittel 0,30 cm³ und für die rechte Fossa pterygopalatina 0,29 cm³ bei einer Standardabweichung von jeweils 0,10 cm³.

Die im Mittel von 0,41 cm³ auf der linken respektive 0,38 cm³ auf der rechten Seite mit am höchsten gemessenen Volumina der Fossa pterygopalatina sind in der Altersgruppe 2 (Lebensalter von 30 bis 39 Jahren) verordnet. Insgesamt sind die gemessenen Volumina in allen Altersgruppen konstant und es lässt sich anhand der vorliegenden Daten keine Tendenz der Volumenzunahme oder -abnahme im Laufe des Lebensalters beobachten. In der Regressionsanalyse wurden die Messdaten der Volumina auf eine kontinuierliche Altersskala aufgetragen. Für die linke Fossa pterygopalatina liegt der slope für 10 Jahre bei -0,057 cm³ und bei - 0,004 cm³ für die rechte Fossa pterygopalatina. Das durchschnittliche Volumen der Fossa pterygopalatina nimmt innerhalb von 10 Jahren somit linksseitig um 0,057 cm³ und auf der rechten Seite um 0,004 cm³ ab. Die Werte sind statistisch gemittelt unterliegen aber einer deutlichen Streuung. Eine statistische Signifikanz lässt sich bei einem p-Wert von 0,082 links und einem p-Wert von 0,624 rechts nicht nachweisen (vgl. Abbildung 3.1 A-B).

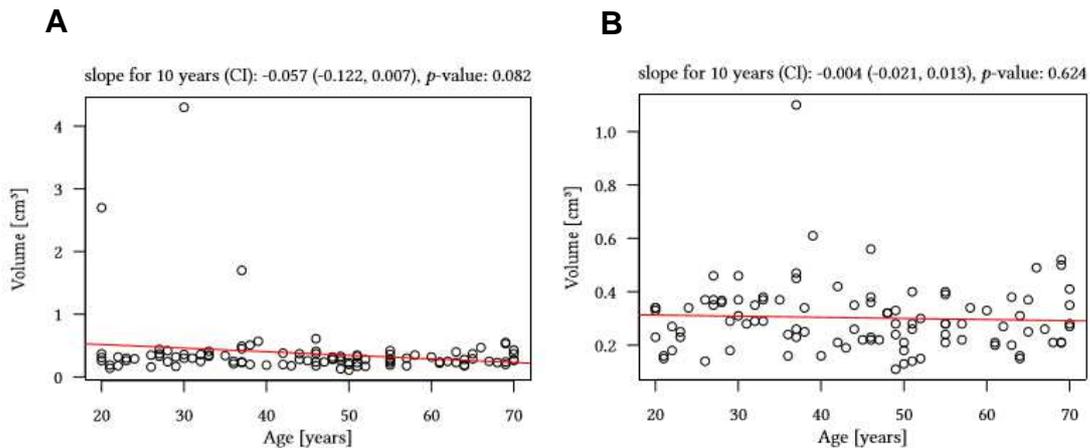


Abbildung 3.1 A-B: Regressionsanalyse (10 Jahre) für das Volumen der Fossa pterygopalatina in Abhängigkeit zum Lebensalter. Die Analyse wurde jeweils für das Volumen der linken (A) und rechten (B) Fossa pterygopalatina vergleichend zum Alter durchgeführt. Zur Abbildung der vereinzelt extrem abweichenden Messwerte in der Gruppe der linken Fossa pterygopalatina (A) musste die Skalierung dort angepasst werden. Die Werte wurden innerhalb und gegen die einzelnen Gruppen auf Signifikanz geprüft. Ein p-Wert (p-value) $<0,05$ wurde als signifikant (*), ein p-Wert $<0,01$ als hoch signifikant (**) bewertet.

3.1.2. Geschlechtsspezifische volumetrische Analyse

Die mittlere Volumen der rechten und linken Fossa pterygopalatina wurden für das gesamte Patientenkollektiv geschlechtsspezifisch für das männliche Geschlecht (engl. male) und das weibliche Geschlecht (engl. female) gegenübergestellt und analysiert. Wie in den Boxplots der Abbildung 3.2 A-B dargestellt liegen die Messwerte des arithmetischen Mittels, der Mediane und der oberen und unteren Quartile bei dem männlichen Kollektiv volumenbezüglich leicht über derer des weiblichen Kollektivs (vgl. Abbildung 3.2 A-B). Das Signifikanzniveau ist für beide Seiten mit einem p-Wert (p-value) 0,823 für die linke respektive mit einem p-Wert 0,721 für die rechte Seite statistisch nicht signifikant. Zur Abbildung der vereinzelt extrem abweichenden Messwerte in der Gruppe der linken Fossa pterygopalatina musste die Skalierung dort angepasst werden. Diese Werte wurden in der Zusammenschau als nicht repräsentativ für die Gruppe bewertet. Das angegebene Konfidenzintervall (CI) von -0.17 bis 0,02

und -0,06 bis 0,04 bestätigt die Tendenz, dass das Volumen der Fossa pterygopalatina in der weiblichen Gruppe des Kollektivs ein kleineres Volumen besitzt als in der männlichen.

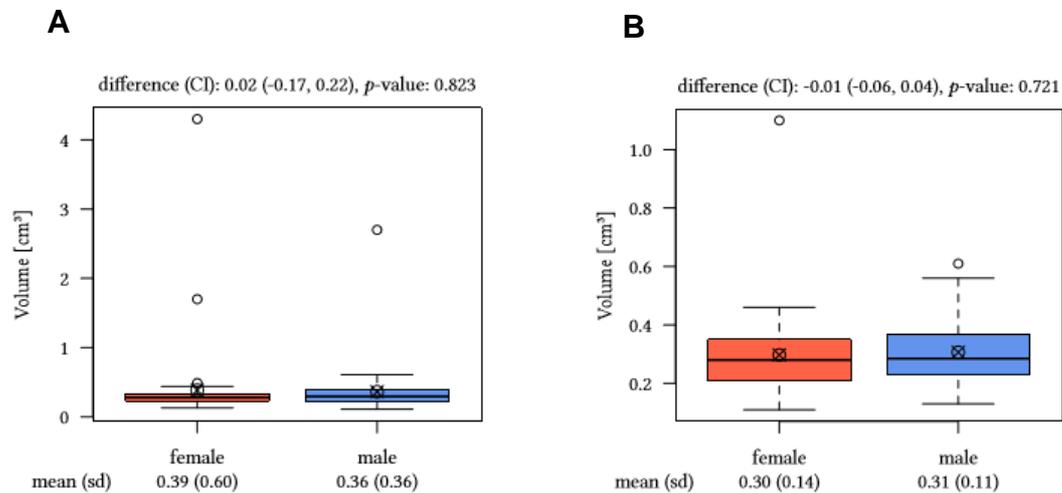


Abbildung 3.2 A-B: Geschlechtsspezifische Analyse des Volumens der Fossa pterygopalatina im Patientenkollektiv. Die Analyse wurde jeweils für das mittlere Volumen der linken (A) und rechten (B) Fossa pterygopalatina vergleichend zum Geschlecht durchgeführt. Alle Messwerte sind als Boxplot angegeben. Zur Abbildung der vereinzelt extrem abweichenden Messwerte in der Gruppe der linken Fossa pterygopalatina (A) musste die Skalierung dort angepasst werden. Die Werte wurden innerhalb und gegen die einzelnen Gruppen auf Signifikanz geprüft. Ein p-Wert (p -value) $<0,05$ wurde als signifikant (*), ein p-Wert $<0,01$ als hoch signifikant (**) bewertet.

3.2. Messergebnisse oberer und unterer pterygopalatinaler Winkel

Folgend werden die Messergebnisse des oberen und unteren pterygopalatinalen Winkels dargestellt. Hierbei werden jeweils zunächst die altersspezifischen, dann die geschlechtsspezifischen Analysen präsentiert. Die Winkel wurden als Teil des Gradmaßes eines Vollwinkels (360 gleich große Anteile) als Grad ($^{\circ}$) vermessen und angegeben.

3.2.1. Altersspezifische Analyse des oberen pterygopalatinalen Winkels

Die Analyse des oberen pterygopalatinalen (PPF) Winkels im Gesamtkollektiv (n=100) ergab folgende Einzelergebnisse (vgl. Tabelle 3.8). Die linke und rechte Seite wurden jeweils getrennt betrachtet.

Tabelle 3.8: Analyse des oberen pterygopalatinalen Winkels der Fossa pterygopalatina (PPF) des gesamten Patientenkollektivs (n=100)

	N	Minimum (°)	Maximum (°)	Mittelwert (°)	Standardabweichung (°)
Oberer Winkel PPF links	100	46	162	101,1	17,6
Oberer Winkel PPF rechts	100	51	158	100,1	19,8

Der Mittelwert des gemessenen oberen pterygopalatinalen Winkels beträgt links 101,1° und rechts 100,1° mit einer Standardabweichung von 17,6° links und 19,8° rechts. Der größte gemessene oberer Winkel im Kollektiv beträgt 162°, der geringste 46°. Die Analyse des Gesamtkollektivs zeigt deutliche Unterschiede in der individuellen Ausprägung bei relativer Homogenität der Mittelwerte für die linke und rechte Seite. In der Regressionsanalyse wurden die Werte der gemessenen Winkel auf eine kontinuierliche Altersskala aufgetragen. Der slope für 10 Jahre liegt für den linken oberen pterygopalatinalen Winkel bei 3,06° und für den rechten oberen pterygopalatinalen Winkel bei 1,60. Die durchschnittliche Zunahme des oberen pterygopalatinalen Winkels innerhalb von 10 Jahren beträgt bezogen auf die linke Seite 3,06° und auf der rechten Seite 1,60°. Eine statistische Signifikanz lässt sich bei einem p-Wert (p-value) von 0,008 für die linke Seite nachweisen. Der p-Wert für die Messung auf der rechten Seite beträgt 0,229 (vgl. Abbildung 3.3 A-B).

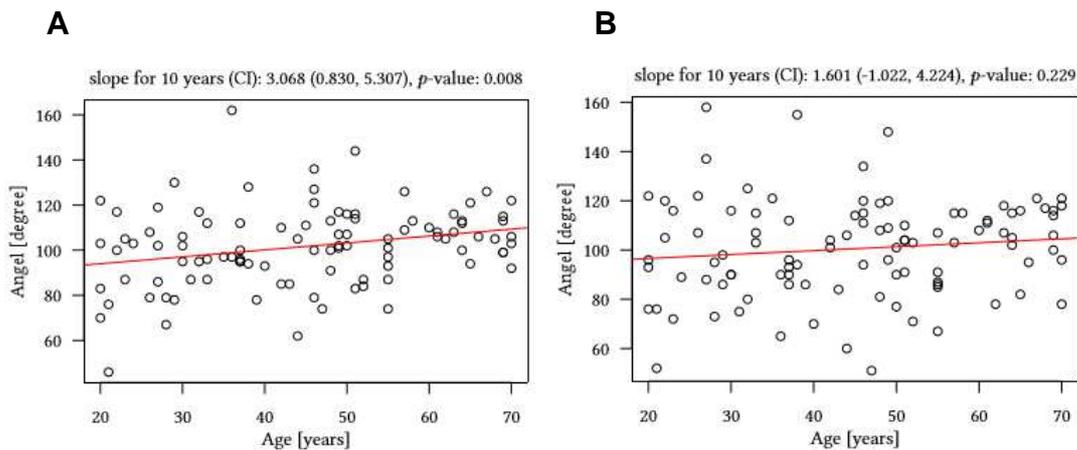


Abbildung 3.3 A-B: Regressionsanalyse (10 Jahre) für den oberen pterygopalatinalen Winkel in Abhängigkeit zum Lebensalter. Die Analyse wurde jeweils für die linke (A) und rechte (B) Fossa pterygopalatina vergleichend zum Alter durchgeführt und zeigt für beide Seiten einen Anstieg des Winkels mit Zunahme des Lebensalters. Die Werte wurden innerhalb und gegen die einzelnen Gruppen auf Signifikanz geprüft. Ein p-Wert (p-value) $<0,05$ wurde als signifikant (*), ein p-Wert $<0,01$ als hoch signifikant (**) bewertet.

3.2.2 Geschlechtsspezifische Analyse des oberen pterygopalatinalen Winkels

Die Mittelwerte der gemessenen oberen Winkel wurden für das gesamte Patientenkollektiv geschlechtsspezifisch für das männliche Geschlecht (engl. male) und das weibliche Geschlecht (engl. female) gegenübergestellt und analysiert. Wie in den Boxplots der Abbildung 3.4 A-B dargestellt liegen die Messwerte des arithmetischen Mittels, der Mediane und der oberen und unteren Quartile bei dem weiblichen Kollektiv bezüglich des oberen pterygopalatinalen Winkels leicht über derer des männlichen Kollektivs (vgl. Abbildung 3.4 A-B). Das Signifikanzniveau ist mit einem p-Wert (p-value) von 0,181 für die linke Seite statistisch nicht signifikant, mit einem p-Wert von 0,021 für die rechte Seite hingegen statistisch signifikant.

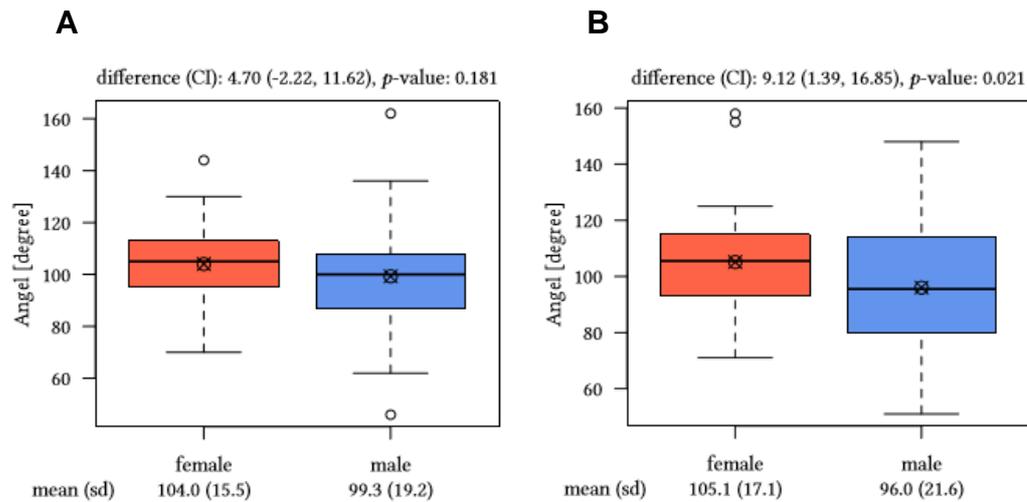


Abbildung 3.4 A-B: Geschlechtsspezifische Analyse des oberen pterygopalatalen Winkels im Patientenkollektiv. Die Analyse wurde jeweils für die Mittelwerte der gemessenen Winkel der linken (A) und rechten (B) Seite vergleichend zum Geschlecht durchgeführt. Alle Messwerte sind als Boxplot angegeben. Die Werte wurden innerhalb und gegen die einzelnen Gruppen auf Signifikanz geprüft. Ein p -Wert (p -value) $<0,05$ wurde als signifikant (*), ein p -Wert $<0,01$ als hoch signifikant (**) bewertet.

3.2.3. Altersspezifische Analyse des unteren pterygopalatalen Winkels

Die Analyse des unteren pterygopalatalen (PPF) Winkels im Gesamtkollektiv ($n=100$) ergab folgende Einzelergebnisse (vgl. Tabelle 3.9). Die linke und rechte Seite wurden jeweils getrennt betrachtet.

Tabelle 3.9: Analyse des unteren pterygopalatalen Winkels der Fossa pterygopalatina (PPF) des gesamten Patientenkollektivs ($n=100$)

	N	Minimum (°)	Maximum (°)	Mittelwert (°)	Standardabweichung (°)
Unterer Winkel PPF links	100	35	138	94,7	21,9
Unterer Winkel PPF rechts	100	52	137	94,7	23,2

Der Mittelwert des gemessenen unteren pterygopalatinalen Winkels beträgt links und rechts $94,7^\circ$ mit einer Standardabweichung von $21,9^\circ$ links und $23,2^\circ$ rechts. Der größte gemessene untere Winkel im Kollektiv beträgt 138° , der geringste 35° . Die Analyse des Gesamtkollektivs zeigt wie auch bei dem oberen Winkel auch bei dem unteren Winkel deutliche Unterschiede in der individuellen Ausprägung bei gleichen Mittelwerten für die linke und rechte Seite. In der Regressionsanalyse wurden auch die Werte der gemessenen unteren Winkel auf eine kontinuierliche Altersskala aufgetragen. Der slope für 10 Jahre liegt für den linken oberen pterygopalatinalen Winkel bei $3,08^\circ$ und für den rechten oberen pterygopalatinalen Winkel bei $1,74^\circ$. Die durchschnittliche Zunahme des oberen pterygopalatinalen Winkels innerhalb von 10 Jahren beträgt bezogen auf die linke Seite $3,08^\circ$ und auf der rechten Seite $1,74^\circ$. Der p-Wert (p-value) beträgt für die linke Seite $<0,001$ und für die rechte Seite $0,002$. In Bezug auf das bestimmte Signifikanzniveau sind die Ergebnisse als hoch signifikant zu bewerten (vgl. Abbildung 3.5 A-B).

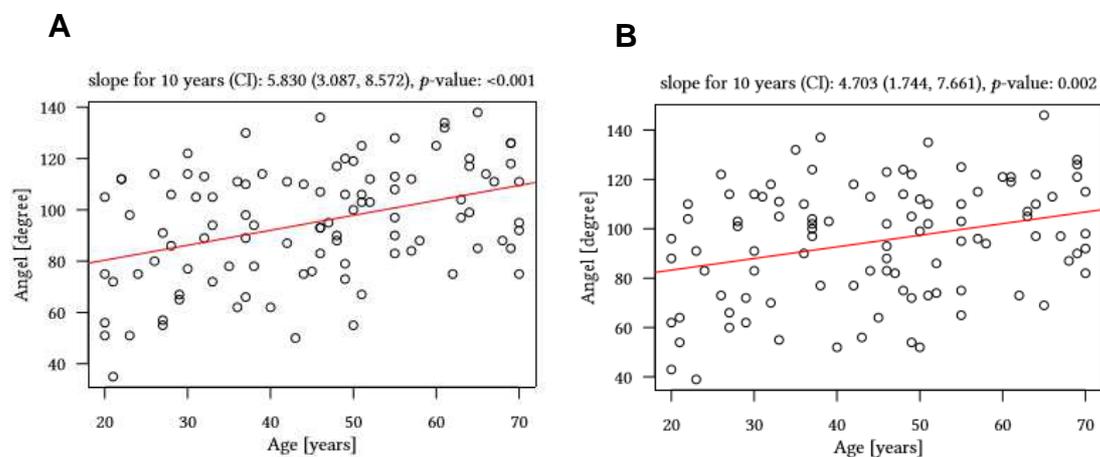


Abbildung 3.5 A-B: Regressionsanalyse (10 Jahre) für den unteren pterygopalatinalen Winkel in Abhängigkeit zum Lebensalter. Die Analyse wurde jeweils die linke (A) und rechte (B) Fossa pterygopalatina vergleichend zum Alter durchgeführt und zeigt für beide Seiten einen Anstieg des Winkels mit Zunahme des Lebensalters. Die Werte wurden innerhalb und gegen die einzelnen Gruppen auf Signifikanz geprüft. Ein p-Wert (p-value) $<0,05$ wurde als signifikant (*), ein p-Wert $<0,01$ als hoch signifikant (**) bewertet.

3.2.4. Geschlechtsspezifische Analyse des unteren pterygopalatinalen Winkels

Die Mittelwerte der gemessenen unteren Winkel wurden ebenfalls für das gesamte Patientenkollektiv geschlechtsspezifisch für das männliche Geschlecht (engl. male) und das weibliche Geschlecht (engl. female) gegenübergestellt und analysiert. Wie in den Boxplots der Abbildung 3.6 A-B dargestellt liegen die Messwerte des arithmetischen Mittels, der Mediane und der oberen und unteren Quartile bei dem weiblichen Kollektiv in Bezug auch auf den unteren pterygopalatinalen Winkel über derer des männlichen Kollektivs (vgl. Abbildung 3.6 A-B). Die Ergebnisse sind linksseitig (p -Wert 0,03) statistisch als signifikant zu bewerten, rechtsseitig wird das Signifikanzniveau nicht erreicht (p -Wert 0,09).

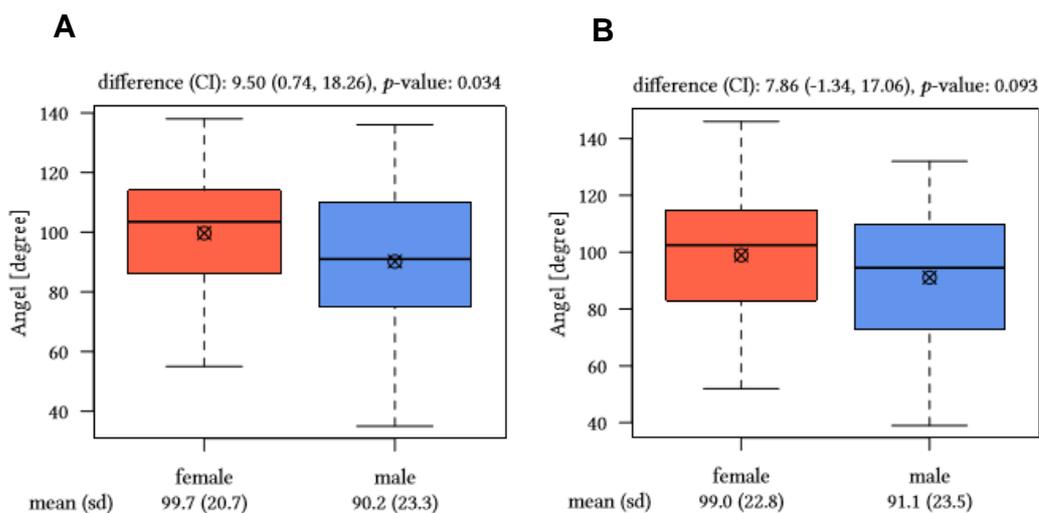


Abbildung 3.6 A-B: Geschlechtsspezifische Analyse des unteren pterygopalatinalen Winkels im Patientenkollektiv. Die Analyse wurde jeweils für die Mittelwerte der gemessenen Winkel der linken (A) und rechten (B) Seite vergleichend zum Geschlecht durchgeführt. Alle Messwerte sind als Boxplot angegeben. Die Werte wurden innerhalb und gegen die einzelnen Gruppen auf Signifikanz geprüft. Ein p -Wert (p -value) $<0,05$ wurde als signifikant (*), ein p -Wert $<0,01$ als hoch signifikant (**) bewertet.

3.3. Messergebnisse Eingangswinkel der Fossa pterygopalatina

Folgend werden die Messergebnisse des sagittalen Eingangswinkels der Fossa pterygopalatina dargestellt. Hierbei werden wie in den vorangegangenen Analysen zuvor zunächst die altersspezifischen, dann die geschlechtsspezifischen Ergebnisse präsentiert. Die Winkel wurden als Teil des Gradmaßes eines Vollwinkels (360 gleich große Anteile) als Grad (°) vermessen und angegeben.

3.3.1 Altersspezifische Analyse des Eingangswinkels

Die Analyse des sagittalen Eingangswinkels der Fossa pterygopalatina (PPF) im Gesamtkollektiv (n=100) ergab folgende Ergebnisse (vgl. Tabelle 3.10). Die linke und rechte Seite wurden jeweils getrennt betrachtet.

Tabelle 3.10: Analyse des sagittalen Eingangswinkels der Fossa pterygopalatina (PPF) des gesamten Patientenkollektivs (n=100)

	N	Minimum (°)	Maximum (°)	Mittelwert (°)	Standardabweichung (°)
Eingangswinkel PPF links	100	11	42	21,9	6,2
Eingangswinkel PPF rechts	100	11	40	21,5	6,8

Der sagittale Eingangswinkel der Fossa pterygopalatina beträgt in dem Gesamtkollektiv durchgeführten Messungen im Mittel 21,9° für die linke und 21,5° für die rechte Fossa pterygopalatina. Die Standardabweichung beträgt links 6,2°, rechts 6,8°. Der größte gemessene sagittale Eingangswinkel im Kollektiv beträgt 42°, der geringste 11°. Die Analyse des Gesamtkollektivs zeigt wie auch bei den zuvor erhobenen Messwerten der übrigen Winkel eine deutliche Varianz in der

individuellen Ausprägung, bei nahezu gleichen Mittelwerten für die linke und rechte Seite. Um einen Zusammenhang zwischen der Veränderung des Eingangswinkels im Alter nachzuweisen erfolgte auch hier eine Regressionsanalyse bei der die Werte der Eingangswinkel auf eine kontinuierliche Altersskala aufgetragen wurden. Der slope für 10 Jahre liegt für den linken oberen pterygopalatinalen Winkel bei $0,31^\circ$ und für den rechten oberen pterygopalatinalen Winkel bei $-1,28^\circ$, d.h. es ist eine durchschnittliche Zunahme des Eingangswinkels um $0,31^\circ$ bei den Messungen der linken Seite im Vergleich zu einer durchschnittlichen Reduktion um $1,28^\circ$ des Eingangswinkels auf der rechten Seite mit steigendem Lebensalter zu beobachten. Der p-Wert (p-value) beträgt für die linke Seite 0,458 und für die rechte Seite 0,416 und zeigten somit keine Signifikanz (vgl. Abbildung 3.7 A-B).

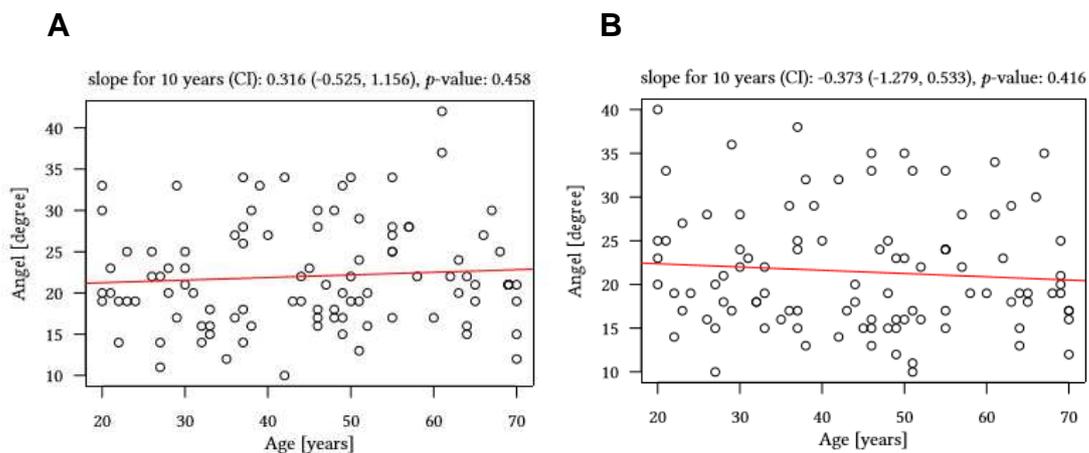


Abbildung 3.7 A-B: Regressionsanalyse (10 Jahre) für den unteren pterygopalatinalen Winkel in Abhängigkeit zum Lebensalter. Die Analyse wurde jeweils für die Eingangswinkel der linken (A) und rechten (B) Fossa pterygopalatina vergleichend zum Alter durchgeführt und zeigt keine signifikanten Veränderungen mit steigendem Lebensalter p-Wert links 0,48, p-Wert rechts 0,41. Die Werte wurden innerhalb und gegen die einzelnen Gruppen auf Signifikanz geprüft. Ein p-Wert (p-value) $<0,05$ wurde als signifikant (*), ein p-Wert $<0,01$ als hoch signifikant (**) bewertet.

3.3.2 Geschlechtsspezifische Analyse des Eingangswinkels

Die Mittelwerte der gemessenen Eingangswinkel wurden ebenfalls für das Gesamtkollektiv geschlechtsspezifisch für das männliche Geschlecht (engl. male) und das weibliche Geschlecht (engl. female) gegenübergestellt und analysiert. Wie in den Boxplots der Abbildung 3.8 A-B dargestellt, liegen die Messwerte des arithmetischen Mittels, der Mediane und der oberen und unteren Quartile bei dem männlichen Kollektiv in Bezug auch auf den sagittalen Eingangswinkel über derer des weiblichen Kollektivs. Die Ergebnisse sind statistisch nicht signifikant. Für die linke Seite ergibt sich ein p-Wert (p-value) von 0,324, für die rechte Seite ein p-Wert von 0,057 (vgl. Abbildung 3.8 A-B).

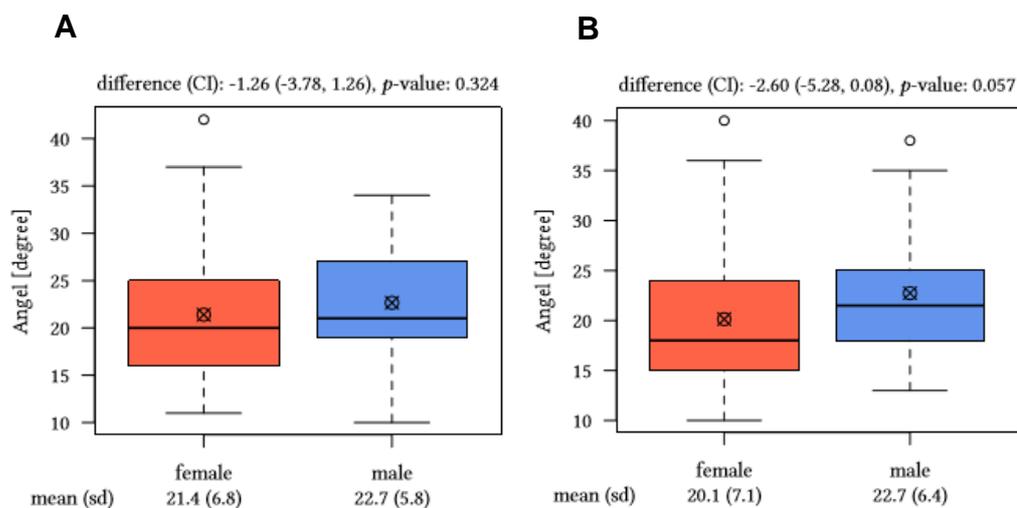


Abbildung 3.8 A-B: Geschlechtsspezifische Analyse des sagittalen Eingangswinkels der Fossa pterygopalatina im Gesamtkollektiv. Die Analyse wurde jeweils für die Mittelwerte der gemessenen Winkel der linken (A) und rechten (B) Seite vergleichend zum Geschlecht durchgeführt. Alle Messwerte sind als Boxplot angegeben. Die Werte wurden innerhalb und gegen die einzelnen Gruppen auf Signifikanz geprüft. Ein p-Wert (p-value) <0,05 wurde als signifikant (*), ein p-Wert <0,01 als hoch signifikant (**) bewertet.

4. Diskussion

Gegenstand dieser retrospektiven Arbeit ist die radiologische Untersuchung mittels Digitaler Volumentomographie der Fossa pterygopalatina sowie deren volumetrische Vermessung und die Beschreibung weiterer, klinisch bedeutsamer Messparameter. Die Fossa pterygopalatina ist mit ihrer komplexen Anatomie und Lagebeziehung ein einzigartiger Bestandteil des menschlichen Mittelgesichts. Durch die zahlreichen Nervenstrukturen, welche sich im Ganglion pterygopalatinum innerhalb der Fossa pterygopalatina verschalten, findet sich hier ein wichtiger Zielort für beispielsweise neuromodulierende oder –stimulierende Therapien des Clusterkopfschmerzes (Tepper 2017). Diese spezielle Region des menschlichen Körpers ist im Hinblick auf ihr Volumen sowie auf die anatomischen Besonderheiten des chirurgischen Zugangs bisher wenig detailliert erforscht. Die hier gewonnenen Daten können bei der präoperativen Planung von chirurgischen Eingriffen sowie der Sicherung des Operationsergebnisses speziell bei der Implantation von Neurostimulatoren helfen (Rusu 2010, Georgescu 2012, Assaf et al. 2015).

4.1. Digitale Volumentomographie

In den vergangenen Jahrzehnten haben sich die Möglichkeiten der radiologischen Bildgebung stark verändert und es wurde eine Vielzahl neuer Aufnahmemodalitäten geschaffen. Nach der Zahnmedizin hat sich die digitale Volumentomographie auch in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie als wichtige, bildgebende Diagnostik etabliert. (Veldhoen et al. 2017). Park et al. konnten zudem zeigen, dass die digitale Volumentomographie bei der volumetrischen Vermessung äußerst genaue Ergebnisse liefert (Park et al. 2017). In der vorliegenden Studie wurde das Volumen der Fossa pterygopalatina anhand von dreidimensionalen DVT-Aufnahmen vermessen. Im Vergleich zur Magnetresonanztomographie (MRT), welche in Ihren Wichtungen eine deutlich

bessere Darstellung von Weichgewebsstrukturen erlaubt, ermöglicht die hohe Ortsauflösung, insbesondere bei Hochkontraststrukturen eine äußerst präzise Darstellung der knöchernen Landmarken für die Untersuchung dieser Region (Angelopoulos 2008). Dies mit einer, im Vergleich zur Computertomographie deutlich geringeren Strahlenbelastung für den Patienten. Zudem ist die MRT aufgrund der Artefaktanfälligkeit besonders bei der Darstellung von zahnrestaurativen Arbeiten, welche bei Aufnahmen des Mittelgesichts häufig mit zur Abbildung kommen, der DVT deutlich unterlegen (Shafiei et al. 2003). In den insgesamt 100 Datensätzen der digitalen volumetomographischen Aufnahmen von Patienten der mund-, kiefer- und gesichtschirurgischen Klinik des Universitätsklinikums Hamburg Eppendorf wurden jeweils 200 Fossae pterygopalatinae manuell vermessen um eventuelle Unterschiede in der Relation des Volumens sowie der übrigen Messparameter der Fossa pterygopalatina im Bezug zum Alter und zum Geschlecht möglichst genau zu erkennen.

Die digitale Volumetomographie stellt auch in dieser Studie eine zuverlässige Möglichkeit für die Beurteilung des knöchernen Mittelgesichts dar. Insbesondere die multimodalen Rekonstruktionen in axialer, koronaler und sagittaler Ebene erlauben eine sichere Möglichkeit der Darstellung komplexer, knöcherner Strukturen.

Die Darbietung der Daten in der dreidimensionalen Ansicht (3D-View) hatte aufgrund der hohen Manipulation des Bildes durch Interpolation und Abstrahierung in der vorliegenden Untersuchung hingegen keinerlei Nutzen und lässt vermuten, dass diese auch im klinischen Alltag keinerlei diagnostischen Vorteil bietet.

4.2. Volumen der Fossa pterygopalatina

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie in Bezug auf das Volumen der Fossa pterygopalatina zeigen große interindividuelle Unterschiede. In der geschlechtsspezifischen Analyse kann in dem weiblichen Kollektiv, im Vergleich zu dem männlichen Kollektiv ein durchschnittlich kleineres Volumen der Fossa pterygopalatina beschrieben werden. Die mögliche Korrelation zwischen dem individuell ermittelten Volumen der Fossa pterygopalatina und der Körpergröße, respektive dem Körpergewicht oder einem daraus resultierenden Body-Mass-Index (BMI) war in Ermangelung dieser hierfür notwendigen Daten in der vorliegenden Untersuchung nicht möglich, sodass offen bleibt, ob dieser durch die durchschnittlich höhere Körpergröße von Männern im Sinne eines Geschlechtsdimorphismus bedingt ist, oder es in Relation keinen geschlechtsspezifischen Unterschied gäbe. Untersuchungen anderer knöcherner Strukturen im Mittelgesicht zeigen ebensolche Phänomene. So zeigt sich bei der Auswertung von DVT Datensätzen zur Bestimmung von Volumina der Orbita, dass diese in männlichen Kollektiven größer sind als die in weiblichen (Bruhn 2014).

Das durchschnittliche Volumen der linksseitigen Fossa pterygopalatina beträgt $0,37\text{cm}^3$, das der rechten Seite $0,33\text{cm}^3$. Wobei auch hier große interindividuelle Unterschiede festgestellt werden konnten. So variiert das Volumen zwischen $0,11\text{cm}^3$ Minimum und $1,70\text{cm}^3$ im Maximum. Morphologische Untersuchungen der Fossa pterygopalatina an humanen Schädelpräparaten von Stojcev zeigen vergleichbare Messwerte für das Volumen der Fossa pterygopalatina. Das mittlere Volumen betrug dort $0,7\text{cm}^3$. Bei einem Minimum von $0,1\text{cm}^3$ und einem Maximum von $1,0\text{cm}^3$ bestätigt sich auch in der Untersuchung von Stojcev die in der vorliegenden Studie nachvollzogene interindividuelle Varianz der Volumina (Stojcev 2010). In anderen Untersuchungen der Fossa pterygopalatina konnten mittlere Volumina von $1,04\text{cm}^3$ ($0,6\text{cm}^3 - 2,02\text{cm}^3$) und $1,2\text{cm}^3$ gemessen werden (Coronado et al. 2008, Hwang et al. 2011). Auch die radiologischen Analysen der Fossa pterygopalatina von Rusu et al. ergeben interindividuelle Unterschiede in

der Morphologie der Fossa pterygopalatina. Die Autoren begründen diese mit der unterschiedlichen Ausprägung der Pneumatisation der Keilbeinhöhle (Sinus sphenoidalis) (Rusu et al. 2013). Ob dies ursächliche Bedeutung auf die Varianz des Volumens haben kann sollte Gegenstand zukünftiger Untersuchungen dieser Region sein.

Der altersspezifische Vergleich der Volumina zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Altersgruppen. Die Entwicklung des Mittelgesichts sowie der Schädelbasis wird maßgeblich durch die spheno-okzipitale Synchronrose bestimmt und ist mit Ende der Adoleszenz (ca. bis zum 18. Lebensjahr) abgeschlossen (Sander et al. 2011). Aufgrund des, in der vorliegenden Studie untersuchten, adulten Patientenkollektivs (20 – 70 Jahre) könnte davon ausgegangen werden, dass nach Abschluss des Körperwachstums keine komplexeren Formveränderungen des Gesichtsschädels und somit auch keine Volumenänderung der Fossa pterygopalatina zu erwarten sind. Coronado et al. stellten in ihren Untersuchungen hingegen einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Volumen der Fossa pterygopalatina und der Gesichts- bzw. Schädelform fest und schlussfolgerten ein vom Hirn- und Gesichtsschädel unabhängige Entwicklung der Fossa pterygopalatina (Coronado 2008). Gegenwärtig finden sich keine Studien, die einen möglichen Einfluss des in der Fossa pterygopalatina befindlichen und diese umgebenden weichgewebigen Strukturen, vor allem der Muskulatur auf die Entwicklung der Fossa pterygopalatina untersuchen. Zur Prüfung multifaktorieller Ursachen sollten weitere Untersuchungen erfolgen. Eine Analyse multimodal fusionierter Bilddatensätze aus DVT oder CT und MRT könnten diesen Zusammenhang durch die differenzierte Darstellung der Gewebe möglicherweise herstellen.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Ergebnisse der Volumetrie, trotz in der Literatur vergleichbarer und äquivalenter Werte, kritisch zu betrachten sind, da eine knöcherne Begrenzung der Fossa pterygopalatina nach lateral zur Fossa infratemporalis, nach kaudal in den Retropharyngealraum sowie nach kranial beim

Übergang in die Fissura orbitalis fehlt und es durch Interpretation des Untersuchers somit immer zu Schwierigkeiten bei der Festlegung einer einheitlichen Begrenzung kommen wird.

4.3. Geometrie der Fossa pterygopalatina

Endoskopische und mikrochirurgische Eingriffe im Bereich des retromaxillären Raums setzen eine genaue Kenntnis der Anatomie dieser Region und insbesondere der Fossa pterygopalatina voraus (Rusu 2010). In der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie ist die Fossa pterygopalatina und das darin befindliche Ganglion pterygopalatinum als Zielstruktur bei der Behandlung des Clusterkopfschmerz mittels SPG-Neurostimulator von hoher klinischer Bedeutung. In der präoperativen Vorbereitung und Planung vor Implantation wird eine dreidimensionale radiologische Diagnostik mittels DVT Untersuchung zur Planung der Lage und Bestimmung der Elektrodenlänge durchgeführt. Nach Implantation erfolgt die intraoperative Bildgebung mittels 3D C-Bogen-Röntgen zur Lagekontrolle (Heiland et al. 2005) oder es erfolgt die postoperative radiologische Lagekontrolle mittels DVT (Assaf et al. 2015).

Um eine differenzierte Vorstellung der Geometrie in axialer und sagittaler Ebene zu erlangen, wurden in dieser Studie der obere sowie untere Winkel in axialer Ebene und der Eingangswinkel in der sagittalen Ebene definiert und vermessen. Für die Messung des Eingangswinkels wurde die V-förmige Konfiguration in der sagittalen Ebene ausgenutzt um hier den Winkel zwischen der Hinterwand der Maxilla und dem Processus pterygoideus ossis sphenoidalis zu ermitteln. Dieser betrug im Mittel $21,5^\circ$.

Die annähernd tetraedrische, umgekehrt tropfenförmige Konfiguration der Fossa pterygopalatina kann auch in den dreidimensionalen Rekonstruktionen sowie nach Bestimmung der Differenz des kranialen (oberen) und kaudalen (unteren) Winkels der Fossa pterygopalatina in dieser Untersuchung nachvollzogen werden. So betrug der obere Fossa pterygopalatina Winkel im Mittel 100° , der untere Fossa

pterygopalatina Winkel im Mittel $94,7^\circ$. Analog zum Volumen werden auch im Hinblick auf die Geometrie große Unterschiede in der individuellen Gestaltung der Fossa pterygopalatina beschrieben (Osborn, 1979). Die altersspezifische Regressionsanalyse zeigte sowohl für den oberen, als auch für den unteren Winkel eine stetige, nicht signifikante Vergrößerung mit steigendem Lebensalter. In der Literatur finden sich bisher keine vergleichbaren Messungen dieser Parameter. Möglicherweise kann die Winkelzunahme auf die knöchernen Remodelingvorgänge und der sich im Alter ändernden Mikroarchitektur des Knochens zurückgeführt werden (Lohse 2008). Diese diffizilen anatomischen Besonderheiten sollten bei der präoperativen Planung sowie Durchführung von chirurgischen Eingriffen in dieser Körperregion berücksichtigt werden. Kohlmeier et al. konnten zeigen, dass die exakte Positionierung der Elektrode möglichst nahe am Zielort für den Therapieerfolg unabdingbar ist. Die intraoperativ navigierte Implantation von Neurostimulatoren konnte die Entfernung der Stimulationselektrode zu der Zielstruktur hier signifikant verbessern (Kohlmeier et al. 2017). Möglicherweise gelingt durch weitere Untersuchungen auch die Entwicklung neuer, nach Alter und Geschlecht präformierter Implantationssonden, mit denen bei der Implantation ähnlich gute Primärergebnisse erlangt werden können. Dies könnte so zu einer Reduktion der Strahlendosis durch den Verzicht auf eine, aktuell noch notwendige, prä-, intra- und/oder postoperative radiologische Bildgebung führen.

4.4. Schlussfolgerung

Die vorliegende Arbeit konnte aufzeigen, dass die Fossa pterygopalatina eine hochkomplexe Struktur im Bereich des humanen Mittelgesichts darstellt, welche in ihrem Volumen sowie in ihrer Geometrie einer großen interindividueller Varianz unterliegt.

Ferner konnten die durchgeführten Analysen der dreidimensionalen DVT-Aufnahmen die hohe Sensitivität und Spezifität der Hochkontrast-Darstellung insbesondere auch filigraner Knochenstrukturen aufzeigen. Dies legt nahe, dass die radiologische Diagnostik mittels Digitaler Volumetomographie hervorragend zur Abbildung und Beurteilung knöcherner Hochkontraststrukturen, nicht ausschließlich im klinischen Alltag, sondern auch bei wissenschaftlichen Analysen geeignet ist.

Allerdings muss, aufgrund der besonderen, anatomischen Konfiguration der Fossa pterygopalatina im Hinblick auf volumetrische Analysen eine, durch den Untersucher individuelle Messdifferenz toleriert werden. Die erhobenen Mittelwerte, insbesondere für das Volumen der Fossa pterygopalatina können als Vergleich bei weiteren Analysen dieser Region dienen.

Die Daten dieser Studie können als Grundlage für weitere Untersuchungen möglicherweise die Entwicklung neuer, individualisierter Messsonden bei der Implantation von Neurostimulatoren in der Behandlung des Clusterkopfschmerz ermöglichen.

5. Zusammenfassung

Die Fossa pterygopalatina ist eine Vertiefung, welche sich als ein trichterförmiger Raum im Bereich des Gesichtsschädels hinter der Maxilla befindet. Sie bildet so einen einzigartigen Bestandteil des Mittelgesichts. Die exponierte Lage, sowie die in ihr befindlichen Strukturen, insbesondere das Ganglion pterygopalatinum nimmt als Zielort für neurostimulierende Therapien des Clusterkopfschmerz eine zentrale Rolle ein. Ziel dieser Arbeit war die volumetrische Vermessung der Fossa pterygopalatina sowie die Bestimmung weiterer anatomischer Gegebenheiten, welche für eine präoperative Planung vor Implantation eines Neurostimulators wichtig sein können. Des Weiteren sollte die Eignung der Digitalen Volumetomographie zur Analyse von Hochkontraststrukturen geklärt werden. In der vorliegenden Studie wurden digitale Volumetomographien von 100 Patienten im Alter von 20 bis 70 Jahren in gleicher Alters- und Geschlechtsverteilung analysiert. Die Röntgenaufnahmen erfolgten studienunabhängig und bei fachärztlich gestellter, rechtfertigender Indikation in der Klinik und Poliklinik der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie der Universitätsklinik Hamburg-Eppendorf (Direktor Prof. Dr. Dr. M. Heiland). Bei allen Patienten erfolgte die vollständige Abbildung des knöchernen Mittelgesichts, der Schädelbasis, der Nasennebenhöhlen sowie der Orbita mit jeweils allen knöchernen Begrenzungen. Nach der Akquise der Röntgenaufnahmen wurden fünf Altersgruppen gebildet sowie eine geeignete und reproduzierbare Methodik zur volumetrischen Vermessung der Fossa pterygopalatina etabliert. Die dreidimensionale, volumetomographische Analyse erfolgte mit der Software OsiriX 3.7.1. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen große interindividuelle Unterschiede in Bezug auf das Volumen der Fossa pterygopalatina. In der geschlechtsspezifischen Analyse kann in dem männlichen Kollektiv ein größeres Volumen nachgewiesen werden als in dem weiblichen. Der Volumenvergleich der rechten mit der linken Körperseite zeigte keine signifikanten Unterschiede. Bezogen auf die Altersgruppen sind die gemessenen Volumina annähernd gleich und es lässt sich anhand der vorliegenden Daten keine Tendenz der Volumenzunahme oder -abnahme im Laufe des Lebensalters beobachten. Die

Ergebnisse der vorliegenden Arbeit weisen darauf hin, dass die Fossa pterygopalatina eine hochkomplexe Struktur im Bereich des humanen Mittelgesichts darstellt, welche in ihrem Volumen sowie in ihrer Geometrie einer großen interindividueller Varianz unterliegt. Allerdings muss hier, aufgrund der besonderen, anatomischen Konfiguration der Fossa pterygopalatina bei volumetrischen Analysen eine, durch den Untersucher individuelle Messdifferenz toleriert werden.

Ziel der Studie war es demnach auch, die Eignung der Digitalen Volumentomographie (DVT) im Hinblick auf volumetrische Analysen festzustellen. Es konnte demonstriert werden, dass sich die Digitale Volumentomographie hervorragend zur Abbildung und Beurteilung knöcherner Hochkontraststrukturen eignet.

Surgical procedures involving the pterygopalatine fossa (PPF) can be needed for treatment of several diseases including tumours, infections, traumatic injuries and neurological disorders. Especially, for chronic cluster headache, a new operative approach has been recently developed which trans-orally implants an on-demand neurostimulator into the pterygopalatine ganglion within the PPF. For these procedures, detailed anatomical knowledge is essential. For example, choice of neuro-stimulators in proper size demands knowledge of the local anatomical structure. Conventional anatomy of the pterygopalatine fossa was based on computed tomography data. However, for the head and neck region, CT is increasingly being replaced by a new imaging tool: cone beam computed tomography (CBCT). CBCT is now the standard imaging tool for preoperative planning, intraoperative monitoring and postoperative controlling. Consequently, structures of regions including the pterygopalatine fossa need to be newly depicted based on CBCT-scans. With a reliable CBCT-based and age- and gender-stratified anatomy, preoperative CBCT may not be always necessary for individual patients.

The aim of this study was the measurement of the volume of the pterygopalatine fossa by means of cone beam computed tomography (CBCT) of human skulls as a prerequisite for estimating alterations of this particular region by this method.

Therefore 50 male and 50 female healthy volunteers, aging from 20 to 70 years were scanned for their maxillofacial area using a 3D cone beam computed tomography (CBCT). Volume of left and right PPF, upper and lower pterygomaxillary angle, PPF entrance angles and distances obtained from reconstructed 3-D structure based on CBCT images using an OsiriX v. 3.7.1 imaging software. Age- and gender-stratification was carried out using t-test and regression analysis.

The results of the present study indicate that the pterygopalatine fossa represents a highly complex structure in the region of the human midface, which is subject to a large interindividual variance in both volume and geometry. Mean volume of the pterygopalatine fossa did not differ significantly with respect to site or age. Mean volume of the pterygopalatine fossa were larger in male than in female.

Furthermore CBCT is suitable for determining the volume and geometry of the pterygopalatine fossa. The provided data can be useful, e.g. to develop preformed surgical instruments. This possibly could reduce radiation exposure because a pre- and postoperative X-ray examination is no longer necessary for individual patients.

6. Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
Abb.	Abbildung
AG	Altersgruppe
CAD/CAM	Computer assisted design/Computer assisted manufacturing
CBCT	Cone Beam Computed Tomography
CCD	Charge Coupled Device
CD	Compact Disc
CH	Cluster Headache
CI	Confidence Interval
CT	Computed Tomography
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
DRR	Digital Reconstructed Radiograph
DVD	Digital Versatile Disc
DVT	Digitale Volumetomographie
FDP	Flat Panel Detector
FOV	Field of View
GB	Gigabyte
GHz	Gigahertz
ICHD	International Center for Human Development
HIS	International Headache Society
kV	Kilovolt
M.	Musculus
mA	Milliampere
mm	Millimeter
µm	Mikrometer
MRT	Magnetresonanztomographie
MSCT	Multi Slice Computed Tomography
n	statistische Fallzahl
N.	Nervus

OPT	Orthopantomographie
pa	posterior-anterior
PPF	Pterygopalatine Fossa
Proc.	Processus
RöV	Röntgenverordnung
seitl.	seitlich
SPG	Sphenopalatine Ganglion
SSCT	Single Slice Computed Tomography
SSD	Solid State Disc
Tab.	Tabelle
TAK	Trigeminoautonome Kopfschmerzen
USB	Universal Serial Bus
V.	Vena

7. Literaturverzeichnis

Alvernia JE, Spomar DG, Olivero WC (2007) A computed tomography scan and anatomical cadaveric study of the pterygopalatine ganglion for use in Gamma Knife treatment of cluster headache. *J Neurosurg.* 107(4): 805-8.

Angelopoulos C, Thomas SL, Hechler S, Parissis N, Hlavacek M (2008) Comparison between digital panoramic radiography and cone-beam computed tomography for the identification of the mandibular canal as part of presurgical dental implant assessment. *J Oral Maxillofac Surg.* 66(10):2130–2135.

Assaf AT, Klatt JC, Blessmann M, Kohlmeier C, Friedrich RE, Pohlenz P, May A, Heiland M, Jürgens TP (2015) Value of intra- and post-operative cone beam computed tomography (CBCT) for positioning control of a sphenopalatine ganglion neurostimulator in patients with chronic cluster headache. *J Craniomaxillofac Surg.* 43(3): 408-13.

Bruhn, M (2014) Dreidimensionale, volumetomographische Analyse der Orbita und des Canalis opticus sowie Vermessung der Fissura orbitalis mit Hilfe der digitalen Volumetomographie. Zahnmed. Dissertation. Universität Hamburg.

Chua NH, Vissers KC, Wilder-Smith OH (2011) Quantitative sensory testing may predict response to sphenopalatine ganglion pulsed radiofrequency treatment in cluster headaches: A case series. *Pain Pract.* 11: 439–445.

Cohen AS, Burns B, Goadsby PJ (2009) High-flow oxygen for treatment of cluster headache: A randomized trial. *JAMA.* 302: 2451-2457.

Coronado GCA, Suazo GIC, Cantin LMG, Zavando MDA (2008) Relationship between pterygopalatine fossa volume and cephalic and upper facial indexes. *International Journal of Morph.* 26: 393-396.

Dreiseidler T, Lingohr T, Mischkowski R et al. (2009) Accuracy of a newly developed integrated system for dental implant planning. *Clin Oral Implants Res.* 1191-1199.

Feldkamp L, Davis L, Kress J (1984) Practical cone-beam-algorithm. *Journal of the Optical Society of America A* Vol. 1. 612–619.

Frahsek G (2013) Vorteile des digitalen Workflows bei implantologischen Behandlungen. *Quintessenz.* 64(8): 949-959.

Ganz SD (2008) Computer-aided Design/Computer-aided Manufacturing Applications Using CT and Cone Beam CT Scanning Technology. *Dental Clinics of North America.* 52: 777–808.

Georgescu CE, Rusu MC, Sandulescu M, Enache AM, Didilescu AC (2012) Quantitative and qualitative bone analysis in the maxillary lateral region. *Surg Radiol Anat.*

Goadsby PJ (1999) Cluster headache: new perspectives. *Cephalalgia.* 19 Suppl 25: 39-41.

Goadsby PJ (2002) Pathophysiology of cluster headache: A trigeminal autonomic cephalgia. *Lancet Neurol.* 1: 251–257.

Goadsby PJ, Lipton RB and Ferrari MD (2002) Migraine - current understanding and treatment. *N Engl J Med.* 346: 257–270.

Headache Classification Subcommittee of the International Headache Society (HIS) (2004) The International Classification of Headache Disorders: 2nd edition. *Cephalalgia.* 24 Suppl 1: 9-160.

Headache Classification Subcommittee of the International Headache Society (IHS) (2013). The International Classification of Headache Disorders: 3rd edition (beta version). *Cephalalgia.* 33(9): 629-808.

Heiland M, Schulze D, Blake F, Schmelzle R (2005) Intraoperative imaging of zygomaticomaxillary complex fractures using a 3D C-arm system. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 34(4): 369-375.

Hofer M (2003) CT-Kursbuch: Ein Arbeitsbuch für den Einstieg in die Computertomographie. Verl. Didamed, Düsseldorf.

Hofmann K (2008) Cone-Beam-Tomografie mit FPD: Funktionsweise und Anwendungen. *Digital Dental News.* 16–24.

Hwang SH, Seo JH, Joo YH, Kim BG, Cho JH, Kang JM (2011) An anatomic study using three-dimensional reconstruction for pterygopalatine fossa infiltration via the greater palatine canal. *Clinical Anat.* 24: 576-581.

Kaepler G (2010) Applications of cone beam computed tomography in dental and oral medicine. *Int J Comput Dent.* 203–219.

Kohlmeier C, Behrens P, Böger A, Ramachandran B, Caparso A, Schulze D, Stude P, Heiland M, Assaf AT (2017) Improved surgical procedure using intraoperative navigation for the implantation of the SPG microstimulator in patients with chronic cluster headache. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 12(12): 2119-2128.

Krmpotic-Nemanic J, Draf W, Helms J (1985) *Chirurgische Anatomie des Kopf-Hals-Bereiches.* Springer, Berlin.

Lohse C (2008) *Altersassoziierte Veränderungen der subdentalen Synchronrose und der Mikroarchitektur des Axis: Eine histomorphometrische Studie.* Med. Dissertation. Universität Hamburg.

Loubele M, Bogaerts R, Van Dijck E (2009) Comparison between effective radiation dose of CBCT and MSCT scanners for dentomaxillofacial applications. *European Journal of Radiology.* 461–468.

Martelletti P, Jensen RH, Antal A, Arcioni R, Brighina F, de Tommaso M, Franzini A, Fontaine D, Heiland M, Jürgens TP, Leone M, Magis D, Paemeleire K, Palmisani S, Paulus W, May A (2013) European Headache Federation. Neuromodulation of chronic headaches: position statement from the European Headache Federation. *J Headache Pain.* 14-86.

May A, Leone M (2003) Update on cluster headache. *Curr Opin Neurol.* 16(3): 333-40.

May A, Goadsby PJ (1999) The trigeminovascular system in humans: pathophysiological implications for primary headache syndromes of the neural influences of the cerebral circulation. *J Cereb Blood Flow Metab.* 115–127.

May A, Evers S, Straube A, Pfaffenrath V, Diener H (2004) Therapie und Prophylaxe von Clusterkopfschmerzen und anderen trigeminoautonomen Kopfschmerzen. Überarbeitete Empfehlungen der Deutschen Migräne- und Kopfschmerzgesellschaft. *Nervenheilkunde.* 23: 478–490.

May A (2005) Therapie und Prophylaxe von Cluster-Kopfschmerzen und anderen trigeminoautonomen Kopfschmerzen. Überarbeitete Empfehlungen der Deutschen Migräne- und Kopfschmerzgesellschaft. In: *Schmerz.* 225–241.

May A, Leone M, Afra J, Linde M, Sandor PS, Evers S, Goadsby PJ (2006) EFNS guidelines on the treatment of cluster headache and other trigeminal-autonomic cephalalgias. *Eur J Neurol.* 13(10): 1066–107.

Narouze S, Kapural L, Casanova J et al. (2009) Sphenopalatine ganglion radiofrequency ablation for the management of chronic cluster headache. *Headache.* 49: 571–577.

Nozaki K, Moskowitz MA, Maynard KI et al. (1993) Possible origins and distribution of immunoreactive nitric oxid synthase-containing nerv fibers in cerebral arteries. *J Cereb Blood Flow Metab.* 13: 70-79.

Park CW, Kim JH, Seo YK, Lee SR, Kang JH, Oh SH, Kim GT, Choi YS, Hwang EH (2017) Volumetric accuracy of cone-beam computed tomography. *Imaging Sci Dent.* 47(3): 165-174.

Ritter L, Neugebauer J, Mischkowski RA (2007) Dreidimensionale Bildgebung in der Zahnmedizin. Zeitschrift für orale Implantologie. 86–95.

Roberti F, Boari N, Mortini P, Caputy AJ (2007) The pterygopalatine fossa: an anatomic report. J Craniofac Surg. 18(3): 586-90.

Rother UJ (2006) Moderne bildgebende Diagnostik in der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde: Grundlagen - Strahlenschutz - Befunde. Elsevier, Urban & Fischer, München.

Ruskell GL (2003) Orbital passage of pterygopalatine ganglion efferents to paranasal sinuses and nasal mucosa in man. Cells Tissues Organs. 175: 223-228.

Rusu MC (2010) Microanatomy of the neural scaffold of the pterygopalatine fossa in humans: trigeminovascular projections and trigeminal-autonomic plexuses. Folia Morphol. 69(2): 84-91.

Rusu MC, Pop F, Curcă GC, Podoleanu L, Voinea LM (2009) The pterygopalatine ganglion in humans: a morphological study. Ann Anat. 191(2): 196-202.

Rusu MC, Pop F (2010) The anatomy of the sympathetic pathway through the pterygopalatine fossa in humans. Ann Anat. 192(1): 17-22.

Sander FG et al. (2011) Einfluss der Schädelbasis auf die Entwicklung des Viszerokraniums. Zahn-Mund-Kiefer-Heilkunde: Kieferorthopädie. Thieme, Stuttgart. 7-8.

Scherer P, Neugebauer J, Ritter L, Mischkowski R, Scheer M, Zöller J (2007) Indikationen für die 3-dimensionale Bildgebung in der Zahnheilkunde. ZWR - Das Deutsches Zahnärzteblatt. 116: 219–230.

Schoenen J, Jensen RH, Lantéri-Minet M, Láinez MJ, Gaul C, Goodman AM, Caparso A, May A (2013) Stimulation of the sphenopalatine ganglion (SPG) for cluster headache treatment. Pathway CH-1: a randomized, sham-controlled study. Cephalalgia. 33(10): 816-30.

Schulze R (2006) Aktueller Stand der digitalen Röntgentechnik. In: Zahnmedizin. 42–48.

Shafiei F, Honda E, Takahashi H, Sasaki T (2003) Artifacts from dental casting alloys in magnetic resonance imaging. J Dent Res. 82: 602–606.

Sjaastad O, Kruszewski P, Fostad K, Elsås T, Qvigstad G (1992) SUNCT syndrome: VII. Ocular and related variables. Headache. 32(10): 489-95.

Sluder G (1908) The role of the sphenopalatine (or Meckle's) ganglion in nasal headaches. New York Med J. 989–990.

Stavropoulos A, Wenzel A (2007) Accuracy of cone beam dental CT, intraoral digital and conventional film radiography for the detection of periapical lesions. An ex vivo study in pig jaws. Clin Oral Investig. 11: 101–106.

Stojcev Stajcic L, Gacic B, Popovic N, Stajcic Z (2010) Anatomical study of the pterygopalatine fossa pertinent to the maxillary nerve block at the foramen rotundum. Int J Oral Maxillofac Surg. 39(5):493–496

Tepper SJ, Caparso A (2017) Sphenopalatine Ganglion (SPG): Stimulation Mechanism, Safety, and Efficacy. *Headache*. 57 Suppl 1:14-28.

Veldhoen S, Schöllchen M, Hanken H, Precht C, Henes FO, Schön G, Nagel HD, Schumacher U, Heiland M, Adam G, Regier M (2017) Performance of cone-beam computed tomography and multidetector computed tomography in diagnostic imaging of the midface: A comparative study on Phantom and cadaver head scans. *Eur Radiol*. 27(2): 790-800.

Van Tiggelen R (2001) Since 1895, orthopaedic surgery needs X-ray imaging: a historical overview from discovery to computed tomography. *JBR-BTR*. 84: 204–213.

Vogl TJ, Balzer B (2002) *Handbuch diagnostische Radiologie*. Springer, Berlin.

Zehm S (1970) *Der retromaxilläre Raum*. Thieme, Stuttgart

8. Danksagung

Mein außerordentlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr. Dr. Marco Blessmann, für die Überlassung dieses überaus wichtigen und interessanten Themas und Herrn Priv. Doz. Dr. Dr. Alexander Gröbe für die großartige Unterstützung und seine Bemühungen um den Fortgang dieser Arbeit.

Den Herren Prof. Dr. Dr. Max Heiland und Priv. Doz. Dr. Dr. Henning Hanken möchte ich für die Möglichkeit danken in der Abteilung für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie des Universitätsklinikums Hamburg Eppendorf zu promovieren und große Teile meiner chirurgischen Ausbildung absolvieren zu können.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Dr. Reinhard E. Friedrich für die zahlreichen Gespräche, die immer konstruktiv zum Schaffensprozess beigetragen haben.

Ich danke Herrn Gerhard Schön, Institut für Medizinische Biometrie und Epidemiologie der Universität Hamburg, für die statistische Beratung.

Herrn Dr. Marc Bruhn danke ich für die enge Zusammenarbeit und seine ständige Hilfsbereitschaft.

Schließlich möchte ich an dieser Stelle meiner Familie danken, insbesondere von ganzem Herzen meiner Frau Franziska für Ihre großartige Unterstützung, Kraft und Liebe ohne diese wäre die vorliegende Arbeit nicht entstanden.

9. Lebenslauf

Persönliche Daten

Dr. med. Christian Lohse

Geboren am 19. März 1979 in Bad Oldesloe

Nationalität: deutsch

Akademische Ausbildung

- | | |
|-----------|---|
| 02/2018 | Anerkennung der Zusatzbezeichnung Notfallmedizin, Ärztekammer Niedersachsen |
| 10/2017 | Anerkennung der Zusatzbezeichnung Plastische und Ästhetische Operationen, Ärztekammer Niedersachsen |
| 06/2015 | Anerkennung zum Facharzt für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, Ärztekammer Hamburg |
| 11/2012 | Zahnärztliche Approbation, Zahnärztekammer Hamburg |
| 2008-2012 | Hochschulstudium der Zahnmedizin, Universität Hamburg
Abschluss: Staatsexamen |
| 12/2008 | Promotion im Fach der Humanmedizin zum Dr. med. (magna cum laude), Prof. Dr. M. Amling |
| 05/2008 | Ärztliche Approbation, Ärztekammer Hamburg |

2002-2008 Hochschulstudium der Humanmedizin, Universität München
und Universität Hamburg
Abschluss: Staastexamen

Klinische Tätigkeit

Seit 2017 Leitender Oberarzt in der Klinik für Mund-, Kiefer- und
Gesichtschirurgie, DIAKOVERE Henriettenstift, Priv. Doz. Dr.
Dr. Gröbe

2015-2017 Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Facharzt in der Klinik und
Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie,
Universitätsklinik Hamburg Eppendorf, Prof. Dr. Dr. Heiland

2010-2015 Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Klinik und Poliklinik für
Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, Universitätsklinik
Hamburg Eppendorf, Prof. Dr. Dr. Heiland

2008-2010 Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Klinik und Poliklinik für
Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie, Universitätsklinik
Hamburg Eppendorf, Prof. Dr. Dr. Schmelzle

Publikationen

Weiser J, Lohse C, Kreutzer K, Hennigsen A, Heiland M, Gröbe A (2017)
Management of Infected Implants in the Craniofacial Region. OP-Journal. Feb.

Birkelbach MA, Lohse C, Hanken H, Heiland M, Gröbe A (2016) CAD/CAM Reconstructions after Ablative Surgery in the Oro-maxillo-facial Region. OP-Journal. Mar.

Ebker T, Lohse C, Hanken H, Heiland M, Gröbe A (2016) Management of Hardware in Craniomaxillofacial Trauma. OP-Journal. Feb.

Friedrich RE, Bruhn M, Lohse C (2016) Cone-beam computed tomography of the orbit and optic canal volumes. J Craniomaxillofac Surg. 44(9):1342-9.

Lohse C, Catala-Lehnen P, Regier M, Heiland M (2015) Superior performance of cone beam tomography in detecting a calcaneus fracture. GMS Interdiscip Plast Reconstr Surg DGPW. 4: Doc09.

Hanken H, Lohse C, Assaf AT, Heiland M (2013) Intraoperative Imaging of the Facial Skeleton. OP-Journal. 29(2): 130-135

Gebauer M, Barvencik F, Lohse C, Beil FT, Pogoda P, Pueschel K, Rueger JM, Amling M (2007) Die Subdentale Synchronrose. Eine computertomographische und histologische Untersuchung zu morphologischen Aspekten der Densbasisfraktur an 36 humanen Axispräparaten. Unfallchir. 110: 97-103

Gebauer M, Lohse C, Barvencik F, Pogoda P, Rueger JM, Pueschel K, Amling M (2006) Subdental synchondrosis and anatomy of the axis in aging: a histomorphometric study on 30 autopsy cases. Eur Spine J.15: 292-298

10. Eidesstattliche Erklärung

Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Ich erkläre mich einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

Unterschrift: