

UNIVERSITÄTSKLINIKUM HAMBURG-EPPENDORF

Kopf- und Neurozentrum

Prof. Dr. med. Markus Hess

Präparation humaner Präparate zur Untersuchung der Variabilität der Innervation der Mm. zygomatici major et minor

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.

vorgelegt von:

Anne-Sophie Cécile Martine Wagner
aus Luxemburg

Hamburg 2020

(wird von der Medizinischen Fakultät ausgefüllt)

**Angenommen von der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg am:**

**Veröffentlicht mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.**

Prüfungsausschuss, der/die Vorsitzende:

Prüfungsausschuss, zweite/r Gutachter/in:

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Nervus facialis	5
1.1.1	Intrakranieller Verlauf.....	5
1.1.2	Extrakranieller Verlauf	6
1.2	Mimische Muskulatur	8
1.2.1	Musculi zygomatici.....	13
1.2.1.1	Verlauf und arterielle Versorgung	13
1.2.1.2	Muskelfasern.....	14
1.2.1.3	R. zygomaticus und R. buccalis des N. facialis in der bisherigen Literatur	15
2	Hypothese und Fragestellung	19
3	Material und Methoden	20
3.1	Präparate	20
3.1.1	Vorversuch	20
3.1.2	Hauptversuch	20
3.2	Präparation	21
3.2.1	Hautschnitt	22
3.2.2	Präparation der Haut und des Fettes	23
3.2.3	Nervenpräparation	23
3.3	Dokumentation	25
3.3.1	Nomenklatur der Nervenäste	26
3.4	Softwares	28
3.4.1	Agisoft	28
3.4.2	CloudCompare	31
4	Ergebnisse	35
4.1	Distanzen zwischen den Referenzpunkten.....	35

4.2	Variabilität	36
4.2.1	Nervenverläufe und Nomenklatur	36
4.2.2	Inserierende Nervenastanzahl	46
4.2.3	Nervenastlängen	46
4.2.4	Tiefenverhältnisse	49
4.2.5	Anastomosen.....	51
5	Diskussion	53
5.1	Diskussion der Methodik	53
5.2	Diskussion der Ergebnisse	54
5.3	Vergleich der Ergebnisse mit bestehender Literatur	56
6	Zusammenfassung	59
6.1	Summary	60
7	Literaturverzeichnis	61
8	Abkürzungsverzeichnis	66
9	Abbildungsverzeichnis	67
10	Tabellenverzeichnis	68
11	Danksagung	69
12	Annahmevermerk	70
13	Eidesstattliche Versicherung	71

1 Einleitung

1.1 Nervus facialis

Der Nervus (N.) facialis ist der siebente Hirnnerv der insgesamt zwölf paarigen Hirnnerven und einer der komplexesten Nerven des menschlichen Körpers (Valls-Sole, 2007). Er ist ein überwiegend motorischer Nerv, der in seinem Intermediusanteil allerdings auch sensible, sensorische und parasymphatische Fasern mitführt. Er geht aus dem zweiten Kiemenbogen hervor und versorgt die mimische Muskulatur (Aumüller et al., 2014; Volk et al., 2012).

1.1.1 Intrakranieller Verlauf

Der intrakranielle Teil des N. facialis entspringt aus drei Kerngebieten. Der speziell viszeromotorische Nucleus (Ncl.) nervi facialis versorgt die mimische Muskulatur, den Musculus (M.) stapedius, den Venter posterior des M. digastricus sowie den M. stylohyoideus. Aus dem allgemein viszeromotorischen Ncl. salvatorius superior stammen parasymphatische Fasern zur Versorgung aller Kopfspeicheldrüsen, außer die der Glandula (Gl.) parotis. Der speziell viszerosensible Ncl. tractus solitarii erhält afferente Fasern aus den vorderen zwei Dritteln der Zunge. Der sensible Anteil versorgt die Haut des Meatus acusticus externus (Aumüller et al., 2014). Der N. facialis beschreibt den mit circa 3 cm längsten interossären und insgesamt kompliziertesten Verlauf aller Hirnnerven (Abb.1) (Mavrikakis, 2008).

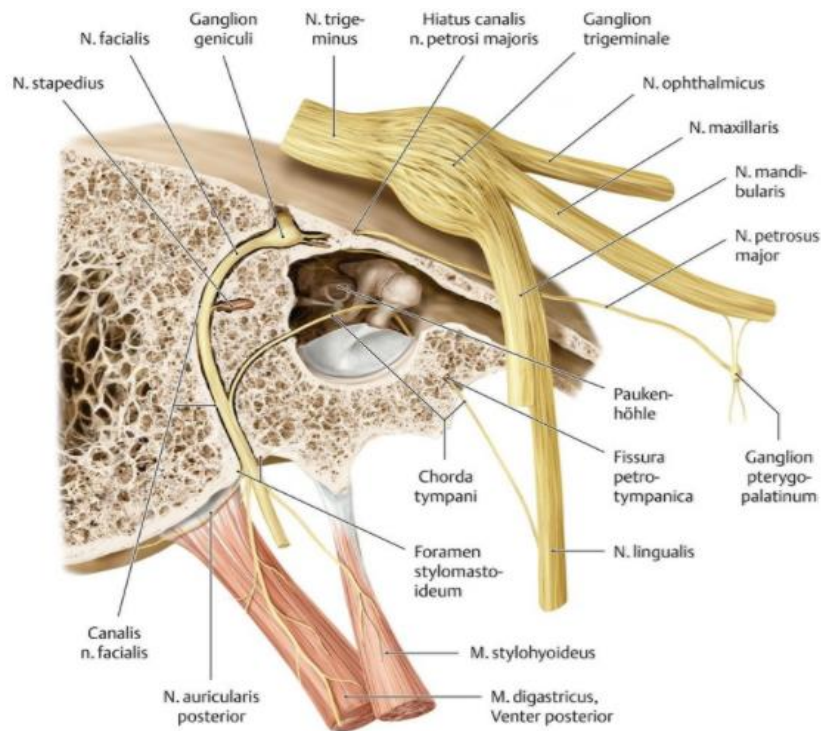


Abbildung 1: Verlauf des N. facialis im Felsenbein (Schünke et al., 2012)

1.1.2 Extrakranieller Verlauf

Nach dem Verlassen der Schädelbasis durch das Foramen stylomastoideum dringt der N. facialis in die Gl. parotis ein. Einige Äste verlassen ihn schon vor dem Eintreten in die Drüse: die Rami (Rr.) stylohyoideus und digastricus, die die gleichnamigen Muskeln innervieren und der N. auricularis posterior, der motorisch die hinteren Ohrmuskeln, die intrinsische Muskulatur der kranialen Oberfläche der Ohrmuschel, den M. occipitalis innerviert und sensibel Teile der Ohrmuschel versorgt. Inkonstante Äste, sind die Ansa nach Haller, die eine Anastomose mit dem N. glossopharyngeus bildet, sowie der R. lingualis, der den M. constrictor superior des Pharynx durchbohrt und dessen feine Filamente in die Nähe der Zungenbasis führen (Proctor & Arbor, 1984). Im Verlauf des Hauptstamms besteht aber insgesamt wenig Variabilität (Furnas, 1965).

Der N. facialis unterteilt sich meist innerhalb der Gl. parotis in den Truncus (Tr.) temporofacialis und den Tr. cervicofacialis, es gibt allerdings Variationen, bei denen er sich sogar in drei Trunci teilt (Baker & Conley, 1979; Kwak et al., 2004). Aus den Haupttrunci entstehen schlussendlich die verschiedenen motorischen Endäste des N. facialis (Abb. 2): der Ramus (R.) frontalis, R. zygomaticus, R. buccalis, R. marginalis mandibulae sowie der R. colli (Proctor & Arbor, 1984).

Die Rr. frontalis, zygomaticus und buccalis entstehen meist aus dem oberen, etwa doppelt so großen und weniger komplex verzweigten Tr. temporofacialis (Captier et al., 2005 ; McCormack et al., 1945).

Der untere Tr. cervicofacialis ist meistens länger, er teilt sich in der Gl. parotis in die Rr. marginalis mandibulae, colli und gelegentlich einen R. buccalis auf (Salinas et al., 2009).

Die genannten motorischen Endäste sind aber nicht immer alle angelegt und ihr Verlauf ist sehr variabel. Sie sind untereinander und mit anderen kranialen Nerven durch zahlreiche Anastomosen verbunden (De Bonnecaze et al., 2018; Diamond et al., 2011; Happak et al., 1997).

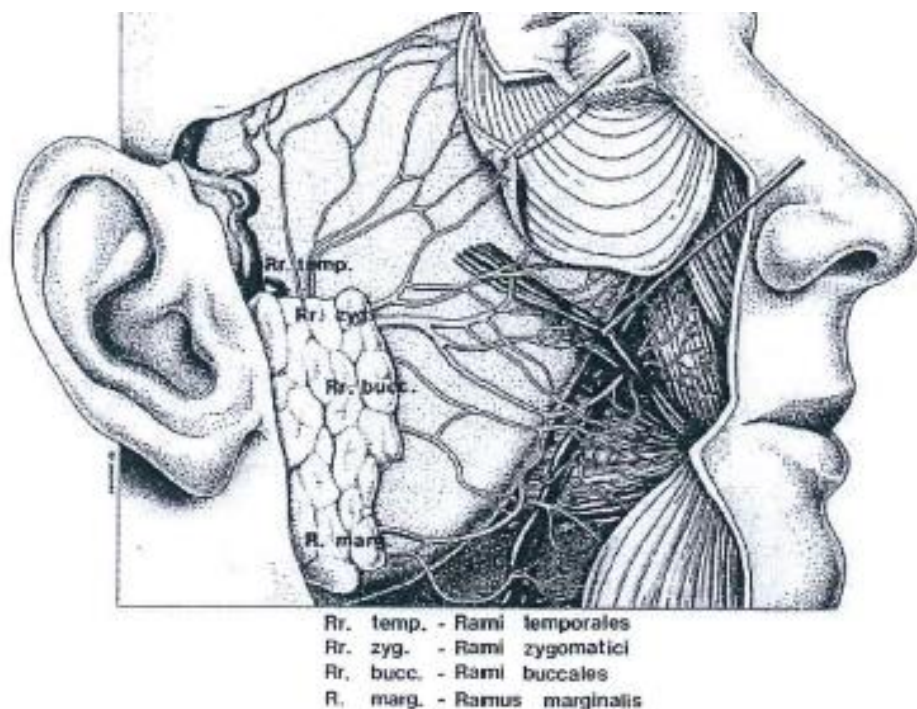


Abbildung 2: extrakranieller Verlauf des N. facialis (Freilinger et al., 1987)

1.2 Mimische Muskulatur

Das System der mimischen Muskeln besteht aus insgesamt 23 Muskeln (International Anatomical Nomenclature Committee und International Congress of Anatomists 1989). Die arterielle Versorgung übernimmt vorwiegend die Arteria (A.) facialis, die aus der A. carotis externa entspringt. Der N. facialis innerviert die Muskeln motorisch.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über den Ursprung, Ansatz sowie Funktionen der verschiedenen Muskeln.

Tabelle 1: Übersicht mimische Muskulatur (Aumüller et al., 2014)

Muskel	Ursprung	Ansatz	Funktion
Muskeln des Schädeldachs (Mm. epicranii)			
M. occipitofrontalis <ul style="list-style-type: none"> • Venter frontalis • Venter occipitalis 	Haut über Margo supraorbitalis	Galea aponeurotica (flächenhafte Sehne, die mit der Kopfhaut zur Kopfschwarte verbunden ist)	Hochziehen der Augenbrauen, Stirnrunzeln
	Linea nuchae suprema des Os occipitalis		Glättung der Stirnfalten
M. temporoparietalis	seitlich, variierend		(keine mimische Funktion)
Muskeln der Lidspalte			
M. corrugator supercilii	Os frontale (oberhalb Radix nasi)	Augenbrauenhaut	Zusammenziehen der Stirnhaut (Bildung senkrechter Falten auf Glabella)
M. orbicularis oculi <ul style="list-style-type: none"> • Pars palpebralis • Pars orbitalis • Pars lacrimalis 	medialer Augenwinkel	Lidhaut umfasst das Auge entlang des Orbitalrandes Lidränder	Lidschlag „Zukneifen“ der Augen Kontakt der Lidränder mit dem Augenapfel

Muskeln der Nase			
M. procerus	Dorsum nasi	Stirnhaut	Bildung von Querfalten an der Radix nasi
M. nasalis			
<ul style="list-style-type: none"> • Pars transversa 	Oberhalb des Eckzahns	Nasentrücken	Herabziehen der Nasenspitze, Verengung des Nasenlochs
<ul style="list-style-type: none"> • Pars alaris 	Oberhalb des seitlichen Schneidezahns	Nasenflügel	Erweiterung des Nasenlochs
M. depressor septi nasi	oberhalb des Processus alveolaris des oberen Schneidezahnes	Nasenseptum	Herabziehen der Nasenspitze
Muskeln des Mundes			
M. orbicularis oris			
<ul style="list-style-type: none"> • Pars marginalis • Pars labialis 	Ringmuskel mit tiefen Anteilen zu Maxilla, Mandibula und Nasenscheidewand	Mundspalte	Mundschluss, die Pars labialis bildet die Lippen
M. levator labii superioris	Geht aus der Muskelmasse des M. orbicularis oculi hervor (Margo infraorbitalis)	Oberlippe	Heben der Oberlippe
M. levator labii superioris alaeque nasi	Geht aus der Muskelmasse des M. orbicularis oculi hervor (Maxilla, Proc. frontalis)	Nasenflügel und Oberlippe	Heben der Oberlippe und Nasenflügel
M. zygomaticus major	Os zygomaticum, Facies lateralis	Mundwinkel	Heraufziehen der Mundwinkel (nach kranial-lateral: „Lachmuskeln“)
M. zygomaticus minor	Geht aus dem M. orbicularis oculi hervor (Os zygomaticum, Facies lateralis)		

M. levator anguli oris	Maxilla, Fossa canina	Muskulatur der Oberlippe und Mundwinkel	Heraufziehen der Mundwinkel (nach kranial-medial)
M. risorius	Mundwinkel	Wangenhaut	Breitziehen des Mundes
M. buccinator	Corpus mandibulae, Maxilla, hinteres Ende des Proc. alveolaris, Fascia buccopharyngea	Mundwinkel, Mundhöhle, Verbindung zum M. orbicularis oris	Antagonist bzw. Agonist des M. orbicularis oris, bildet Grundlage der Wangen, presst Luft aus, wichtig beim Kauen; „Trompeter-Muskel“
M. depressor anguli oris	Basis mandibulae	Mundwinkel und Unterlippe	Herabziehen der Mundwinkel
M. depressor labii inferioris	Basis mandibulae	Unterlippe	Herabziehen der Unterlippe
M. mentalis	Jugum alveolare des unteren lateralen Schneidezahns	Haut des Kinns	Heraufziehen der Kinnhaut
M. transversus mentis	Vorderer und seitlicher Unterkiefer	Mundwinkel	Raffung der Kinnhaut
Muskel des Halses			
Platysma	Basis mandibulae	Haut der oberen Brustregion	Herabziehen der Mundwinkel nach lateral, Spannen der Haut
Muskeln des äußeren Ohres			
M. auricularis anterior	Galea aponeurotica	Ohrmuschel (vorne)	Nur schwach ausgeprägte Stellmuskeln, Beweglichkeit des menschlichen Ohres ist gering
M. auricularis superior		Ohrknorpel	
M. auricularis posterior		Hinterwand der Ohrmuschel	

Embryologisch entwickelt sich die mimische Muskulatur aus den Myoblasten des zweiten Schlundbogens und wandert vom Hals in die Gesichtsregion, um dort die mimische Muskulatur zu bilden (Abb. 3) Die paarige Anlage der Schlundbögen könnte eine Erklärung für die Variabilität im Seitenvergleich von Gesichtern liefern (Moore et al., 2013).

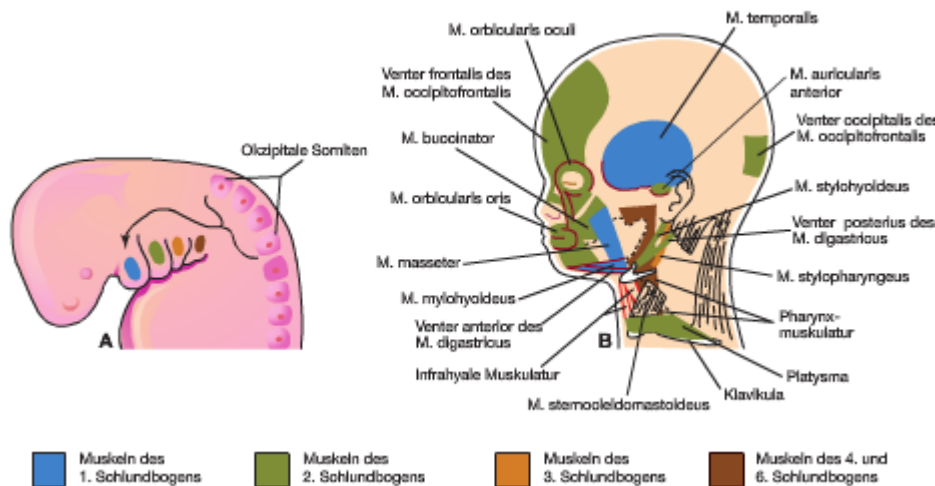


Abbildung 3: A) Muskelanlagen in den Schlundbögen. B) Darstellung der von den Schlundbögen abstammenden Muskeln (Moore et al., 2013)

Die mimische Muskulatur ist unter anderem für den individuellen Gesichtsausdruck, für die nonverbale Kommunikation, die soziale Interaktion und den emotionalen Ausdruck verantwortlich. Obwohl das Spektrum der Gesichtsbewegungen bei den Individuen nicht stark differiert, ist die Ausstattung an mimischer Muskulatur nicht identisch: nicht jeder Mensch weist alle 23 mimischen Muskel auf. Nur bei den für den Ausdruck der sechs Basisemotionen (Freude, Trauer, Wut, Angst, Überraschung und Ekel) und verschiedenen Schutzmechanismen notwendigen Muskeln bestehen weitestgehende Ähnlichkeiten. Immer vorzufinden sind der M. frontalis, M. orbicularis oculi (MOO), M. zygomaticus major (M.zyg.maj.), M. depressor anguli oris sowie der M. orbicularis oris. Die übrigen Muskeln können je nach Individuum in ihrer Ausprägung differieren, es ist sogar eine Seitendifferenz möglich (Waller et al., 2008). Einen signifikanten Unterschied in der Größe und Anordnung der Gesichtsmuskeln bei den beiden Geschlechtern gibt es nicht (Freilinger et al., 1987).

Die mimischen Muskeln sind in vier Schichten angeordnet und überlagern sich gegenseitig. Nur der M. buccinator besitzt eine Faszie, alle anderen setzen direkt an der Haut oder anderen Weichteilen des Gesichts an (Freilinger et al., 1987).

Histochemisch ergibt sich, dass das mimische Muskelsystem ebenfalls in Bezug auf Faserdurchmesser und Fasertypzusammensetzung nicht einheitlich ist. Der Durchmesser der Muskelfasern variiert zwischen 20,24 und 41,45 μm . Die verschiedenen Muskeln können je nach Anteil an Typ I (langsam zuckende) und Typ II Fasern (schnell zuckende) in phasische (14 bis 15% Typ I Fasern: M. nasalis, M. orbicularis oculi, M. procerus), intermediäre (28 bis 37% Typ I Fasern: M. depressor anguli oris, M. levator labii superioris, M. mentalis, M. orbicularis oris, Platysma, M. zygomaticus major) oder tonische Muskeln (41 bis 67% Typ I Fasern: M. buccinator, M. corrugator supercilii, M. depressor labii inferioris, M. occipitofrontalis) eingeteilt werden (Freilinger et al., 1990).

In der Hämatoxylin-Eosin-Färbung (H.E.-Färbung) findet man multinukleäre Muskelfasern mit peripher lokalisierten Kernen. Im Unterschied zur Skelettmuskulatur sind die Muskelfasern relativ klein (Goodmurphy & Ovalle, 1999). Außerdem werden bei der mimischen Muskulatur pro Muskelfaser bis zu fünf motorische Endplatten (MEPs) beobachtet, die vom N. facialis innerviert werden. Die motorische Endplatte liegt auch nicht wie bei der skelettalen Muskulatur zentral, sondern es gibt über die gesamte Muskelfaser hinweg verteilte multiple, exzentrische Efferenzen (Abb. 4) (Happak et al., 1997).

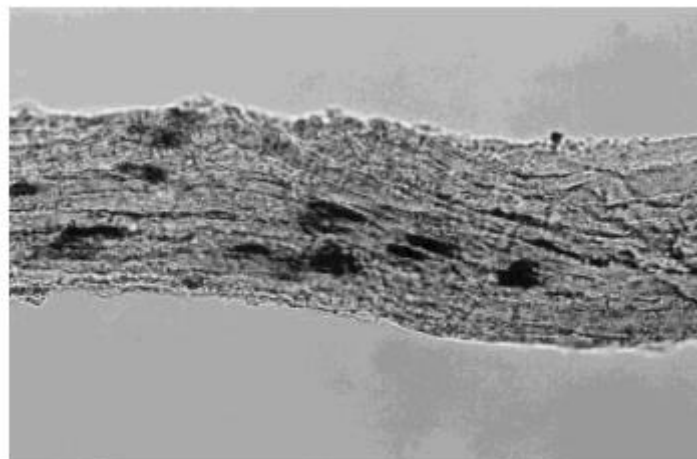


Abbildung 4: Acetylcholinesterase markierte MEPs im M.zyg.maj. (Happak et al., 1997)

1.2.1 Musculi zygomatici

Die Musculi (Mm.) zygomatici, die sich aus dem M. zygomaticus major und minor (M.zyg.min) zusammensetzen, gehören zu den mimischen Muskeln. Die beiden in dieser Arbeit untersuchten Muskeln sind unabdingbar für Lachen und Lächeln, welche eine entscheidende Rolle in der sozialen Interaktion sowie der Ästhetik spielen, indem sie, mithilfe des M. risorius, die Mundwinkel nach außen oben heben. Bei fast allen Variationen des Lachens kontrahiert der M. zygomaticus major (Lin et al., 2013).

1.2.1.1 Verlauf und arterielle Versorgung

Der M. zygomaticus major entspringt von der Sutura zygomaticotemporalis und setzt am Mundwinkel, am sogenannten Modiolus an, zusammen mit den Mm. depressor anguli oris, M. risorius, M. orbicularis oris, M. buccinator und M. levator anguli oris. Der M. zygomaticus minor entspringt medial des M. zygomaticus major und setzt am Sulcus nasolabialis an (Abb. 5).

Wie unter Punkt 1.2 bereits erwähnt, liegen die mimischen Muskeln in vier verschiedenen topographischen Schichten: der M. zygomaticus minor wird zu der oberflächlichen, der M. zygomaticus major zu der tiefer liegenden zweiten Schicht gezählt (Freilinger et al., 1987). Letzterer liegt bei Frauen durchschnittlich 6 mm, bei Männern hingegen nur 4,1 mm tief, was wahrscheinlich am vermehrten subkutanen Fettgewebe von Frauen liegt (Spiegel & De Rosa, 2004).

Die beiden Muskeln werden von Ästen der A. temporalis superficialis (Endast der A. carotis externa), wie der A. transversa faciei und der A. zygomaticoorbitalis sowie von Ästen der A. facialis, aus der A. carotis externa entspringend, versorgt (Aumüller et al., 2014).

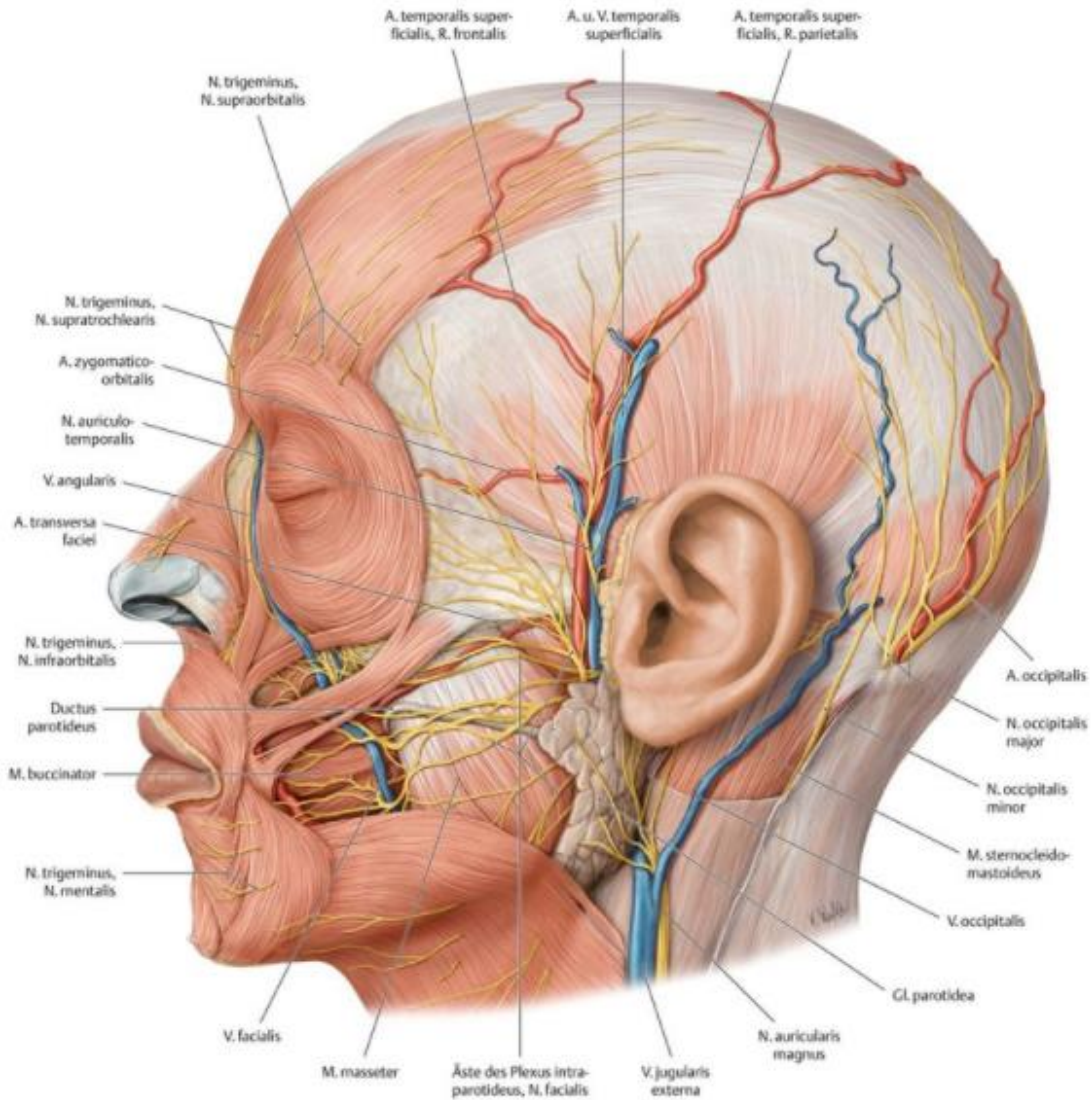


Abbildung 5: Oberflächliche Schicht des seitlichen Kopfes (Schünke et al., 2012)

1.2.1.2 Muskelfasern

Die histologische Untersuchung der Muskelfasern ergibt, dass der M. zygomaticus major zu der Gruppe der intermediär zuckenden Muskeln, mit 28 bis 37 Prozent Typ I Fasern (langsam zuckende Fasern) und 63 bis 72 Prozent schnell zuckenden Typ II Fasern mit einem Faserdurchmesser von 38,5 µm gehört (Freilinger et al., 1990).

Die Mm. zygomatici weisen eine prädominierende motorische Endplatte am Ursprung auf. Im proximalen und distalen Drittel der Muskeln befinden sich zwei bis drei weitere kleinere Endplatten (Happak et al., 1997).

1.2.1.3 R. zygomaticus und R. buccalis des N. facialis in der bisherigen Literatur

Die Mm. zygomatici werden motorisch vom R. zygomaticus und R. buccalis des N. facialis innerviert (Monkhouse, 1990). Beide Muskeln erhalten hierbei, wie fast alle mimischen Muskeln, ihre Innervation aus der Tiefe (Happak et al., 1994). Der Verlauf beider Nervenäste ist sehr variabel, sogar im Seitenvergleich (Proctor & Arbor, 1984; Rudolph 1990, Tzafetta & Terzis, 2010).

Der R. zygomaticus stammt meistens vom Tr. temporofacialis ab und befindet sich im oberen Bereich der Gl. parotidea. Hier unterteilt er sich in mehrere Äste und innerviert das untere Drittel des M. orbicularis oculi und den oberen Teil des M. zygomaticus major (Mitsukawa et al., 2012; Choi et al., 2017). Oft gibt es zwei Rr. zygomatici, wobei der kraniale meist dünner als der kaudale ist. Der kraniale Ast verläuft relativ oberflächlich zum oberen Drittel des M. zygomaticus major, während der kaudale oberflächlich zum unteren Drittel des Muskels verläuft (Freilinger et al., 1987).

Der R. buccalis entsteht aus den Trunci temporofacialis und cervicofacialis und hat einen etwas größeren Durchmesser. Im kaudalen Teil der Gl. parotidea unterteilt sich der R. buccalis in verschiedene Äste. Sie verlaufen horizontal und verteilen sich unterhalb der Orbita und vor allem circolär um den Mund, um schließlich den M. zygomaticus major aus der Tiefe zu innervieren (Proctor & Arbor, 1984; Tzafetta & Terzis, 2010).

Bevor die Nervenäste den jeweiligen Muskel erreichen, anastomosieren sie jedoch mindestens viermal untereinander und zusätzlich auch mit anderen kranialen Nerven, v.a. dem N. trigeminus (Freilinger et al., 1987; Diamond et al., 2011). Tzafetta und Terzis fanden bei allen fünf untersuchten Köpfen Anastomosen zwischen den Rr. buccales und zygomatici, bei de Bonnacaze et al. gab es diese bei 66,7% der 15 Präparate (De Bonnacaze et al., 2018; Tzafetta & Terzis, 2010).

Davis et al. unterscheiden sechs verschiedene Verzweigungsmuster der terminalen Äste. Diese Klassifikation wurde später von Katz und Catalano in fünf Hauptverlaufsformen umgeschrieben. Bei Letzteren ist Typ III der häufigste (44%) mit Anastomosen zwischen den Rr. buccales und zu den Rr. zygomatici, er wird noch unterteilt in IIIA, bei dem der R. zygomaticus zusätzlich Äste zum R. buccalis sendet. In Typ IIIB entspringt der R. buccalis allerdings dem R. marginalis mandibulae. Bei Typ IIIC gibt es v.a. Anastomosen zwischen den Rr. buccalis und mandibularis. Er entspricht Typ III bei Davis et al. und ist auch hier mit 28% der häufigste Typ. Bei Typ I, in 24% der Fälle, verlief der N. facialis unverzweigt. Typ II bei Katz und Catalano betraf 14% der Köpfe. Hier gibt der R. buccalis Äste zum R. zygomaticus ab. Bei Davis et al. ist Typ II eine Mischung aus Katz und Catalanos Typ I und IIa und tritt in 20% auf. Typ IV (14%) hat ein kompliziertes Verlaufsmuster, sodass er noch in zwei weitere Gruppen je nach Ursprung des R. buccalis aufgeteilt wird (Abb. 6). Bei Typ IVA stammt der R. buccalis aus der cervicofacialen Region. Hier gibt es Verbindungen zwischen Rr. zygomatici, buccales und mandibulares. Bei IVB, gibt es auch diese Verbindungen. Der R. buccalis hingegen entsteht aus beiden Trunci. Typ IV bei Katz und Catalano entspricht bei Davis et al. Typ IV, V und VI und damit 24%. Bei Typ V (3%), dem Typ I bei Davis et al. (13%), gibt es zwei Trunci: majores und minores, wobei der letztere in den zygomaticotemporalen aufgenommen wird und der R. buccalis hieraus entsteht. Im Weiteren verlaufen die Äste unverzweigt (Abb. 7) (Katz & Catalano, 1987; Davis et al., 1956)

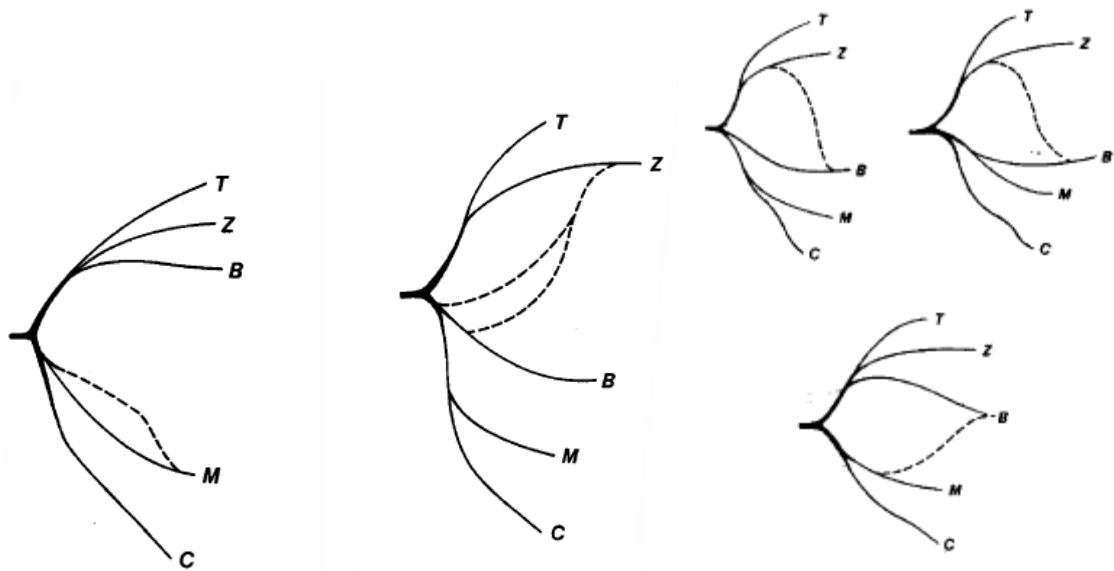


Abbildung 6: Nervenverläufe in Typ I (links), II (Mitte) und Typ IIIA (rechts oben), IIIB (links oben), IIIC (unten). T steht für R. temporalis, Z für R. zygomaticus, B für R. buccalis, M für R. mandibularis, C für R. cervicalis (Katz & Catalano, 1987)

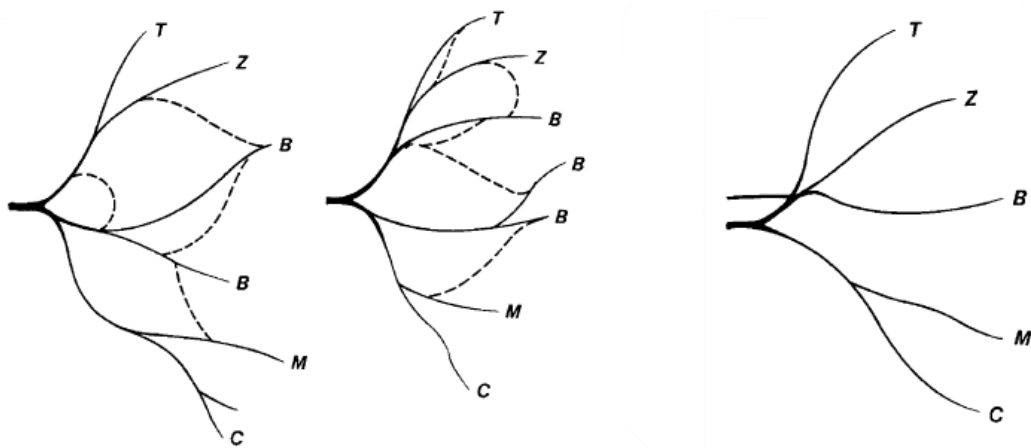


Abbildung 7: Nervenverläufe in Typ VIA (links), VIB (Mitte) und V (rechts). T steht für R. temporalis, Z für R. zygomaticus, B für R. buccalis, M für R. mandibularis, C für R. cervicalis (Katz & Catalano, 1987)

Kwak et. al. hingegen unterscheiden nur vier verschiedene Möglichkeiten des Verlaufs, je nach Ursprung der Rr. buccales. Bei Typ I, 13,8% der Fälle, entstehen die Rr. buccales ausschließlich aus den zwei Trunci temporofacialis und cervicofacialis. Bei Typ II (44.8%) gibt es außerdem Verbindungen zwischen den Rr. buccales und den Rr. zygomatici. Bei Typ III (17.3%) gibt es Anastomosen zwischen den Rr. buccales und dem Rr. marginalis mandibulae. Bei Typ IV (17.3%) schließlich, gibt es Verbindungen zwischen allen Rami. Bei allen Typen entstehen die Rr. buccales aus beiden Haupttrunci (Abb. 8) (Kwak et al., 2004).

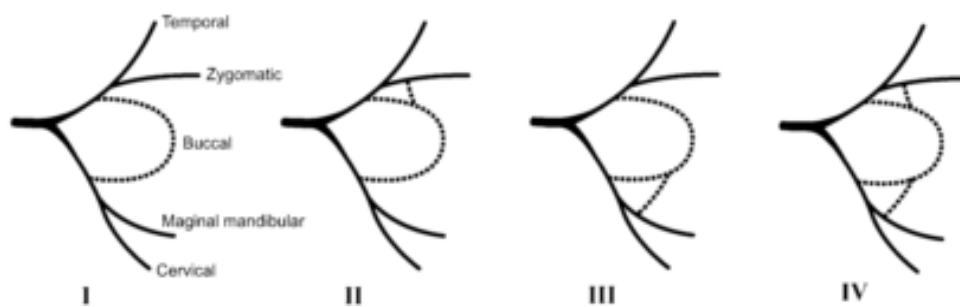


Abbildung 8: Nervenverläufe Typ I, II, III, IV (Kwak et al., 2004)

Hembd et al. stellten fest, dass durchschnittlich 2,5 Nervenäste in den M. zygomaticus major inserieren, dabei wurde bei 60% der untersuchten Präparate der Muskel von zwei, bei 36% von drei Nervenästen und bei 4% nur von einem Nervenast versorgt (Hembd et al., 2017).

2 Hypothese und Fragestellung

Die Kenntnis des Verlaufs und der Variabilität des extrakraniellen N. facialis ist nicht nur aus anatomischer Sicht interessant, sondern auch für die Vermeidung iatrogenen Nervenschädigungen, für die Injektion von Medikamenten, wie z.B. Lokalanästhetika und für die Nervenrekonstruktion von großer Bedeutung. Da durch die Kontraktion der Mm. zygomatici majores und minores das Lachen und Lächeln entsteht, wäre hier der zukünftige Einsatz „mimischer Schrittmacher“ denkbar (Frigerio et al., 2015).

In der bisherigen Literatur gibt es diverse Untersuchungen zum Verlauf des N. facialis, die zum Teil jedoch stark variieren und keinen Schwerpunkt auf die motorische Innervation der Mm. zygomatici gelegt haben. Die Qualität der Ergebnisse ist außerdem häufig aufgrund geringer Fallzahlen oder ungenauer Darstellungen nur wenig zufriedenstellend.

Aus diesem Grund sollen durch sorgfältige Präparation der Mm. zygomatici major, minor und des Nervus facialis die genaue nervale Endversorgung der Muskeln, der Verlauf und die Anastomosen der Nervenäste deutlich gemacht und beschrieben werden.

Die Ergebnisse der Präparation werden durch zahlreiche Fotos dokumentiert und anschließend im Hinblick auf Länge und Tiefe der versorgenden Nerven mithilfe von zwei verschiedenen Softwares, Agisoft und CloudCompare, bearbeitet.

Zur Klärung der Fragestellung wurden die Untersuchungen an humanen Köpfen durchgeführt, die für Forschungszwecke zur Verfügung gestellt wurden.

3 Material und Methoden

3.1 Präparate

Für diese Doktorarbeit wurden acht dekapitierte Köpfe präpariert. Diese stammten von Körperspendern aus dem Institut für Rechtsmedizin des Universitätsklinikum Eppendorf, die eingewilligt hatten, ihren Körper der Wissenschaft zur Verfügung zu stellen. Da die Spender alle anonym waren, gab es weder Informationen zum Alter, dem Geschlecht noch zur Todesursache. Es wurden lediglich zwei Hemifaces ausgeschlossen die makroskopisch sichtbare Verletzungen, wie z.B. Operationsnarben im zu präparierenden Gebiet, aufwiesen.

Nach Ende der Präparation wurden die Köpfe mitsamt dem gesamten präparierten Gewebe ordnungsgemäß an das jeweilige Institut zurückgegeben.

3.1.1 Vorversuch

Im Vorversuch wurden vom Institut für Anatomie der Universität Innsbruck zwei dekapitierte Köpfe zur Verfügung gestellt. Diese waren mit einer speziellen Alkohol-Glycerin-Mischung einbalsamiert. Als Fixiermittel für 10 l wurden 0,3 l Glycerin 85%, 0,0625 l Phenol 90% und 9,6375 l Ethanol 96% (D2 denaturiert) verwendet. Bei diesem Verfahren werden die Eiweiße nicht so stark denaturiert wie bei Fixierungen mit Formaldehyd und erhält damit eine Gewebeskonsistenz und Gewebefarbe wie sie eher dem nativen Zustand entsprechen (Kessler et al., 2014).

3.1.2 Hauptversuch

Für den Hauptversuch wurden sechs Köpfe vom Institut für Rechtsmedizin des Universitätsklinikum Eppendorf Hamburg zur Verfügung gestellt. Diese waren nach einer speziellen Methode von Herrn Lindenau fixiert (Mitarbeiterpatentnummer 10177). Bei Letzterer liegt der Fokus darauf, eine möglichst dem lebenden Menschen entsprechende Gewebekonsistenz, Gewebevolumen, sowie Farbe zu erhalten.

Zwei Kopfhälften der zur Verfügung gestellten Präparate (Präparat 1 links und Präparat 2 links) konnten nicht verwendet werden, da sie makroskopisch sichtbare Defekte in Form von Narben aufwiesen. Nach Ausschluss der ungeeigneten Halbköpfe wurden insgesamt zehn Hemifaces präpariert, dokumentiert und ausgewertet.

3.2 Präparation

In dem Vorversuch in Innsbruck wurden zwei verschiedene Präparationsrichtungen auf Praktikabilität und Qualität der Ergebnisse hin überprüft: Einmal wurde der Nervus facialis von der Gl. parotis aus aufgesucht und bis zu den Mm. zygomatici verfolgt. Bei der anderen Technik wurden die Facialisäste retrograd von ihrer Zielmuskulatur aus zur Gl. parotis hin freigelegt. Hierbei wurde die letztere Methode zum weiteren Vorgehen ausgewählt, da weniger Gewebe zerstört wird und die Nervenverfolgung bzw. -freilegung einfacher durchzuführen waren (Abb. 9).

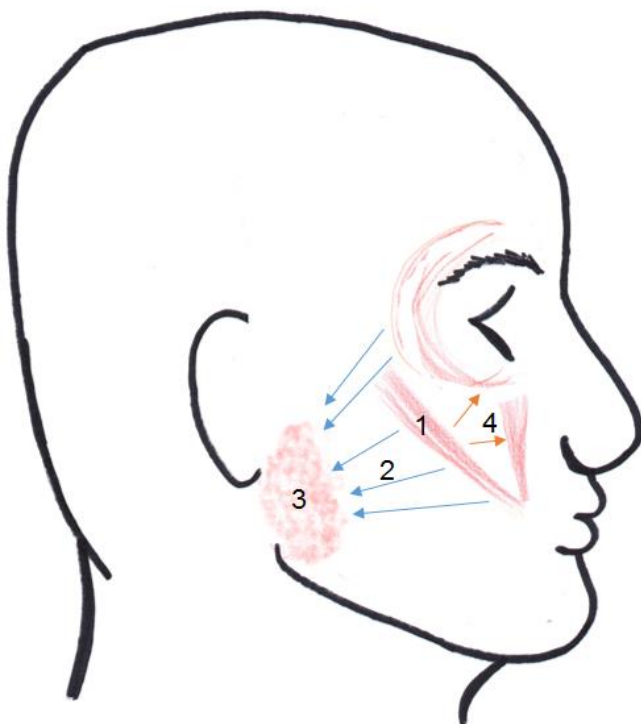


Abbildung 9: gewählte Präparation: vom M. zygomaticus major (1) aus zur Gl. parotidea (3) hin (2) und zum M. zygomaticus minor (4)

3.2.1 Hautschnitt

Der Hautschnitt wurde in der Epidermis gemacht, um das darunterliegende subkutane Fett und die in ihm verlaufenden Strukturen zu schonen. Alle Schnitte wurden unter ständigem Zug der Haut orthogonal zur Schnittrichtung getätigt.

Mit einem Skalpell aus Karbonstahl mit Nr.10 Klinge wurde ein Einschnitt knapp über dem medianen Teil der Augenbraue gemacht. Dann wurde ein Hautschnitt entlang des Margo supraorbitalis gemacht. Der Schnitt wurde auf dem knöchernen Rand der Orbita bis zum Processus frontalis fortgesetzt, dann am Nasenrand und der Nasolabialfalte entlang bis zum lateralen Mundwinkel weitergeführt. Von hier aus wurde bis zum Kinn inzidiert und der Schnitt am Ramus mandibularis bis zum Angulus mandibulae fortgesetzt.

Anschließend wurde der Schnitt an dem medialen Teil der Augenbraue vertikal bis zum Haaransatz, dann diesem im Bogen folgend nach supraaurikulär fortgesetzt. Schlussendlich wurde der supraaurikuläre Punkt vertikal mit dem Schnitt am Angulus mandibulae verbunden (Abb.10).

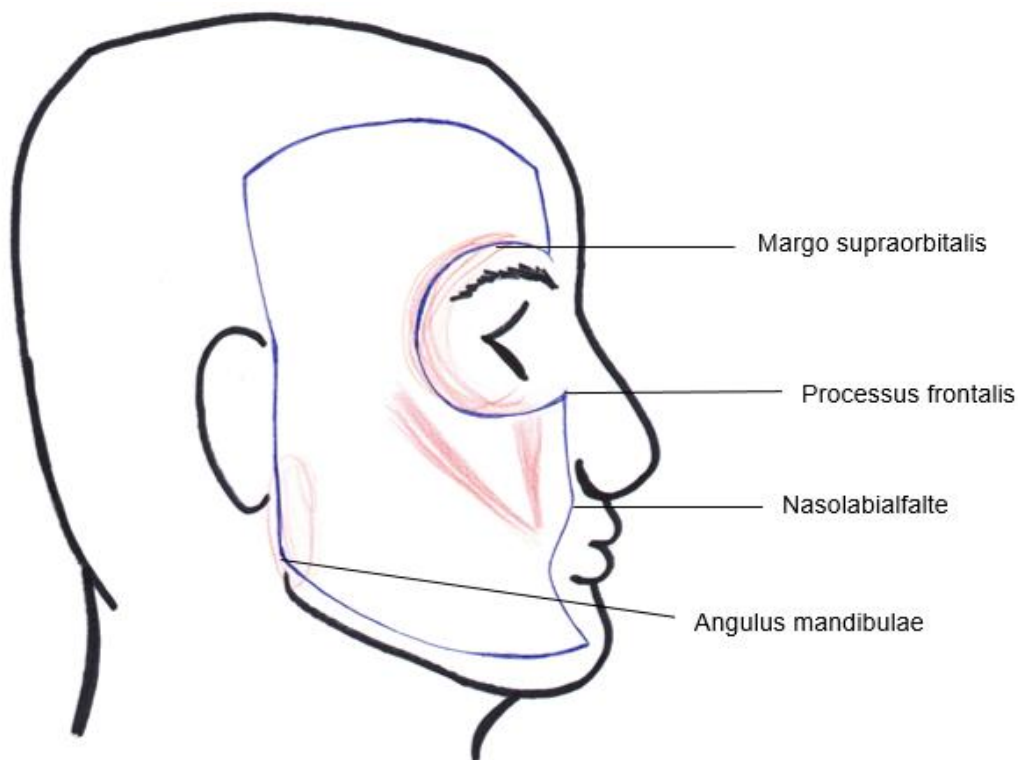


Abbildung 10: schematische Darstellung des Hautschnitts

3.2.2 Präparation der Haut und des Fettes

Die Haut wurde oberflächlich präpariert, um darunterliegende Strukturen zu schonen. Die Haut wurde von medial nach lateral abgetragen, indem sie mit einer anatomischen Pinzette angehoben und dann mit der scharfen Seite des Skalpells zum hochgezogenen Hautlappen unter Spannung präpariert wurde. Hierbei konnte ein Entlastungsschnitt unterhalb des Arcus zygomaticus bis zum Tragus gesetzt werden. Der Hautlappen wurde komplett entfernt. Die Skalpellklinge wurde regelmäßig gewechselt, damit nie mit einer stumpfen Klinge gearbeitet wurde.

Der M. zygomaticus major wurde aufgesucht und vorsichtig von dem darüberliegenden Fett getrennt. Dieses wurde mit einer anatomischen Pinzette leicht angehoben und mithilfe des Skalpells, auch hier wieder mit der scharfen Klingenseite zur Zugrichtung hin, abgetragen.

3.2.3 Nervenpräparation

Vom lateralen Rand des M. zygomaticus major aus wurden eintretende Nervenäste gesucht indem mit einer geschlossenen feinen Schere, parallel zum vermuteten Nervenfaserverlauf ins Fettgewebe eingestochen wurde und dann geöffnet wurde. Bei dieser Methode wird das Fettgewebe verdrängt und durch das zum Nervenverlauf parallele Öffnen der Schere, der Nerv geschont und nicht zerrissen oder gar durchschnitten. So wurde der ganze Rand des Muskels bearbeitet, bis sich feine Nervenäste erkennen ließen. Diese wurden dann in Richtung der Parotis verfolgt. Mit einer chirurgischen Pinzette wurde das Fett erneut angehoben und durch Ziehen oder mit der Schere entfernt. So wurden die verschiedenen Nervenäste in Richtung Parotis freigelegt, um ihren Ursprung zu ermitteln (Abb.11).

Der oberflächliche Teil der Parotis wurde zur vollständigen Darstellung des Fazialisfächers durch Zug mit der anatomischen Pinzette und Schneiden mit dem Skalpell entfernt.

Danach wurde wieder der M. zygomaticus major aufgesucht damit die Nerveneintrittsstellen genau dargestellt werden konnten. Mit der anatomischen Pinzette wurden die Nervenfasern angehoben und mit der feinen Schere wurde

das restliche Gewebe entfernt. Hierbei wurden auch die Äste, die unter dem Muskel nach medial verliefen, bis zu ihrem Muskeleintritt in z.B. den Musculus zygomaticus minor verfolgt.

Schlussendlich wurde der M. zygomaticus minor, soweit vorhanden, aufgesucht und im Zuge dessen der mediale Rand des M. zygomaticus major bis zur Pars orbitalis des M. orbicularis oculi ebenfalls vom Fett befreit, damit der Nervenverlauf und die Innervation der Muskel dargestellt werden können.

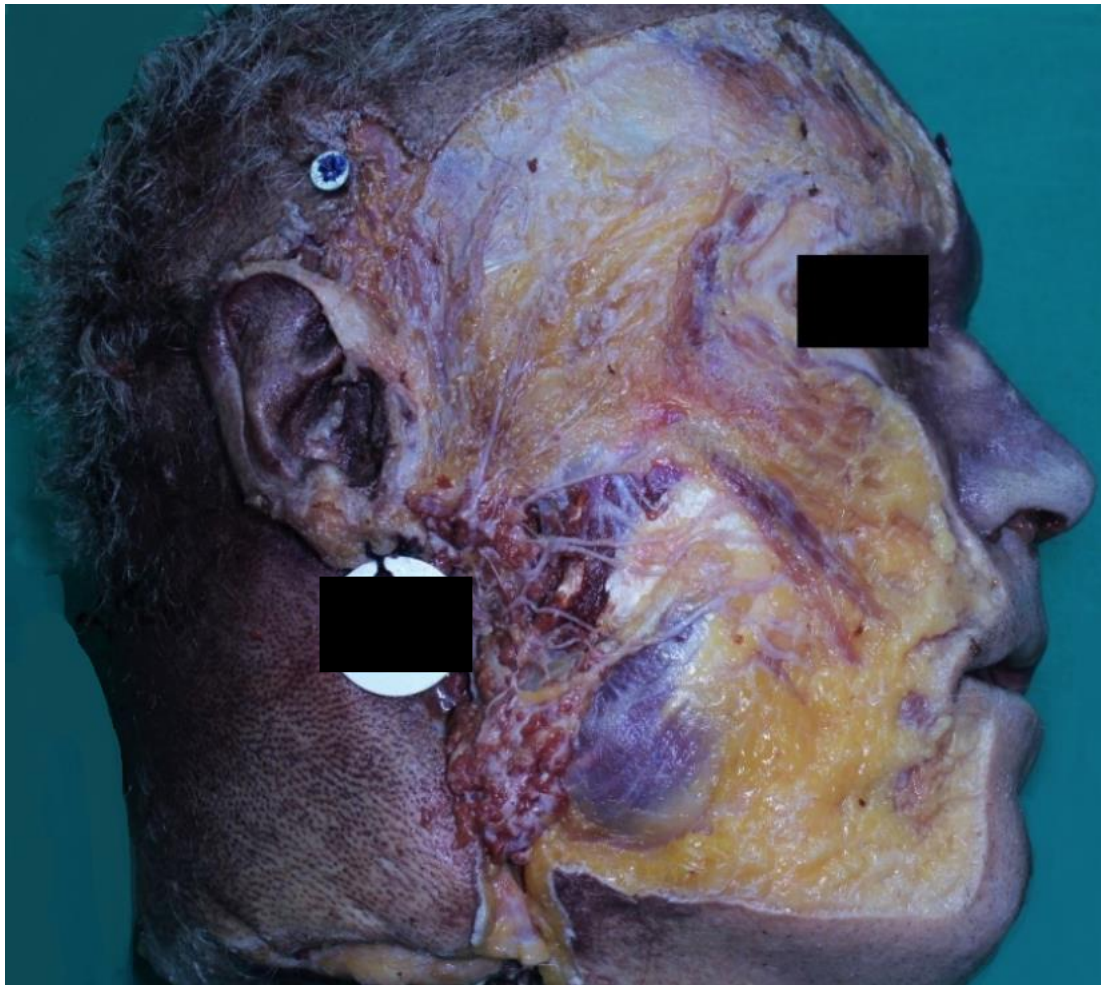


Abbildung 11: Präparation des N. facialis

3.3 Dokumentation

Jedem Kopf wurde im Rahmen der Arbeit eine Nummer zugeordnet. Vor und nach der Präparation wurden Fotos gemacht

Zur Erzeugung von Referenzpunkten auf den Fotos, wurden pro Gesichtshälfte drei, 16 mm lange, Schrauben im Knochen fixiert, jeweils eine in der Stirnmitte (SM), eine supraaurikulär (SA) und die letzte tangential zum lateralen Augenrand (AR). Die Schrauben wurden in drei verschiedenen Lackfarben markiert (Abb.12). Die Distanzen zwischen den drei Schrauben wurden mit einem digitalen Messschieber (Schieblehre 150 mm) mit einer Genauigkeit von 0,1 mm gemessen und schriftlich festgehalten.



Abbildung 12: Referenzschrauben (*)

Für die Aufnahmen wurde eine Canon EOS 600D (Hersteller: Canon, Land: Japan) Kamera benutzt. Die Zoomweite war auf 35 mm eingestellt und der Autofokus sowie der Stabilisator waren eingeschaltet. Es wurde außerdem ein Walimex pro TTL Macro Ringblitz (Hersteller: Walimex, Land: Deutschland) mit der Einstellung ETTL – 2 1/3 verwendet.

Tabelle 2: Kameraeinstellung

	Präparat 1, 2, 3, 4	Präparat 5, 6
ISO	100	100
Brennweite	35 mm	35 mm
Blende	f/29	f/7,1
Belichtungszeit	1/10	1/30
Auflösung	2308 x 3456	5184 x 3456
Ringblitz	1/16	1/16

Bei der Aufnahme der Bilder wurde auf eine gleichmäßige Raumbeleuchtung durch eine feste OP-Lampe an der Decke geachtet. Die fotografierte Kopfhälfte wurde während der Aufnahmeserie nicht bewegt. Eine 80%ige Überlappung der Fotos in Aufnahmerichtung und eine 60%ige Seitenüberlappung wurde eingehalten (Agisoft LLC, 2018). Pro Kopfhälfte wurden im Schnitt 33 Fotos von der unpräparierten und 33 von der fertig präparierten Kopfhälfte gemacht.

3.3.1 Nomenklatur der Nervenäste

Um die einzelnen Nervenäste, die die Mm. zygomatici versorgen, systematisch benennen zu können, wurde eine Nomenklatur entwickelt, anhand derer man die Nervenäste der verschiedenen Kopfhälften im ganzen Verlauf vergleichen kann (Tabelle 4 des Kapitels 4.1). Da für diese Arbeit nur der Teil des N. facialis, der die Mm. zygomatici motorisch versorgt von Interesse war, fängt die Nomenklatur ab der Aufteilung des Hauptstamms in der Gl. parotis an. Dem Hauptstamm wird die Nummer 0 zugeteilt. Jede Aufteilung des Nervs wird ab dann mit einem ‘. ‘ vermerkt und die folgenden Bündel werden von kranial nach kaudal ab Nummer 1 durchnummeriert. Dieses Prinzip wird bis zum Eintritt des jeweiligen Nervenbündels in den untersuchten Muskel weitergeführt.

Jeder Nervenast, der weder die Musculi zygomatici noch den kaudalen Teil des Musculus orbicularis oculi innerviert wird zwischen '//' gesetzt.

Zur Kennzeichnung von Anastomosen zwischen den motorischen Nervenästen wird der Ast, der aus den beiden vorherigen entsteht, mit dem Namen des kranialen, einem '+' und dem Namen des kaudalen Astes in Klammern benannt.

Bei den Ästen, die unter dem M. zygomaticus major zum M. zygomaticus minor ziehen, wird ein '+Mi' zum Namen hinzugefügt. Bei den Ästen, die unter dem M. zygomaticus major zum M. orbicularis oculi ziehen, wird ein '+MOO' zum Namen hinzugefügt. Beide Zusätze werden an das Ende des Namens gesetzt.

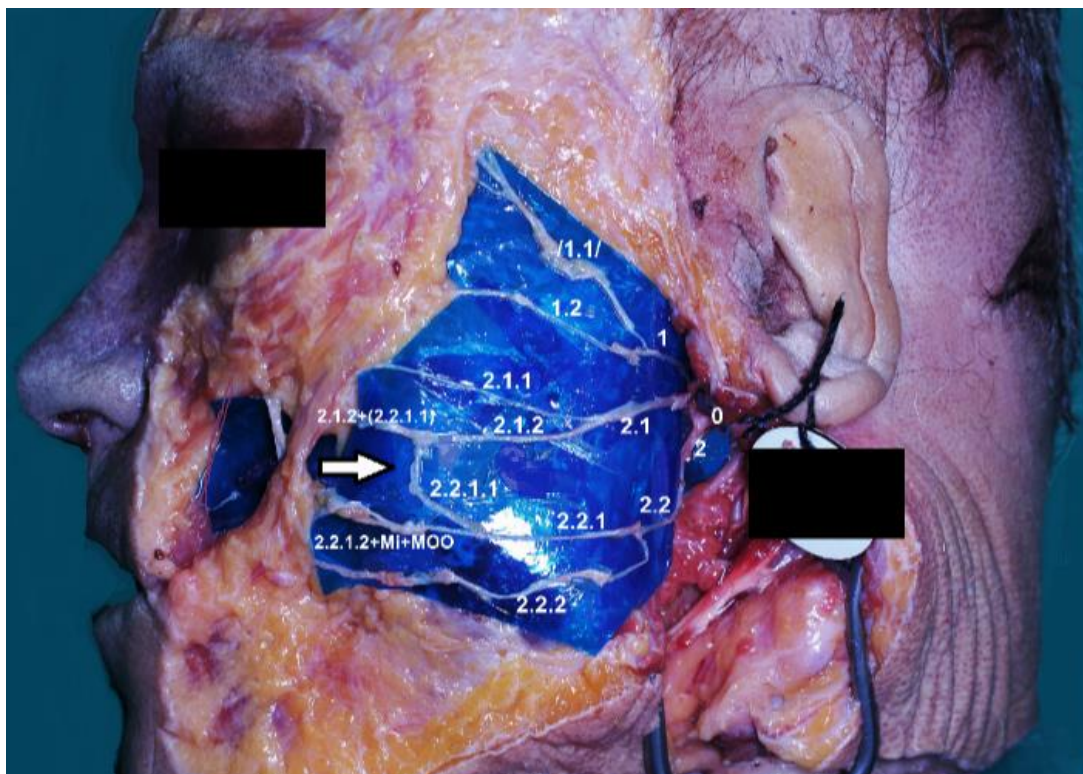


Abbildung 13: Beispiel Nomenklatur der Nervenäste (Präparat 6 links)

3.4 Softwares

3.4.1 Agisoft

Für die 3D Rekonstruktion der Präparate wurde Photoscan Professional, Version 1.2.6 Build 2834 (64 bits), von Agisoft (Stadt: St. Petersburg, Land: Russland) benutzt. Mithilfe der Mehrbildtriangulation kombiniert diese die eingespeisten Fotos zu einer einzigen dichten Punktwolke (Abb. 14).

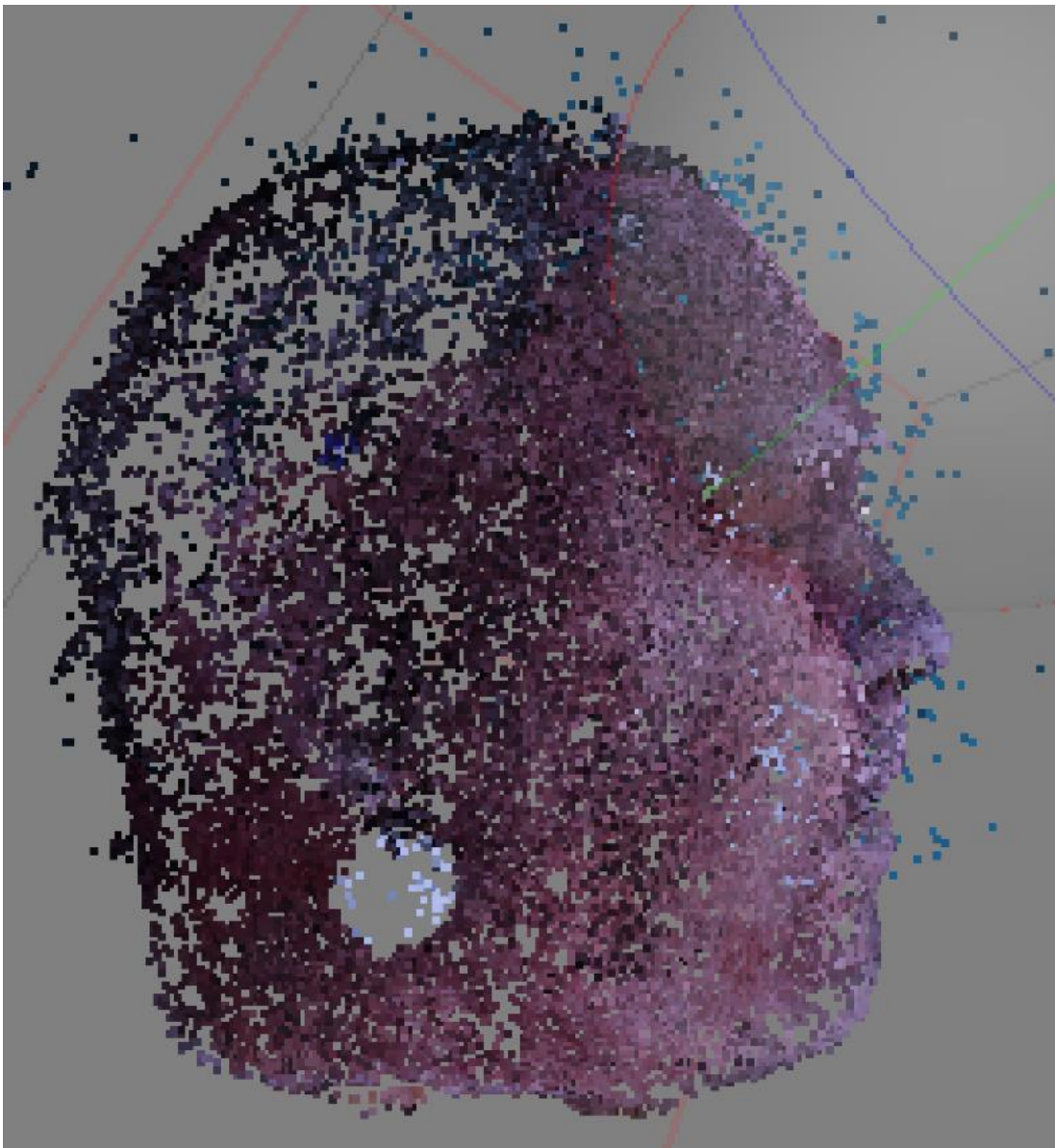


Abbildung 14: Punktwolke

Danach wird ein polygonisiertes Gittermodell, basierend auf der Punktwolke, erstellt (Abb. 15).

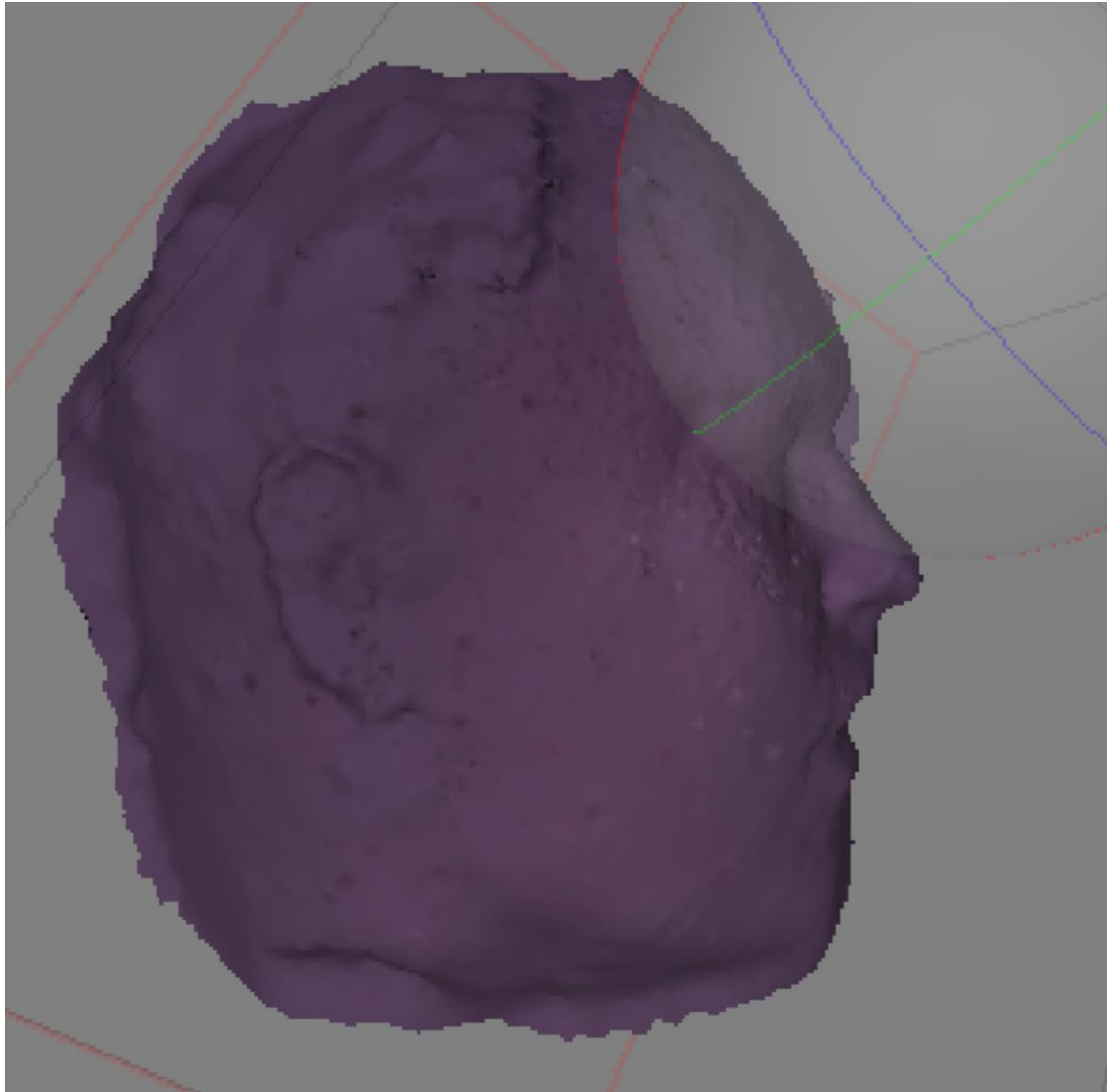


Abbildung 15: Agisoft Gittermodell

Die Textur des Objektes wurde erzeugt, indem diese pixelweise aus den aufgenommenen Bildern extrahiert und auf die jeweilige Stelle im 3D-Modell projiziert wurde (Abb. 16). Hierzu wurde der Abbildungsmodus auf "Allgemein", der Überlagerungsmodus auf "Mosaik" und die Texturgröße/-anzahl auf „4069 x 1“ gestellt.



Abbildung 16: Agisoft Textur

In die Software wurden jeweils die Fotos von der unpräparierten als auch von der präparierten Kopfhälfte eingefügt.

Schlussendlich wurden noch Marker auf die jeweiligen Referenzschrauben gesetzt und die gemessenen Distanzen zwischen letzteren manuell eingefügt. So konnten die Längen der verschiedenen Äste mit der Software gemessen werden (Abb. 17). Hierbei wurde immer die Nervenfasern ab der ersten Aufteilung des Haupttruncus bis zum Eintritt in den Muskel gemessen, indem jede Länge bis zur nächsten Aufteilung des Nervs ausgemessen, alle Längen addiert wurden und

anschließend die errechnete Dezimalzahl die dabei herauskam auf eine ganze Zahl aufgerundet wurde.

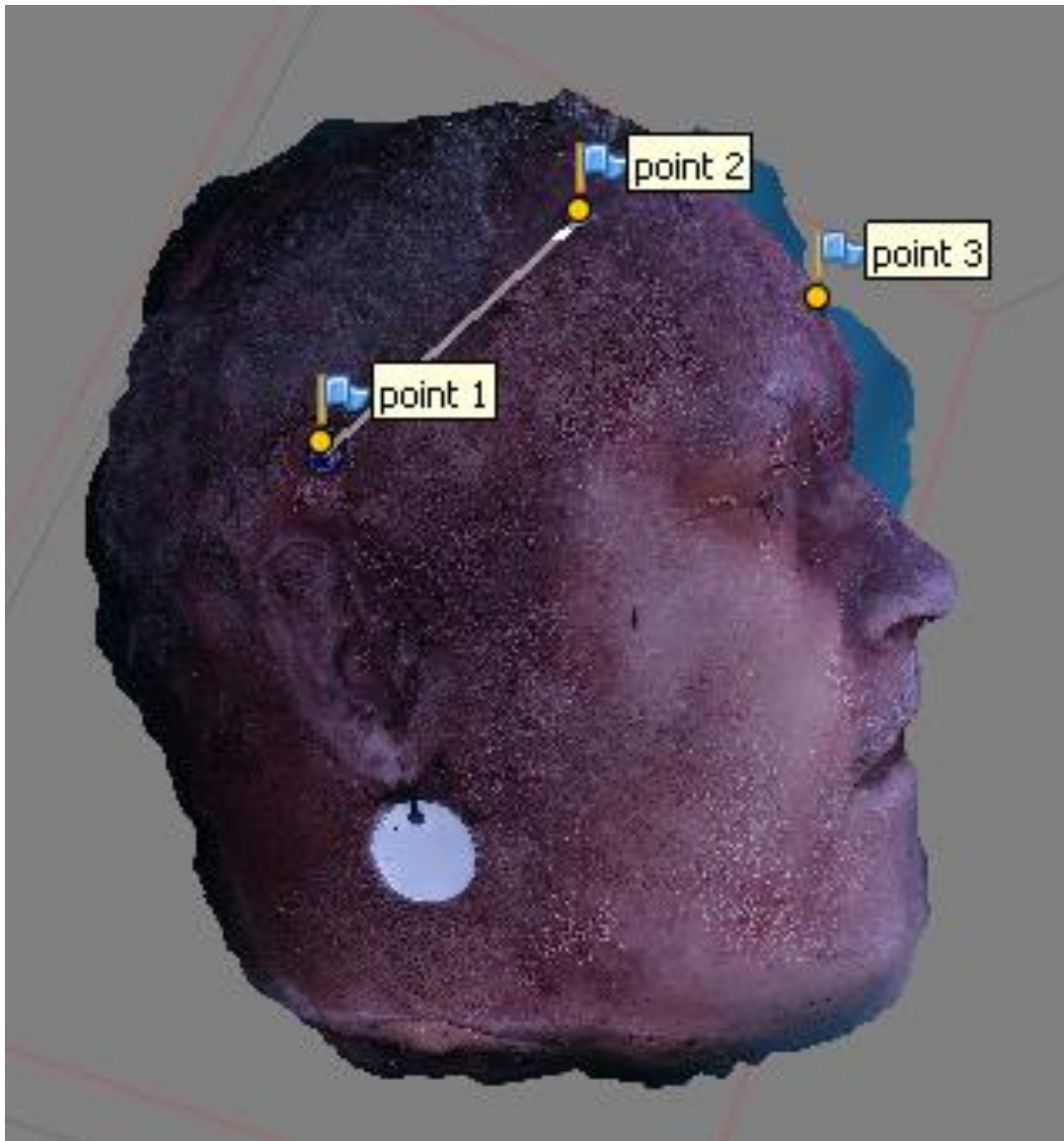


Abbildung 17: Agisoft Referenzpunkte und Distanzen

3.4.2 CloudCompare

Zum Vergleich von zwei 3D Modellen wurde die Software CloudCompare (Open-Source-Projekt: <http://www.cloudcompare.org>) Version: v2.8.beta (Windows 64 bits) benutzt. Hier wurden jeweils die Punktwolke der unpräparierten und der präparierten Kopfhälfte eingefügt (Abb. 18).

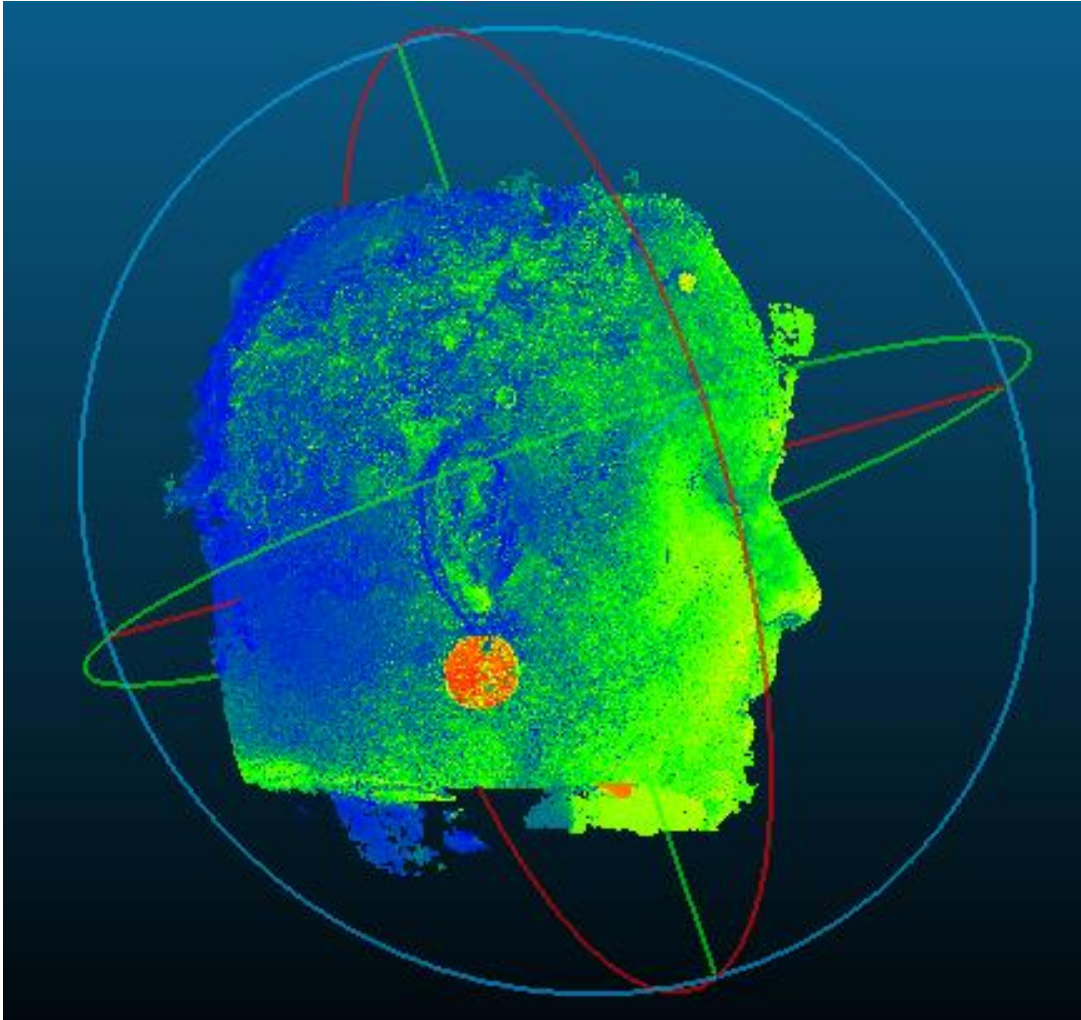


Abbildung 18: Punktwolke im CloudCompare

Zum Vergleich der beiden Punktwolken ist es notwendig, dass diese aneinander angepasst werden, da die ausgewählte Funktion keine willkürlich positionierten und orientierten Punktwolken anpassen kann (Abb. 19). Als Referenz diene die Punktwolke der unpräparierten Kopfhälfte (Abb. 20).

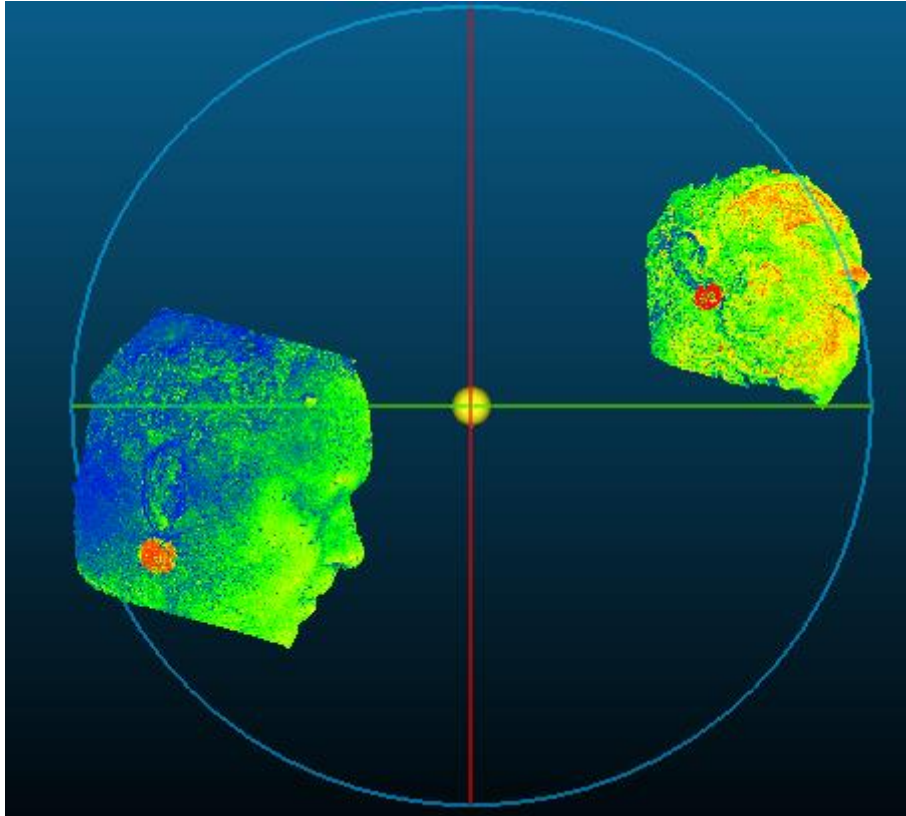


Abbildung 19: zwei unangepasste Punktwolken

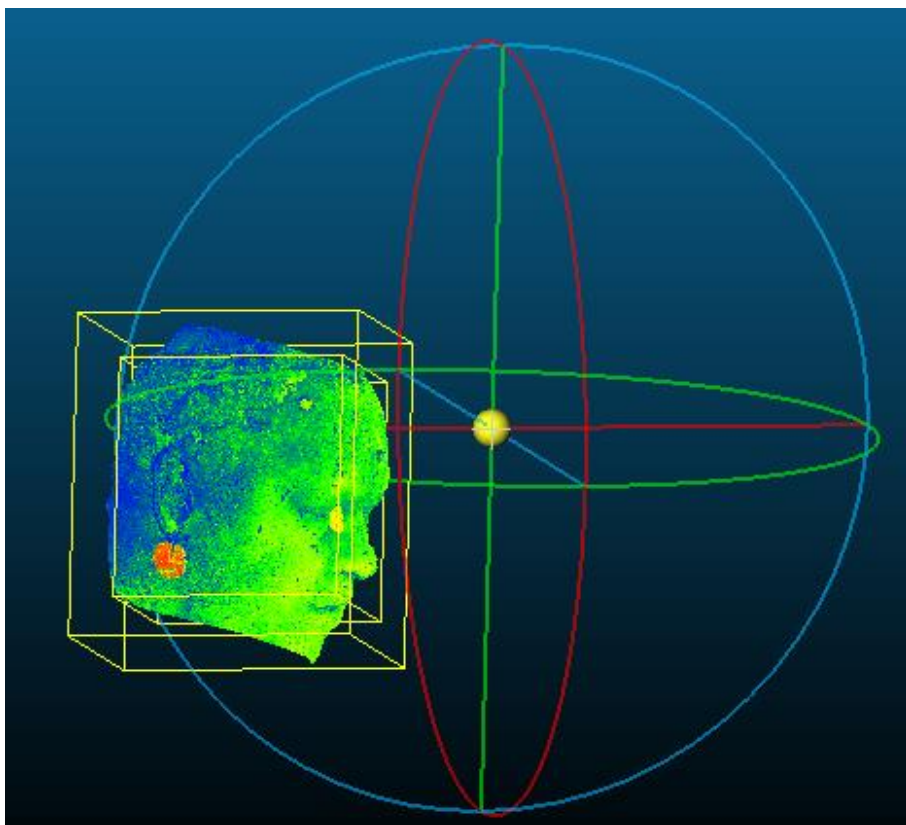


Abbildung 20: zwei angepasste Punktwolken

Es konnten nun also die Distanzen zwischen den beiden Punktwolken berechnet werden. In den "Approx results" sind die Näherungswerte für die minimale, maximale und mittlere Distanz angegeben (Abb. 21). Dadurch konnten der tiefste Punkt des Nervenverlaufs und die durchschnittliche Tiefe der Nerven ermittelt werden.

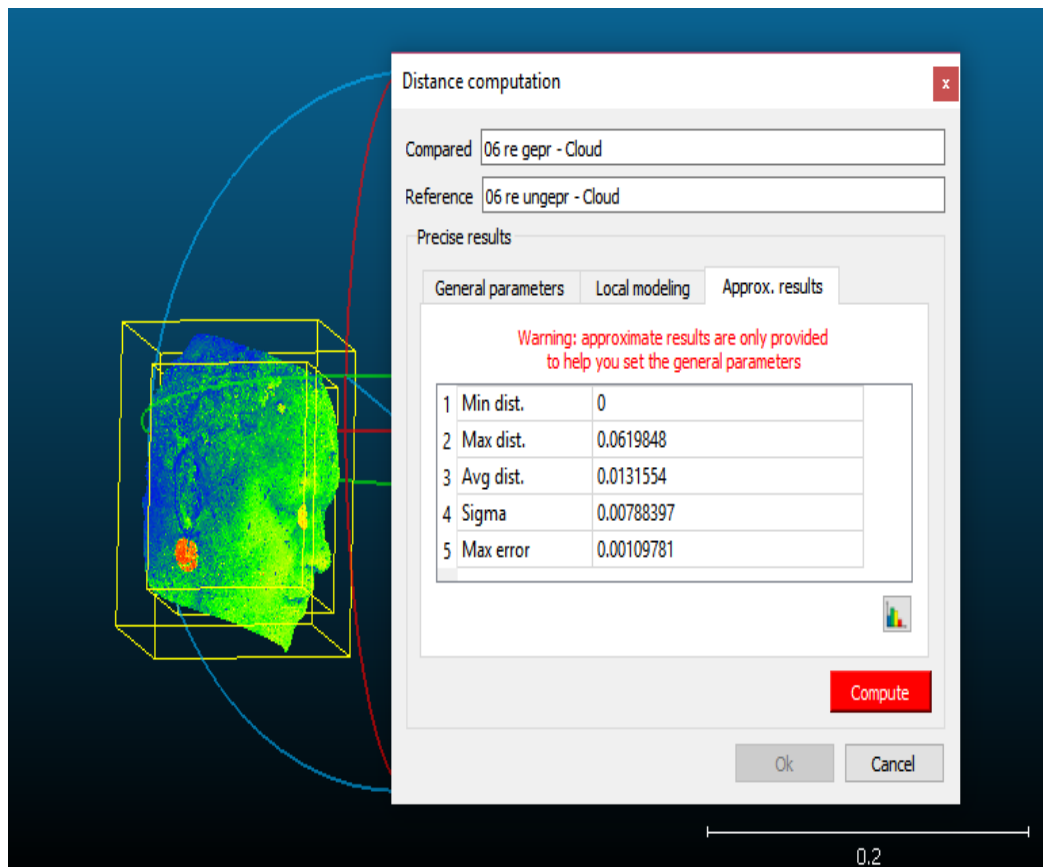


Abbildung 21: zwei Punktwolken mit den Distanzen

4 Ergebnisse

4.1 Distanzen zwischen den Referenzpunkten

In Tabelle 3 sind die mit dem Messschieber ausgemessenen Distanzen zwischen den Referenzschrauben aufgelistet.

Tabelle 3: Distanzen zwischen den Referenzpunkten

Präparat	Referenzpunkte	Distanz (mm)
1 rechts	AR-SA	143,0
	AR-SM	62,0
	SA-SM	132,2
2 rechts	AR-SA	124,0
	AR-SM	53,9
	SA-SM	127,6
3 rechts	AR-SA	77,2
	AR-SM	75,9
	SA-SM	116,6
3 links	AR-SA	42,9
	AR-SM	65,8
	SA-SM	99,0
4 rechts	AR-SA	40,2
	AR-SM	61,8
	SA-SM	91,6
4 links	AR-SA	78,7
	AR-SM	29,0
	SA-SM	98,4
5 rechts	AR-SA	64,7
	AR-SM	77,9
	SA-SM	121,0
5 links	AR-SA	54,2
	AR-SM	75,6
	SA-SM	109,8
6 rechts	AR-SA	77,7
	AR-SM	72,1

	SA-SM	130,2
6 links	AR-SA	52,9
	AR-SM	56,7
	SA-SM	101,5

4.2 Variabilität

Die Variabilität des N. facialis im Rahmen der motorischen Versorgung der Mm. zygomatici wurde über den Verlauf, die versorgende Nervenastanzahl, die Nervenastlängen, die Tiefenverhältnisse und die Anastomosen definiert.

4.2.1 Nervenverläufe und Nomenklatur

Die Nervenverläufe aller Präparate werden schematisch für jede einzelne Gesichtshälfte in den Abbildungen 22 bis 31 dargestellt.

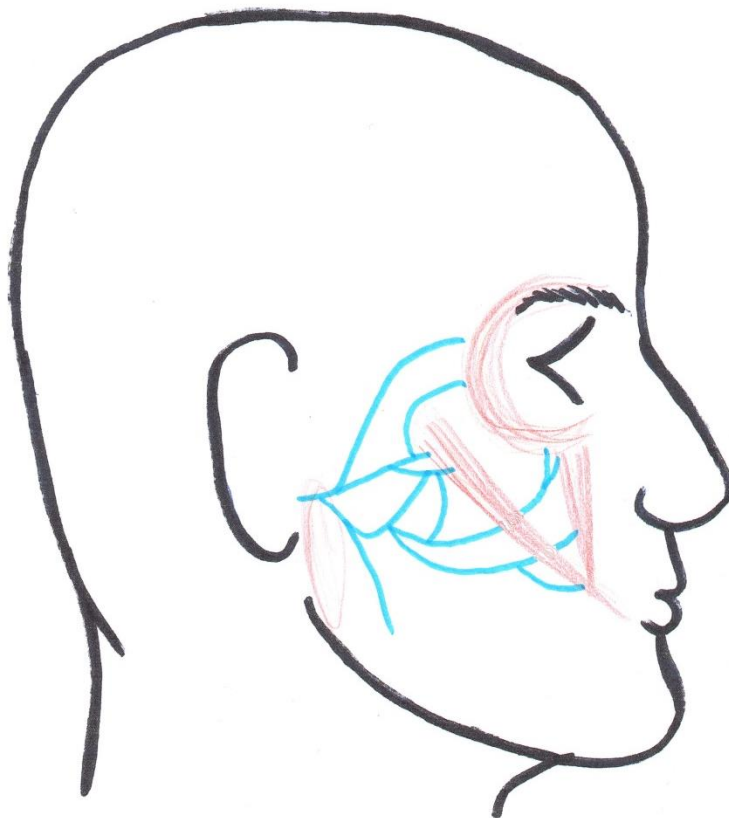


Abbildung 22: Nervenverlauf Präparat 1 rechts. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.

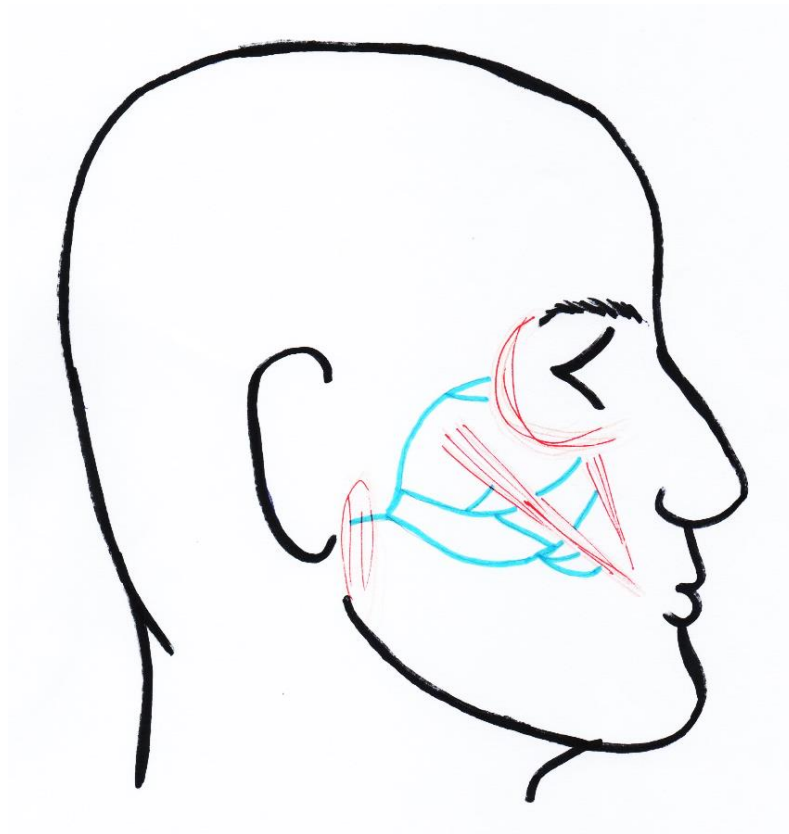


Abbildung 23: Nervenverlauf Präparat 2 rechts. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.

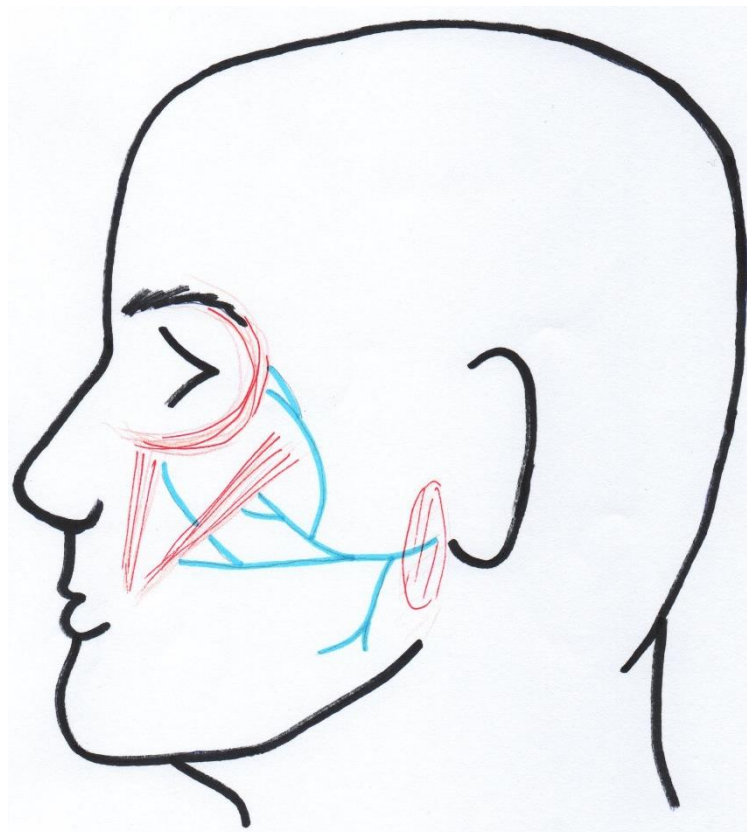


Abbildung 24: Nervenverlauf Präparat 3 links. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.

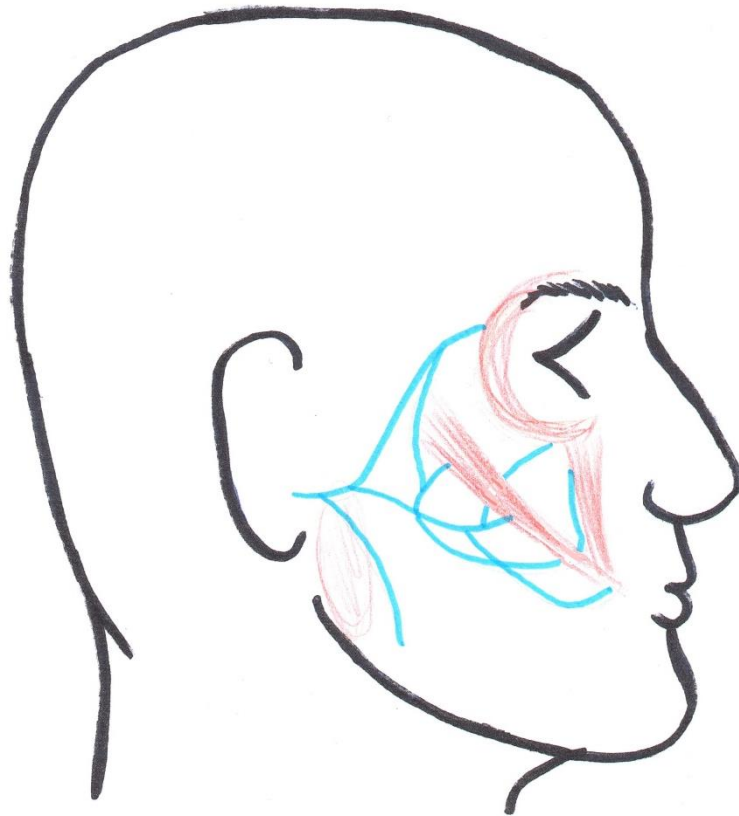


Abbildung 25: Nervenverlauf Präparat 3 rechts. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.

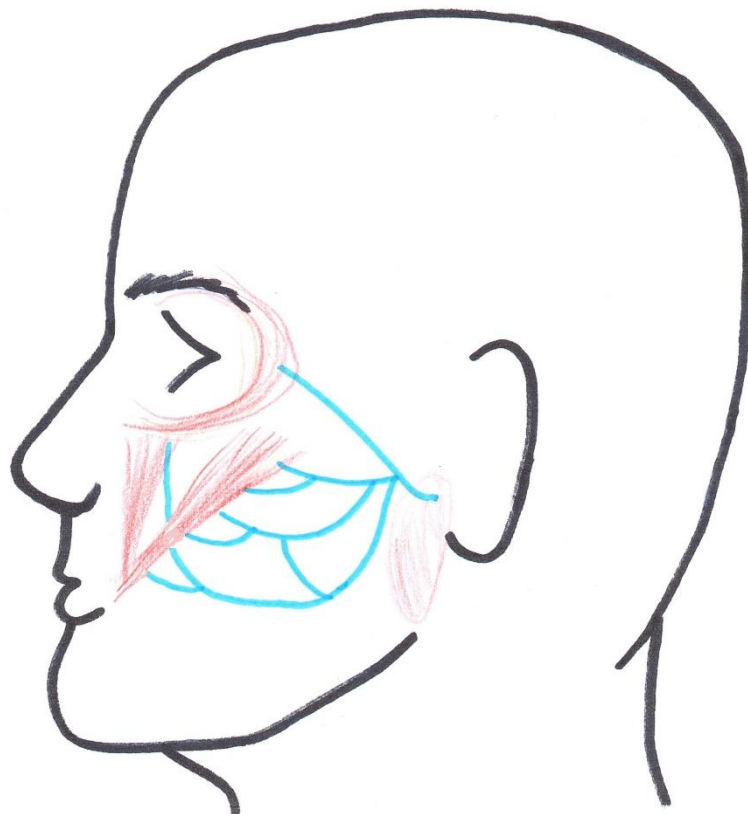


Abbildung 26: Nervenverlauf Präparat 4 links. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.

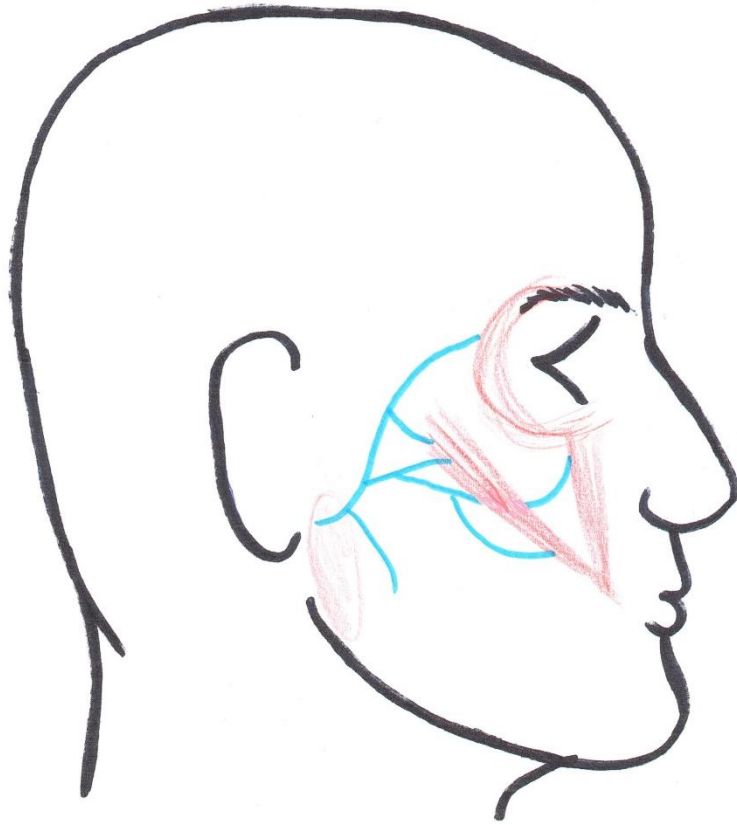


Abbildung 27: Nervenverlauf Präparat 4 rechts. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.

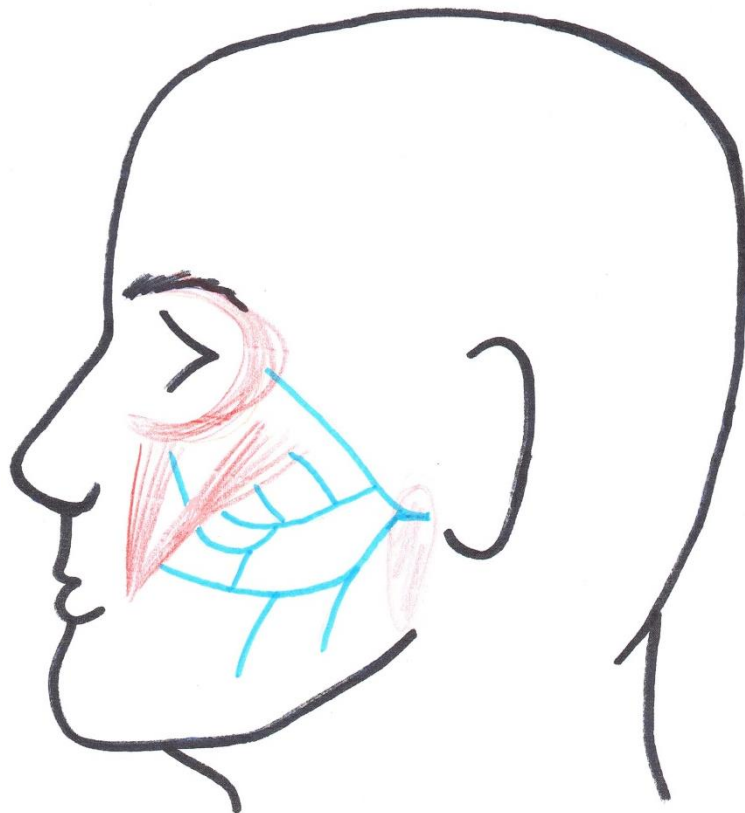


Abbildung 28: Nervenverlauf Präparat 5 links. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.

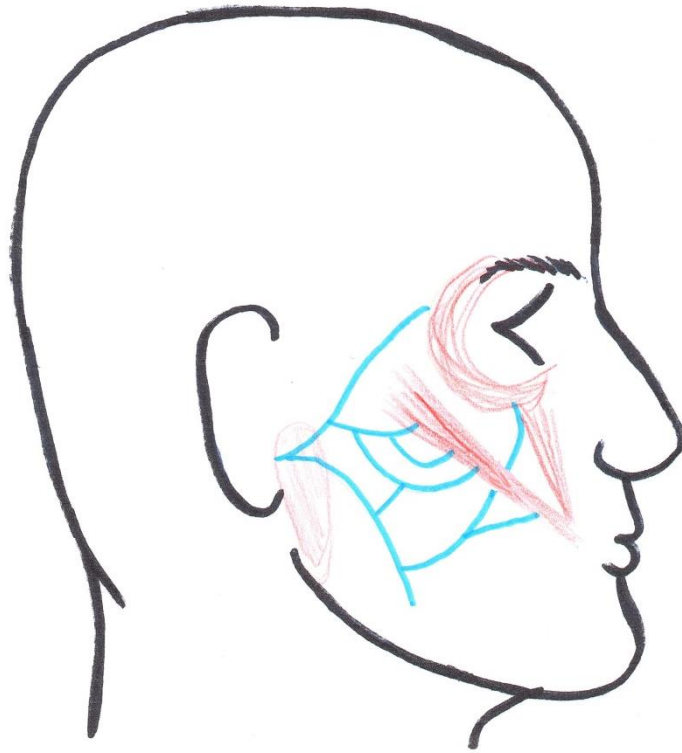


Abbildung 29: Nervenverlauf Präparat 5 rechts. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.

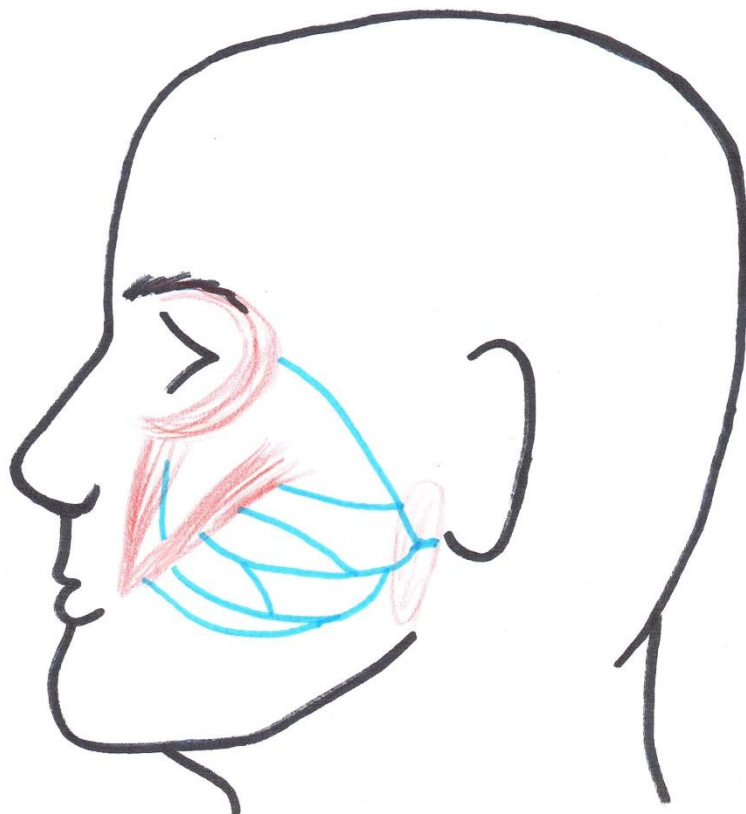


Abbildung 30: Nervenverlauf Präparat 6 links. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.

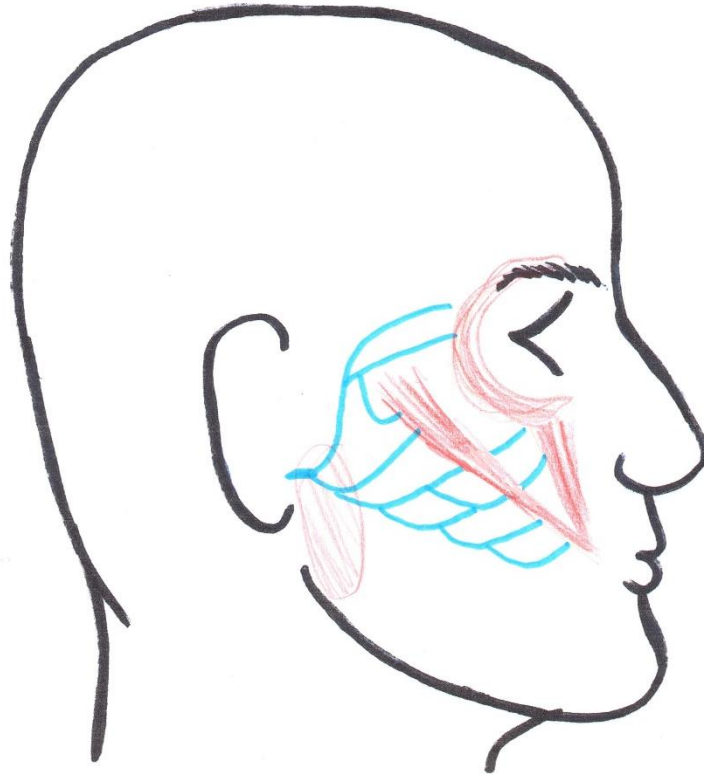


Abbildung 31: Nervenverlauf Präparat 6 rechts. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.

Es fällt vor allem auf, dass bei allen Präparaten mindestens ein Nervenast den M. zygomaticus major unterläuft und die Pars inferior medialis des M. orbicularis oculi mitversorgt (Abb. 32).

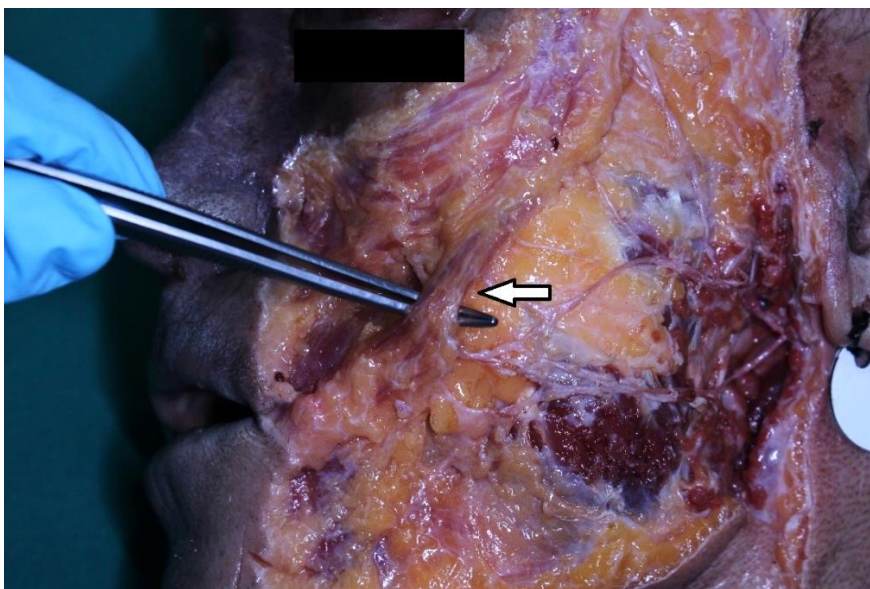


Abbildung 32: Unterkreuzung (⇐) des M.zyg.maj. Präparat 6 links

Die Tabelle 4 zeigt die Nomenklatur der Nervenäste, die die Mm. zygomatici versorgen, wie sie in Kapitel 3.3.1. beschrieben wurde sowie deren Aufteilung.

Lediglich bei Präparat 4 links teilt sich der Haupttruncus in drei Äste auf, bei allen anderen Kopfhälften nur in zwei. Es liegt hier also anstatt der typischen Bifurkation eine Trifurkation vor.

Es konnte festgestellt werden, dass bei Präparat 1 rechts, 2 rechts, 4 rechts, 5 links sowie 6 rechts und links, die Muskeln sowohl aus dem Tr. temporofacialis als auch aus dem Tr. cervicofacialis versorgt wurden. Bei Präparat 4 links wurden die Mm. zygomatici von Nervenästen entstehend aus den drei Trunci versorgt. Bei Präparat 3 rechts und links, sowie 5 rechts wurden beide untersuchten Muskel nur vom kranialen Bündel aus dem Haupttruncus versorgt.

Tabelle 4: Nomenklatur und Aufteilung der Nervenäste

Präparat	Nervenäste
1 rechts	<pre> graph TD 0 --- 1 0 --- 2 0 --- 3 1 --- 1.1["/1.1/"] 1 --- 1.2 1.2 --- 1.2.1 1.2 --- 1.2.2 1.2.1 --- 1.2.1.1["/1.2.1.1/"] 1.2.1 --- 1.2.1.2 1.2.2 --- 1.2.2_2.1.1["1.2.2+(2.1.1)"] 1.2.2 --- 1.2.2_2.1.1_2.1.2.1["1.2.2+(2.1.1)+(2.1.2.1)"] 2 --- 2.1 2 --- 2.2["/2.2/"] 2.1 --- 2.1.1 2.1 --- 2.1.2 2.1 --- 2.1.3 2.1.1 --- 2.1.1.1 2.1.1 --- 2.1.1.2 2.1.2 --- 2.1.2.1 2.1.2 --- 2.1.2.2_Mi_MOO["2.1.2.2+Mi+MOO"] 2.1.3 --- 2.1.3.1_Mi["2.1.3.1+Mi"] 2.1.3 --- 2.1.3.2 </pre>

2 rechts	
3 rechts	
3 links	

4 rechts	
4 links	
5 rechts	

5 links	
6 rechts	
6 links	

4.2.2 Inserierende Nervenastanzahl

Bei der Präparation wurden die inserierenden Nervenäste erhalten und gezählt. Hierbei wurden die Nervenäste, die unter dem M. zygomaticus major hindurchliefen, nicht zu denen, die den M. zygomaticus major versorgen, sondern nur zu dem Muskel in den sie letzten Endes inserieren, gezählt. Der M. zygomaticus major wurde im Durchschnitt von 3,6 (min: 3; max: 5), der M. zygomaticus minor von 1,5 (min: 1; max: 2) und die Pars inferior medialis des M. orbicularis oculi von 1,3 (min: 1; max: 2) Nervenästen innerviert.

Tabelle 5: Nervenastanzahl nach Muskel

Präparat	M.zyg.maj	M.zyg.min	MOO
1 rechts	4	2	1
2 rechts	3	2	1
3 rechts	3	2	2
3 links	3	1	1
4 rechts	3	1	1
4 links	5	1	1
5 rechts	3	2	2
5 links	4	1	1
6 rechts	4	2	2
6 links	4	1	1
Mittelwerte (min; max)	3,6 (min: 3; max: 5)	1,5 (min: 1; max: 2)	1,3 (min: 1; max: 2)

4.2.3 Nervenastlängen

Bei der digitalen Ausmessung der Länge des Verlaufs der Nervenäste in den 3D-Aufnahmen mit Hilfe der Software Agisoft kam eine Durchschnittslänge von 71 mm heraus. Die kürzeste von einem inserierenden Nervenast zurückgelegte Strecke betrug 41 mm, die weiteste 111 mm. Tabelle 6 zeigt die ausgemessenen Distanzen der verschiedenen Nerven. Bei Präparat 2 rechts war eine Vermessung der Nervenlänge nicht möglich, da die Fotos bei Agisoft nicht zu einer Punktwolke zusammengefügt werden konnten.

Bei den Präparaten 3, 4 und 5 waren die inserierenden Nerven der rechten Kopfhälfte im Schnitt um 8,3 mm länger als die der linken Seite. Nur beim

Präparat 6 waren die Nervenäste der linken Seite durchschnittlich um 5 mm länger als die der rechten.

Die Abbildungen 33 und 34 zeigen eine graphische Darstellung der Nervenastlängen der einzelnen Präparate.

Tabelle 6: Länge der Nervenäste

Präparat	Nervenast	Länge (mm)	Durchschnitt (mm)
1 rechts	1.2.1.2	59	73 M. zyg. maj.: 69 M. zyg. min.: 80
	1.2.2+(2.1.1)+(2.1.2.1)	54	
	2.1.2.2+Mi+MOO	79	
	2.1.3.1+Mi	80	
	2.1.3.2	95	
3 rechts	1.2.1.2	44	65 M. zyg. maj.: 54 M. zyg. min.: 82
	1.2.2.1.1+Mi+MOO	66	
	1.2.2.1.2	47	
	1.2.2.2.1+(1.2.3)+Mi+MOO	97	
	1.2.2.2.2+(1.2.3)	72	
3 links	1.1.2.1	42	58 M. zyg. maj.: 49
	1.1.2.2	47	
	1.2.1+Mi+MOO	83	
	1.2.2	58	
4 rechts	1.1.2	41	75 M. zyg. maj.: 63
	1.2.1	46	
	1.2.2+Mi+MOO	110	
	1.2.2.2	101	
4 links	2.1.1	43	67 M. zyg. maj.: 60
	2.1.2	45	
	2.2.1+(3.1)	63	
	2.2.2+(3.1)	64	
	3.2.1+Mi+MOO	106	
	3.2.2	83	
5 rechts	1.2.1	59	82 M. zyg. maj.: 75
	1.2.2.1	74	
	1.2.2.2	82	
	1.2.2.3+(2.1.1.1)+Mi+MOO	108	
	2.1.1.2	85	
5 links	1.2.1	57	72 M. zyg. maj.: 64
	1.2.2.1	63	

	1.2.2.2	59	
	1.2.2.3+(2.1.1.1)+Mi+MOO	100	
	2.1.1.2	78	
6 rechts	1.3	52	69 M. zyg. maj.: 67 M. zyg. min.: 73
	2.1	41	
	2.2.1.1+Mi+MOO	67	
	2.2.1.2+(2.2.2.1)+Mi+MOO	79	
	2.2.2.2.1	83	
	2.2.2.2.2	91	
6 links	1.2	45	74 M. zyg. maj.: 65
	2.1.1	66	
	2.1.2+(2.2.1.1)	63	
	2.2.1.2+Mi+MOO	111	
	2.2.2	86	

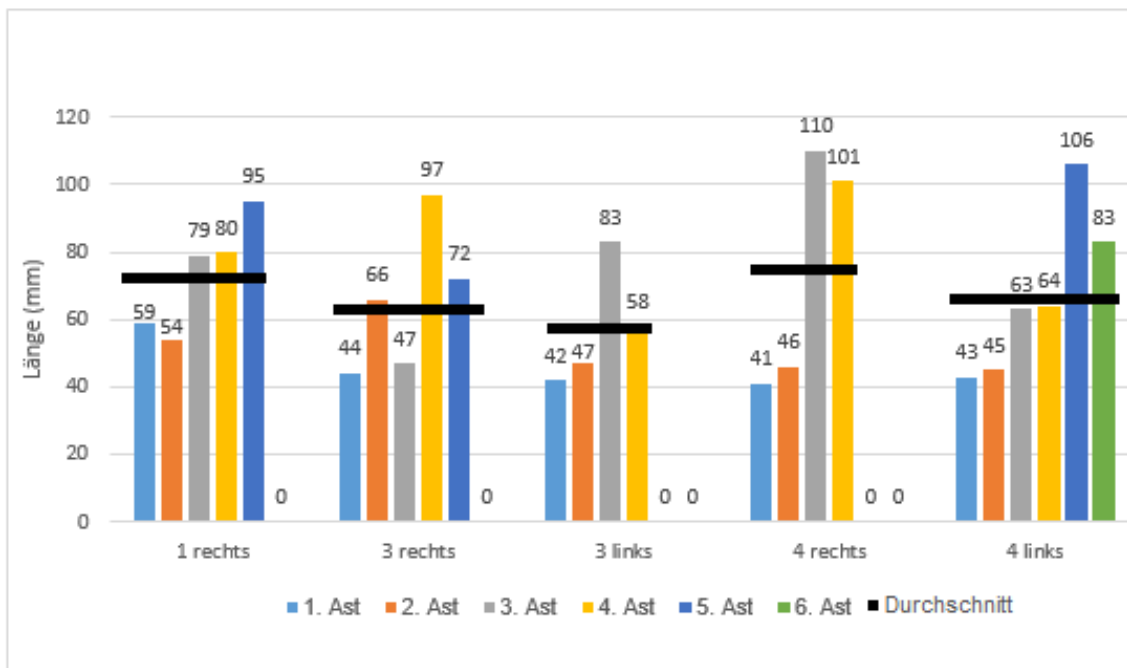


Abbildung 33: Grafik: Nervenastlängen Präparate 1, 3 und 4

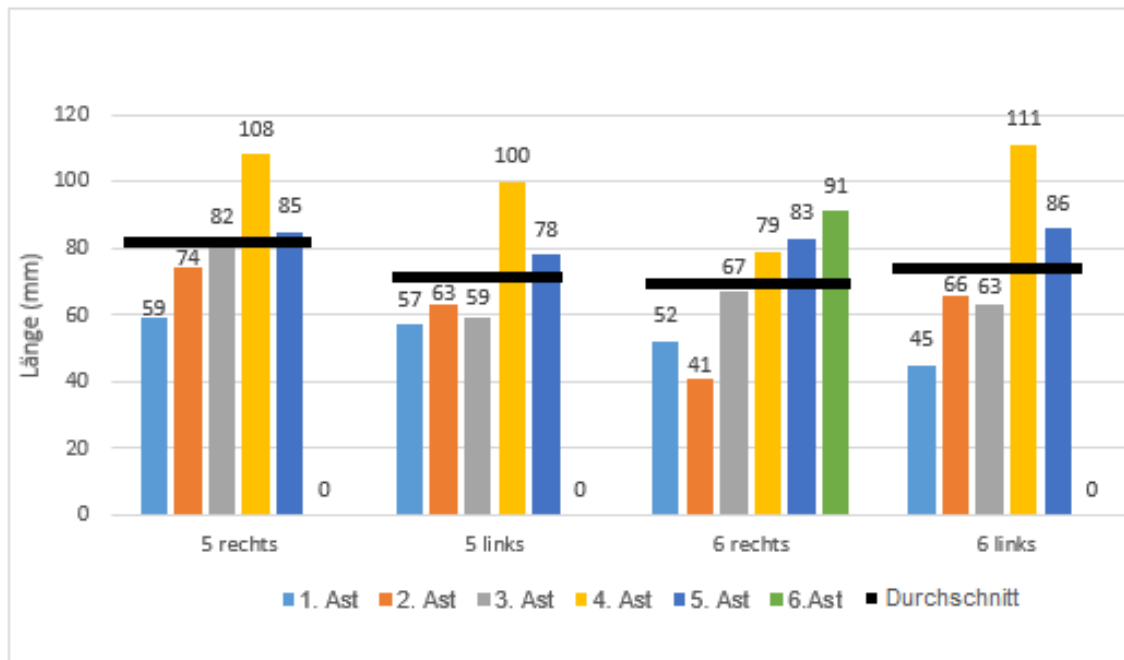


Abbildung 34: Grafik: Nervenastlängen Präparate 5 und 6

4.2.4 Tiefenverhältnisse

Die Nervenasttiefe wurde mit Hilfe von CloudCompare ausgewertet, indem die Punktwolke des unpräparierten Kopfes über die des präparierten Kopfes gelegt wurde, der Tiefenunterschied ausgerechnet wurde und jeweils die maximale und die durchschnittliche Distanz zwischen beiden Wolken erhoben wurden. Der durchschnittliche Tiefenverlauf der Nerven betrug 8 mm unter dem Hautniveau, der tiefste Punkt des Verlaufes eines Nervenastes betrug im Durchschnitt 57 mm kaudal des Arcus zygomaticus. Bei den Präparaten 3 und 5 verliefen die Nervenäste der linken Kopfhälfte mit durchschnittlich 11 und 13 mm tiefer als die der rechten mit durchschnittlich 5 und 8 mm. Bei den Präparaten 4 und 6 war es mit durchschnittlich 8 und 13 mm rechts gegen durchschnittlich 5 und 4 mm links umgekehrt. Bei Präparat 1 und 2 konnten keine Tiefenverhältnisse ermittelt werden, da die Punktwolken sich nicht verarbeiten ließen. Dies ist am wahrscheinlichsten dadurch zu erklären, dass bei beiden Präparaten keine Referenzschrauben, sondern lediglich farbige Punkte als Referenzpunkte verwendet wurden, wodurch die CloudCompare Software keine Fixpunkte zum Übereinanderlegen errechnen konnte.

Die unterschiedlichen Tiefenverhältnisse der Nervenverläufe der Präparate sind in Tabelle 7 zusammengefasst und graphisch dargestellt (Abb. 35).

Tabelle 7: Tiefenverhältnisse

Präparat	Tiefster Punkt (mm)	Durchschnittliche Tiefe (mm)
3 rechts	36	5
3 links	47	11
4 rechts	44	8
4 links	43	5
5 rechts	64	8
5 links	90	13
6 rechts	62	13
6 links	66	4
Mittelwert	56,5	8,375

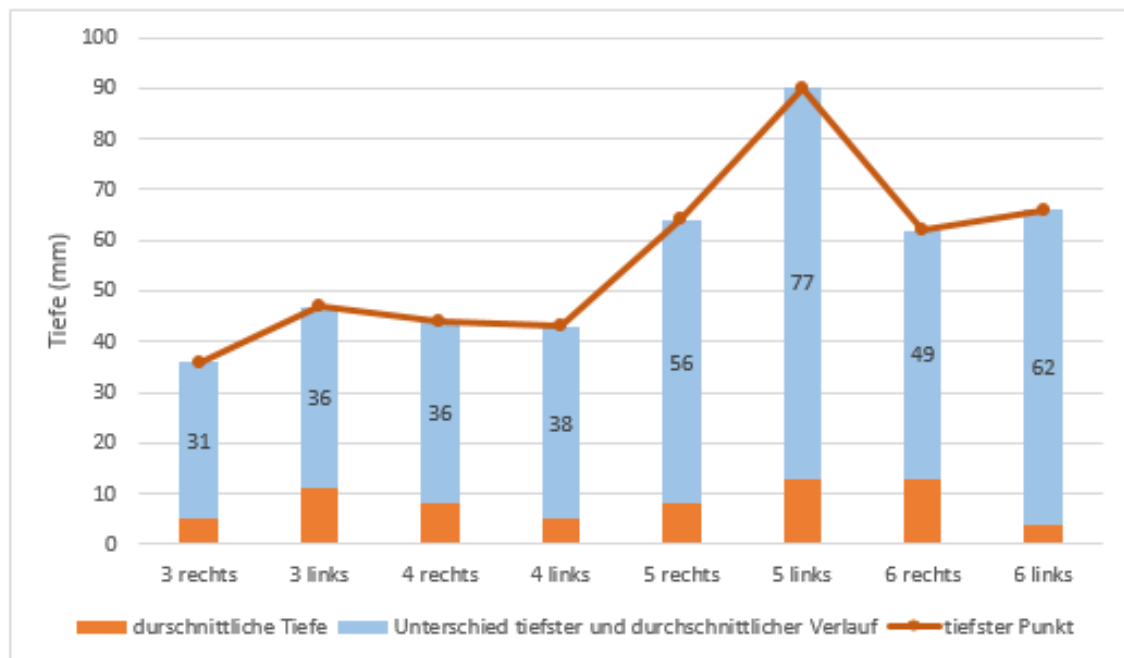


Abbildung 35: Grafik Tiefe der Nervenverläufe der Präparate 3,4,5 und 6

Der Unterschied zwischen dem tiefsten Punkt und dem mittleren Verlauf variierte zwischen 31 und 72 mm.

4.2.5 Anastomosen

Die Anzahl der Anastomosen zwischen den einzelnen Nervenästen, die die Mm. zygomatici und den M. orbicularis oculi versorgen, lag zwischen null und zwei, wobei es nur bei Präparat 1 rechts zwei gab. Der M. zygomaticus minor wurde in sechs von zehn Präparaten von einem Nervenast mit einer Anastomose versorgt.

Es konnte auch hier keine Regelmäßigkeit erkannt werden, weder im Seitenvergleich noch in dem vom Nervenast, der aus einer Anastomose entstanden ist, versorgten Muskel (Tabelle 8).

Die Abbildungen 36 und 37 zeigen die gut erkennbaren Anastomosen an den Präparaten 3 rechts und 4 links. Hier wurden die Nervenverläufe durch eine blaue Unterlage hervorgehoben.

Tabelle 8: Anastomosenanzahl und durch Anastomose versorgter Muskel

Präparat	Anastomosenanzahl	Versorgter Muskel
1 rechts	2	M.zyg.maj.
2 rechts	1	M.zyg.min.
3 rechts	1	M.zyg.maj., M.zyg.min., MOO
3 links	0	/
4 rechts	0	/
4 links	1	M.zyg.min.
5 rechts	1	M.zyg.maj., M.zyg.min., MOO
5 links	1	M.zyg.min., MOO
6 rechts	1	M.zyg.min., MOO
6 links	1	M.zyg.maj.

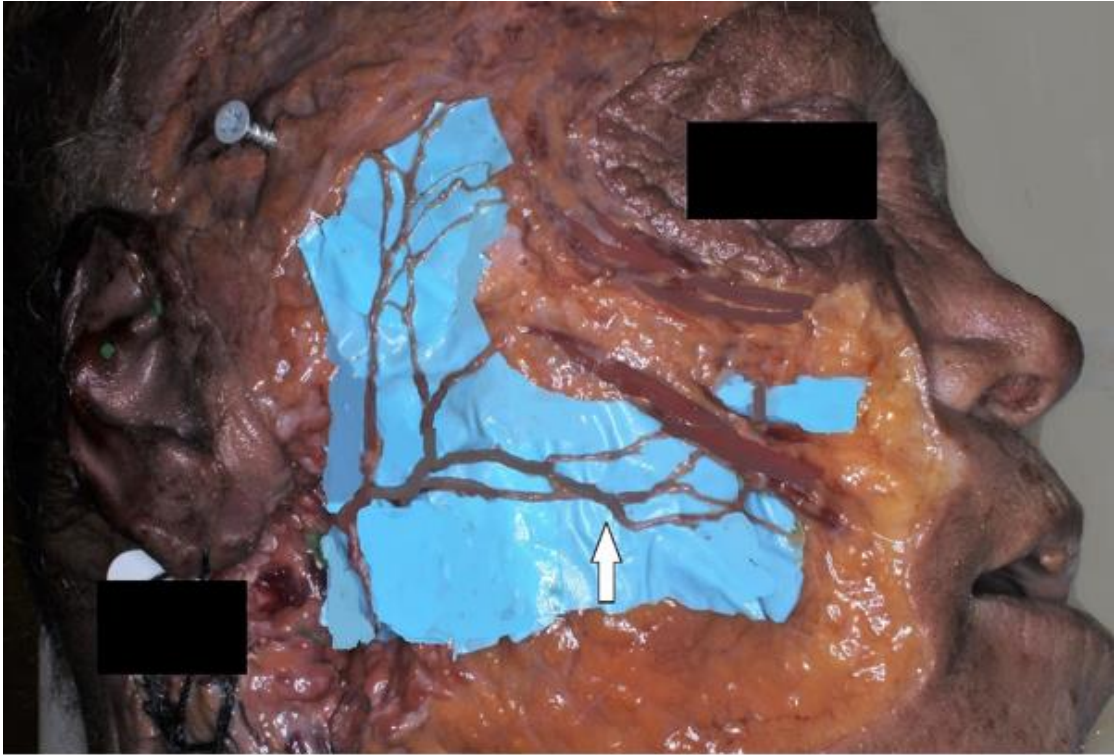


Abbildung 36: Anastomose 1.2.2.2+(1.2.3) Präparat 3 rechts

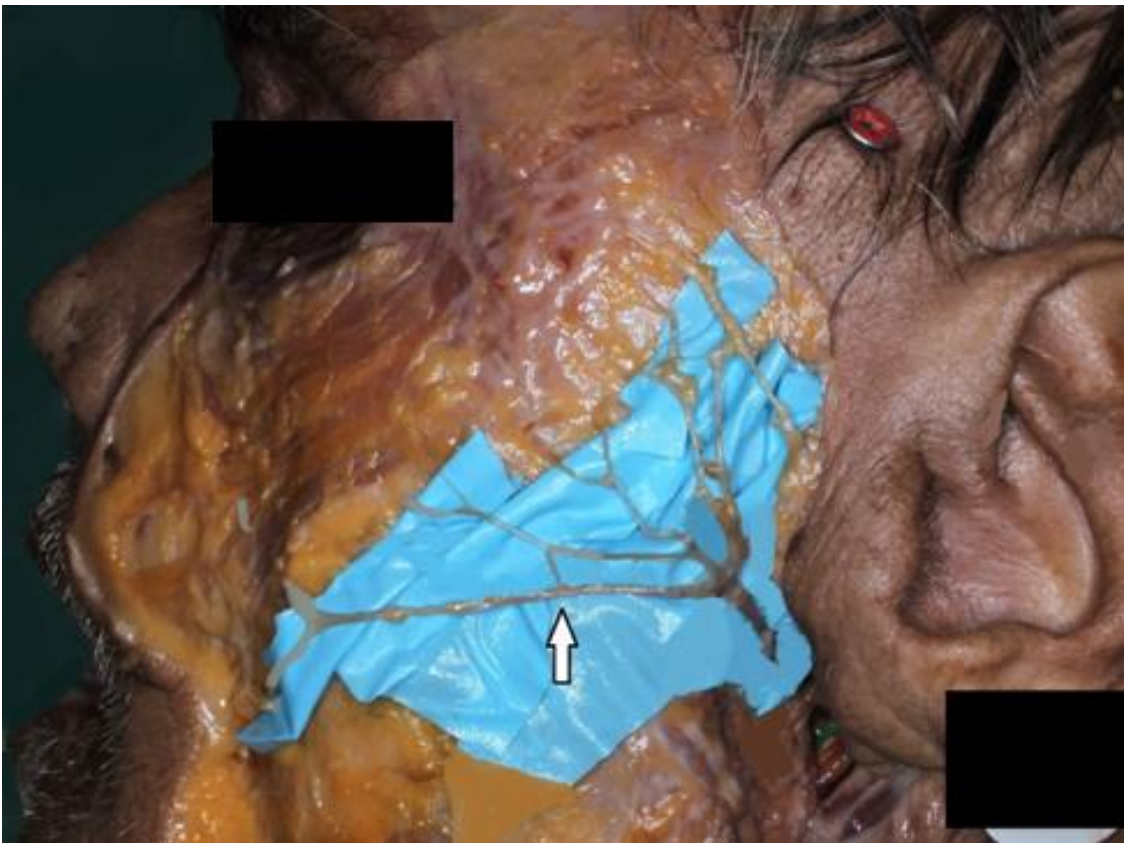


Abbildung 37: Anastomose 2.2.2+(3.1) Präparat 4 links

5 Diskussion

5.1 Diskussion der Methodik

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf humane Köpfe zurückgegriffen, damit die Ergebnisse bestmöglich auf den menschlichen Körper übertragen werden können. Um dies nämlich überhaupt möglich zu machen, sollten die Versuchsbedingungen und die tatsächlichen menschlichen Gegebenheiten bestmöglich übereinstimmen. Für die Untersuchung von mimischer Muskulatur kommen höchstens Affen als Tiermodelle in Frage. Bei Vierbeinern erreicht die Gesichtsmuskulatur nicht den Differenzierungsgrad der Menschen, lediglich bei Affen ist deren Ausbildung ähnlich (Taubert, 1961). Dementsprechend bildet humanes Gewebe tatsächlich immer noch die Basis vieler wissenschaftlicher Arbeiten, weil es noch keine wirklich vergleichbaren Modelle gibt, die diese Verfahrensweise ersetzen könnten (Püschel, 2016).

Bei dieser Arbeit wurde totes Gewebe verwendet, das im Gegensatz zu lebendem Gewebe nicht mehr durchblutet oder innerviert ist. Es konnte daher nur die makroskopische Anatomie untersucht werden und so auf die Innervation geschlossen werden. Die funktionelle Überprüfung der physiologischen Innervation wie sie z.B. bei einer Elektrostimulation möglich wäre, ist leider bei dieser Methode nicht möglich. Nichtsdestotrotz kommt, wie vorher erwähnt, die Präparation an humanen Hemifaces der tatsächlichen menschlichen Anatomie am nächsten.

Der N. facialis wurde bei dieser Arbeit durch die Entfernung der oberen Hautschicht und des darunterliegenden Bindegewebes freigelegt. Dies ermöglicht das Auffinden und Freilegen des Nervs, kann aber dazu führen, dass feinste Nervenäste, die trotz der gewebeschonenden Präparation durchtrennt werden, verloren gehen könnten. Es wurden bei dieser Arbeit keine chirurgischen Mikroskope verwendet, die möglicherweise zu einer noch genaueren Präparation der untersuchten Nerven geführt hätten. Es stellt sich daher die Frage, ob eventuell mit einer unvollständigen Darstellung zumindest der sehr kleinen Nervenäste zu rechnen ist.

Nicht außer Acht zu lassen ist darüber hinaus auch, dass durch unterschiedliche anatomische Präparatoren andere Ergebnisse erzielt werden könnten, da sie unterschiedliche Fertigkeiten und Vorgehensweisen haben. Weil es in dieser Arbeit um eine präzise und individuelle Darstellung der anatomischen Verhältnisse ging, konnten objektive Kriterien für die Auswertung der Ergebnisse angewendet werden.

Im Hinblick auf Übertragbarkeit und Wiederholbarkeit wurden für diesen Versuch standardisierte und systematische Abläufe etabliert und festgelegt. Berücksichtigt wurden hierbei die Präparation, das Fotografieren, das Verarbeiten der Fotos mit den entsprechenden Softwares, sowie die Auswertung der Ergebnisse.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Nomenklatur sowohl der einzelnen Nervenäste als auch der einzelnen Nervenastabschnitte optimiert den Vergleich der Gesichtshälften, da sie systematisch reproduzierbar ist und jeder einzelne Nervenast erfasst werden kann.

Für die Berechnung von Länge und Tiefe der Nervenäste wurden Agisoft und CloudCompare verwendet. Zusätzlich wurden die Markierungen, anhand derer die Softwares die 3D Modelle ausrechnen, vor der Präparation in Form von Schrauben als Referenzpunkte gesetzt. So mussten sie nicht im Nachhinein manuell erfolgen. Außerdem konnte die untersucherabhängige Fehlerquelle bei Messungen weitestgehend ausgeschaltet werden.

Folglich stellen die Präparation von humanen Köpfen und die Auswertung von Nervenastlänge und -tiefe mithilfe von Softwares eine angemessene Methode zur Erläuterung und Darstellung der Variabilität der Innervation des M. zygomaticus major und M. zygomaticus minor dar.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Durch die exakt erfolgte Präparation des M. zygomaticus major, des M. zygomaticus minor, der versorgenden Nervenäste und die Verarbeitung der entsprechenden Fotos durch die Programme Agisoft und CloudCompare soll die Variabilität der nervalen Versorgung der Mm. zygomatici dargestellt werden.

Die hohe Variabilität des Verlaufs des N. facialis, der die Mm. zygomatici versorgt, konnte durch die Auswertung der Ergebnisse gezeigt werden. Das minutiöse Präparieren ermöglichte eine genaue Aussage über Verlauf, Lagebeziehung und Anastomosen der extrakraniellen Nervenäste. Es konnte bei der hier untersuchten Fallzahl eine hohe Variabilität im Nervenverlauf entdeckt werden. Sowohl die einzelnen Präparate als auch die Gesichtshälften eines einzelnen Kopfes zeigten unterschiedliche Verläufe der Rami.

Durch die qualitativ hochwertigen Fotos und deren Verarbeitung konnten detaillierte Darstellungen von Länge und Tiefenverlauf der versorgenden Nervenäste gegeben werden.

Die Nervenastlängen der Präparate waren unterschiedlich. Bei den Präparaten 3, 4 und 5 waren die inserierenden Äste der rechten Seite länger. Lediglich bei Präparat 6 war es umgekehrt. Es konnte beim Tiefenverlauf zwischen allen Präparaten und in ihrem Seitenvergleich eine Variabilität festgestellt werden. Besonders bei Präparat 5 gab es einen sehr großen Unterschied zwischen der linken und rechten Kopfhälfte, was möglicherweise durch ein einseitiges Gesichtsoedem oder aber die postmortale Lagerung erklärbar wäre.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wären daher zusätzliche Informationen bezüglich des Alters, des Körpergewichts, des Geschlechts und der Ethnie von Bedeutung.

Bei der Untersuchung der inserierenden Nervenastanzahl und der Anastomosen wäre die Krankengeschichte (Voroperationen im Präparationsbereich) und bei den Tiefenverhältnissen das Körpergewicht gegebenenfalls von Interesse gewesen. Da es sich aber um anonyme Körperspender handelt, ist es nicht möglich gewesen, entsprechende Daten zu erheben.

Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist es ein besseres Verständnis des Verlaufs der Nervenäste des N. facialis, die die Mm. zygomatici versorgen, zu liefern. So kann diese Arbeit in Zukunft, durch das erworbene genauere anatomische Verständnis, für therapeutische Zwecke (z.B. für Fazialisparese) oder für chirurgische Eingriffe im Gesicht (z.B. Parotidektomie) bedeutsam sein. So lag z.B. bei keinem der zehn Halbköpfe der N. facialis in seinem Verlauf

oberflächlicher als 4 mm und der tiefste Verlauf war kaudal des Arcus zygomaticus.

5.3 Vergleich der Ergebnisse mit bestehender Literatur

Diese Arbeit widmet sich der genauen neuralen Endversorgung der Mm. zygomatici, einem Thema, das ansonsten nur bei Kehrer et al. behandelt worden ist. Es wird in der Studie allerdings weder auf den M. zygomaticus minor, noch auf die Nervenastlänge oder -tiefe eingegangen. Wie in der vorliegenden Arbeit werden eine hohe Variabilität der Innervation festgestellt und die stetige Unterkreuzung des M. zygomaticus major von einem Nervenast. Allerdings beschreiben Kehrer et al. auch den Verlauf von Nervenästen über dem M. zygomaticus major, was bei dieser Arbeit in keinem der 10 untersuchten Halbköpfen gefunden wurde und damit nicht bestätigt werden konnte (Kehrer et al., 2018).

Eine andere Methodik zur Evaluation der Variabilität der Nervenverläufe stellen die perkutane sowie die intraoperative Elektrostimulation der Nervenäste dar. Raslan et al. und De Bonnecaze et al. präparierten mikroskopisch und stimulierten dann bei Patienten intraoperativ im Rahmen von Parotis-Operationen. Raslan et al. stimulierten die verschiedenen Nervenäste lediglich bis zum Vorderrand der Parotis, bei De Bonnecaze werden die Endäste mitstimuliert. Sie stellen fest, dass bei Stimulation des Tr. temporofacialis sowohl die nasale als auch orale Muskulatur kontrahiert. Die Stimulation eines einzelnen Muskels ist nicht möglich, welches wieder für eine starke Auffächerung vor allem der peripheren Nervenäste spricht (De Bonnecaze et al., 2018; Raslan et al., 2017). Raslan et al. elektrostimulieren in einer weiteren Studie 40 Patienten perkutan. Hierbei können in 50 % der Fälle und sogar in 80 %, wenn eine weitere Region mitstimuliert wird, die Mundwinkel nach außen oben gehoben werden (Raslan et al., 2019).

Die retrograde Präparation der Rami wird lediglich bei Chatellier et al. und bei Katz und Catalano im Falle eines Tumors in der Parotis durchgeführt (Chatellier et al. 2013; Katz & Catalano, 1987). Bei Kehrer et al., Mitsukawa et al., Rudolph, Zani et al. wird anterograd von der Parotis aus präpariert (Kehrer et al., 2018; Mitsukawa et al., 2012; Rudolph, 1990; Zani et al., 2003). Auf diese Technik

wurde hier verzichtet, da die Wahrscheinlichkeit, einen Endast der Versorgung der Mm. zygomatici zu übersehen kleiner ist, wenn man von den Muskeln aus retrograd präpariert. Einige Studien verwendeten chirurgische Mikroskope zur Präparation des N. facialis (Choi et al., 2017; Kwak et al., 2004; Mitsukawa et al., 2012 und Tzafetta & Terzis, 2010). Da die Nervenäste ebenfalls ohne Vergrößerung aufzufinden waren, verzichtete man in dieser Arbeit darauf.

Eine Trifurkation des Haupttruncus wie bei Präparat 4 links in dieser Arbeit, wurde lediglich bei Kwak et al. in 13,3% der Fälle beschrieben (Kwak et al., 2004).

Die meisten Arbeiten setzen sich schwerpunktmäßig mit dem Verlauf der Endäste des N. facialis auseinander (Freilinger et al., 1987; Proctor & Arbor, 1984; Tzafetta & Terzis, 2010; Zani et al., 2003). Nur De Bonnezeze et al. und Happak et al. beschreiben außerdem die Anastomosen unter den verschiedenen Rami (De Bonnezeze et al., 2018; Happak et al., 1994).

Verschiedene Arbeiten entwickeln sogar Klassifikationen mit unterschiedlichen Typen des Verlaufs der motorischen Endäste (Davis et al., 1956; Katz und Catalano, 1987; Kwak et al. 2004; Mc Cormack et al., 1945). Trotzdem bleiben in der bestehenden Literatur die Nomenklatur und Definition der verschiedenen Äste immer noch uneinheitlich. So werden z.B. bei Katz und Catalano die Haupttrunci zygomaticotemporalis und cervicomandibularis benannt und bei Tzafetta und Terzis wird der dem R. temporalis entsprechende Nervenast R. frontalis genannt. In der Tat werden sie nicht anhand von systematischen Kriterien festgelegt, sondern orientieren sich an der Richtung des Nervenverlaufs. Zudem werden nur die Hauptäste benannt, weitere Verzweigungen oder Abgänge werden nicht näher beschrieben oder benannt. Teilweise werden die Nervenäste über virtuelle Linien an der Hautoberfläche definiert (Chatellier et al., 2013; Zani et al., 2003). Bei Zani et al. befinden sich die Rr. buccales zwischen zwei Linien, die eine vom unteren Tragus bis zur Nasenmitte, die andere vom unteren Tragus bis 1 cm kaudal der oralen Kommissur ziehend (Zani et al., 2003). Infolgedessen war es in dieser Arbeit notwendig eine neue eigene Nomenklatur zu entwickeln um die Innervation der Mm. zygomatici ausreichend beschreiben zu können. Da eine sehr große Variabilität der Innervation festgestellt wurde, beschränkte man sich auf das schematische Benennen der Äste ohne Eigennamen.

Wie bei De Bonnacaze et al., Rudolph und Tzafetta & Terzis wurde bei dieser Untersuchung ebenfalls festgestellt, dass die Verläufe der Rami des N. facialis auch bei beiden Gesichtshälften eines Präparates variieren (De Bonnacaze et al., 2018; Rudolph, 1990; Tzafetta & Terzis 2010).

Lediglich Hembd et al beschäftigten sich auch mit der inserierenden Nervenastanzahl in den M. zygomaticus major In der Arbeit von Hembd et. al. trat durchschnittlich ein Nervenast weniger in den M. zygomaticus major ein (2,5 versus 3,6) als bei dieser Arbeit. Dies ist wohl aus dem Umstand erklärbar, dass der Fokus der Arbeit von Hembd et al mehr auf der histologischen Auswertung der Axonanzahl lag und nicht so sehr auf der Innervation der Mm. zygomatici (Hembd et al., 2017), so dass bei der Präparation eventuell einzelne Endäste übersehen wurden.

Die Tiefenverhältnisse des N. facialis wurden bei Rudolph mit einer Fallzahl von 12 Gesichtshälften untersucht. In dieser Studie wurde die Dicke der bis zu den Nerven präparierten Hautlappen mithilfe eines Lineals gemessen. Der R. zygomaticus lag bei $9,2 \pm 2,2$ mm und der R. buccalis bei $9,6 \pm 2,0$ mm. Bei der vorliegenden Arbeit wurde lediglich der tiefste Punkt des Nervenverlaufs und die durchschnittliche Tiefe alle Äste mit Hilfe von CloudCompare und Agisoft kalkuliert, die durchschnittlich bei 8,38 mm lag. Die Tiefenverhältnisse sind demnach ähnlich wie bei Rudolph et al. (Rudolph, 1990).

Die vergleichende Analyse der bestehenden Literatur zeigt, dass sich diese Arbeit im Gegensatz zur bestehenden Literatur als einzige mit der genauen nervalen Versorgung beider Mm. zygomatici auseinandersetzt. Außerdem werden zum ersten Mal die Methode der Photogrammetrie mit der Software Agisoft, wie zu 3D-Vermessung die Software CloudCompare benutzt, um Nervenastlänge und Nervenasttiefe zu bestimmen, sodass die vorliegende Arbeit in ihrer Vorgehensweise neu und in ihrer Ergebnissicherung verlässlich ist.

6 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit setzt sich mit der Variabilität der Innervation der Mm. zygomatici major und minor durch den N. facialis auseinander. Die bestehende Literatur widmet sich bisher weder dem detaillierten Verlauf der versorgenden Nervenäste noch der genauen Innervation beider Muskeln.

In diesem Rahmen wurden zehn humane Gesichtshälften sorgfältig von den Mm. zygomatici in Richtung Gl. parotis präpariert, um den Verlauf der versorgenden Nerven erkennbar zu machen. Es wurde eine systematische Nomenklatur zur Benennung der einzelnen Äste entwickelt. Die Präparate wurden zur Dokumentation vor und nach der Präparation fotografiert. Die Fotos wurden erst mithilfe von Agisoft in Punktwolken gewandelt und Letztere schließlich mithilfe von CloudCompare verglichen, um Tiefe und Länge der Nervenäste zu ermitteln.

Insgesamt kann man sagen, dass der Verlauf der Nervenäste und die Innervation der Mm. zygomatici sehr variabel sind. In der Tat erwies sich der Nervenverlauf bei allen zehn Präparaten unterschiedlich. Allerdings wurde der M. zygomaticus major immer von mindestens einem Nervenast unterkreuzt, der den M. zygomaticus minor oder den M innervierte. Nur bei einer von zehn Gesichtshälften teilte sich der Haupttruncus in drei Äste auf, bei den Restlichen neun in zwei Äste. Die Versorgung der Mm. zygomatici entsprang bei sechs von zehn Kopfhälften aus beiden Ästen, bei den anderen vier nur aus dem kranialen. Die inserierende Nervenastanzahl zeigte auch keine Konstanz. Sie variierte beim M. zygomaticus major zwischen drei und fünf und beim M. zygomaticus minor zwischen einem und zwei Ästen.

Auch bei Nervenastlänge und -tiefe konnte eine große Variabilität zwischen den Präparaten und sogar zwischen den beiden Gesichtshälften eines Präparates festgestellt werden. Die durchschnittliche Länge betrug 71 mm (min. 41 mm, max. 111 mm), die durchschnittliche Tiefe 8 mm (min. 36 mm, max. 90 mm). Allerdings waren die unterschiedlichen Werte breit gestreut (Länge von 41 bis 111 mm, tiefster Punkt von 36 bis 90 mm).

Auch die Anastomosen zwischen den in die Mm. zygomatici inserierenden Ästen zeigten eine hohe Variabilität. Bei sieben von zehn Hemifaces gab es eine, bei einer von zehn zwei und bei zwei Kopfhälften gab es gar keine Anastomosen.

6.1 Summary

The present dissertation deals with the variability of the innervation of the major and minor zygomatic muscle through the facial nerve. The existing literature does not concentrate on the detailed course of the supplying nerve branches nor on the exact innervation of both muscles.

Within this work, ten human hemifaces were carefully dissected from the zygomatic muscles towards the parotid gland to reveal the course of the supplying nerve branches. A systematic nomenclature was then developed to name every individual nerve branch. The faces were also photographed before and after the dissection for documentation. The photos were first transformed into pointclouds using Agisoft and eventually these clouds were compared using CloudCompare to determine the depth and length of the different nerve branches.

Overall, the course of the nerve branches and innervation of the zygomatic muscles are very variable. Indeed, the course of the branches is different for all the faces. However, the major zygomatic muscle is always crossed under by at least one nerve branch to supply the minor zygomatic or orbicularis oculi muscle. Only in one case the main trunk divided into three nerves, in the rest of the cases into two. In six out of ten hemifaces, the supply of the muscles came from both bundles, in the other four only from the cranial one. Even the number of inserting nerve branches showed no regularity. It varied between three to five branches for the major zygomatic and between one and two for the minor muscle.

The nerve branch lengths and depths also showed a large variability between the face halves. The average length was 71 mm, the average depth 8 mm. However, the values were widely scattered (length between 41 and 111 mm, lowest point between 36 and 90 mm).

Finally the anastomoses between the nerve branches inserting into the muscles showed a high variability. Seven out of ten hemifaces had one anastomosis, one out of ten had two and two head halves had no anastomoses at all.

7 Literaturverzeichnis

- Agisoft. 2016. PhotoScan User Manual. Professional Edition, Version 1.2. [Online im Internet.] URL: https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf . [Stand: 20.07.2018, 18:30].
- Aumüller, G., Aust, G., Conrad, A., Engele, J., Kirsch, J. 2014. Duale Reihe Anatomie, 3. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- Baker, D.S. & Conley, J. 1979. Avoiding Facial Nerve Injuries in Rhytidectomy Anatomical Variations and Pitfalls. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 64(6): 781–795.
- Captier, G., Canovas, F., Bonnel, F., & Seignarbieux, F. 2005. Organization and microscopic anatomy of the adult human facial nerve: anatomical and histological basis for surgery. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 115(6): 1457-1465.
- Chatellier, A., Labbé, D., Salamé, E. & Bénateau, H. 2013. Skin reference point for the zygomatic branch of the facial nerve innervating the orbicularis oculi muscle (anatomical study). *Surgical and Radiologic Anatomy*, 35(3): 259–262.
- Choi, Y., Kang, H.G., Nam, Y.S., Kang, J.-G. & Kim, I.B. 2017. Facial Nerve Supply to the Orbicularis Oculi around the Lower Eyelid: Anatomy and its Clinical Implications. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 140(2): 261–271.
- Davis, R., Anson, B., Budinger, J. & Kurth, L.R. 1956. Surgical anatomy of the facial nerve and parotid gland based upon a study of 350 cervicofacial halves. *International Journal of Gynecology and Obstetrics*, 102(4): 10–12.
- De Bonnecaze, G., Vergez, S., Chaput, B., Vairel, B., Serrano, E., E Chantalat, E. & Chaynes, P. 2018. Variability in facial-muscle innervation: A comparative study based on electrostimulation and anatomical dissection. [Online im Internet.] URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ca.23081>. [Stand: 10.01.2019, 17:00].

- Diamond, M., Wartmann, C.T., Tubbs, R.S., Shoja, M.M., Cohen-Gadol, A. a & Loukas, M. 2011. Peripheral facial nerve communications and their clinical implications. *Clinical anatomy (New York, N.Y.)*, 24(1): 10–18.
- Freilinger, G., Gruber, H., Happak, W. & Pechmann, U. 1987. Surgical anatomy of the mimic muscle system and the facial nerve: importance for reconstructive and aesthetic surgery. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 80(5): 686–90.
- Freilinger, G., Happak, W., Burggasser, G. & Gruber, H. 1990. Histochemical mapping and fiber size analysis of mimic muscles. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 86(3): 422–428.
- Frigerio, A., Heaton, J.T., Cavallari, P., Knox, C., Hohman, S.H.& Hadlock, T.A. 2015. Electrical Stimulation of Eye Blink in Individuals with Acute Facial Palsy: Progress toward a Bionic Blink. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 136(4): 515-523.
- Furnas, D.W. 1965. Landmarks for Trunk and Temporofacial Division of Facial Nerve. *British Journal of Surgery*, 52(9): 694-696.
- Goodmurphy, C. W., & Ovalle, W. K. (1999). Morphological study of two human facial muscles: orbicularis oculi and corrugator supercilii. *Clinical Anatomy*, 12(1): 1-11.
- Happak, W., Burggasser, G., Liu, J., Gruber, H. & Freilinger, G. 1994. Anatomy and Histology of the Mimic Muscles and the Supplying Facial Nerve. *Eur Arch Otorhinolaryngol*: 85–86.
- Happak, W., Liu, J., Burggasser, G., Flowers, A., Gruber, H. & Freilinger, G. 1997. Human facial muscles: Dimensions, motor endplate distribution, and presence of muscle fibers with multiple motor endplates. *Anatomical Record*, 249(2): 276–284.
- Hembd, A., Nagarkar, P.A., Saba, S., Wan, D., Kutz, J.W, Isaacson, B., Gupta, S., White, C.L.^{3rd}, Rohrich R.J. & Rozen, S.M. 2017. Facial nerve axonal analysis and anatomical localization in donor nerve: optimizing axonal load for cross-facial nerve grafting in facial reanimation. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 139(1): 177-183.

- International Anatomical Nomenclature Committee, Anatomists ICo. 1989. Nomina anatomica : authorised by the Twelfth International Congress of Anatomists in London.
- Katz, A.D. & Catalano, P. 1987. The Clinical Significance of the Various Anastomotic Branches of the Facial Nerve. *Archives of Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 113(9): 959–962.
- Kehrer, A., Engelmann, S., Bauer, R., Taeger, C., Grechenig, S., Kehrer, M., Prantl, L., Tamm, E.R., Bleys, R.L.A.W. & Mandlik, V. 2018. The nerve supply of zygomaticus major: Variability and distinguishing zygomatic from buccal facial nerve branches. *Clinical Anatomy*, 32: 480–488.
- Kessler, J., Moriggl, B. & Grau, T. 2014. Ultrasound-guided regional anesthesia : learning with an optimized cadaver model. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 36(4): 383–392.
- Kwak, H.H., Park, H.D., Youn, K.H., Hu, K.S., Koh, K.S., Han, S.H. & Kim, H.J. 2004. Branching patterns of the facial nerve and its communication with the auriculotemporal nerve. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 26(6): 494–500.
- Lin, A.I.C., Braun, T., McNamara, J.A. & Gerstner, G.E. 2013. Esthetic evaluation of dynamic smiles with attention to facial muscle activity. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 143(6): 819–827.
- Mavrikakis, I. 2008. Facial Nerve Palsy : Anatomy , Etiology , Evaluation , and Management. *Orbit*, 27(6): 466–474.
- McCormack, L.J., Cauldwell E.W. & Anson, B.J. 1945. The surgical anatomy of the facial nerve with special reference to the parotid gland. *International Journal of Gynecology and Obstetrics*, 80: 620-630.
- Mitsukawa, N., Moriyama, H., Shiozawa, K. & Satoh, K. 2012. Study on the terminal branches of the facial nerve in mimetic muscles (orbicularis oculi muscle and orbicularis oris muscle). *Journal of the Showa Medical Association*, 72(6): 656–661.
- Monkhouse, W.S. 1990. The anatomy of the facial nerve. *Ear, nose and throat journal*, 69(10): 677–683, 686–687.

- Moore, K., Persaud, T.V.N., Torchia, M.G. 2013. Embryologie: Entwicklungsstadien- Frühentwicklung - Organogenese - Klinik, 6. Auflage, Elsevier GmbH, Urban&Fischer Verlag, München.
- Proctor, B. & Arbor, A. 1984. The extratemporal facial nerve. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 92(5): 537–545.
- Püschel, K. 2016. Lehre und Forschung an Verstorbenen. *Rechtsmedizin*, 26 (2): 115–119.
- Raslan, A., Guntinas-Lichius, O. & Volk, G.F. 2019. Altered facial muscle innervation pattern in patients with postparetic facial synkinesis. *Laryngoscope*, [Online im Internet.] URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/lary.28149>. [Stand: 20.03.2020, 15:30].
- Raslan, A., Volk, G.F., Möller, M., Stark, V., Eckhardt, N. & Guntinas-Lichius, O. 2017. High Variability of Facial Muscle Innervation by Facial Nerve Branches: A Prospective Electrostimulation Study. *Laryngoscope*, 127:1288–1295.
- Rudolph, R. 1990. Depth of the facial nerve in face lift dissections. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 85(4), 537-544.
- Salinas, N.L., Jackson, O., Dunham, B., & Bartlett, S.P. 2009. Anatomical dissection and modified Sihler stain of the lower branches of the facial nerve. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 124(6): 1905-1915.
- Spiegel, J.H. & De Rosa, J. 2005. The anatomical relationship between the orbicularis oculi muscle and the levator labii superioris and zygomaticus muscle complexes. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 116(7): 1937-1942.
- Taubert, H. 1961. Untersuchungen zur Mimik der Rhesusaffen unter Berücksichtigung der Muskelanatomie. *Zeitschrift für Säugetierkunde*, 28: 228-241.
- Tzafetta, K. & Terzis, J.K. 2010. Essays on the facial nerve: Part I. Microanatomy. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 125(3): 879–889.

Valls-Solé, J. 2007. Electrodiagnostic studies of the facial nerve in peripheral facial palsy and hemifacial spasm. *Muscle nerve*, 36(1):14-20.

Volk, G.F., Hagen, R., Pototschnig, C., Friedrich, G., Nawka, T., Arens, C., Guntinas-Lichius, O. 2012. Laryngeal electromyography: a proposal for guidelines of the European Laryngological Society. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 269(10): 2227-2245.

Waller, B.M., Cray, J.J. & Burrows, A.M. 2008. Selection for universal facial emotion. *Emotion*, 8(3): 435-439.

Zani, R., Fadul, R., Da Rocha, M. a D., Santos, R. a, Alves, M.C. a & Ferreira, L.M. 2003. Facial nerve in rhytidoplasty: anatomic study of its trajectory in the overlying skin and the most common sites of injury. *Annals of Plastic Surgery*, 51(3): 236–242.

8 Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
AR	Augenrand
cm	Zentimeter
Gl.	Glandula
H.E.	Hämatoxylin-Eosin-Färbung
l	Liter
M.	Musculus
max.	Maximum
MEPs	motorische Endplatten
Mi	Musculus zygomaticus minor
min.	Minimum
mm	Millimeter
Mm.	Musculi
MOO	Musculus orbicularis oculi
M.zyg.maj.	Musculus zygomaticus major
M.zyg.min.	Musculus zygomaticus minor
N.	Nervus
Ncl.	Nucleus
R.	Ramus
Rr.	Rami
SA	supraaurikulär
SM	Stirnmitte
Tr.	Truncus
z.B.	zum Beispiel
3D	dreidimensional

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verlauf des N. facialis im Felsenbein (Schünke et al., 2012)	6
Abbildung 2: extrakranieller Verlauf des N. facialis (Freilinger et al., 1987)	7
Abbildung 3: A) Muskelanlagen in den Schlundbögen. B) Darstellung der von den Schlundbögen abstammenden Muskeln (Moore et al., 2013).....	11
Abbildung 4: Acetylcholinesterase markierte MEPs im M.zyg.maj. (Happak et al., 1997).....	12
Abbildung 5: Oberflächliche Schicht des seitlichen Kopfes (Schünke et al., 2012)	14
Abbildung 6: Nervenverläufe in Typ I (links), II (Mitte) und Typ IIIA (rechts oben), IIIB (links oben), IIIC (unten). T steht für R. temporalis, Z für R. zygomaticus, B für R. buccalis, M für R. mandibularis, C für R. cervicalis (Katz & Catalano, 1987)	17
Abbildung 7: Nervenverläufe in Typ VIA (links), VIB (Mitte) und V (rechts). T steht für R. temporalis, Z für R. zygomaticus, B für R. buccalis, M für R. mandibularis, C für R. cervicalis (Katz & Catalano, 1987)	17
Abbildung 8: Nervenverläufe Typ I, II, III, IV (Kwak et al., 2004).....	18
Abbildung 9: gewählte Präparation: vom M. zygomaticus major (1) aus zur Gl. parotidea (3) hin (2) und zum M. zygomaticus minor (4)	21
Abbildung 10: schematische Darstellung des Hautschnitts	22
Abbildung 11: Präparation des N. facialis	24
Abbildung 12: Referenzschrauben (*)	25
Abbildung 13: Beispiel Nomenklatur der Nervenäste (Präparat 6 links).....	27
Abbildung 14: Punktwolke	28
Abbildung 15: Agisoft Gittermodell	29
Abbildung 16: Agisoft Textur	30
Abbildung 17: Agisoft Referenzpunkte und Distanzen	31
Abbildung 18: Punktwolke im CloudCompare.....	32
Abbildung 19: zwei unangepasste Punktwolken.....	33
Abbildung 20: zwei angepasste Punktwolken.....	33
Abbildung 21: zwei Punktwolken mit den Distanzen.....	34
Abbildung 22: Nervenverlauf Präparat 1 rechts. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.....	36

Abbildung 23: Nervenverlauf Präparat 2 rechts. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.....	37
Abbildung 24: Nervenverlauf Präparat 3 links. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.	37
Abbildung 25: Nervenverlauf Präparat 3 rechts. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.....	38
Abbildung 26: Nervenverlauf Präparat 4 links. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.	38
Abbildung 27: Nervenverlauf Präparat 4 rechts. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.....	39
Abbildung 28: Nervenverlauf Präparat 5 links. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.	39
Abbildung 29: Nervenverlauf Präparat 5 rechts. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.....	40
Abbildung 30: Nervenverlauf Präparat 6 links. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.	40
Abbildung 31: Nervenverlauf Präparat 6 rechts. Nervenverlauf in blau. Muskeln in rot.....	41
Abbildung 32: Unterkreuzung () des M.zyg.maj. Präparat 6 links	41
Abbildung 33: Grafik: Nervenastlängen Präparate 1, 3 und 4.....	48
Abbildung 34: Grafik: Nervenastlängen Präparate 5 und 6.....	49
Abbildung 35: Grafik Tiefe der Nervenverläufe der Präparate 3,4,5 und 6.....	50
Abbildung 36: Anastomose 1.2.2.2+(1.2.3) Präparat 3 rechts	52
Abbildung 37: Anastomose 2.2.2+(3.1) Präparat 4 links.....	52

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht mimische Muskulatur (Aumüller et al., 2014)	8
Tabelle 2: Kameraeinstellung.....	26
Tabelle 3: Distanzen zwischen den Referenzpunkten	35
Tabelle 4: Nomenklatur und Aufteilung der Nervenäste	42
Tabelle 5: Nervenastanzahl nach Muskel.....	46
Tabelle 6: Länge der Nervenäste	47
Tabelle 7: Tiefenverhältnisse	50
Tabelle 8: Anastomosenzahl und durch Anastomose versorgter Muskel.....	51

11 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Dissertation unterstützt haben.

Insbesondere gilt mein Dank den folgenden Personen, ohne deren Hilfe die Anfertigung dieser Doktorarbeit niemals zustande gekommen wären:

Mein Dank gilt zunächst meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. med. Hess, für die Betreuung dieser Arbeit sowie der freundlichen Hilfe und Unterstützung.

Auch danke ich Herr Priv.-Doz. Dr. med. habil. Volk für die mühevollen Arbeit des Korrekturlesens, sowie die wissenschaftliche Betreuung als auch die Hilfsbereitschaft, die mir stets eine große Unterstützung waren. Insbesondere der konstruktive Austausch und die regelmäßigen Gespräche auf fachlicher und persönlicher Ebene waren stets eine große Hilfe für mich und haben mich stets positiv beeinflusst und ermutigt.

Ich danke außerdem Prof. Klaus Püschel für die Bereitstellung der Präparate.

Mein Dank gilt ebenfalls meinen Mitdoktoranden Vera Hurler, Pirmin Schwarz und Hannes Wegscheider. Die Zusammenarbeit bei der Präparation, Dokumentation und der rege Austausch von Ideen waren eine große Unterstützung bei der Gestaltung und Ausarbeitung der Dissertation.

Meiner Mutter möchte ich besonders herzlich danken für die aufmerksame, liebevolle und vielseitige Unterstützung während des Verfassens dieser Arbeit und während meines gesamten Studiums. Dies war stets ein großer Rückhalt für mich, der als wichtiger Teil zum Erfolg meines Studiums beigetragen hat.

12 Annahmevermerk

Angenommen von der Medizinischen Fakultät am: 26.10.2020

Veröffentlicht mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität
Hamburg

Prüfungsausschuss, der Vorsitzende: PD Dr. Arne Böttcher

Prüfungsausschuss, 2. Gutachter: Prof. Dr. Markus Hess

13 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: