

**Magnetresonanztomographie zur
Quantifizierung der mimischen Muskulatur
von Probanden**

-

Erstellung einer Segmentierungsanleitung

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Schiller-Universität Jena

von Anika Meyer

geboren am 20.12.1990 in Erfurt

Gutachter:

1. Prof. Dr. Orlando Guntinas-Lichius, Jena
2. Prof. Dr. Jürgen Reichenbach, Jena
3. Prof. Dr. Dirk Beutner, Köln

Tag der öffentlichen Verteidigung: 02. Februar 2016

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 Einleitung	3
1.1 Die mimische Muskulatur.....	3
1.2 Ätiologie der peripheren Fazialisparese und diagnostische Kriterien	7
1.3 Magnetresonanztomographie	9
1.3.1 MP-RAGE Sequenz	11
1.3.2 VIBE Sequenz	12
1.4 Magnetresonanztomographische Darstellung der mimischen und Kaumuskulatur....	12
1.5 Die 3D-Segmentierung	13
2 Ziele der Arbeit	15
3 Material und Methoden	16
3.1 Orientierungsphase	16
3.1.1 Untersuchung der mimischen Muskulatur im MRT	17
3.1.2 3D- Segmentierung der mimischen Muskulatur	18
3.1.2.1 MITK.....	18
3.1.2.2 Segmentierungsparameter und Vorgehen.....	19
3.1.2.3 Kontrast, Helligkeit	20
3.1.2.4 Abgrenzung	20
3.1.2.5 Reihenfolge und Farbe.....	21
3.2 MRT, CT, Sonographie und Präparation eines anatomischen Präparates	23
3.2.1 Präparation der mimischen Muskulatur	25
3.2.2 Auswahl der Kennmuskeln	27
3.3 Standardisierte Segmentierung	29
3.4 Segmentierung der MRT-Datensätze von acht Probanden.....	34
3.5 Statistik	34
4 Ergebnisse	36
4.1 Erkenntnisse aus der Präparation	36
4.1.1 Form und Lage des M. orbicularis oculi	36
4.1.2 Form und Lage der Mm. zygomatici.....	37
4.1.3 Ausdehnung des M. depressor anguli oris	38
4.1.4 Abgrenzung und Ausdehnung der einzelnen Muskeln in der Kinnregion	39
4.1.5 Im MRT bislang nicht segmentierte Muskeln.....	40
4.2 Darstellbarkeit der mimischen Muskeln	41
4.3 Segmentierungsanleitung.....	45
4.4 Interobserver-Reliabilität	47

Inhaltsverzeichnis

4.4.1	Nutzen der Segmentierungsanleitung.....	47
4.5	Unterschiede zwischen den Untersuchern	50
4.6	Zeitaufwand	51
5	Diskussion	55
5.1	Untersuchung der mimischen Muskulatur im MRT-Datensatz	55
5.2	Identifikation der einzelnen mimischen Muskeln im MRT-Datensatz.....	57
5.3	Klinische Anwendbarkeit der Methode	60
5.4	Vergleich MRT, CT, Sonographie.....	64
5.5	Segmentierungsanleitung.....	69
5.6	Interobserver-Reliabilität und Zeitaufwand der Methode.....	71
5.7	Grenzen der Methode, Optimierungsmöglichkeiten, Zukunftsperspektiven	73
6	Schlussfolgerung.....	76
7	Literaturverzeichnis.....	77
8	Anhang	82
8.1	Danksagung.....	82
8.2	Lebenslauf.....	83
8.3	Ehrenwörtliche Erklärung	84

Anleitung zur quantitativen Segmentierung der mimischen Muskulatur im MRT

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

A./Aa.	Arteria/Arteriae	min	Minute
Abb.	Abbildung	MITK	Medical Imaging Interaction Toolkit
A.M.	Anika Meyer	mm	Millimeter
BUC	M. buccinator	mm ²	Quadratmillimeter
bzw.	beziehungsweise	MP-RAGE	magnetization prepared rapid gradient-echo
CT	Computertomographie	MRT	Magnetresonanz- tomographie
CR	M. corrugator supercilii	ms	Millisekunde
DAO	M. depressor anguli oris	n	Anzahl
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine	N./Nn.	Nervus/Nervi
DLI	M. depressor labii inferioris	NAS	M. nasalis
EMG	Elektromyographie	Ncl./Ncll.	Nucleus/Nuclei
ENoG	Elektroneurographie	OOC	Musculus orbicularis oculi
FLASH	Fast low angle shot	OOR	Musculus orbicularis oris
FRO	Musculus frontalis	p-Wert	Signifikanzwert
Gl.	Glandula	Proc.	Processus
h	Stunde	R./ Rr.	Ramus/ Rami
HF-Impuls	Hochfrequenzimpuls	re.	rechts
ICC	Intra Class Correlation	ROI	Region of Interest
IDIR	Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie	RMS	root mean square
inf.	inferioris	SNR	Signal-Rausch-Verhältnis
li	links	sog.	sogenannte
J.D.	Josefine Druse	SPSS	Statistical Package of the Social Sciences
M./Mm.	Musculus/Musculi	sup.	superioris
M _z	longitudinale Magnetisierung	TA	Time to Acquisition (= Akquisitionszeit)
M _{xy}	transversale Magnetisierung	Tab.	Tabelle
MAS	M. masseter	TE	Time to Echo (= Echozeit)
MB	Megabyte	TEM	Musculus temporalis
MEN	M. mentalis		

Abkürzungsverzeichnis

TR	Time to Repetition (= Repetitionszeit)
u.a.	unter anderem
v.a.	vor allem
VIBE	Volume Interpolated Breathhold Examination
V	Volumen
z.B.	zum Beispiel
ZMA	M. zygomaticus major
ZMI	M. zygomaticus minor
3D	dreidimensional
2D	zweidimensional

Zusammenfassung

Seit mindestens 15 Jahren gab es immer wieder Versuche, die mimische Muskulatur mit Hilfe der Magnetresonanztomographie (MRT) darzustellen und zu segmentieren, um die quantitative Analyse in die Diagnostik und Verlaufskontrolle von verschiedenen Erkrankungen, wie periphere Fazialisparese oder Lippen-Kiefer-Gaumen-Spalten, zu integrieren (Kleinheinz u. Joos 2001; Kaylie et al. 2003; Gargiulo et al. 2011b; Volk et al. 2014a). Doch die 3D-Segmentierung der mimischen Muskulatur wurde als zeitaufwändig und aufgrund der geringen Größe und der fehlenden Faszien als sehr subjektiv beschrieben (Rezaeitabar u. Ulusoy 2012). Die Genauigkeit der publizierten Ergebnisse konnte aufgrund fehlender Kontrollen zur sicheren Identifikation der Muskeln in der Literatur bisher nicht ausreichend bewertet werden (Volk et al. 2014a). Daher zielte die vorliegende Arbeit auf eine Evaluation und Optimierung der MRT zur quantitativen Untersuchung der mimischen Muskulatur und Verifizierung am Goldstandard der anatomischen Präparation. Das so gewonnene Wissen sollte darauf mit einer online verfügbaren Segmentierungsanleitung klinisch und wissenschaftlich nutzbar gemacht werden.

Mit einer 12-Kanal Kopfspule wurden in einem 3 Tesla MRT Gerät (Magnetom Tim Trio, Siemens, Erlangen) jeweils der Kopf von einem Körperspender und drei gesunden Probanden aufgenommen. Das Untersuchungsprotokoll beinhaltete eine 3D T₁-gewichtete MP-RAGE-Sequenz sowie eine coronare VIBE-Sequenz. Alle identifizierbaren mimischen Muskeln sowie die Mm. masseter et temporalis wurden durch zwei Untersucher (A.M. und J.D.) unabhängig voneinander segmentiert sowie die Grauwerte und Volumina ermittelt. Neben der MRT-Messung erfolgte am Körperspender außerdem eine Computertomographie (CT) und eine sonographische Messung, um die Methoden in Bezug auf die Darstellbarkeit der mimischen Muskeln vergleichen zu können. Zum Zwecke der qualitativen und quantitativen Evaluierung wurde die fixierte mimische Muskulatur desselben Körperspenders anatomisch präpariert und diese Ergebnisse vermessen. Durch die Präparation konnten 15 mimische Muskeln von insgesamt 19 in dieser Gesichtsregion beschriebenen Muskeln dargestellt werden. Durch Vergleich der MRT-Daten mit den Ergebnissen der Präparation konnte die korrekte Identifikation und Segmentierung der Muskeln erstmalig sichergestellt werden. Mit hoher Reproduzierbarkeit konnten neun der Muskeln in den MRT-Datensätzen des Körperspenders als auch der drei Probanden aufgefunden werden. Als Ergebnis können die nachfolgenden Kennmuskeln für zukünftige Segmentierungen empfohlen werden: M.

mentalis, M. depressor anguli oris, M. corrugator supercilii, M. zygomaticus major, M. orbicularis oculi, M. orbicularis oris, M. levator labii sup., M. nasalis sowie der M. buccinator. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde eine online frei zugängliche Anleitung zur standardisierten Segmentierung der mimischen Muskulatur erstellt, die unter **www.facial.muscles.wiki** zur Verfügung steht.

Abschließend wurde auf der Grundlage dieser neu erstellten Segmentierungsanleitung die Muskulatur von fünf weiteren Probanden von zwei Untersuchern unabhängig voneinander segmentiert und sich dabei streng an diese Anleitung gehalten. Der signifikante Anstieg der Interobserver-Reliabilität und die signifikante Verringerung des Zeitaufwandes für die Segmentierung durch Anwendung der Segmentierungsanleitung verdeutlichten den qualitativen als auch quantitativen Nutzen der Anleitung.

Die entwickelte Segmentierungsanleitung ermöglicht eine effiziente nicht-invasive Quantifizierung der Volumina der mimischen Muskulatur. Damit ist der Grundstein für eine präzisere Diagnostik pathologischer Veränderungen durch bspw. Fazialispareesen oder angeborene Fehlbildungen gelegt worden.

1 Einleitung

1.1 Die mimische Muskulatur

Das System der mimischen Muskulatur des Menschen setzt sich aus insgesamt 23 Muskeln zusammen (Zilles et al. 2010). Sie sind Derivate des zweiten Pharyngealbogens (Hyoidbogen) und werden vom N. facialis innerviert (Bentsianov u. Blitzer 2004). Sie wanderten im Laufe der Entwicklung von ihrer ursprünglichen Lage am Zungenbein flächenhaft über den Kopf (Frühwald 1988). Die mimischen Muskeln haben ihren Ursprung an Knochen oder Knorpel, inserieren jedoch mit elastischen Sehnen direkt in die Subkutis oder Lederhaut und sind mit Ausnahme des M. buccinator von keiner Faszie umgeben. Bei der Kontraktion kommt es so zu Hautverschiebungen und es entstehen Hautfalten (Schiebler u. Korf 2007). So können die mimischen Muskeln einen individuellen Gesichtsausdruck, die Mimik, hervorrufen. Die Mimik ist von großer Bedeutung für die verbale und non-verbale Kommunikation und das Ausdrücken von Emotionen (Marur et al. 2014). So zieht der M. corrugator supercilii den medialen Teil der Augenbrauen nach unten und sorgt damit für einen zornigen Gesichtsausdruck. Der M. zygomaticus major wiederum ist mit dem Heraufziehen des Mundwinkels mitverantwortlich für ein Lächeln. Des Weiteren haben die mimischen Muskeln besonders im Bereich des Auges eine wichtige Schutzfunktion. So kommt es durch die Kontraktion des M. orbicularis oculi zum Verschluss der Lidspalte, welche das Auge zum einen vor Fremdkörpern schützt und außerdem das Austrocknen der Konjunktiva durch die ständige Erneuerung des Tränenfilms verhindert. Darüber hinaus ermöglichen sie wichtige physiologische Funktionen wie die Nahrungsaufnahme oder die Artikulation (Zilles et al. 2010). Nicht alle mimischen Muskeln müssen bei jedem Menschen angelegt sein. Einige der Muskeln, vor allem im Bereich des Ohres und der Nase, sind beim Menschen nur noch rudimentär entwickelt. Es sind nur die Muskeln konstant angelegt, die essentiell sind für Schutzfunktionen sowie die Expression der universellen Basisemotionen (Freude, Traurigkeit, Angst, Wut, Überraschung, Ekel) (Ekman 1993; Waller et al. 2008). Zu diesen gehören der M. frontalis, M. orbicularis oculi, M. zygomaticus major, M. orbicularis oris sowie der M. depressor anguli oris. Alle anderen Muskeln sind für den Ausdruck der Basisemotionen nicht zwangsläufig erforderlich und daher nicht bei jedem Menschen angelegt oder sie zeigen große Seitendifferenzen (Goktepe et al. 2004; Waller et al. 2008). Tab. 1 gibt einen Überblick über die Anatomie der mimischen Muskulatur und der Kaumuskulatur.

Einleitung

Muskel	Ursprung/Ansatz	Innervation/Blutversorgung	Funktion
M. depressor septi nasi	Ursprung oberhalb des Proc. alveolaris des ersten Schneidezahnes Ansatz knorpeliger Teil des Nasenseptums	Innervation ▪ Rr. zygomatici und buccales des N. facialis Blutversorgung ▪ A. labialis superior der A. facialis	Herabziehen der Nasenspitze und Erweiterung der Nasenlöcher
M. levator labii superioris alaeque nasi	Ursprung Proc. frontalis des Maxilla, Margo infraorbitalis Ansatz Oberlippe, Haut der Nasenflügel	Innervation ▪ Rr. zygomatici des N. facialis Blutversorgung ▪ A. infraorbitalis der A. maxillaris ▪ A. labialis superior und Äste der A. angularis der A. facialis	Anheben von Nasenflügel und Oberlippe, Erweiterung der Nasenöffnung
Muskeln im Bereich des Mundes			
M. orbicularis oris	Ursprung Jugum alveolare des oberen und des unteren Eckzahnes Ansatz Haut der Ober- und Unterlippe	Innervation ▪ Rr. zygomatici des N. facialis im Bereich der Oberlippe ▪ Rr. buccales des N. facialis im Bereich des Mundwinkels ▪ R. marginalis mandibulae des N. facialis im Bereich der Unterlippe Blutversorgung ▪ Aa. labiales superior und inferior der A. facialis	Gesamter Muskel: Verengen und Schließen der Mundöffnung, Erzeugen der Lippenspannung Alleinige Kontraktion der Pars marginalis: Einziehen des Lippenrotanteils nach innen Alleinige Kontraktion des Pars labialis: Vorwölben der Lippen
M. buccinator	Ursprung Proc. alveolaris maxillae im Bereich der Molaren, Crista buccinatoria im Bereich der Unterkiefermolaren Ansatz Modiolus anguli oris, über dem M. orbicularis oris in der Ober- und Unterlippe	Innervation ▪ Rr. buccales des N. facialis Blutversorgung ▪ Äste der A. facialis und der A. temporalis superficialis ▪ A. buccalis und A. alveolaris superior posterior der A. maxillaris	Beteiligung am Kauakt, indem er die Speise aus dem Mundvorhof zwischen die Zahnreihen und in die Mundhöhle schiebt. Erzeugung der Wangen- und Lippenspannung.
M. zygomaticus major	Ursprung Os zygomaticum vor der Sutura zygomaticotemporalis Ansatz Haut des Mundwinkels und der Oberlippe	Innervation ▪ Rr. zygomatici des N. facialis Blutversorgung ▪ A. zygomaticoorbitalis der A. temporalis superficialis ▪ Äste der A. facialis	Anheben des Mundwinkels nach außen-oben, Vertiefung der Nasolabialfurche und der Lidfurche
M. zygomaticus minor	Ursprung Os zygomaticum medial vom M. zygomaticus major Ansatz Haut des Sulcus nasolabialis	Innervation ▪ Rr. zygomatici des N. facialis Blutversorgung ▪ A. zygomaticoorbitalis der A. temporalis superficialis ▪ Äste der A. facialis	Anheben des Mundwinkels nach außen-oben
M. risorius	Ursprung Facia masseterica Ansatz Haut der Oberlippe, Schleimhaut des Vestibulum oris, Modiolus anguli oris	Innervation ▪ Rr. buccales des N. facialis Blutversorgung ▪ Äste der A. facialis	Zug des Mundwinkels nach lateral, Vertiefung der Nasolabialfurche, Erzeugung des Wangengrübchens
M. levator labii superioris	Ursprung Margo infraorbitalis der Maxilla oberhalb des Foramen infraorbitale Ansatz Haut der Oberlippe und des Nasenflügels, M. orbicularis oris	Innervation ▪ Rr. zygomatici des N. facialis Blutversorgung ▪ A. infraorbitalis der A. maxillaris ▪ A. labialis superior und Äste der A. angularis der A. facialis	Anheben der Oberlippe, Erzeugung einer Falte oberhalb und seitlich der Nasenflügel
M. levator anguli oris (M. caninus)	Ursprung Fossa canina unterhalb des Foramen infraorbitale Ansatz Haut und Schleimhaut des Mundwinkelbereiches, Modiolus anguli oris, M. orbicularis oris	Innervation ▪ Rr. zygomatici des N. facialis Blutversorgung ▪ A. infraorbitalis der A. maxillaris ▪ Äste der A. angularis und A. labialis superior der A. facialis	Anheben des Mundwinkels nach kranial-medial
M. depressor anguli oris (M. triangularis)	Ursprung Basis mandibulae vom Tuberculum mentale bis zum Jugum alveolare des ersten Molaren Ansatz Haut des Mundwinkels, Modiolus anguli oris	Innervation ▪ Rr. buccales des N. facialis ▪ variabel: R. marginalis mandibulae Blutversorgung ▪ Äste der A. facialis ▪ A. labialis inferior der	Zug des Mundwinkels nach unten

Einleitung

Muskel	Ursprung/Ansatz	Innervation/Blutversorgung	Funktion
M. depressor labii inferioris (M. quadratus inferioris)	Ursprung Basis mandibulae unterhalb des Foramen mentale (Verbindung zum Platysma) Ansatz Haut und Schleimhaut der Unterlippe, Haut des Kinnwulstes, M. orbicularis oris	Innervation A. facialis ▪ R. marginalis mandibulae des N. facialis Blutversorgung ▪ A. labialis inferior der A. facialis	Zug der Unterlippe nach unten-lateral, Vorwölbung des Lippenrotes
M. mentalis	Ursprung Jugum alveolare des seitlichen Schneidezahnes der Mandibula Ansatz Haut des Kinns	Innervation ▪ R. marginalis mandibulae des N. facialis Blutversorgung ▪ A. labialis inferior der A. facialis	Verschieben der Haut des Kinns nach oben
Muskeln im Bereich des äußeren Ohres			
M. auricularis anterior	Ursprung Fascia temporalis, Galea aponeurotica Ansatz Spina helix der Ohrmuschel	Innervation ▪ Rr. temporales des N. facialis Blutversorgung ▪ A. temporalis superficialis	geringgradiger Zug der Ohrmuschel nach vorn
M. auricularis superior	Ursprung Galea aponeurotica Ansatz Hinterfläche der Ohrmuschel im Bereich der Eminentia scaphae und der Eminentia fossae triangularis, Spina helix	Innervation ▪ Rr. temporalis und R. auricularis des N. auricularis posterior des N. facialis Blutversorgung ▪ A. temporalis superficialis ▪ A. auricularis posterior	geringgradiger Zug der Ohrmuschel nach oben
M. auricularis posterior	Ursprung Proc. mastoideus, Linea nuchalis superior Ansatz Eminentia conchae der Ohrmuschel	Innervation ▪ R. auricularis des N. auricularis posterior des N. facialis Blutversorgung ▪ A. auricularis posterior ▪ R. auricularis der A. occipitalis	geringgradiger Zug der Ohrmuschel nach hinten
Muskeln des Halses			
Platysma	Ursprung Basis mandibulae Ansatz Haut der oberen Brustregion	Innervation ▪ R. colli des N. facialis Blutversorgung ▪ R. superficialis der A. transversa colli ▪ A. submentalialis der A. facialis	Gesichtsteil: Herabziehen der Mundwinkel nach lateral Halsteil: Verschieben der Haut zur Mandibula Spannen von Haut und Unterhautgewebe

Die gesamten mimischen Muskeln werden vom Nervus facialis motorisch innerviert. Er ist der siebte von insgesamt zwölf Hirnnerven und zählt zu den komplexesten Nerven des menschlichen Körpers (Valls-Solé 2007). Er enthält motorische Fasern zu den Strukturen des zweiten Kiemenbogens sowie parasymphatische, sensorische und sensible Fasern über den N. intermedius. Er umfasst Fasern aus vier Kerngebieten: Seine motorischen Anteile für die mimische Muskulatur, den M. stapedius, den Venter posterior des M. digastricus sowie den M. stylohyoideus stammen aus dem Ncl. nervi facialis. Der allgemein-viszeromotorische Ncl. salivatorius superior liefert Fasern zur parasymphatischen Versorgung der Gl. lacrimalis, Gl. submandibularis und Gl. sublingualis. In den speziell-viszerosensiblen Ncl. tractus solitarii enden afferente Fasern aus den vorderen zwei Dritteln der Zunge (Schünke et al. 2012). Der N. facialis zeigt ein variables und kompliziertes Verzweigungsmuster, in dem er mit verschiedenen anderen Hirnnerven kommuniziert (Diamond et al. 2011). Er tritt im Kleinhirnbrückenwinkel aus und gelangt über den Porus acusticus internus gemeinsam mit dem N. vestibulocochlearis in die Pars petrosa ossis temporalis. Kurz nach seinem Eintritt bildet er das äußere Fazialisknie, in welchem das Ganglion geniculi liegt. Dort zweigt der

parasympathische N. petrosus major ab, welcher für die Tränen- und Nasensekretion verantwortlich ist. Der Canalis n. facialis führt die restlichen Nervenfasern weiter über die Paukenhöhle bis zum Foramen stylomastoideum. In diesem Segment zweigt zunächst der N. stapedius für den gleichnamigen Muskel ab und anschließend die Chorda tympani, welche Geschmackfasern und präganglionäre parasympathische Fasern enthält (Schünke et al. 2012). Der Hauptstamm des N. facialis verlässt die Schädelbasis über das Foramen stylomastoideum. Unmittelbar danach entlässt er den N. auricularis posterior sowie den Ramus digastricus und den Ramus stylohyoideus (Valls-Solé 2007). Die übrigen viszeroefferenten Fasern des N. facialis bilden nach Verlassen des Felsenbeins in der Glandula parotidea den Plexus intraparotideus, aus dem die folgenden Endäste für die Innervation der mimischen Muskulatur hervorgehen: Rr. temporales, Rr. zygomatici, Rr. buccales, die Rr. marginales mandibulae sowie der R. colli (Schünke et al. 2012; Happak et al. 1997). An der Vorderfläche der Ohrspeicheldrüse strahlen die Ausläufer des Plexus intraparotideus fächerförmig divergierend zu den mimischen Muskeln der Schläfen-, Jochbogen-, Wangen- und Unterkieferregion aus (Schumacher u. Aumüller 2004).

1.2 Ätiologie der peripheren Fazialisparese und diagnostische Kriterien

Die häufigste Erkrankung, die zu Symptomen an der mimische Muskulatur führt, ist die Fazialisparese. Sie wird abhängig von der Lokalisation der Schädigung in zentrale und periphere Fazialisparese, in Bezug auf die Dauer in passager oder permanent und abhängig von der Schwere in komplett und inkomplett unterschieden.

Läsionen im supranukleären Verlauf des Tractus corticonuclearis zu einem der beiden Nervi facialis führen zu einer zentralen Fazialisparese (Guntinas-Lichius u. Sittel 2004). Diagnostisch wichtig ist, dass es dabei nicht zu einer Funktionsbeeinträchtigung der Stirnmuskulatur und des Lidschluss kommt, während die restliche mimische Muskulatur kontralateral gelähmt ist. Dies beruht auf der Besonderheit, dass der Teil des Kerngebiets des N. facialis, der die Stirn- und Lidmuskulatur versorgt, von beiden Gehirnhälften innerviert wird (Trepel 2012).

Tritt wiederum eine Schädigung des Kerns oder des N. facialis in seinem Verlauf auf, kann die gesamte mimische Muskulatur der betroffenen Seite gelähmt sein und man spricht von einer peripheren Fazialisparese. Diese kann sich jedoch ebenso variabel inkomplett äußern und muss nicht zwingend alle mimischen Muskeln betreffen. Der N. facialis enthält sowohl motorische als auch sensorische Funktionen. Abhängig davon, auf welcher Höhe der Nerv

geschädigt ist, treten neben der Lähmung der mimischen Muskulatur weitere charakteristische Leitsymptome auf (Trepel 2012).

Die Ursachen einer peripheren Fazialisparese sind vielseitig. Die häufigste Hirnnervenläsion ist die idiopathische Fazialisparese (sog. Bell's palsy). Sie tritt plötzlich und unilateral auf (Morrow 2000). Die Ätiologie ist unklar. Entzündungen sowie eine Reaktivierung einer Herpes-Simplex-Viren-Infektion werden als ursächliche Faktoren diskutiert (Morrow 2000; Adour et al. 1975). Erfolgt eine Therapie mit Steroiden, wie beispielsweise Prednisolon, wird der Heilungsprozess begünstigt und es bilden sich 80-90% der Lähmungen zurück (Sullivan et al. 2007; Reiß 2009). Eine weitere häufige Ursache sind traumatische Läsionen des Felsenbeins. Außerdem kann es im Rahmen eines Unfalles oder Gewaltdelikttes zu traumatischen Verletzungen des extrakraniellen N. facialis kommen (Guntinas-Lichius u. Sittel 2004).

Weitere Formen der peripheren Fazialisparese sind zum einen die angeborene Fazialisparese im Zusammenhang mit neurologischen Erkrankungen (Möbius-Syndrom, Goldenhaar-Syndrom u.a.), die entzündliche Fazialisparese, unter der selten Kinder nach akuten Entzündungen des Ohres oder des Mastoids leiden, die neoplastische Fazialisparese und die metabolische Fazialisparese, wozu es im Rahmen von Systemerkrankungen wie Diabetes mellitus kommen kann (Finkensieper et al. 2012; Reiß 2009).

Die Anamnese und die klinische Untersuchung sind bei der Diagnostik der peripheren Fazialisparese essenziell und geben Hinweise auf die Ursache der Läsion (Reiß 2009). Zur Einstufung der Schwere der Erkrankung werden verschiedene Grading-Systeme genutzt. Gebräuchliche Systeme sind zum einen die House-Brackmann-Skala und der Parese-Index nach Stennert (Stennert et al. 1977; Reiß 2009). Zur Diagnostik und Verlaufskontrolle werden Elektrodiagnostik, bildgebende Verfahren und topodiagnostische Tests, wie z.B. der Schirmer-Test, Schmeckprüfungen oder die Messung des Stapediusreflexes angewendet.

Den größten prognostischen Wert bei Fazialisparenese haben derzeit elektrophysiologische Tests, wie die Elektromyographie (EMG) und die Messung der Nervenleitgeschwindigkeit (ENoG). Die Messergebnisse der EMG können direkt mit der Prognose korreliert werden, da eine postoperative Reinnervation zuerst elektrophysiologisch in Erscheinung tritt (Grosheva et al. 2008; Volk et al. 2013a)

Bildgebende Verfahren spielen ebenso eine wichtige Rolle bei der Eruiierung der Fazialisparese. So bietet die Sonographie eine Möglichkeit zur Darstellung der mimischen Muskulatur. Dabei werden hochfrequente Ultraschallwellen als eine nicht-invasive Methode zur Darstellung von Geweben genutzt (Pillen u. van Alfen 2011). Ultraschallwellen breiten

sich in Flüssigkeiten und Gasen als longitudinale mechanische Schwingungen aus. Durch unterschiedliche Leitfähigkeiten ermöglichen sie eine differenzierte Visualisierung der verschiedenen Gewebe (Delorme u. Debus 2005). 2013 konnten von Volk et al. vielversprechende Ansätze zur quantitativen Sonographie erarbeitet werden (Volk et al. 2013b).

Die Computertomographie (CT) und die Magnetresonanztomographie (MRT) sind die wichtigsten bildgebenden Verfahren zur Darstellung des Verlaufs des N. facialis. Die CT ist dabei die Methode der Wahl zur Darstellung knöcherner Strukturen wie dem Meatus acusticus internus oder den Canalis n. facialis im Os temporale (Jager u. Reiser 2001). Es ist außerdem auch mit der CT möglich, Veränderungen einer muskulären Atrophie sichtbar zu machen. So kann der Volumenschwund und auch eine fettige Infiltration der betroffenen mimischen Muskeln in der CT dargestellt werden (Harnsberger u. Dillon 1985).

Die MRT wird zumeist dafür genutzt, den N. facialis selbst darzustellen (Burmeister HP et al. 2011). Erste Versuche wurden unternommen, auch die mimische Muskulatur im MRT-Datensatz darstellen und quantifizieren zu können und damit die Diagnostik und den Therapieverlauf einer peripheren Fazialisparese zu unterstützen (Kaylie et al. 2003; Kaylie et al. 2004; Farrugia et al. 2007). Gegenstand dieser Arbeit ist es, diese Methode zur Darstellung der mimischen Muskulatur näher zu untersuchen. Denn trotz der vielen Möglichkeiten, die mimische Muskulatur darzustellen, ist noch keine Methode veröffentlicht worden, die eine objektive und quantitative Evaluierung der mimischen Muskulatur ermöglicht (Volk et al. 2014a).

1.3 Magnetresonanztomographie

Schon 1899 deutete Lorentz die Aufspaltung der optischen Spektrallinien im Magnetfeld so, dass das Atom einen magnetischen Kreisel darstellt, der durch ein äußeres Magnetfeld zu Präzessionsbewegungen angeregt werden kann (Berends 2009). Im Jahr 1946 beschrieben Purcell und Bloch als Erste das Prinzip der magnetischen Kernresonanz im heutigen Sinne. Für ihre Errungenschaften um die Grundlagen der MRT erhielten sie 1952 den Nobelpreis der Physik. 1978 zeigten Clow und Young erstmals kernspintomographische Abbildungen eines menschlichen Kopfes und schon 1982 wurden daraufhin die ersten MR-Systeme vorgestellt (Nitz 2012). Die MRT als digitales Schnittbildverfahren nimmt seitdem in seiner Bedeutung zu (Vogl et al. 2011).

Das Prinzip der MRT basiert, nicht wie die CT, auf ionisierenden Strahlen, sondern nutzt eine Kombination aus einem statischen Magnetfeld und einem dazu senkrechten hochfrequenten

Magnetfeld (HF-Impuls) zur Änderung der Magnetisierung von Wasserstoffprotonen. Die berechneten Bilder geben nicht die allgemeine Gewebedichte, sondern die Protonendichte im Gewebe wieder (Pabst 2013).

Wasserstoffprotonen besitzen einen Eigendrehimpuls, einen sog. Kernspin. Da bewegte Ladungen ein magnetisches Moment haben, entsteht ein messbares magnetisches Feld. Befinden sich Wasserstoffprotonen in einem starken Magnetfeld, wie im MRT, reagieren sie mit Präzessionsbewegungen und richten sich entlang der Feldlinien parallel oder antiparallel aus. Die charakteristische Frequenz der Präzessionsbewegungen (Lamorfrequenz ω_0) ist proportional zur Stärke des Magnetfeldes. Durch einen geringen Protonenüberschuss in paralleler Richtung kommt es zum Aufbau einer longitudinalen, makroskopischen Magnetisierung (M_z). Dem stabilen Spinsystem wird anschließend in Form von elektromagnetischen Wellen Energie zugeführt. Stimmt die Frequenz des HF-Impulses mit der Lamorfrequenz der Spins überein, werden diese angeregt (Magnetresonanzprinzip) und es kommt zu einer Neuausrichtung der Kernmagnetisierung. Wird die Magnetisierung vollständig in eine transversale Kernmagnetisierung (M_{xy}) umgewandelt, spricht man von einer 90°-Anregung (Vogl et al. 2011; Pabst 2013). Die Präzession dieser Magnetisierung induziert in der Empfängerspule eine Wechselspannung und erzeugt damit das MR-Signal. Die T_1 - und T_2 -Relaxation bewirken, dass die transversale Magnetisierung und damit das MR-Signal wieder abnehmen und der stabile Ausgangszustand vor der Anregung wieder hergestellt wird (Nitz 2012).

- **T_1 -Relaxation**

Die longitudinale T_1 -Relaxation beschreibt das Zurückkippen der transversalen Magnetisierung in die z-Richtung und den Wiederaufbau einer longitudinalen Magnetisierung. Sie ist verbunden mit der Abgabe von Energie an die Umgebung (Spin-Gitter-Wechselwirkung). Die Zeitkonstante T_1 ist gewebespezifisch und abhängig von der Stärke des äußeren Magnetfeldes und der inneren Bewegung der Moleküle. Sie bezieht sich auf die Zeit, die das System benötigt, um in den Gleichgewichtszustand zurückzukehren und gibt an, wie schnell das Gewebe wieder erregt werden kann (Pabst 2013).

- **T_2 -Relaxation**

Die T_2 -Relaxation beschreibt den Verlust der transversalen Magnetisierung durch die Dephasierung des Spins als Folge der Spin-Spin-Wechselwirkungen und Inhomogenitäten des äußeren Magnetfeldes. Die einzelnen Magnetisierungsvektoren beginnen sich gegenseitig aufzuheben und damit verringert sich der Gesamtvektor der transversalen Magnetisierung bis das MR-Signal verschwindet. Die Spins tauschen dabei untereinander Energie aus, geben

jedoch keine an die Umgebung ab. Die Zeitkonstante T_2 zeigt ebenfalls eine Abhängigkeit von der Stärke des Magnetfeldes und ist ein Maß für die Dauer des Signals (Vogl et al. 2011; Weishaupt et al. 2014).

Der Bildkontrast im MR-Bild ist gewebeabhängig und wird vor allem durch die T_1 -Gewichtung (abhängig von der Repetitionszeit/TR; Dauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Anregungen) und die T_2 -Gewichtung (abhängig von der Echozeit/TE: Dauer zwischen der Anregung und der Messung des Signals) bestimmt. Gewebe mit kurzen T_1 , wie z.B. Fett, relaxieren schnell und geben bei erneuter Erregung viel Signal. Bei T_1 -gewichteten Bildern (< 600 ms) stellen sich daher Fett und Gewebe mit hohem Proteingehalt hell dar (viel Signal), Flüssigkeiten (Liquor, Blut) dunkel. Bei T_2 -gewichteten Bildern (Verzögerung > 60 ms) ist in Geweben mit kurzer T_2 -Zeit kein Signal mehr messbar und daher erscheinen sie dunkel. Flüssigkeiten werden auf diesen Bildern hell dargestellt (Pabst 2013). Ein weiterer wichtiger Parameter ist der Flipwinkel (Pulswinkel). Dieser wird reduziert, um trotz kurzer TR genügend Signal zu erhalten. Die Spins werden nicht mehr um 90° ausgelenkt, sondern z.B. nur noch um 30° . Somit entsteht eine geringere transversale Magnetisierung, aber dafür verbleibt ein Teil in z-Richtung und steht für die nächste Anregung zur Verfügung (Vogl et al. 2011).

Je nach Zielstellung und Untersuchungsregion kann eine MR-Sequenz ausgewählt und entsprechend des gewünschten Kontrastes eingestellt werden. Zur Untersuchung der mimischen Muskulatur sind vor allem die Sequenzen MP-RAGE und VIBE von Bedeutung (Gargiulo et al. 2011b). Aus den Daten können nach der Untersuchung 3D-Datensätze erstellt werden. Für eine gute strukturelle Darstellung der Gewebe gibt es drei Voraussetzungen: eine gute Auflösung (1 mm oder weniger), einen hohen Bildkontrast der darzustellenden Strukturen und eine maximale Untersuchungsdauer von 10 bis 15 Minuten (Deichmann et al. 2000).

1.3.1 MP-RAGE Sequenz

MP-RAGE (Magnetization-prepared rapid acquisition Gradient-Echo MR-sequence) ist eine herstellerspezifische MR-Sequenz (Siemens AG 2008). Der Datensatz gibt eine vollständige 3D-Darstellung der Gewebe innerhalb des Kopfes einschließlich des Gesichtes (Gargiulo et al. 2011b). MP-RAGE kann aufgrund der geringen effektiven Schichtdicke zur Darstellung kleiner anatomischer Strukturen genutzt werden und ist daher für die Untersuchung der mimischen Muskulatur ideal.

1.3.2 VIBE Sequenz

Die VIBE Sequenz (Volume Interpolated Breathhold Examination) ist, ebenso wie die MP-RAGE Sequenz, ein Akronym der Firma Siemens (Siemens AG 2008). Sie stellt ebenfalls eine T₁-gewichtete 3D-Gradientenechosequenz dar. An der Friedrich-Schiller-Universität Jena wurde darauf basierend eine coronare T₁-gewichtete FLASH-Sequenz entwickelt. Diese coronare VIBE Sequenz konzentriert sich auf mimische Muskulatur und beinhaltet nur das Gesicht und die Stirn (Gargiulo et al. 2011b).

1.4 Magnetresonanztomographische Darstellung der mimischen und Kaumuskulatur

Durch eine permanente Denervierung kommt es im Muskel zu einem zunehmenden Gewichtsverlust und einer Abnahme des Muskelfaserdurchmessers (Midrio 2006). Mittels MRT lassen sich die Muskelatrophie und bindegewebige sowie fettige Infiltrationen von Extremitätenmuskeln gut darstellen (Farrugia et al. 2007). Die Myofibrillen des betroffenen Muskels schrumpfen und der extrazelluläre Raum vergrößert sich kompensatorisch. Dies führt zu einer Verlängerung der T₂ Relaxationszeit (Vahlensieck u. Reiser 2014). Bei einer chronischen irreversiblen Denervierung kommt es im weiteren Verlauf zu einer kompensatorischen Fetteinlagerung, was eine Verkürzung der T₁-Relaxationszeit zur Folge hat. Die Veränderungen führen damit insbesondere in T₁ gewichteten Bildern zu einer Signalerhöhung (Vahlensieck u. Reiser 2014).

Auch in der mimischen Muskulatur werden muskuläre Störungen sichtbar. Die Beurteilung stellt sich jedoch schwieriger als bei Extremitätenmuskeln dar. (Farrugia et al. 2007) Die Gesichtsmuskeln sind, mit Ausnahme der Kaumuskulatur, sehr klein und daher oft schwer zu identifizieren (Farrugia et al. 2007). Die mimischen Muskeln sind mit Ausnahme des M. buccinator von keiner Faszie umgeben und daher nur unscharf vom umgebenden Gewebe abgegrenzt. Außerdem sind sie miteinander verbunden oder gar stark verflochten, wie z.B. der M. orbicularis oris und M. buccinator oder der M. orbicularis oculi mit dem M. frontalis. (Farrugia et al. 2007). Bisherige Studien nutzen meist die Sonographie bzw. die CT zur Darstellung der mimischen Muskulatur (Farrugia et al. 2007). Der MRT kommt im klinischen Alltag bisher bei der Beurteilung der mimischen Muskulatur wenig Bedeutung zu. Sie wurde bislang in diesem Zusammenhang v.a. für die Darstellung des N. facialis genutzt (Kim et al. 2007; Murphy 1991). Forschungen zur Darstellung von Muskeln am Kopf konzentrierten sich meist auf den M. masseter und die Pterygoideus-Muskulatur (Farrugia et al. 2007). In einigen Studien konnten jedoch die mimischen Muskeln bereits in MRT-Datensätzen untersucht werden. 2001 gelang es Kleinheinz und Joos, die Gruppen der perinasalen und perioralen

mimischen Muskeln zu visualisieren (Kleinheinz u. Joos 2001). 2007 stellte Farrugia in einer Studie fest, dass die Darstellung der mimischen Muskulatur im MRT prinzipiell möglich ist. Es konnten neben der extrinsischen und intrinsischen Zungenmuskulatur und den Kaumuskeln *Mm. pterygoidei* und *masseter* auch die mimischen Muskeln *M. orbicularis oris* und *M. buccinator* im MRT dargestellt und ihr Volumen berechnet werden (Farrugia et al. 2007). Mit Hilfe von quantitativen Methoden können wertvolle Informationen gewonnen werden (Farrugia et al. 2007). Die quantitative Bewertung der mimischen Muskulatur im MRT könnte nützlich sein, um das Verständnis für pathologische Prozesse innerhalb der Muskeln aufgrund bestimmter neuromuskulären Störungen zu verbessern. (Vahlensieck u. Reiser 2014).

Der Volumenschwund der mimischen Muskulatur kann mithilfe von Sequenzen mit dünner Schichtstärke und einem T_1 gewichteten Bildkontrast am besten beurteilt werden (Fischbein et al. 2001). Änderungen innerhalb des Muskelgewebes können wiederum durch T_2 -gewichtete fast spin echo Sequenzen mit hoher Fettsättigung gut erkannt werden (Fischbein et al. 2001). In einer Studie von Gargulio et al. 2011 gelang es, mit Hilfe eines 3 Tesla MRT, einzelne mimische Muskeln direkt zu visualisieren und diese mit einer Segmentierungssoftware zu quantifizieren. Damit konnten erstmals Seitendifferenzen der Muskelvolumina und -grauwerte bei Patienten mit einseitiger Fazialisparese nachgewiesen werden (Gargiulo et al. 2011b).

1.5 Die 3D-Segmentierung

Um Muskeln im MRT visualisieren und quantifizieren zu können, werden sie im Datensatz segmentiert. Die Segmentierung stellt einen wichtigen Teil der medizinischen Bildverarbeitung dar. Das Ziel dabei ist, den relevanten Bildbereich (region-of-interest, ROI), wie z.B. Organe oder Gewebe, vom restlichen Bild zu separieren. Dafür werden die einzelnen Voxel konturiert. Ein Voxel bezeichnet ein Volumenelement (Voxel = Schichtdicke x Pixelgröße) (Siemens AG 2008). Wird die ROI in allen Schichten des Bildvolumens segmentiert, kann das Volumen bestimmt oder ein 3D-Modell zur visuellen Beurteilung erstellt werden. Die Segmentierung von MRT-Datensätzen wurde bereits für die unterschiedlichsten menschlichen Gewebe und Organe beschrieben. So finden sich in der Literatur Veröffentlichungen, wie beispielsweise zur Leber (Grieser et al. 2014), dem Anulus fibrosus und Nucleus pulposus der Bandscheiben (Castro-Mateos et al. 2014) oder der Prostata (Korsager et al. 2015). Es gibt inzwischen auch halb- und vollautomatische Segmentierungsalgorithmen, doch gilt die manuell erstellte Segmentierung noch als Goldstandard (Fetzer 2011; Rezaeitabar u. Ulusoy 2012).

Es wurden auch schon erste Versuche angestellt, die 3D-Segmentierung an der mimischen Muskulatur im MRT-Datensatz anzuwenden, um sie damit im Ganzen visualisieren und deren Volumina ermitteln zu können. Volk et al. gelang es 2014, 13 mimische Muskeln zu segmentieren und deren Volumina zu berechnen (Volk et al. 2014a). Doch die Genauigkeit der Ergebnisse konnte aufgrund fehlender Literatur, zur sicheren Identifikation der Muskeln, nicht ausreichend bewertet werden (Volk et al. 2014a). In dieser Arbeit soll an diese Studie angeschlossen werden, um die 3D-Segmentierung zu standardisieren und sie damit für mehr Anwender zugänglich zu machen.

2 Ziele der Arbeit

Zielstellung der vorliegenden Arbeit war es, zu evaluieren, unter welchen Voraussetzungen und mit welchen Limitationen das MRT als Methode zur quantitativen Untersuchung der mimischen Muskulatur am Probanden geeignet ist und die zukünftige Anwendung in Klinik und Forschung durch eine frei verfügbare Online-Anleitung zu fördern.

Im ersten Schritt sollte überprüft werden, welche mimischen Muskeln des Menschen im MRT-Datensatz aufgefunden werden können. Im Anschluss sollten die Identifizierung und Quantifizierung der Muskeln auf ihre Reproduzierbarkeit getestet werden.

Um die anatomischen Gegebenheiten mit den MRT-Aufnahmen im Millimeterbereich vergleichen zu können, sollte ein MRT eines fixierten anatomischen Präparates erfolgen. Um Vergleiche zur Sonographie sowie zur Computertomographie aufstellen zu können, sollten auch diese Untersuchungen am Präparat erfolgen. Die mimische Muskulatur sollte daraufhin im MRT, Sonographie und CT Datensatz segmentiert und parallel am selbigen Leichnam präpariert werden.

Basierend auf den bis dahin gewonnenen Kenntnissen sollten gut segmentierbare Kennmuskeln ausgewählt und für diese eine standardisierte Segmentierungsanleitung entwickelt werden, damit die mimischen Muskeln sicher durch den Untersucher aufgefunden werden können. Daraufhin sollte die Segmentierung der mimischen Muskulatur im MRT-Datensatz mit und ohne Segmentierungsanleitung auf ihre Interobserver-Reliabilität und Zeitaufwand getestet und miteinander verglichen werden, um den Nutzen der Segmentierungsanleitung qualitativ und quantitativ zu untersuchen.

3 Material und Methoden

Für diese Studie lag ein positives Votum der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena vor. Weiterhin lag ein schriftliches Einverständnis aller untersuchten Probanden vor.

3.1 Orientierungsphase

Zu Beginn wurde zunächst evaluiert, welche diagnostischen Möglichkeiten das MRT in Bezug auf die Darstellung der mimischen Muskulatur und Kaumusculatur bietet. Augenmerk der vorliegenden Arbeit lag dabei auf den physiologischen Bedingungen. Frau cand. med. Josefine Druse, die zeitgleich bei Herrn Prof. Guntinas-Lichius promoviert, untersuchte die Darstellung pathologisch veränderter mimischer Muskeln im MRT bei Patienten mit Fazialisparese. Gemeinsam wurde in der Orientierungsphase zunächst versucht, alle in den Anatomieatlanten Prometheus, Thieme und Anatomie mit 121 Tabellen, Springer (Schumacher u. Aumüller 2004; Zilles et al. 2010) beschriebenen mimischen Muskeln (Tab. 1) in MRT-Aufnahmen aus vorangegangenen Forschungsprojekten im 3 Tesla MRT zu identifizieren. Eine Liste der identifizierbaren Muskeln findet sich unter 4.1. Die Identifizierung und Segmentierung der mimischen Muskeln erwies sich auch mit anatomischen Vorkenntnissen als sehr schwierig. Die mimischen Muskeln sind sehr klein und meist von keiner Faszie umgeben. Daher sind sie nur unscharf vom umgebenden Gewebe abzugrenzen. Aufgrund des daraus resultierenden hohen subjektiven Entscheidungsspielraums erwies sich das Zuordnen einzelner Voxel zu den Muskeln als sehr variabel (Abb. 3). Die Literaturrecherche vom August 2013 in der Thüringer Hochschulbibliothek sowie über PubMed ergab, dass bisher keine Literatur existierte, in der die Lage der mimischen Muskeln im MRT beschrieben wurde. Aus diesem Grund wurden zunächst für diese Muskeln eine Vorgehensweise zur standardisierten Segmentierung definiert sowie Untersuchungsparameter für die Segmentierung dieser festgelegt (Siehe 3.3). Zur Segmentierung wurden alle eines Muskels zugehörigen Voxel im MRT-Datensatz erst in coronarer Ebene markiert. Dann wurde der Vorgang in axialer und schließlich in sagittaler Ebene kontrolliert und Abweichungen korrigiert. Die Reihenfolge der Ebenen wich bei den Muskeln ab, die in axialer oder sagittaler Ebene besser aufzufinden sind als in der coronaren Ebene. So ist der M. orbicularis oculi in der axialen Ebene am besten identifizierbar. Er wird in dieser Ebene zuerst komplett segmentiert und die Segmentierung wird daraufhin in den sagittalen und coronaren

Schichtstapeln kontrolliert. Aus den so in drei Ebenen kontrollierten 2D-Datensätzen ließ sich nachfolgend ein 3D-Bild dieses Muskels erzeugen.

In der sich darauf anschließenden Phase der Sammlung der Segmentierungsdaten erfolgte die Aufnahme der MRT immer unter den gleichen Untersuchungsparametern. Die Segmentierung lief standardisiert immer gleich und mit gleichen unter 3.1.2.1 erläuterten Kontrasteinstellungen ab.

3.1.1 Untersuchung der mimischen Muskulatur im MRT

Für die Untersuchungen wurde ein 3 Tesla MRT verwendet (Magnetom TIM Trio, Siemens, Erlangen, Deutschland). Zur guten Darstellung des Kopfes wurde eine 12-Kanal Kopfspule (Siemens, Erlangen, Deutschland) genutzt. Alle Probanden wurden in Rückenlage untersucht. Speziell die Sequenzen MP-RAGE und VIBE sind für die Untersuchung der mimischen Muskulatur gut geeignet und wurden daher in das Messprotokoll integriert.

- **MP-RAGE**

Das Untersuchungsprotokoll beinhaltet zum einen eine 3D T_1 -gewichtete Sequenz (MP-RAGE) (TR 2300ms, TE 3.03ms, Flipwinkel 9° , Voxelgröße $1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 1\text{mm}$ [=1mm³], Matrix 256 x 256, TA 5:21 min). Jede Schicht setzt sich zusammen aus 256x256 Pixel. Ein Datensatz enthält 192 Schichten und ist ca. 36 MB groß. Die Schichtdicke kann beliebig eingestellt werden. In dem verwendeten Messprotokoll betrug sie 1.0 mm. Die Voxelauflösung betrug 1.0 mm³. MP-RAGE stellt eine 3D-Erweiterung der FLASH (Fast low angle shot) Technik dar. Letztere bezeichnet eine MR-Messtechnik, bei der in einem Durchgang die gesamte Rohdatenmatrix mittels einer ultraschnellen Gradientenecho-Sequenz gemessen wird (Siemens AG 2008). Somit können hochaufgelöste 3D-Datensätze mit einem hohen Kontrast in einer kurzen Zeit generiert werden. Die Messung eines gesamten Kopfes dauert weniger als sechs Minuten (Mugler u. Brookeman 1990). Die Besonderheit der MP-RAGE Sequenz ist die Anwendung eines 180° Inversionspulses (sog. Präparationspuls) vor der Akquisition der Bilder. Durch diesen Inversionspuls wird die Längsmagnetisierung der Spins um 180° gekippt und kann sich in der folgenden Verzögerungszeit erholen. Da sich die Spins in Geweben mit kurzem T_1 schneller wieder regenerieren als die Spins in Geweben mit längeren T_1 , weisen erstere bereits wieder messbare positive Längsmagnetisierungen auf, während letztere noch nicht wieder signalgebend sind (Rummeny u. Reimer 2009). Nach der verlängerten Inversionszeit folgt die Datenakquisition durch eine Gradientenechosequenz mit kurzer TR und eine Verzögerungszeit zur zusätzlichen Kontrastkontrolle (Stevenson et al. 1995; Siemens AG 2008). Damit zeigt die Sequenz einen T_1 -gewichteten Bildkontrast. Durch

die Wiederholung der Inversionspulse kann der Effekt über die gesamte Dauer der Messung aufrecht gehalten werden. Dieser Datensatz gibt eine vollständige 3D-Darstellung der Gewebe innerhalb des Kopfes und des Gesichtes.

- **Coronare VIBE Sequenz**

Das Protokoll beinhaltete außerdem eine am Universitätsklinikum Jena von Gargulio et al. entwickelte coronare T_1 -gewichtete FLASH-Sequenz (TR 5.67ms, TE 2.48ms, Flipwinkel 11° , Voxelgröße 0.67mm x 0.67mm x 0.67mm [=0.3mm³], Matrix 384 x 384, TA 9:35 min) (Gargiulo et al. 2011b). Zur Messzeitverkürzung der 3D-Messungen wird hier die Schichtzahl in Schichtrichtung durch Interpolation und/oder Partial-Fourier-Verfahren reduziert. Bei der Interpolation werden Werte berechnet, die zwischen bekannten mathematischen Funktionen liegen. So kann die Bildmatrix vergrößert werden, ohne die Messzeit zu verlängern. Im Partial-Fourier-Verfahren werden durch die Reduzierung der Phasenkodierschritte während der Messung die Echozeiten verkürzt (Siemens AG 2008). Diese coronare VIBE Sequenz konzentriert sich auf mimische Muskulatur und beinhaltet nur das Gesicht und die Stirn. Die Ausrichtung der Schnitte wurde zu der Ebene, die parallel zum harten Gaumen verläuft, um 90° geneigt. Ein Datensatz dieser Sequenz beinhaltet 192 Schnitte und ist ca. 81 MB groß.

3.1.2 3D- Segmentierung der mimischen Muskulatur

Um nach durchgeführter MRT die mimische Muskulatur beurteilen zu können, erfolgte die Übertragung des MRT-Datensatzes im DICOM-Format mittels USB-Device auf einen PC mit Microsoft Windows 7 Betriebssystem und dem open-source Segmentierungsprogramm MITK zur Auswertung.

3.1.2.1 MITK

Das Medical Imaging Interaction Toolkit (MITK) ist eine open-source Software (German Cancer Research Center, Heidelberg, Germany) und dient der Bildbearbeitungs- und Visualisierungsanwendungen im Bereich der medizinischen Diagnostik und Therapieunterstützung. Es ist unter www.mitk.org zum Download verfügbar. MITK beinhaltet neben dem reinen Toolkit auch ein Framework, auf dem die Hauptanwendung MITK Workbench basiert. Es gibt dem Anwender die Möglichkeit, DICOM-Datensätze (Digital Imaging and Communications in Medicine) segmentieren, vermessen und auswerten zu können. Abb.1 zeigt die Benutzeroberfläche des Programmes MITK. Das Kernstück der Anwendung ist eine Vier-Fenster-Anzeige, die sich aus drei 2D-Ansichten (Transversalebene, Sagittalebene und Coronalebene) und einer 3D-Ansicht zusammensetzt. Hier fand die Navigation und Interaktion der geladenen Datensätze statt. Die Ansicht konnte individuell

angepasst werden. Am Levelwindow konnte nach dem Laden eines Datensatzes das Spektrum der Grauwerte geändert werden. Der Datamanager auf der linken Seite diente dem Verwalten der geladenen Datensätze. Die aktiven Module und deren Funktionen waren auf der rechten Seite dargestellt.

Nach der Segmentierung konnte ein „polygon model“, also ein 3D-Bild des Muskels erstellt werden. Außerdem konnten die folgenden Werte ermittelt werden: Mean, Standardabweichung, quadratisches Mittel (RMS), maximaler und minimaler Grauwert, Anzahl und Volumen.

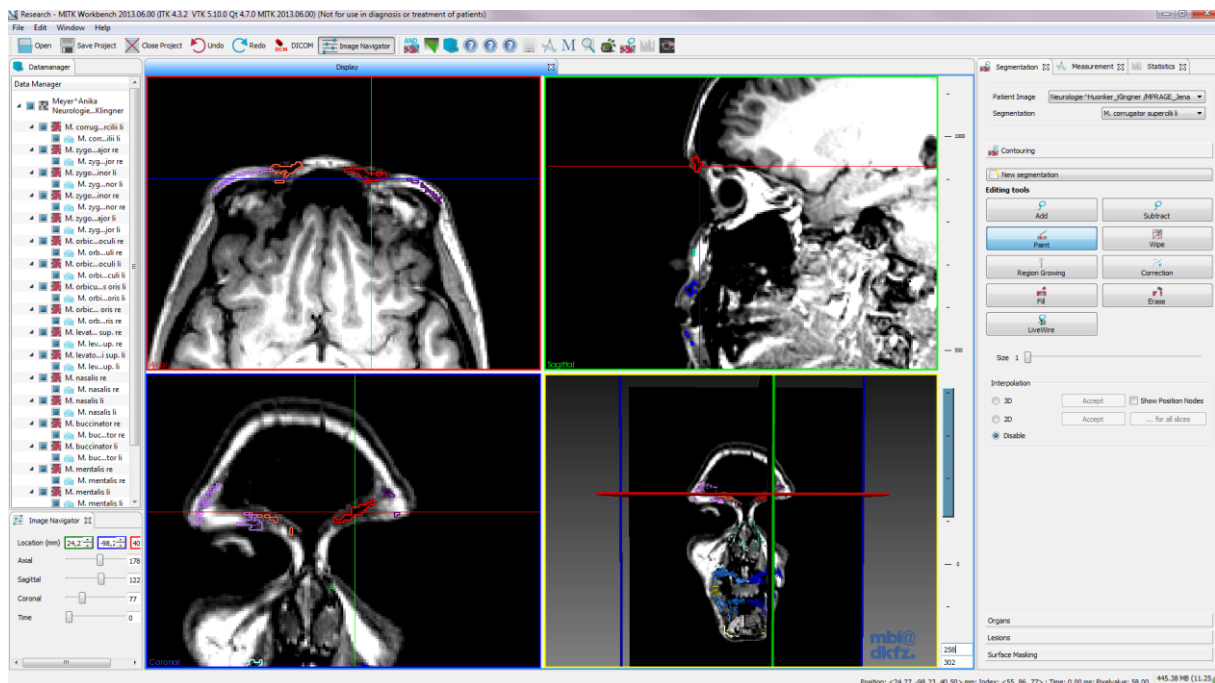


Abb.1 Benutzeroberfläche MITK Workbench

3.1.2.2 Segmentierungsparameter und Vorgehen

Die Segmentierung der Muskelquerschnitte jeder Schicht erfolgte mit der „Paint“- bzw. „Add“-Funktion zur Erstellung einer Region of Interest (ROI). Pixel, die durch ihren Grauwert einem Muskeln zugeteilt werden konnten, wurden farbig markiert. Mit den Tools „Wipe“ und „Substract“ konnten falsch markierte Regionen korrigiert werden. Die Verwendung der von der Software angebotenen halbautomatischen Flächenbegrenzungen, wie „Region Growing“, erwies sich für die mimische Muskulatur als nicht praktikabel. Die Toleranz der Graustufenunterscheidung im Programm stellte sich als zu niedrig dar und damit führten die Versuche einer halbautomatischen Segmentierung zu ungenauen Ergebnissen. Abb. 2 zeigt die Segmentierung des M. corrugator supercilii mittels halbautomatischer und manueller Segmentierung. Die halbautomatische Segmentierung schließt zu viele Pixel mit

ein, die eindeutig nicht dem Muskel zugehörig sind (Abb. 2a). Um die Untersuchung zu standardisieren, wurden verschiedene Segmentierungsparameter festgelegt.

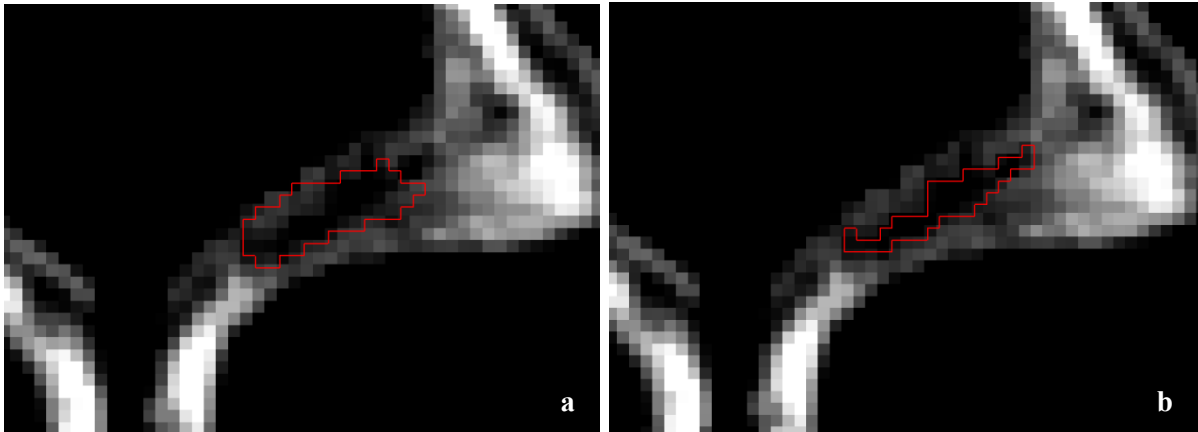


Abb. 2 MRT-Datensatz von Proband AS in coronarer Ebene; Vergleich a) halbautomatische Segmentierung b) manuelle Segmentierung am Beispiel des M. corrugator supercilii

3.1.2.3 Kontrast, Helligkeit

Die Kontrasteinstellung ist immer abhängig von der jeweiligen Sequenz. Um eine Vergleichbarkeit unter den Untersuchern und innerhalb verschiedener Untersuchungszeitpunkte gewährleisten zu können, wurde bei der Beurteilung eines Datensatzes immer der gleiche Kontrast und die gleiche Helligkeit eingestellt. Abb. 3 zeigt, wie stark sich die verschiedenen Einstellungen von Kontrast und Helligkeit auf die Beurteilung der Muskelgrenzen auswirken. Für die Arbeit in einer MP-RAGE Sequenz wurde im MITK die Kontrasteinstellung des Levelwindows auf 258-302 festgelegt. In dieser Einstellung grenzten sich die Muskeln gut vom umliegenden Gewebe ab. Für die Sequenz VIBE musste in jedem Datensatz individuell der Kontrast eingestellt werden.

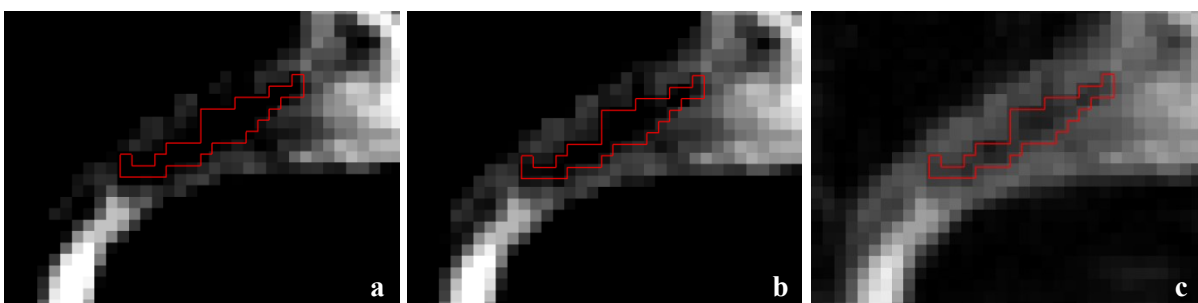


Abb. 3 MRT-Datensatz von Proband AS in coronarer Ebene; Auswirkungen von Helligkeit und Kontrast auf die Beurteilung der Muskelgrenzen am Beispiel des M. corrugator supercilii
Bild a) zeigt zu hoch regulierte Kontrasteinstellung und damit scheinbar größeren Muskelquerschnitt,
Bild b) zeigt optimale Kontrast- und Helligkeitseinstellung zur Segmentierung,
Bild c) zeigt zu niedrig regulierte Kontrasteinstellung und scheinbar geringeren Muskelquerschnitt

3.1.2.4 Abgrenzung

Die Segmentierung der Grenzzone zwischen Muskel und umliegendem Gewebe war sehr schwierig, da die mimischen Muskeln von keiner Faszie begrenzt sind. Dieses Problem führte während der Segmentierung zu erheblichen Unterschieden in den Ergebnissen. Daher musste

die Herangehensweise vor der Segmentierung optimiert und standardisiert werden. In dieser Arbeit wurde daher die Grenzzone als nicht zum Muskelvolumen gehörend definiert. Es wurden nur Voxel mit Grauwerten segmentiert, die näher dem Grauwert des Muskels als dem der Umgebung lagen, also deutlich von der Umgebung abzugrenzen waren. In der oben genannten Einstellung des Levelwindows auf 258-302 in der MP-RAGE Sequenz galt dies nur für die sehr dunklen Voxel (Abb. 3b). Da jeder Muskel eine unterschiedliche Dichte und Fettanteil besitzt, erscheint er dadurch im MRT unterschiedlich hell. Die Abgrenzung aller mimischen Muskeln über einen definierten Grauton war damit nicht möglich und musste für jeden Muskel individuell festgelegt werden. So war bei den Muskeln M. temporalis, M. masseter, M. buccinator und M. orbicularis oculi aufgrund der inhomogenen Dichte und des intramuskulären Fettanteils auch die Markierung auch hellerer Voxel legitim und notwendig, wenn diese innerhalb der Muskelgrenzen lagen.

Abgrenzungen, die durch fehlende Kontraste nicht möglich waren, mussten durch anatomische Kenntnisse getätigt werden. Ein Beispiel dafür ist die Abgrenzung des M. mentalis zum M. orbicularis oris. Optisch ist keine deutliche Abgrenzung zwischen den verschiedenen Muskeln zu erkennen (Abb. 4). Die Trennung erfolgte an diesem Beispiel durch den extrapolierten Verlauf des M. mentalis.

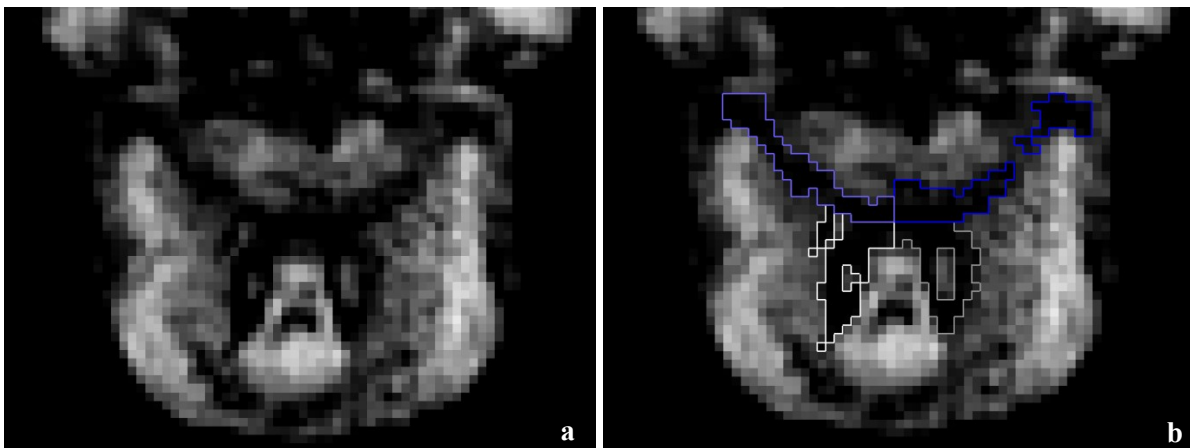


Abb. 4 MRT-Datensatz von Proband AS in coronarer Ebene; Abgrenzung zwischen *Mm. orbiculares oris dexter et sinister* (hellblau, blau) und *Mm. mentales dexter et sinister* (weiß, grau); a) ohne segmentierte ROIs, b) mit segmentierten ROIs

3.1.2.5 Reihenfolge und Farbe

In der Orientierungsphase konnten 14 mimische Muskeln dargestellt werden. Diese wurden zu besserer Orientierung immer in der gleichen Reihenfolge segmentiert. Außerdem wurde jedem Muskel eine definierte Farbe zugeteilt, in der er im Folgenden immer markiert wurde. (Tab. 2). Damit sollte für den Betrachter eine schnellere Orientierung im segmentierten Datensatz ermöglicht werden. Die beiden Gesichtshälften wurden getrennt segmentiert um etwaige Seitenunterschiede analysieren zu können. Dabei wurde sich an der Mittellinie

orientiert, welche anhand des Interhemisphärenspaltes festgelegt werden konnte. ROIs der rechten und linken Seite wurden farblich durch einen helleren und dunkleren Farbton der gleichen Grundfarbe unterschieden. Jeder Muskel wurde zunächst in einer charakteristischen Ebene segmentiert. Das Ergebnis wird daraufhin in den beiden anderen Ebenen korrigiert.

Tab. 2 Reihenfolge der Segmentierungen mit Farbkonzept für alle im MRT auffindbaren mimischen Muskeln und Mm. temporalis et masseter

M. mentalis	weiß
M. depressor anguli oris	gelb
M. depressor labii inferioris	orange
M. corrugator supercilii	rot
M. zygomaticus major	rosa
M. zygomaticus minor	pink
M. orbicularis oculi	lila
M. orbicularis oris	blau
M. levator labii superioris	hellblau
M. nasalis	türkis
M. risorius	hellgrün
M. procerus	dunkelgrün
M. buccinator	olivgrün
M. frontalis	braun
M. temporalis	dunkelrot
M. masseter	dunkelblau
rechts hell, links dunkel	

Nach der vollständigen Segmentierung jeden Muskels konnte im MITK durch das Tool „Create polygon model“ ein 3D-Bild des Muskels erstellt werden. Damit konnte die Form und Ausdehnung des segmentierten Muskels visualisiert werden, um die Segmentierung anhand anatomischer Kenntnisse, gewonnen aus Literatur und Studien am Körperspender, nochmals überprüfen zu können (Abb. 5). Bei deutlichen Abweichungen musste die Segmentierung in den verschiedenen Ebenen erneut kontrolliert und korrigiert werden.

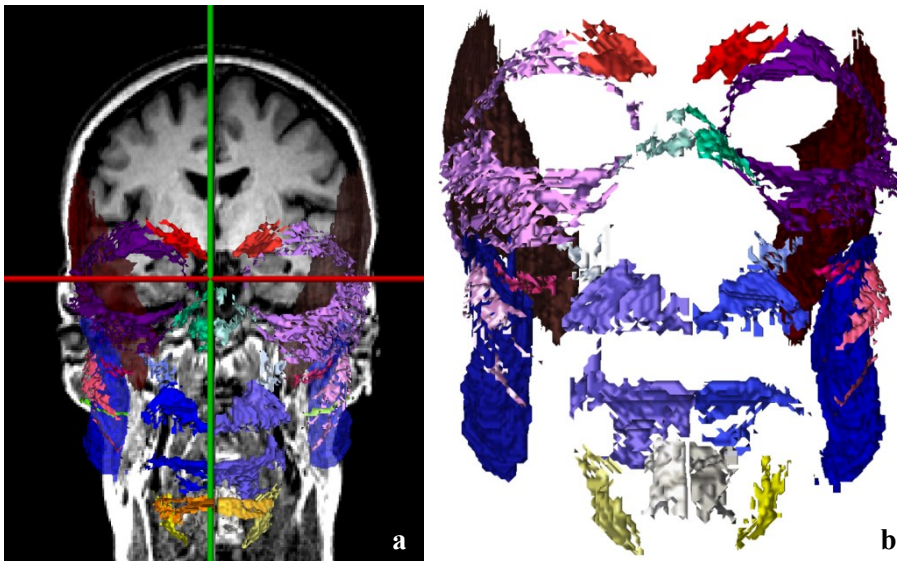


Abb. 5 3D-Rekonstruktion der mimischen Muskulatur des Probanden AS, a) 3D-Rekonstruktion im MRT Bild, b) isolierte Ansicht der 3D-Rekonstruktion

3.2 MRT, CT, Sonographie und Präparation eines anatomischen Präparates

Um die in der Orientierungsphase in vivo im MRT aufgefundenen mimischen Muskeln und Kaumuskeln zweifelsfrei identifizieren zu können und außerdem die Darstellbarkeit der mimischen Muskeln in CT, MRT sowie Sonographie gegenüberstellen zu können, musste ein direkter Vergleich zwischen MRT, CT, Sonographie und der Präparation der mimischen Muskulatur am fixierten Präparat erfolgen. Dazu wurde am 28. Februar 2014 ein MRT, eine Sonographie sowie ein CT eines in Formalin fixierten Körperspenders des Institutes für Anatomie I des Universitätsklinikums Jena vorgenommen. Zunächst wurde eine Ganzkörper-CT Messung des Körpers, unter besonderer Beachtung des Gesichtes und des Halses, durchgeführt. Für die CT wurde das Gerät GE Light Speed 16 (General Electric, Milwaukee, Wisconsin) genutzt und ein hochaufgelöster Standarddatensatz erstellt. Die Detektorauflösung betrug 1,25 mm. Die Bilder wurden nachfolgend auf 0,625 mm rekonstruiert. Sie wurden so stark geglättet, um das Rauschen im Weichteilgewebe zu unterdrücken und so den Weichteilkontrast zu erhöhen.

Daraufhin wurde eine MRT im 3 Tesla Forschungs-MRT des Instituts für Diagnostische und Interventionelle Radiologie (IDIR) des Universitätsklinikums Jena vorgenommen. Sowohl für die CT- als auch für die MRT-Messungen blieb das Präparat in einem Kunststoffstoffsack und damit vollständig umhüllt. Aus diesem Grund war das Anbringen der Kopfspule während der MRT Messung nicht möglich. Stattdessen wurden zwei Bodymatrizes untereinander auf den Kopf und Körper gelegt. Unter dem Präparat befand sich eine Spinematrix (Siemens, Erlangen, Deutschland). Zunächst wurden die üblichen Sequenzen gefahren, welche zur

Beurteilung der mimischen Muskulatur bei Probanden und Patienten verwendet werden (MP-RAGE, coronare VIBE). Damit konnte ein direkter Vergleich zu den gängigen Sequenzen gewährleistet werden. Im IDIR Jena war dies der erste Versuch, eine MRT eines fixierten Präparates vorzunehmen. Somit war noch unklar, inwieweit sich das Formalin auf die Bildqualität auswirkt. Daher musste zunächst nach einer geeigneten Messeinstellung gesucht werden. Folgende Einstellungen erwiesen sich als günstig, da sie verglichen mit den vorherigen Versuchen einen guten Muskelkontrast ermöglichten:

Mittelungen: 12

TE: 4.92 ms

Flipwinkel: 90°

TR: 20 ms

Auflösung: 0,5 mm isotrop

Daraufhin erfolgte die Messung mit diesen optimierten Messeinstellungen. Da die Dauer der Messung in diesem Falle nicht durch die Kooperation des Versuchsobjekts begrenzt war, konnte für eine hochaufgelöste coronare VIBE Sequenz acht Stunden gemessen werden. Durch die zwölf Mittelungen ergab sich eine vielfach erhöhte Bildqualität. Abb. 6 zeigt einen Vergleich zwischen der standardisierten VIBE Sequenz und der für die Messung des Körperspenders individualisierten VIBE Sequenz. Durch die veränderten Messeinstellungen war zu beachten, dass die Muskeln in der individualisierten VIBE-Sequenz im Kontrast nicht mehr dunkler erscheinen als die Umgebung, sondern heller.

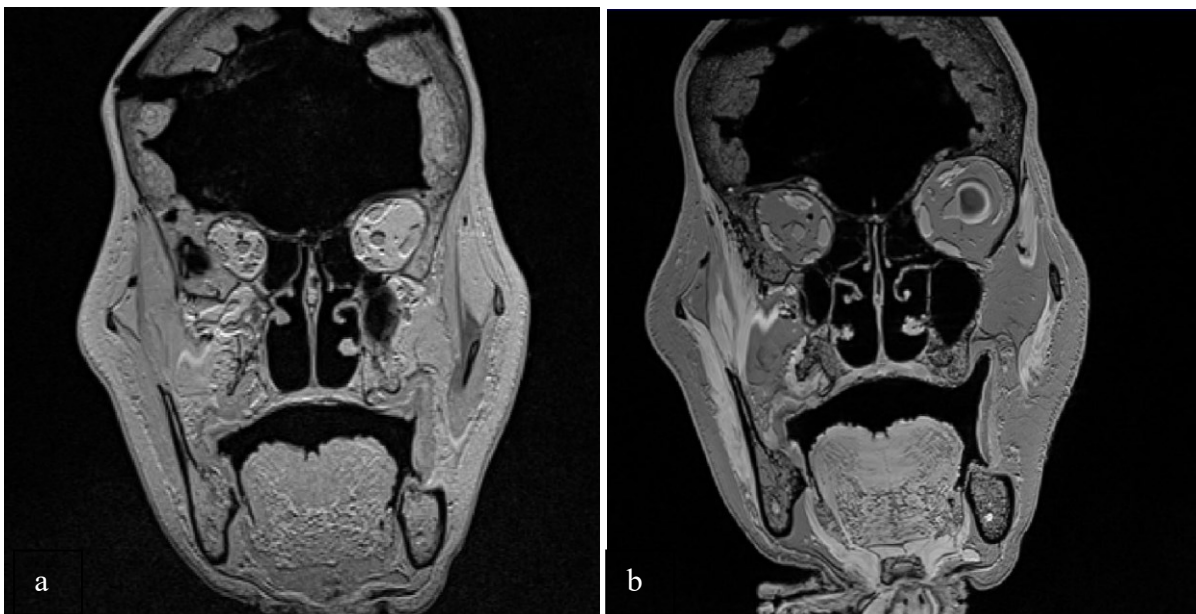


Abb. 6 MRT-Datensatz des Körperspenders in coronarer Ebene; a) standardisierte VIBE Sequenz, b) individualisierte VIBE Sequenz

Durch die Formalinfixierung des Präparates kommt es zwar zu einer Schrumpfung nicht-knöcherner Strukturen (Wehrl et al. 2015; Dallenbach-Hellweg 2013). Da aber kein Vergleich zwischen fixierten und nicht-fixierten Strukturen durchgeführt wurde, bestand dadurch keine Gefahr eines systematischen Fehlers in den Ergebnissen. Statt mit Patientendaten wurden die MRT Bilder des Präparates mit der anschließenden anatomischen Präparation desselben Präparates verglichen, sodass Schrumpfungartefakte nicht zum Tragen kamen.

Nach der MRT Messung erfolgte eine sonographische Vermessung des Gesichtes nach Anleitung zur quantitativen Sonographie der mimischen Muskulatur, die im Rahmen einer Dissertation in unserer Arbeitsgruppe erstellt wurde (Sauer 2013). Aufgrund der Fixierung und den damit verbundenen Gewebsveränderungen und den veränderten Schallleitungseigenschaften des Gewebes konnten nicht alle mimischen Muskeln sonographisch eindeutig identifiziert werden.

Die sonographischen Bilder der Muskeln wurden vermessen und sowohl der MRT- sowie der CT-Datensatz wurden mit Hilfe des Programmes MITK segmentiert. Nach der Segmentierung der mimischen Muskulatur im MRT-Datensatz konnte ein 3D-Bild der segmentierten Muskeln erstellt werden. Unter 4.2 wurde eine Liste erstellt, die zeigt, welche mimischen Muskeln mit den verschiedenen Methoden von einem Untersucher aufgefunden werden konnten. War ein Muskel mit der jeweiligen Methode eindeutig darstellbar erhielt dieser ein „+“.

Der segmentierte MRT- und CT-Datensatz konnten daraufhin in den drei Ebenen verglichen werden, um die Bildqualität der beiden Methoden direkt gegenüberstellen zu können. Um einen Vergleich der MRT-Segmentierung und der sonographischen Untersuchung herstellen zu können, wurde die x-Achse im MRT-Datensatz aus der Horizontalen so geneigt, dass sie mit der Lage des Ultraschallkopfes bei der Sonographie übereinstimmt. Daraufhin wurde im MRT die Ebene aufgesucht, die in etwa der des Ultraschallbildes entspricht und die dargestellten Muskelquerschnitte verglichen.

3.2.1 Präparation der mimischen Muskulatur

Um die Richtigkeit der Segmentierung zu überprüfen, wurden die mimischen Muskeln anschließend in der Anatomie präpariert und fotodokumentiert. So ließen sich die 3D-Rekonstruktionen der segmentierten Daten der bildgebenden Verfahren qualitativ und quantitativ mit den Ergebnissen der anatomischen Präparation vergleichen. Dazu wurde die vordere Gesichtsregion gemäß der Präparieranweisung des Institutes für Anatomie I des Universitätsklinikums Jena präpariert (Fröber 2012). Mit Hilfe eines gängigen Präparierbesteckes wurde damit begonnen, einen coronaren Hautschnitt von Ohr zu Ohr

sowie einen vertikalen Hautschnitt entlang der Gesichtsmitte zu setzen. Daraufhin wurde die Haut von lateral nach medial abpräpariert, umgeklappt und dann entfernt. Die Haut um die Augen, Nasenöffnungen sowie das Lippenrot wurden zunächst ausgespart. Bei der Hautpräparation war darauf zu achten, dass das Skalpell exakt zwischen Kutis und subkutanen Bindegewebe geführt wurde, um die mimische Muskulatur und die am Vorderrand der Glandula parotis austretenden Äste des N. facialis nicht zu verletzen. Im nächsten Schritt folgte die Darstellung der mimischen Muskeln und der motorischen Endäste des N. facialis. Dazu wurde das subkutane Fettgewebe entfernt (Abb. 7). Auf der linken Seite wurde an einigen Stellen das Fettgewebe wallartig erhalten, um die Lage der Muskeln in Bezug auf das Fettgewebe zu verdeutlichen. Zunächst wurde der Venter frontalis m. occipitofrontalis mit dem Übergang in die Galea aponeurotica dargestellt. Daraufhin wurde die Pars orbitalis m. orbicularis oculi präpariert. Dann wurde die Pars palpebralis m. orbicularis oculi durch Ablösen der Haut am Ober- und Unterlid präpariert (Fröber 2012). Dabei viel auf, dass die Muskelfasern direkt unterhalb der Haut liegen und es so nicht möglich war, die Haut zu entfernen ohne Muskelfasern zu verletzen. Danach wurden die Muskeln Mm. zygomatici major et minor, M. levator labii inferior, M. levator labii inferior alaeque nasi, M. levator anguli oris, M. orbicularis oris, M. risorius, M. depressor anguli oris mit dem Übergang in das Platysma, M. depressor labii inferioris sowie der M. mentalis vom umliegenden Fett- und Bindegewebe befreit, um den Verlauf der Muskeln darzustellen. Um den M. procerus sowie den M. corrugator supercilii freizulegen, wurde auf der linken Gesichtshälfte die Haut der Augenbraue entfernt. Die Nase des Körperspenders wurde zu OP-Übungszwecken bereits präpariert und so konnte der M. nasalis an der Innenseite des Hautlappens dargestellt werden. Die anatomische Präparation fand unter Supervision von Frau Dr. Fröber statt. Die Ergebnisse wurden kleinschrittig fotodokumentiert. Um die Vergleichbarkeit mit den Schnittbildern der bildgebenden Verfahren zu sichern, wurde darauf geachtet, dass die Fotos annähernd in transversaler, coronarer oder sagittaler Ebene erstellt wurden. Die Bilder konnten daraufhin mit den erstellten 3D-Modellen der segmentierten Muskeln korreliert werden (Abb. 8).

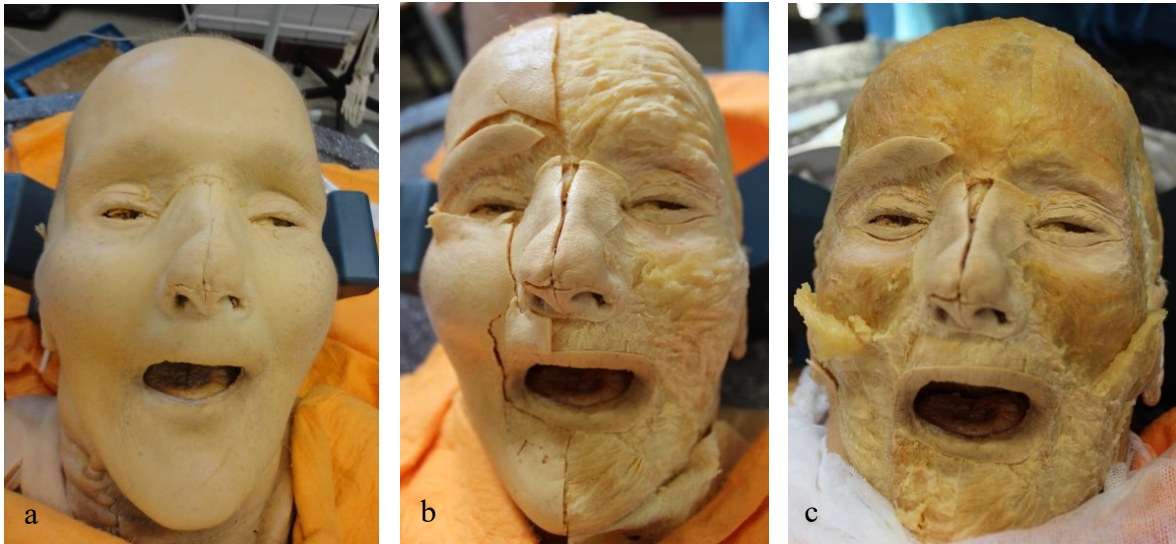


Abb. 7 Präparationsschritte am fixierten Körperspender, a) vor der Präparation, b) Abtragung der Kutis, c) Abtragung des subkutanen Fettgewebes



Abb. 8 Präparation und korrelierendes MRT-3D-Bild der mimischen Muskulatur, links: fixiertes Präparat; rechts: 3D-Rekonstruktion

3.2.2 Auswahl der Kennmuskeln

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse durch den Vergleich von MRT und Präparation am anatomischen Präparat konnte die korrekte Identifikation aller Muskeln bestätigt werden. Während der Präparation des Körperspenders konnten 15 mimische Muskeln von insgesamt 19 in dieser Region beschriebenen dargestellt werden. M. temporoparietalis und die Mm. auriculares sind zwar ebenso mimische Muskeln, sie wurden aber aufgrund ihrer geringen Bedeutung für die Mimik nicht in die Betrachtung mit einbezogen. Elf der mimischen Muskeln sowie zwei Kaumuskeln konnten in den MRT-Datensätzen der Probanden sowie des Körperspenders konstant aufgefunden werden und wurden schließlich auf Basis der in der Orientierungsphase und während der anatomischen Präparation gewonnenen Erkenntnisse

ausgewählt und in die Segmentierungsanleitung aufgenommen. Diese gut segmentierbaren Muskeln werden im Folgenden Kennmuskeln genannt. Dazu gehören der *M. mentalis*, der *M. depressor anguli oris*, der *M. corrugator supercilii*, der *M. zygomaticus major*, der *M. orbicularis oculi*, der *M. orbicularis oris*, der *M. levator labii sup.*, der *M. nasalis*, der *M. buccinator* sowie der *M. temporalis* und der *M. masseter*. Der *M. zygomaticus minor* und der *Venter frontalis* des *M. occipitofrontalis* wurden zwar vorerst mit in die Gruppe der Kennmuskeln aufgenommen und in die Segmentierungsanleitung integriert, da sie im Vergleich der Präparation und der MRT des Körperspenders gut aufzufinden waren. Bei der weiteren Datensammlung und -analyse fiel jedoch auf, dass speziell der *M. zygomaticus minor* und der *Venter frontalis m. occipitofrontalis* nur sehr selten identifiziert werden konnten. Der Grund dafür ist, dass der *M. zygomaticus minor* oft anatomisch nicht angelegt ist. Der *Venter frontalis m. occipitofrontalis* ist schwer vom umliegenden Gewebe zu unterscheiden. Aufgrund ihrer geringen Darstellbarkeit wurden sie als Kennmuskeln im weiteren Verlauf gestrichen und die Anzahl der gut segmentierbaren Kennmuskeln reduzierte sich so von elf auf neun.

„Gut segmentierbarer“ bedeutet, dass die Muskeln folgende Auswahlkriterien erfüllten. Wichtig waren eine sehr gute Auffindbarkeit im MRT-Datensatz sowie eine leichte Erlernbarkeit der Segmentierungsschritte. Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass entsprechende Landmarken zugeordnet werden konnten und sich vom umliegenden Fett- und Bindegewebe abgrenzen ließen. Außerdem wurde beachtet, dass die Kennmuskeln zum einen konstant angelegt und zum anderen essentiell für den Ausdruck der sechs Basisemotionen waren. So beinhalten die Kennmuskeln mit Ausnahme des *M. frontalis* alle Basismuskeln nach Waller, die für die fünf Basisemotionen essentiell sind (*M. orbicularis oris*, *M. orbicularis oculi*, *M. zygomaticus major*, *M. depressor anguli oris*) (Waller et al. 2008). Des Weiteren wurde eine Subgruppe von fünf weiteren mimischen Muskeln ausgewählt (*M. mentalis*, *M. corrugator supercilii*, *M. levator labii superioris*, *M. nasalis*, *M. buccinator*). Es sollte mindestens ein repräsentativer Muskel für jeden der fünf Endäste des Plexus intraparotideus identifiziert werden. So sollte erreicht werden, dass auch Läsionen einzelner viszeromotorischer Anteile des *N. facialis* mit Funktionsverlust der entsprechenden denervierten Muskeln bei der späteren Untersuchung der Patienten identifiziert werden können. Eine detaillierte Übersicht, welche Muskeln aufgrund ihrer geringen Darstellbarkeit ausgeschlossen wurden, findet sich unter 4.3. Die beiden Kaumuskeln *M. temporalis* und *M. masseter* wurden als Kontrollmuskeln ausgewählt, da sie eine relative Nähe zur mimischen Muskulatur bieten, aber durch ihre Innervation durch den *N. trigeminus* nicht von Läsionen

des N. facialis betroffen sind. Sie können so in zukünftigen Projekten zur Darstellung der mimischen Muskulatur von Fazialisparesepatienten als Referenz dienen.

3.3 Standardisierte Segmentierung

Um die Segmentierung der mimischen Muskulatur zu standardisieren, wurde eine Segmentierungsanleitung für die ausgewählten Kennmuskeln erarbeitet. Sie wurde in Form einer Website erstellt und steht online unter www.facial.muscles.wiki zur Verfügung. Die Website wurde mit Hilfe der Web-Software WordPress (WordPress Foundation, <https://de.wordpress.org/>) erstellt und verwaltet. Für diese Arbeit wurde sie in eine PDF-Datei umgewandelt.

Die Segmentierung der MRT-Datensätze wurde darauffolgend immer nach dieser gleichen erstellten Segmentierungsanleitung durchgeführt. Zunächst wurden die Helligkeit und der Kontrast den Anforderungen entsprechend eingestellt. Darauf folgte die Einstellung der Mittellinie in Bezug auf den Interhemisphärenspalt. Im Folgenden werden die Ebenen der ausgewählten gut segmentierbaren Muskeln (Kennmuskeln) und ihre anatomischen Landmarken entsprechend ihrer Reihenfolge beschrieben. In den Abbildungen sind die jeweiligen Muskeln in ihrer entsprechenden Farbe markiert.

- **M. mentalis**

Die Segmentierung wurde coronar in der Schicht begonnen, in der das Kinn gerade noch zu erkennen war. Daraufhin wurde in die Tiefe nach occipital gescrollt. Von der Mitte aus verbreiterte sich der M. mentalis beidseits der Mittellinie in einem Streifen von mediokraniel nach laterokaudal (Abb. 9).

Kranial ging er in den M. orbicularis oris über. Das dorsal liegende Vestibulum oris

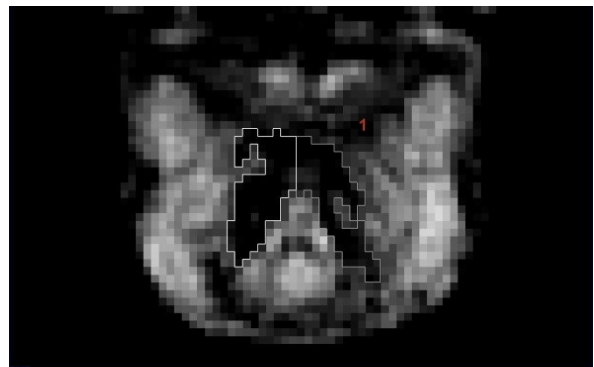


Abb. 9 MRT-Datensatz Proband AS; coronare Ansicht des M. mentalis (grau); 1) M. orbicularis oris

stellte sich im MRT ebenfalls dunkel dar und musste vom M. mentalis abgegrenzt werden. Die Segmentierung wurde in der sagittalen sowie in der axialen Ebene korrigiert. In der sagittalen Ebene wurde die Segmentierung mittig begonnen. Der M. mentalis verlief als schmaler Streifen von kranial am M. orbicularis oris nach kaudal auf Höhe Zungengrund. In dieser Ebene erfolgte die Abgrenzung nach dorsal. Die Abgrenzung des M. mentalis zum M. orbicularis oris war durch die enge Beziehung nicht rein aufgrund der Grauwerte möglich.

Anatomische a-priorie-Informationen waren notwendig. Die Trennung zwischen M. mentalis und M. orbicularis oris erfolgte anhand des extrapolierten Verlaufs des M. mentalis.

- **M. depressor anguli oris**

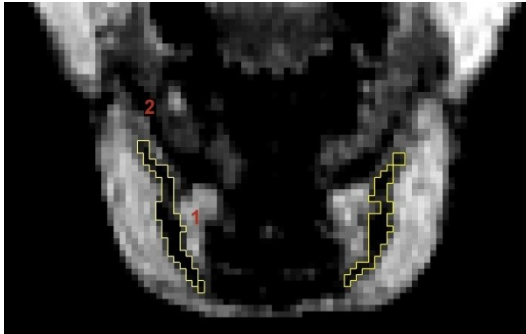


Abb. 10 MRT-Datensatz Proband AS; coronare Ansicht des M. depressor anguli oris (gelb); 1) Mandibula; 2) M. orbicularis oris

Die Segmentierung wurde coronar in den tiefen Lagen des M. mentalis begonnen. Laterokaudal des M. mentalis begann sich der M. depressor anguli oris in einem schmalen Streifen entlang der Mandibulaaußenkante nach dorsal zu erstrecken (Abb. 10). Die kaudale Begrenzung wurde auf Höhe der Basis mandibulae vorgenommen, da der Muskel an dieser entspringt. Nach kranial kann er bis Höhe Mundwinkel reichen. Der Muskel ist

direkt der Mandibula angelagert. Kranial inseriert der Muskel in den Modiolus, er kann somit Kontakt zu anderen mimischen Muskeln haben, wie z.B. den M. orbicularis oris. Nach dorsal geht der Muskel in das Platysma über, welches unbedingt abzugrenzen war. Die Trennung erfolgte anhand anatomischer Kenntnisse auf Höhe des Mundwinkels.

- **M. corrugator supercilii**

In der Coronarebene erstreckte sich der Muskel kranial der Orbita in einem Streifen von mediokaudal nach laterokranial (Abb. 11). Der Muskel liegt kranial der Orbita der Kalotte auf. Er musste anhand des Faserverlaufes vom M. orbicularis oculi abgegrenzt werden.

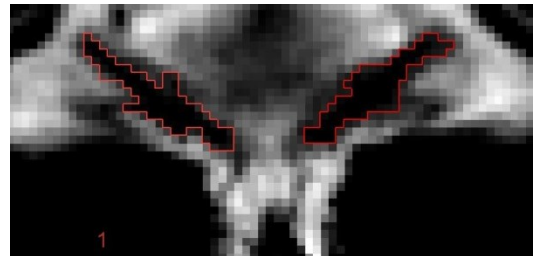


Abb. 11 MRT-Datensatz Proband AS; coronare Ansicht des M. corrugator supercilii (rot); 1) Orbita

- **M. zygomaticus major**

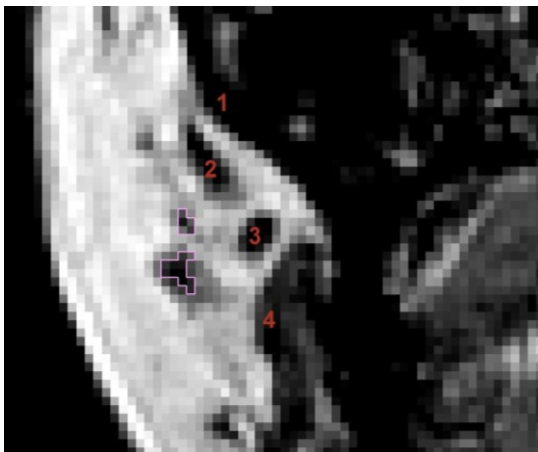


Abb. 12 MRT-Datensatz Proband AS; coronare Ansicht des M. zygomaticus major (rosa); 1) Os zygomaticum; 2) M. zygomaticus minor; 3) A. facialis; 4) M. buccinator

In der Coronarebene wurden die ventralsten Lagen des M. masseter aufgesucht. Kranial des Muskels liegt das Os zygomaticum. Von da aus setzte sich nach laterokaudal hin ein Muskelzug ab. Dieser war Teil des M. zygomaticus major. Der Muskel verlief in einem Bogen nach mediokaudal zum Modiolus. Der Muskeln hat seinen Ursprung am Os zygomaticum und inseriert in die Haut auf

Höhe des Mundwinkels, oft auch zweibäuchig. Der Muskel durfte nicht mit der A. facialis verwechselt werden, welche zum Auginnenwinkel zieht (Abb. 12). Sie verläuft jedoch in der entgegengesetzten Richtung, also von laterokaudal nach mediokranial, was spätestens in der 3D-Ansicht aufgefallen sein müsste.

- **M. orbicularis oculi**

Die Segmentierung wurde in der axialen Ebene unterhalb der Orbita begonnen. Vom Nasenflügel bis lateral der Orbita erstreckte sich ein schmaler Muskelzug, der sich nach kaudal verkürzte. Wurde nach kranial gescrollt, eröffnete sich die Orbita, welche den Muskel in einen medialen und einen lateralen Teil unterteilt. Der Mediale stellte sich häufig kaum dar. Der laterale Anteil war oft zweischichtig. Wurde weiter nach kranial gescrollt, vereinten sich die beiden Anteile wieder oberhalb

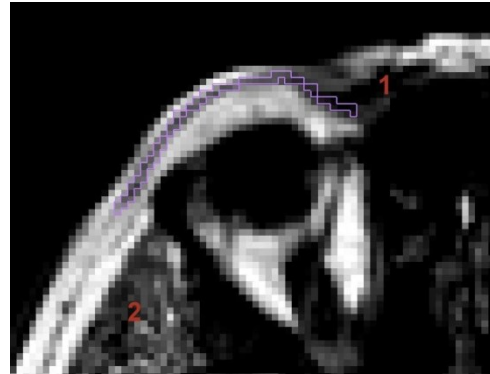


Abb. 13 MRT-Datensatz Proband AS; transversale Ansicht des M. orbicularis oculi (lila); 1) M. corrugator supercilii; 2) M. buccinator

der Orbita, da der M. orbicularis oris ein Ringmuskel darstellt. Das Muskelgewebe erschien heller als bei anderen mimischen Muskeln (Abb. 13).

- **M. orbicularis oris**

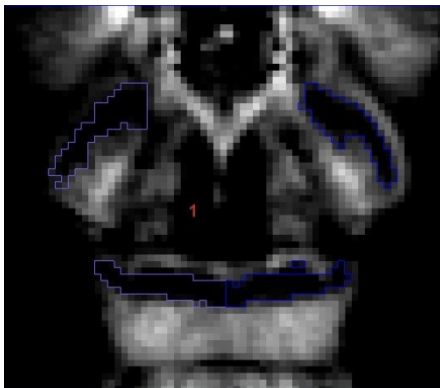


Abb. 14 MRT-Datensatz Proband AS; coronare Ansicht des M. orbicularis oris (blau); 1) Incisivi 11

Die Segmentierung wurde in der axialen Ebene auf Höhe des Nasenbodens begonnen. Lateral der Nasenflügel wurden die rundlichen Querschnitte des M. orbicularis oris sichtbar. Wurde nach kaudal gescrollt, vereinigten sich diese zu einem Muskelstrang, der direkt unter der Haut lag (Oberlippe). Weiter kaudal auf Höhe des Stomions war kurzzeitig kein Muskelgewebe sichtbar, oder nur im Bereich der Mundwinkel. Wurde weiter nach unten gescrollt, stellte sich der Muskeln wieder direkt unter der Haut dar (Unterlippe). Unterhalb dieser liegt er etwas weiter in der Tiefe und geht dann über in den M. mentalis bzw. M. depressor anguli oris und M. depressor labii inferior. Die dorsal liegenden Zähne stellten sich ebenfalls dunkel dar und durften nicht mit dem Muskeln verwechselt werden (Abb. 14).

- **M. levator labii superioris**

Die Segmentierung wurde coronar in der tiefsten Schicht des oberen Anteiles des M. orbicularis oris begonnen. Wurde von dort in die Tiefe gescrollt, setzte sich von da aus, etwa Höhe Foramen infraorbitalis, ein Muskelzug nach kranial ab, der zur Maxilla zog (Abb. 15). Der Muskel durfte nicht mit der ähnlich verlaufenden A. facialis verwechselt werden, welche jedoch einen längeren Verlauf von der Basis mandibulae aus zeigte.

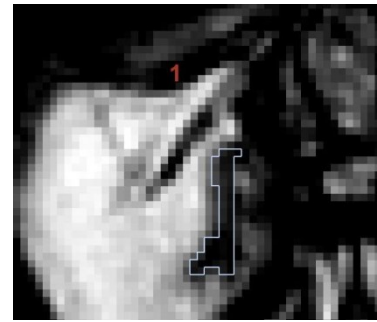


Abb. 15 MRT-Datensatz Proband AS; coronare Ansicht des M. levator labii superioris (hellblau); 1) M. orbicularis oris

- **M. nasalis**

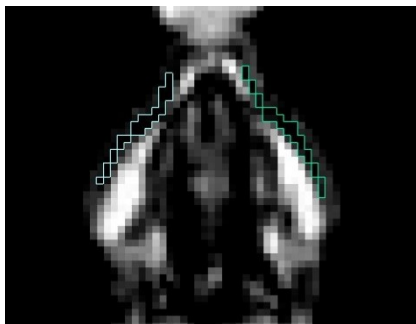


Abb. 16 MRT-Datensatz Proband AS; coronare Ansicht des M. nasalis (türkis)

Die Segmentierung wurde in der coronaren Ebene an der Nasenspitze begonnen. Wurde in die Tiefe gescrollt, lag der Muskel oberflächlich unter der Haut (Abb. 16). An der Nasenspitze stellte er sich punktförmig dar und verbreiterte sich dann nach dorsal entlang der Nasenflügel.

- **M. buccinator**

Der Muskel begrenzt nach lateral die Mundhöhle. Die Segmentierung sollte coronar in den ventralen Schichten des M. masseter begonnen werden. Lateral der Mundhöhle lag hier ein senkrechter, leicht geschwungener Muskelzug (Abb. 17). Dieser wurde nach ventral und dorsal verfolgt. In der Axialschicht stellte sich der Muskel lateral der Mundhöhle in einem langen, schmalen Band dar. Nach ventral reicht er bis zum M. orbicularis oris, nach dorsal bis zu den Molaren. Das umliegende Gewebe war sehr inhomogen und daher war der Muskel schwer zu segmentieren.

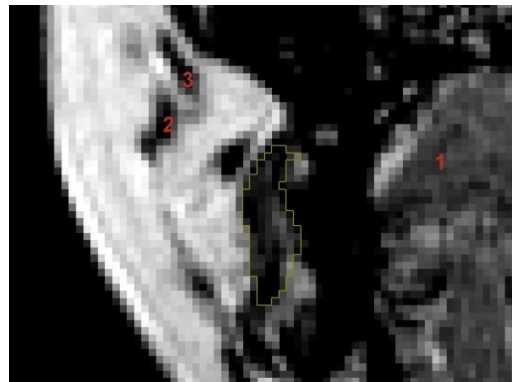


Abb. 17 MRT-Datensatz Proband AS; coronare Ansicht des M. buccinator (olivgrün); 1) Zunge; 2) M. zygomaticus major; 3) M. zygomaticus minor

- **M. temporalis**

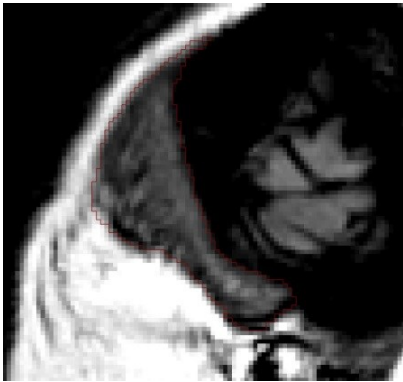


Abb. 18 MRT-Datensatz Proband AS; sagittale Ansicht des M. temporalis (dunkelrot)

Die Segmentierung wurde in der sagittalen Ebene weit lateral begonnen und daraufhin wurde nach medial gescrollt. Mittig vergrößerte sich zunächst kreisförmig der M. temporalis und verlief dann nach ventral in Richtung Processus coronoideus der Mandibula (Abb. 18). Der Processus coronoideus sowie eventuelle Bindegewebsstränge innerhalb des Muskels durften nicht mitsegmentiert werden.

- **M. masseter**

Segmentierung wurde in der Sagittalebene lateral der Mandibula begonnen, dort wo der Querschnitt des M. masseter am größten war. Nach medial grenzt er an die Mandibula, nach lateral endet er am Os zygomaticum (Abb. 19).

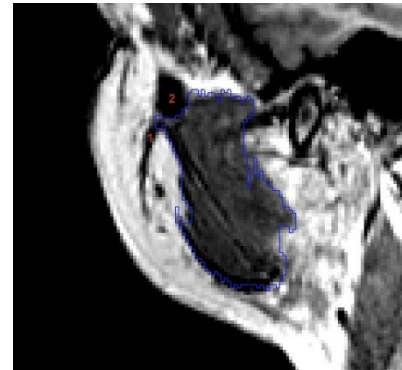


Abb. 19 MRT-Datensatz Proband AS; sagittale Ansicht des M. masseter (dunkelblau); 1) Os zygomaticum; 2) M. zygomaticus major

3.4 Segmentierung der MRT-Datensätze von acht Probanden

Es wurden acht Probanden, davon vier Männer und vier Frauen, geboren in den Jahren 1958 bis 1990, ausgewählt. Es handelte sich dabei um Datensätze von Probanden, die für andere Forschungsprojekte erhoben wurden und deren Messprotokoll die Sequenz MP-RAGE bereits enthielten und für das vorliegende Projekt zusätzlich um eine VIBE Sequenz erweitert wurden. Als Probanden wurden ausschließlich Personen rekrutiert, die keinerlei Beeinträchtigungen in Bezug auf die zu untersuchenden Muskeln sowie weder neuromuskulären Erkrankungen, noch oberflächliche Operationen im Gesichtsbereich vor der Untersuchung aufwiesen.

Mit Hilfe des Segmentierungsprogrammes MITK wurden alle identifizierbaren mimischen Muskeln sowie die Mm. masseter et temporalis in den MRT-Datensätzen von drei Probanden durch die zwei Untersucher Anika Meyer und Josefine Druse (A.M. und J.D.) unabhängig voneinander segmentiert sowie die Grauwerte und Volumina ermittelt. Außerdem wurde gemessen, wie viel Zeit die Segmentierung der einzelnen Muskeln in Anspruch nahm.

Anschließend wurde auf der Grundlage der neu erstellten Segmentierungsanleitung nochmals die Muskulatur von weiteren fünf Probanden (auch jeweils getrennt von A.M. und J.D.) segmentiert und wiederum die Volumina und Grauwerte ermittelt. Außerdem wurden auch die zuvor ohne Segmentierungsanleitung segmentierten drei Probanden-Datensätze von einem Untersucher sechs Monate später nochmals mit Anleitung segmentiert und die benötigten Zeiten gemessen, um den Zeitaufwand mit und ohne Segmentierungsanleitung vergleichen zu können.

3.5 Statistik

Diese Arbeit ist eine klinisch-experimentelle Studie. Nach Abschluss aller Segmentierungen wurden die Daten im Programm Microsoft Excel® in tabellarischer Form gesammelt und im Anschluss sowohl primär mittels Excel®, als auch mit Hilfe des Statistikprogrammes SPSS 21® für Windows 7 aufgearbeitet.

Um die Reproduzierbarkeit der Segmentierungsergebnisse untersuchen zu können, wurde mittels SPSS® eine Intra-Klassen-Korrelation (ICC) durchgeführt. Dabei handelt es sich um einen statistischen Test zur Überprüfung der Messergebnisse zwischen mehreren Untersuchern in Bezug auf mehrere Untersuchungsobjekte. Das diesbezügliche Maß ist der Intra-Klassen-Koeffizient (Wirtz u. Caspar 2002). Der ICC-Koeffizient kann Werte zwischen -1,0 und +1,0 annehmen. Die Reliabilitätsmaße sind laut Definition auf 0 bis 1 limitiert.

Negative Koeffizienten zeigen somit eine Reliabilität von 0 an (Wirtz u. Caspar 2002). Eine hohe Korrelation kommt zustande, wenn die interindividuellen Unterschiede zwischen den Probanden ausreichend groß sind und gleichzeitig eine geringe intraindividuelle Varianz bei den Wiederholungsmessungen besteht (Krentz 2005). Für die Interobserver-Reliabilität wurden die MRT-Datensätze von sechs Probanden von zwei verschiedenen Untersucherinnen (A.M und J.D.) segmentiert. Drei Datensätze wurden ohne Kenntnis der Segmentierungsanleitung bearbeitet, weitere wurden drei mit Hilfe der Segmentierungsanleitung segmentiert. Es wurden dabei nicht die gleichen drei Probanden ausgewählt, da sonst anzunehmen wäre, dass die Untersucher durch den ersten Segmentierungsdurchgang die Datensätze bereits kennen und daher besser segmentieren.

Anschließend wurde der ICC-Koeffizient aller Volumina und Grauwerte der elf Muskelpaare zunächst für die drei Datensätze ermittelt, die ohne Segmentierungsanleitung segmentiert wurden. Später erfolgte die gleiche Berechnung für die drei Datensätze, die mit Segmentierungsanleitung bearbeitet wurden. Dabei wurde das Modell als zweifach gemischt festgelegt, da die Untersucher zum einen nicht zufällig ausgewählt, und zum anderen jeder Fall einzeln von den Untersuchern eingeschätzt wurde. Zunächst wurde der ICC-Koeffizient für die Summe aller segmentierten Muskeln bestimmt und nachfolgend getrennt für jeden einzelnen Muskel. Außerdem wurde der p-Wert ermittelt, der eine Aussage über die Signifikanz der Ergebnisse gibt. Nahm dieser Werte unter 0,05 an, konnten die ICC-Koeffizienten als signifikant bezeichnet werden. P-Werte unter 0,05 werden im Folgenden fett markiert. Eine Intraobserver-Reliabilität wurde nicht erhoben, da bei mehrfacher Wiederholung der Segmentierung eines Datensatzes ein Übungseffekt nicht auszuschließen war.

Für die Zeitwerte mit und ohne Segmentierungsanleitung wurde in der deskriptiven Analyse die Mediane errechnet, die zeigen, wie stark sich der Zeitaufwand jeweils verringert hat. Statistisch wurden die Zeitwerte anhand des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests verglichen. Damit wurde evaluiert ob sich der Zeitaufwand mit und ohne Anleitung signifikant unterscheidet. Der Wilcoxon-Test stellt einen nichtparametrischen Vergleich zweier abhängiger Stichproben dar. Er basiert auf der Rangreihe der einzelnen absoluten Wertepaarunterschiede (Bühl 2008). Der Test wurde für die kompletten Datensätze und für die einzelnen Muskeln durchgeführt.

4 Ergebnisse

4.1 Erkenntnisse aus der Präparation

In der Orientierungsphase wurde ersichtlich, dass das Segmentieren der mimischen Muskulatur für den ungeübten Anwender sehr schwierig ist und die einzelnen Muskeln nicht immer sicher identifiziert werden konnten. Während der Segmentierung der Probanden-Datensätze ließen sich in der Orientierungsphase folgende mimische Muskeln darstellen: M. mentalis (MEN), M. depressor labii inferioris (DLI), M. depressor anguli oris (DAO), M. corrugator supercilii (CR), Mm. zygomaticus major et minor (ZMA, ZMI), M. orbicularis oculi (OOC), M. orbicularis oris (OOR), M. nasalis (NAS), M. procerus, M. risorius, M. levator labii superioris (LLS), M. frontalis (FRO) und M. buccinator (BUC) sowie die Kaumuskeln M. temporalis (TEM) und M. masseter (MAS). Doch nicht alle dieser Muskeln konnten in jedem Datensatz oder von jedem Untersucher aufgefunden werden. Aus diesem Grund wurden die im MRT-Datensatz eines Körperspenders segmentierten Muskeln mit der anatomischen Präparation des Präparats verglichen und auf Basis dieser Erkenntnisse die mimischen Muskeln als Kennmuskeln ausgewählt, die die unter 3.2.2 genannten Kriterien erfüllten.

Viele der bislang offen gebliebenen Fragestellungen, im Bezug auf die Segmentierung der mimischen Muskulatur in der MRT, konnten mit Hilfe der Präparation geklärt werden. Durch Vergleich der MRT-Daten mit den Ergebnissen der Präparation konnte die korrekte Identifikation und Segmentierung der Muskeln erstmalig sichergestellt werden. Neun der Muskeln wurden mit ausreichender Sicherheit sowohl in dem MRT-Datensatz des Körperspenders als auch in den drei bereits in der Orientierungsphase segmentierten Datensätzen Probanden aufgefunden, so dass diese als gut segmentierbare Kennmuskeln übernommen werden konnten. Die Präparation zeigte, dass auch anatomisch am Leichnam nicht immer alle mimischen Muskeln aufgefunden bzw. unterschieden werden können.

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Vergleich der Präparation und der Segmentierung des MRT-Datensatzes beschrieben. Die integrierten Abbildungen ermöglichten einen Vergleich zwischen den segmentierten ROIs im MRT-Datensatz und den entsprechenden anatomischen Korrelaten (Abb. 20-27).

4.1.1 Form und Lage des M. orbicularis oculi

Der M. orbicularis oculi reichte am Präparat von der Augenbraue bis auf Höhe des Nasenbodens, was der Dimension des segmentierten Muskels im MRT Datensatz entsprach. Die Pars palpebralis, also die Muskelfasern am Ober- und Unterlid, lag direkt unter der Haut.

Die Muskelfasern der Pars orbitalis waren wiederum durch eine etwa 4 mm breite Fettgewebsschicht von der Haut getrennt. Das Muskelgewebe zeigte sich außerdem von Fett durchsetzt. Dies erklärte, warum die Segmentierung des M. orbicularis oculi in den bereits segmentierten MRT-Datensätzen der drei Probanden und des Körperspenders immer „fleckig“ erschien. Die Segmentierung war damit bestätigt, zeigte sich jedoch unvollständig. Die Pars palpebralis war aufgrund ihrer Lage direkt unter der Haut im MRT-Datensatz nicht darstellbar und konnte damit nicht segmentiert werden (Abb. 19). Somit war die Segmentierung des M. orbicularis oculi immer unvollständig. Dies musste in der Evaluierung der Segmentierungsergebnisse immer berücksichtigt werden, da das errechnete Volumen nie Auskunft über die Größe des gesamten Muskels gab.

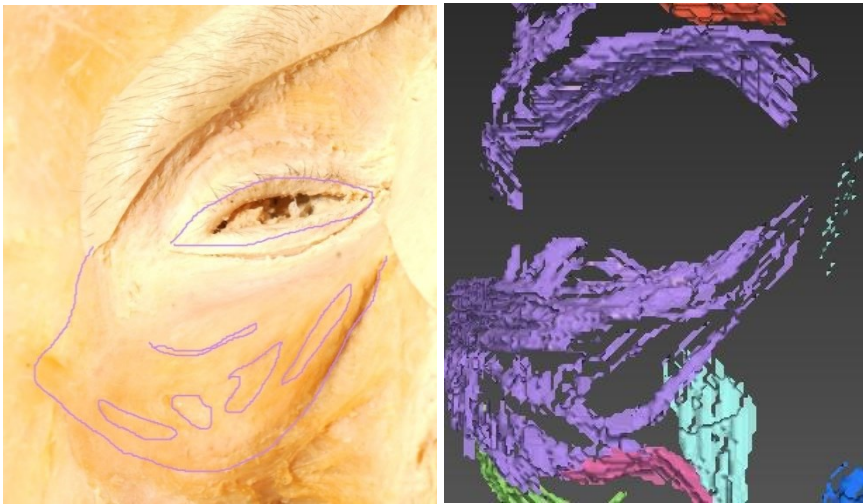


Abb. 20 M. orbicularis oculi dexter (lila markiert), links am Präparat mit lila eingezeichneten Grenzen der Muskelfasern, rechts 3D-Darstellung im MRT-Datensatz; türkis: M. levator labii sup., pink: M. zygomaticus minor

4.1.2 Form und Lage der Mm. zygomatici

Beide konnten sowohl während der Präparation als auch im MRT dargestellt werden. Die Ursprünge sowie die Muskelbäuche waren in Fett eingebaut und lagen unter einer etwa 5 mm dicken Fettgewebsschicht (Abb. 22). Die Lage der Muskeln konnte anhand der Präparation bestätigt werden. Selbst ein kleiner Seitenast des M. zygomaticus major, der sich im Verlauf abzweigt und unabhängig von dem eigentlichen Muskel am Modiolus inseriert, konnte während der Segmentierung aufgefunden und in der 3D-Darstellung sichtbar gemacht werden (Abb. 21). Es zeigte, dass es möglich ist, auch feine Muskelzüge im MRT-Datensatz zu segmentieren. Sowohl am Präparat als auch in der 3D-Darstellung war gut zu erkennen, dass beide Muskeln eine Verbindung zum M. orbicularis oculi aufweisen und die Abgrenzung zu diesem schwierig zu realisieren ist.

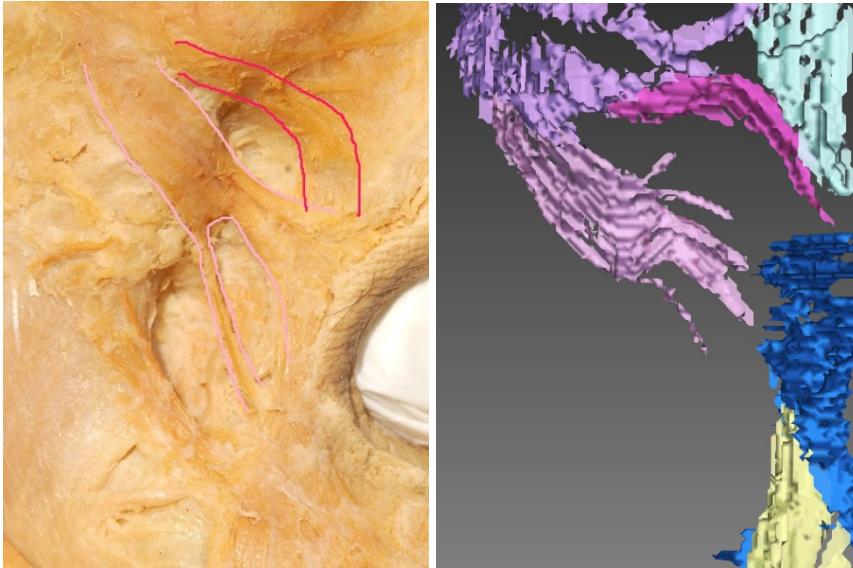


Abb. 21 Mm. zygomatici major (rosa) et minor (pink) dexter, ein Hauptast und kleiner Nebenast des M. zygomaticus major; links am Präparat, rechts 3D-Darstellung im MRT-Datensatz; lila: M. orbicularis oculi, blau: M. orbicularis oris, türkis: M. levator labii sup., gelb: M. depressor anguli oris

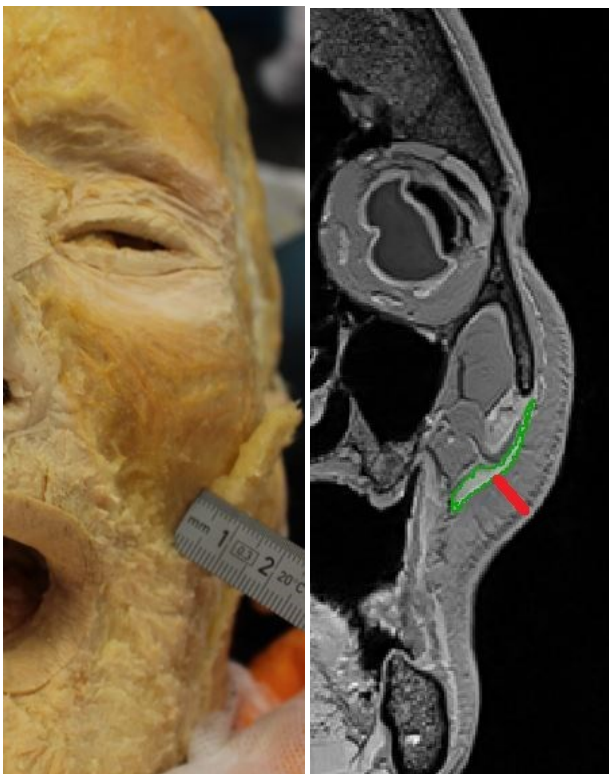


Abb. 22. Fettschicht über M. zygomaticus major sinister (grün markiert); links am Präparat, rechts MRT-Datensatz in Coronarebene; rot: Fettschicht

4.1.3 Ausdehnung des M. depressor anguli oris

Der M. depressor anguli oris umfasste nach kaudal den gesamten Mandibularand und verlief medial fast bis zur Mittellinie (Abb. 23). Nach lateral war keine klare Abgrenzung zum Platysma zu erkennen. Diese wurde während der Präparation anhand des Faserverlaufes festgelegt und ist für die MRT-Segmentierung auf Höhe des Mundwinkels zu setzen.

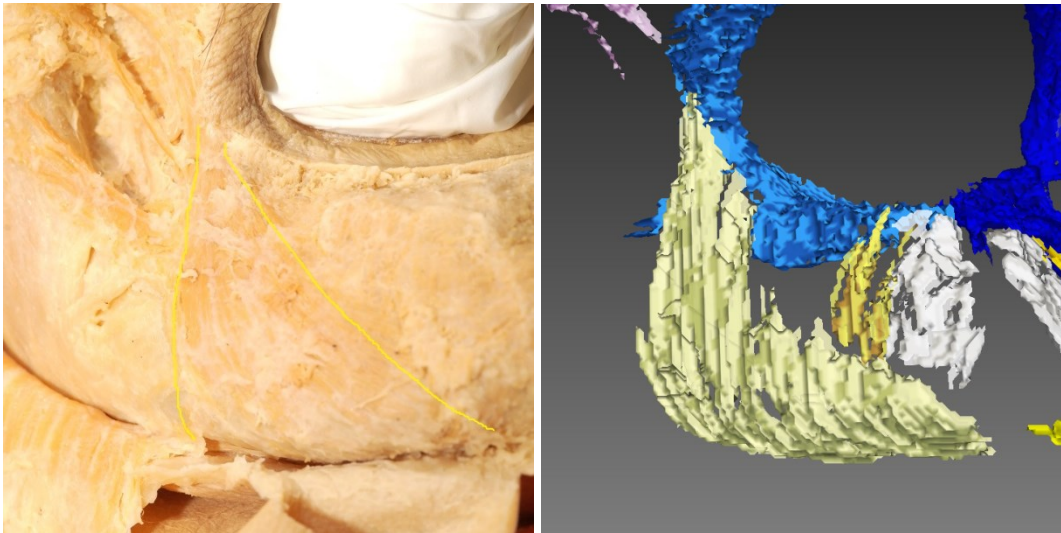


Abb. 23 *M. depressor anguli oris dexter* (gelb markiert); links am Präparat, rechts 3D-Darstellung im MRT-Datensatz; blau: *M. orbicularis oris*, weiß: *M. mentalis*, orange: *M. depressor labii inf.*

4.1.4 Abgrenzung und Ausdehnung der einzelnen Muskeln in der Kinnregion

Die getrennte Segmentierung der Muskeln gestaltete sich in der Orientierungsphase als schwierig. Die Präparation zeigte, dass die Muskeln direkt unter der Haut liegen und stark ineinander verflochten sind. Die gesamte Kinnregion war von Muskelfasern bedeckt und eine Differenzierung zwischen *M. depressor anguli oris*, *M. mentalis*, *M. depressor labii inferior* und *M. orbicularis oris* war kaum möglich (Abb. 24). Somit konnte die Richtigkeit der Segmentierung nicht vollständig überprüft werden. Insbesondere der Segmentierung des *M. depressor labii inferior* sollte keine Bedeutung zukommen, da im MRT-Datensatz, wenn überhaupt, nur Anteile dessen identifiziert werden konnten. Daher wurde dieser Muskel nicht als Kennmuskel ausgewählt.

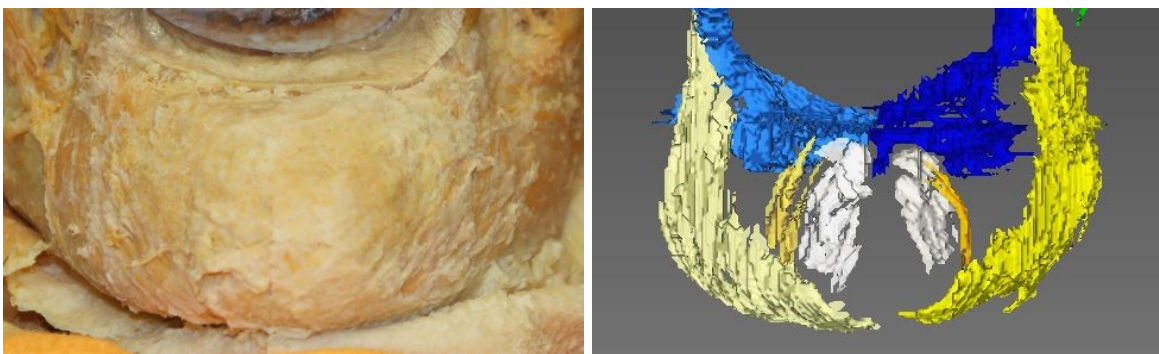


Abb. 24 Kinnregion; links am Präparat, rechts 3D-Darstellung im MRT-Datensatz; gelb: *M. depressor anguli oris*, blau: *M. orbicularis oris*, weiß: *M. mentalis*, orange: *M. depressor labii inf.*

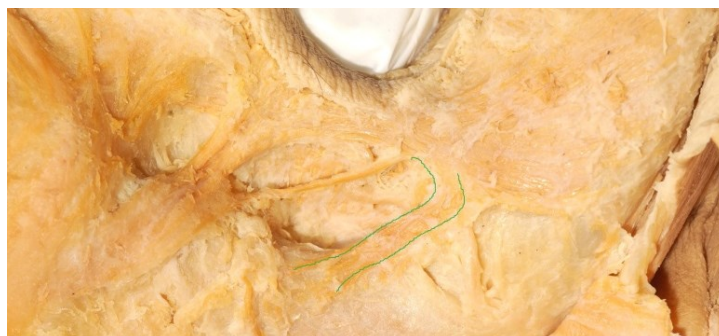
4.1.5 Im MRT bislang nicht segmentierte Muskeln



Abb. 25 *M. nasalis* am Präparat

bei der nur etwa ein Pixel breiten ROI wirklich um Muskelgewebe handelt. Während der Präparation stellte sich der Muskel dann in einer feinen Muskelschicht direkt unter der Haut dar (Abb. 25). Die Segmentierung des *M. nasalis* war im MRT-Datensatz des fixierten anatomischen Präparates, womöglich aufgrund der Formalinfixierung, nicht möglich. Bei näherer Betrachtung der Probanden-Datensätze konnte der Muskel jedoch dann auf Grundlage der erworbenen anatomischen Kenntnisse identifiziert werden und wurde so als Kennmuskeln aufgenommen.

Dem *M. risorius* kommt in seiner Funktion als Lachmuskel eine große Bedeutung zu (Marur et al. 2014). Jedoch war es in der Segmentierung der Datensätze sehr selten möglich, diesen zu identifizieren. Am



Präparat konnte der *M. risorius* Abb. 26 *M. risorius* am Präparat (grün markiert)

eindeutig sichtbar gemacht werden. Er lag etwa in der Ebene der *Mm. zygomatici* und verlief bogenförmig zum Mundwinkel (Abb. 26). Aber auch im MRT-Datensatz des selbigen Körperspenders konnte der Muskel nicht eindeutig dargestellt werden. Dies hatte zur Folge,

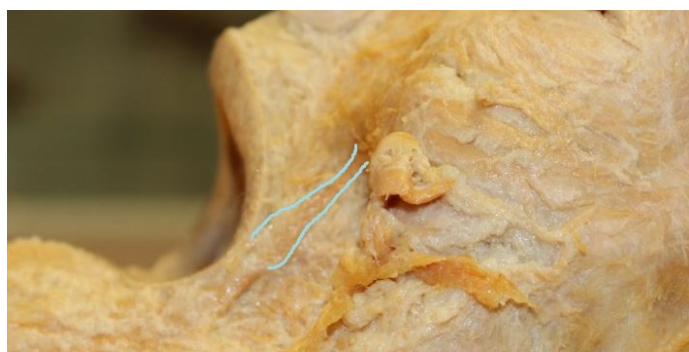


Abb. 27 *M. levator anguli oris* am Präparat (türkis markiert)

Viele der mimischen Muskeln wurden bisher in der Segmentierung außer Acht gelassen, da sie nicht mit ausreichender Sicherheit identifiziert werden konnten. So wurde der *M. nasalis* in den Datensätzen der Probanden bisher nur selten segmentiert, da unklar war, ob es sich

dass der Muskel nicht als Kennmuskel ausgewählt werden konnte. Es sagt jedoch auch aus, dass die Darstellbarkeit des Muskels im MRT keine Auskunft darüber geben kann, ob der Muskel angelegt ist oder nicht.

Dem *M. levator anguli oris* wurde sowohl in der Sonographie als auch im

MRT bisher wenig Beachtung geschenkt. In der Präparation war er jedoch eindeutig sichtbar (Abb. 27). Er lag im Verhältnis zum M. levator labii superioris in einer tieferen Ebene. Aber auch bei diesem Muskel war es im Nachhinein nicht möglich, ihn im MRT-Datensatz zu identifizieren und wurde so nicht als Kennmuskel ausgewählt.

4.2 Darstellbarkeit der mimischen Muskeln

Tab. 3 Übersicht über die während der anatomischen Präparation, in MRT, CT und Sonographie dargestellten Muskeln des Körperspenders

Muskel	Präparation	MRT	CT	Sonographie
M. mentalis	+	+		+
M. depressor labii inferioris	+			+
M. depressor anguli oris	+	+		+
M. corrugator supercilii	+	+		
M. zygomaticus major	+	+	+	+
M. zygomaticus minor	+	+		
M. orbicularis oculi	+	+	+	+
M. orbicularis oris	+	+	+	+
M. levator anguli oris	+			
M. levator labii superioris	+	+		
M. nasalis	+	+		
M. risorius	+			
M. procerus	+			
M. frontalis	+	+		+
M. buccinator	+	+		
Platysma	+	+		
M. depressor septi nasi				
M. levator labii superioris alaeque nasi				
M. depressor supercilii				
M. masseter	+	+	+	+
M. temporalis	+	+	+	+

Tab. 3 gibt eine Übersicht über die in der anatomischen Präparation, im MRT- sowie CT Datensatz und in der sonographischen Messung im Bereich des Gesichtes darstellbaren mimischen Muskeln des Körperspenders. Während der Präparation konnten mit Ausnahme des M. depressor septi nasi, M. levator labii superioris alaeque nasi und M. depressor supercilii alle mimischen Muskeln dargestellt werden. Der M. levator labii superioris alaeque nasi war nicht abgrenzbar von der Pars superioris des M. orbicularis oris sowie vom M. levator labii superioris. Für den M. depressor septi nasi und den M. depressor supercilii ist bereits in der Literatur beschrieben, dass diese Muskeln sehr inkonstant angelegt sind (Waller et al. 2008).

Im MRT-Datensatz des Körperspenders konnten folgende Muskeln nicht eindeutig aufgefunden werden: Die drei mimischen Muskeln, die auch während der Präparation nicht dargestellt werden konnten, waren auch im MRT-Datensatz nicht identifizierbar. Der M. depressor labii superioris zeigte sich schon in der Präparation stark verworren mit dem M. depressor anguli oris und dem M. orbicularis oris und war aus diesem Grund im MRT kaum zu identifizieren. Außerdem ist er aufgrund seiner Lage im MRT schlecht darstellbar, da er im Kinnbereich sehr weit anterior liegt und die Kopfspule des MRT diesen nicht ausreichend abdeckt. Der M. levator anguli oris konnte ebenso wie M. risorius nicht identifiziert werden. M. procerus scheint zu dünn, um ihn im MRT-Datensatz segmentieren zu können.

Das Platysma war zwar sowohl in der Präparation als auch im MRT darstellbar, wurde aber für weitere Untersuchungen außer Acht gelassen, da es nicht vollständig segmentiert werden kann. Es liegt als dünner Hautmuskel direkt subkutan und zeigt keine knöcherne Befestigung (Marur et al. 2014).

In der CT konnten nur der M. zygomaticus major, M. orbicularis oculi und M. orbicularis oris sowie die Kaumuskeln M. masseter und M. temporalis identifiziert werden. In Abb. 28 und 29 wurde ein Vergleich der MRT und CT Bilder angestellt. Sie zeigen Schnittbilder aus dem CT- sowie MRT-Datensatz auf etwa gleicher Höhe. Es wurde ersichtlich, dass die CT-Aufnahmen deutlich unschärfer sind. Die Muskeln erschienen im MRT-Bild um einiges detaillierter. Es wurde deutlich, dass die CT v.a. auf die Darstellung und Untersuchung der knöchernen Strukturen abzielt, da diese besser wahrzunehmen waren als im MRT. Jedoch ist auch zu erkennen, dass alle knochennahen mimischen Muskeln, wie beispielsweise der M. mentalis oder M. depressor anguli oris, nicht darstellbar waren, da der Knochen die Umgebung „überstrahlte“.

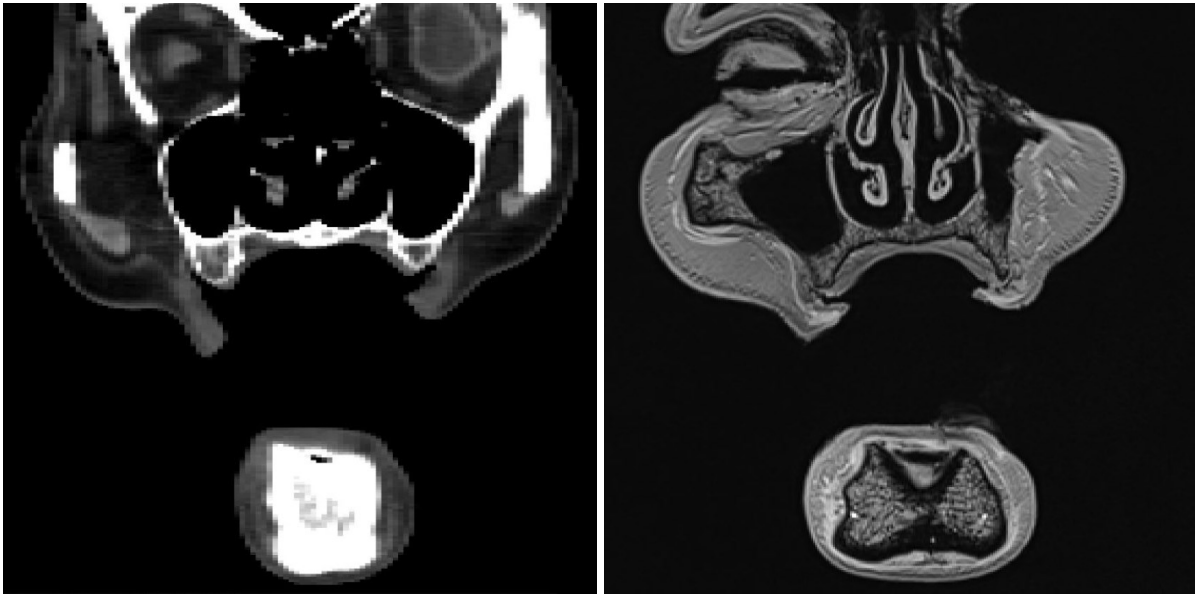


Abb. 28 Vergleich CT – MRT des Körperspenders in Coronalenebene; links CT; rechts MRT

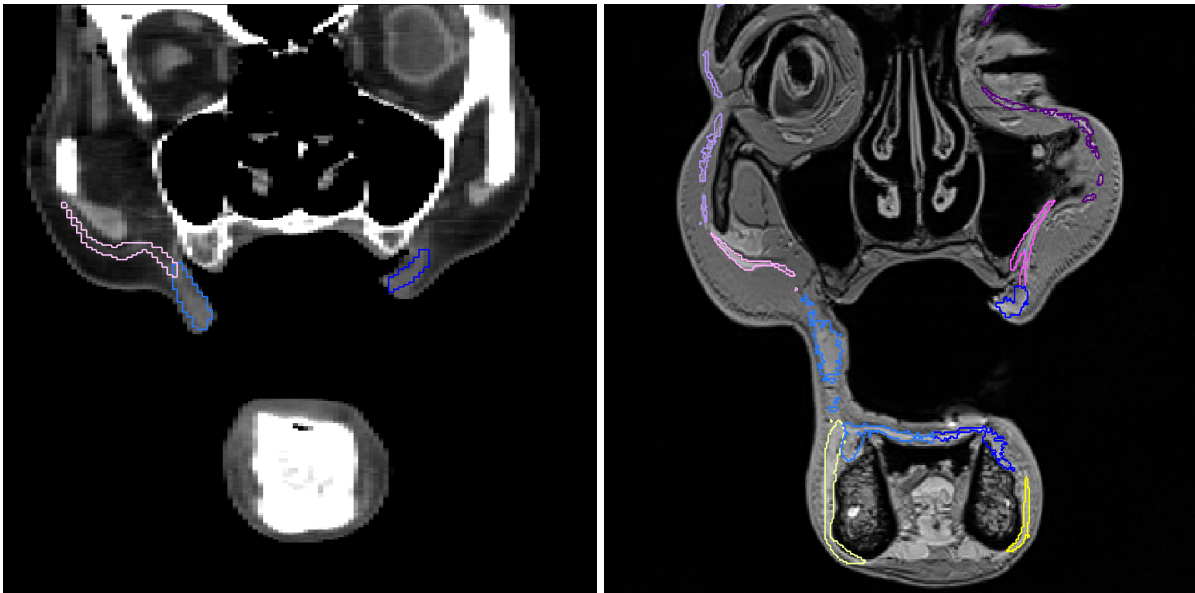


Abb. 29 Segmentierung der darstellbaren Muskeln des Körperspenders in Coronalenebene; links CT; rechts MRT; rosa: M. zygomaticus major, lila: M. orbicularis oculi.; blau: M. orbicularis oris, gelb: M. depressor anguli oris

Während der sonographischen Untersuchung konnten folgende Muskeln dargestellt und vermessen werden: M. mentalis, M. depressor labii inferioris, M. depressor anguli oris, M. zygomaticus major, M. orbicularis oculi, M. orbicularis oris, M. frontalis, M. masseter und M. temporalis. Die folgenden sechs Muskeln konnten im MRT, jedoch nicht in der Sonographie dargestellt werden: M. corrugator supercilii, M. zygomaticus minor, M. levator labii superioris, M. nasalis, M. buccinator, Platysma. Aufgrund der Fixierung und den damit verbundenen Veränderungen des Gewebes sowie den veränderten Schallleitungseigenschaften desselben konnten nicht alle mimischen Muskeln sonographisch eindeutig identifiziert

werden. Abb. 30 verdeutlicht exemplarisch den Vergleich zwischen Sonographie und MRT für die Muskelquerschnitte des M. depressor anguli oris und M. depressor labii inferioris links. Es zeigt, dass mit beiden Methoden die Muskelquerschnitte sichtbar gemacht werden konnten. Allerdings ließ sich der M. depressor labii inferioris im MRT des Körperspenders, wie auch in den Datensätzen der Probanden, nur schlecht bis gar nicht darstellen. Im sonographischen Querschnitt wiederum ist er gut abgegrenzt. Die Bilder zeigten, dass schon die Lage der Muskelquerschnitte zueinander im Vergleich nicht übereinstimmte. Daher wurden keine weiteren Messungen vorgenommen. Bei dem Versuch, die Querschnitte der anderen mimischen Muskeln zu vergleichen, zeigten sich ähnliche Probleme.

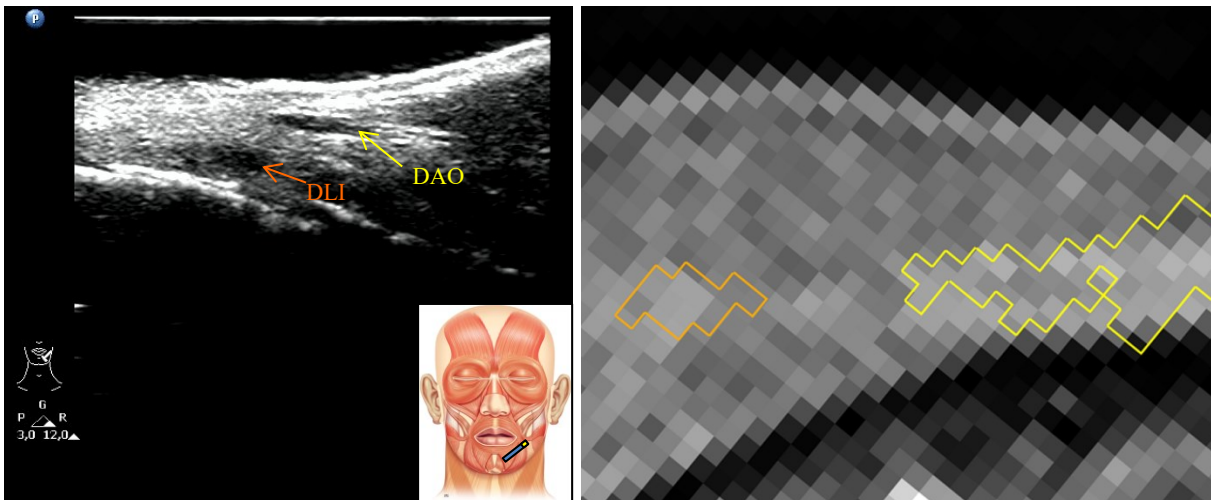


Abb. 30 M. depressor anguli oris (DAO) et M. depressor labii inf. (DLI) sinister des Körperspenders; links Sonographie; rechts MRT, Schemabild verdeutlicht Schnittebene für Sonographie und MRT

Nur die Darstellung der Mm. mentales mit Hilfe der Sonographie und MRT ermöglichte einen besseren Vergleich (Abb. 31). In diesem Fall musste die x-Achse im MRT nicht verändert werden, um es dem sonographischen Querschnitt anzugleichen, da die sonographische Vermessung der Muskeln in der Horizontalen erfolgt. Beide Bilder zeigten einen ähnlichen Querschnitt des M. mentalis sowohl rechts als auch links. Beide Abbildungen verdeutlichen, dass der Muskel eng an der Mandibula anliegt und sich nach medial etwas von ihr entfernt.

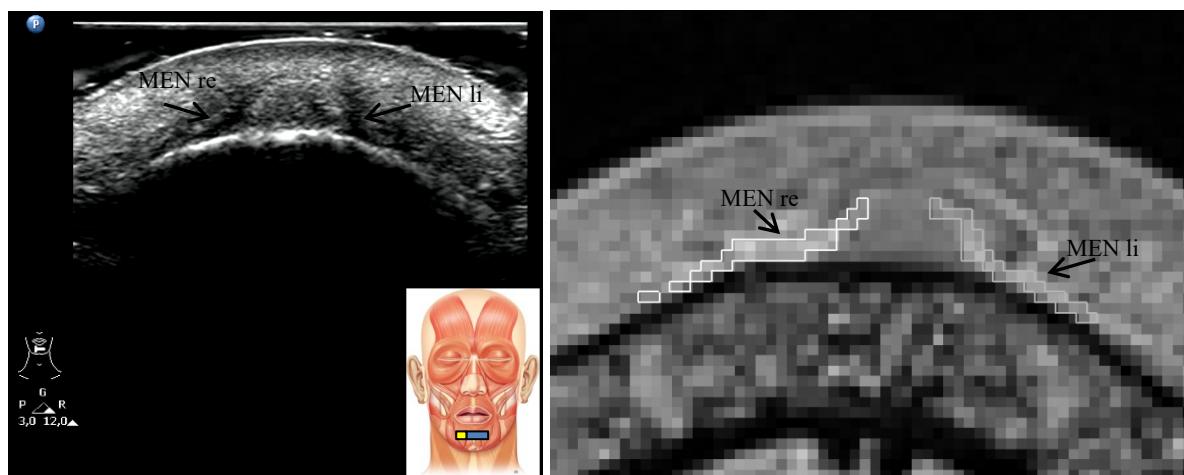


Abb. 31 Mm. mentales dexter et sinister (MEN re und li) des Körperspenders, links Sonographie, rechts MRT in Axialebene; Schemabild verdeutlicht Schnittebene für Sonographie und MRT

Neben dem visuellen Vergleich wurden für die Mm. mentales exemplarisch auch die Messwerte verglichen (Tab. 4). Die absoluten Werte zeigten große Unterschiede zwischen den Methoden. So wurde die Fläche des M. mentalis links in der sonographischen Vermessung mehr als doppelt so groß gemessen wie im MRT-Datensatz (Sonographie: 28,98 mm², MRT: 13,45 mm²). Nur die Längsdurchmesser beider Muskeln zeigten annähernd gleiche Messwerte. Wurden die Messwerte im Verhältnis betrachtet, stimmten diese weitgehend überein. Der linke M. mentalis zeigte sowohl in der Sonographie als auch im MRT größere Messwerte als der rechte M. mentalis.

Tab. 4 Vergleich der Messwerte zwischen Sonographie und MRT

Muskel	Sonographie			MRT		
	Fläche in mm ²	Längsdurchmesser in mm	Querdurchmesser in mm	Fläche in mm ²	Längsdurchmesser in mm	Querdurchmesser in mm
M. mentalis links	28,98	12,64	4,05	13,45	11,66	2,42
M. mentalis rechts	22,83	8,87	3,27	10,37	10,09	2,38

4.3 Segmentierungsanleitung

In der Orientierungsphase wurde deutlich, dass das Segmentieren der mimischen Muskulatur ohne Erfahrungen und durch das Fehlen von Literatur und Bildmaterial sehr schwer zu erlernen ist. Außerdem differierten die Ergebnisse zwischen den Untersuchern stark, da bisher keine einheitlichen Segmentierungsparameter festgelegt wurden. So lag die errechnete Interobserver-Reliabilität bei der Betrachtung der neun Kennmuskeln in drei Datensätzen zwischen zwei Untersuchern bei nur ICC=0,731 (ICC= Intra Class Correlation).

Basierend auf den Erkenntnissen aus der Orientierungsphase und den Ergebnissen der Präparation wurde eine Anleitung zur standardisierten Segmentierung der mimischen Muskulatur erarbeitet. Sie ist dieser Arbeit im Anhang beigelegt. In der Anleitung wurde erläutert, worauf beim Segmentieren der mimischen Muskulatur geachtet werden muss und wie jeder einzelne Kennmuskel in allen drei Ebenen aufzufinden ist. Auf der Startseite ist ein 3D-Modell der mimischen Muskulatur sichtbar, bei der durch Klicken auf den gewünschten Muskel automatisch die Segmentierungsanleitung des selbigen geöffnet wird. Die Website wurde in fünf Punkte unterteilt. Der erste beinhaltet eine kurze Erklärung, in der die Intention und der Aufbau der Anleitung erläutert werden. Der nächste Punkt stellt eine allgemeine Einführung in die Segmentierung der mimischen Muskulatur dar. Dabei werden wichtige Segmentierungsparameter definiert, was die Grundlage für eine standardisierte Untersuchung der mimischen Muskulatur im MRT-Datensatz bildet. Außerdem wurde erläutert, wie das Programm MITK aufgebaut ist und Schritt für Schritt erklärt, wie das Segmentieren eines MRT-Datensatzes im MITK begonnen wird. Das nächste Kapitel beinhaltet die Segmentierungsanleitungen der einzelnen mimischen Muskeln. Da die anatomischen Kenntnisse grundlegend für das Verständnis der Segmentierung sind, wurden Ursprung, Ansatz und Funktion aller mimischen Muskeln in einer Tabelle nochmals zusammengefasst (Zilles et al. 2010).

Außerdem wurde für die Kennmuskeln *M. mentalis*, *M. depressor anguli oris*, *M. corrugator supercilii*, *M. zygomaticus major*, *M. zygomaticus minor*, *M. orbicularis oculi*, *M. orbicularis oris*, *M. levator labii sup.*, *M. nasalis*, *Venter frontalis* des *M. occipitofrontalis* und *M. buccinator* erklärt, wie sie im MRT-Datensatz aufzufinden sind und wie sie segmentiert werden sollten. Des Weiteren wird der Bezug der Muskeln zu anatomischen Landmarken hergestellt, wie beispielsweise zu knöchernen Strukturen oder naheliegenden Gefäßen. Um die Lage der Muskeln bildlich zu verdeutlichen, beinhaltet sie neben den reinen Segmentierungsanleitungen auch MRT Bilder in einer für den jeweiligen Muskel charakteristischen Schicht jeder Ebene. Der Muskel ist jeweils in seiner entsprechenden Farbe markiert. Um die Orientierung zu erleichtern, werden alle detaillierten MRT Bilder von einem Übersichtsbild in der entsprechenden Schicht begleitet, in welchem die anderen beiden dargestellten Ebenen mit Linien markiert sind. Unter den entsprechenden Abbildungen werden die mit Zahlen markierten Strukturen benannt und erläutert. Um den Atlas übersichtlich zu gestalten, erfolgen die Anleitungen ausnahmslos für die rechte Gesichtshälfte.

Die weiteren acht mimischen Muskeln wurden aufgrund ihrer geringen Darstellbarkeit ausgeschlossen: M. depressor septi nasi, M. levator labii superioris alaeque nasi, M. depressor supercillii und M. levator anguli oris konnten sowohl in der Segmentierung der MRT-Datensätze des Präparates und der Probanden, als auch während der Präparation nicht aufgefunden werden. Der M. procerus und M. risorius konnten zwar am Präparat dargestellt werden, sind jedoch selten im MRT-Datensatz identifizierbar. Der M. depressor labii inferioris ist stark verflochten mit dem umliegenden Gewebe und kann daher nur schwer segmentiert werden. Außerdem ist er aufgrund seiner Lage nicht ideal im MRT darstellbar.

Im nächsten Punkt erfolgt die anatomische Erläuterung der Kaumuskeln sowie die Segmentierungsanleitung für M. temporalis und M. masseter in der gleichen Weise. Für die in der Anleitung segmentierten Muskeln wurde das Programm MITK verwendet. Um dem Anwender den Verlauf der gesamten Muskeln zu verdeutlichen, wurden im letzten Punkt Videos online gestellt, in denen die kompletten Ebenen durchfahren werden und alle segmentierten Muskeln vollständig sichtbar sind. Außerdem beinhaltet es ein Video, in der eine 360° Rundumsicht eines 3D-Modells der mimischen Muskeln zu sehen ist. Die Videos sind auf der beiliegenden DVD zu finden.

Die Anleitung wurde online unter www.facial.muscles.wiki zur Verfügung gestellt und ist damit für den Benutzer frei zugänglich. Um sie für die Mehrheit der Untersucher anwendbar zu machen, wurde sie auch in englischer Sprache online gestellt.

4.4 Interobserver-Reliabilität

Um die Zuverlässigkeit der Methode zu überprüfen, wurde die Interobserver-Reliabilität zweier Untersucher ermittelt. Es wurde untersucht, wie stark die Ergebnisse der Segmentierungen zweier Untersucher (A.M. und J.D.) eines gleichen MRT-Datensatzes korrelieren. Die Übereinstimmung ist umso höher, je mehr die Werte sich +1,0 nähern.

4.4.1 Nutzen der Segmentierungsanleitung

Um den Nutzen der Segmentierungsanleitung evaluieren zu können, wurden die Interobserver-Reliabilitäten mit und ohne Segmentierungsanleitung verglichen. Tab. 5 und 6 verdeutlichen außerdem, warum die Anzahl der Kennmuskeln von elf auf neun reduziert wurde. Die Reliabilitäten wurden zunächst für die elf zu Beginn ausgewählten Kennmuskeln errechnet (Tab. 5).

Ergebnisse

Tab. 5 Interobserver-Reliabilität der Volumina der elf Kennmuskeln (mit M. zygomaticus minor und M. frontalis) beidseits an jeweils drei Probanden durch zwei verschiedene Untersucher (A.M. und J.D.) Damit ergibt sich bei drei Probanden à elf Muskeln beidseits ein Referenzwert von 66 Muskeln (ICC= Intra Class Correlation; 95% CI = 95% Konfidenzintervall)

Segmentierung von 3 Datensätzen	ICC	95% CI	p-Wert	Beim Segmentieren gefundene Muskeln
ohne Anleitung	0,711	[0,4422-0,860]	<0,001	27/66
mit Anleitung	0,819	[0,710-0,890]	<0,001	56/66

Bei der Betrachtung des gesamten Datensatzes wurden die Kaumuskeln M. masseter und M. temporalis außer Acht gelassen, da besonders der Einfluss der Anleitung auf die Segmentierung der mimischen Muskeln untersucht werden sollte. Die Ergebnisse zeigten, dass bei der Segmentierung von drei Datensätzen der ICC-Koeffizient von 0,711 ohne Anleitung auf 0,819 nach Anleitung gesteigert werden konnte. Der Anteil an identifizierten Muskeln in den gesamten drei Datensätzen stieg von 40 % (27 von 66 Muskeln) auf 85% (56 von 66 Muskeln) an. Da die Darstellung der Muskeln M. zygomaticus minor sowie M. frontalis am Körperspender sowohl im MRT-Datensatz als auch während der Präparation ohne Probleme möglich war, wurden diese Muskeln vorerst als Kennmuskeln ausgewählt und in die Segmentierungsanleitung integriert. Bei der Auswertung der Datensätze der Probanden viel jedoch auf, dass speziell diese beiden Muskeln nur sehr selten vollständig segmentiert werden konnten. Daher wurden sie aus der Auswahl der Kennmuskeln ausgeschlossen und in den nachfolgenden Untersuchungen außer Acht gelassen und die Interobserver-Reliabilität erneut ohne M. zygomaticus minor und M. frontalis errechnet (Tab. 6).

Tab. 6 Interobserver-Reliabilität der Volumina der reduzierten neun Kennmuskeln beidseits an jeweils drei Probanden durch zwei verschiedene Untersucher (A.M. und J.D.) Damit ergibt sich bei drei Probanden à neun Muskeln beidseits ein Referenzwert von 54 Muskeln (ICC= Intra Class Correlation; 95% CI = 95% Konfidenzintervall)

Segmentierung von 3 Datensätzen	ICC	95% CI	p-Wert	Beim Segmentieren gefundene Muskeln
ohne Anleitung	0,731	[0,445-0,874]	<0,001	27/54
mit Anleitung	0,820	[0,709-0,891]	<0,001	54/54

Die Ergebnisse zeigten, dass es bei der Segmentierung von drei Datensätzen mit 9 Kennmuskeln der ICC-Koeffizient von 0,731 auf 0,820 gesteigert werden konnte. Der Anteil an identifizierten Muskeln stieg von 50% (27 von 54 Muskeln) auf 100% (54 von 54 Muskeln) an. Dies verdeutlichte, dass die Anleitung die Ergebnisse der Segmentierungen sowohl quantitativ als auch qualitativ verbessern konnte. Die Anwendung der

Ergebnisse

Segmentierungsanleitung ermöglichte beiden Untersuchern, sämtliche neun Kennmuskeln in allen drei Datensätzen zu identifizieren.

Im Folgenden wurden die Volumina und Grauwerte der einzelnen Muskeln betrachtet (Tab. 7 und 8). Da die Anzahl der Muskeln bei drei Probanden und zwei Seiten auf jeweils sechs gleiche Muskeln begrenzt war, waren die Ergebnisse in den meisten Fällen nicht signifikant. Die Messungen wurden dennoch durchgeführt, um eventuelle Tendenzen aufzuzeigen.

Tab. 7 Interobserver-Reliabilität der Volumina der Muskeln beidseits von drei Probanden ohne Segmentierungsanleitung und drei Probanden mit Segmentierungsanleitung durch zwei verschiedene Untersucher (A.M. und J.D.) (ICC= Intra Class Correlation; 95% CI = 95% Konfidenzintervall)

Muskeln	ohne Segmentierungsanleitung				mit Segmentierungsanleitung			
	n	ICC	95% CI	p-Wert	n	ICC	95% CI	p-Wert
M. mentalis	2/6	0,007	[-0,002 ; 0,864]	0,279	6	0,881	[0,413 ; 0,982]	0,003
M. depressor anguli oris	2/6	0,639	[-0,019 ; 0,999]	0,071	6	0,608	[-0,161 ; 0,932]	0,069
M. corrugator supercilii	2/6	0,276	[-0,107 ; 0,997]	0,277	6	0,881	[0,062 ; 0,984]	0,001
M. zygomaticus major	6	0,385	[-0,149 ; 0,859]	0,066	6	0,755	[-0,083 ; 0,962]	0,034
M. orbicularis oculi	6	0,062	[-0,052 ; 0,472]	0,223	6	0,107	[-0,190 ; 0,680]	0,319
M. orbicularis oris	2/6	0,173	[-0,475 ; 0,985]	0,596	6	0,187	[-0,530 ; 0,813]	0,332
M. levator labii superior	2/6	-			6	0,14	[-0,590 ; 0,800]	0,375
M. nasalis	2/6	0,903	[-1,480 ; 1,000]	0,168	6	0,887	[-0,034 ; 0,986]	<0,001
M. buccinator	6	0,156	[-0,386 ; 0,778]	0,334	6	-0,211	[-0,962 ; 0,676]	0,662
M. temporalis	6	0,224	[-0,325 ; 0,804]	0,264	6	0,541	[-0,512 ; 0,923]	0,127
M. masseter	6	0,296	[-0,659 ; 0,863]	0,272	6	0,856	[0,277 ; 0,978]	0,003

Bei der Betrachtung der Volumina ergab sich ohne Segmentierungsanleitung, bis auf den M. depressor anguli oris (ICC=0,639) und den M. nasalis (ICC=0,903), ein ICC-Koeffizient von $\leq 0,296$, was einer geringen Interobserver-Reliabilität entspricht. Aufgrund der geringen Anzahl an Messwerten waren jedoch alle Werte nicht signifikant. Die Muskeln M. mentalis, M. depressor anguli oris, M. corrugator supercilii, M. orbicularis oris, M. levator labii sup. und M. nasalis konnten nur in zwei von sechs Fällen aufgefunden werden.

Die Datensätze, die mit Hilfe der Segmentierungsanleitung bearbeitet wurden, ergaben einen signifikanten ICC-Koeffizienten für die Muskeln M. mentalis, M. corrugator supercilii, M. nasalis sowie M. masseter von $\geq 0,856$, was einer guten Interobserver-Reliabilität entspricht. Die ICC-Koeffizienten der anderen Muskeln zeigten zwar keine Signifikanz, waren jedoch bis auf den M. nasalis und den M. buccinator im Vergleich größer als die ICC-Koeffizienten ohne Segmentierungsanleitung. Mit Hilfe der Segmentierungsanleitung konnten alle Kennmuskeln identifiziert werden.

Ergebnisse

Tab. 8 Interobserver Reliabilität der Grauwerte der Muskeln beidseits von drei Probanden ohne Segmentierungsanleitung und drei Probanden mit Segmentierungsanleitung durch zwei verschiedene Untersucher (A.M. und J.D.) (ICC= Intra Class Correlation; 95% CI = 95% Konfidenzintervall)

Muskeln	ohne Segmentierungsanleitung				mit Segmentierungsanleitung			
	n	ICC	95% CI	p-Wert	n	ICC	95% CI	p-Wert
M. mentalis	2/6	-0,02	[-0,152 ; 0,632]	0,549	6	0,182	[-0,227 ; 0,759]	0,258
M. depressor anguli oris	2/6	0,948	[0,049 ; 1,000]	0,088	6	0,838	[0,222 ; 0,976]	0,004
M. corrugator supercilii	2/6	0,446	[-0,011 ; 0,998]	0,079	6	0,525	[-0,125 ; 0,911]	0,019
M. zygomaticus major	6	0,628	[-0,217 ; 0,938]	0,072	6	0,583	[-0,227 ; 0,928]	0,091
M. orbicularis oculi	6	-0,004	[-0,078 ; 0,327]	0,521	6	0,453	[-0,056 ; 0,890]	0,005
M. orbicularis oris	2/6	0,135	[-0,063 ; 0,994]	0,315	6	0,426	[-0,210 ; 0,879]	0,111
M. levator labii sup.	2/6	0,778	[-0,005 ; 1,000]	0,035	6	0,693	[-1,183 ; 0,359]	0,92
M. nasalis	2/6	0,903	[-1,480 ; 1,000]	0,168	6	0,243	[-0,200 ; 0,792]	0,19
M. buccinator	6	0,752	[-0,057 ; 0,966]	<0,001	6	0,868	[0,241 ; 0,981]	0,002
M. temporalis	6	-0,003	[0,756 ; 0,753]	0,502	6	0,967	[0,800 ; 0,995]	<0,001
M. masseter	6	0,956	[0,053 ; 0,995]	<0,001	6	0,994	[0,957 ; 0,999]	<0,001

Auch in der Betrachtung der Grauwerte zeigte die Anwendung der Segmentierungsanleitung deutlich bessere Ergebnisse in der Interobserver-Reliabilität. Ohne Segmentierungsanleitung zeigten nur M. buccinator (ICC=0,752) und M. masseter (ICC=0,956) signifikante ICC-Koeffizienten. Beide konnten mit der Segmentierungsanleitung gesteigert werden (BUC ICC=0,868, MAS ICC=0,994). Mit der Segmentierungsanleitung zeigten außerdem der M. depressor anguli oris (ICC=0,838), M. orbicularis oculi (ICC=0,453) sowie der M. temporalis (ICC=0,967) signifikante Ergebnisse. Alle weiteren ICC-Koeffizienten erwiesen keine Signifikanz. Wurden die Koeffizienten dennoch verglichen, ergaben sich für die Muskeln M. mentalis, M. corrugator supercilii, M. orbicularis oculi und den M. orbicularis oris durch die Segmentierungsanleitung bessere Interobserver-Reliabilitäten.

4.5 Unterschiede zwischen den Untersuchern

Die Ergebnisse der Interobserver-Reliabilitäten verdeutlichten, dass große Unterschiede bei den Segmentierungen der mimischen Muskeln zwischen verschiedenen Untersuchern zustande kommen können. Abb. 32 zeigt exemplarisch am MRT-Datensatz von Proband MK, inwieweit die ermittelten Volumina der segmentierten Muskeln zwischen zwei Untersuchern voneinander abweichen. Die Segmentierung des Datensatzes wurde von beiden Untersuchern mit Hilfe der Segmentierungsanleitung vorgenommen. Für eine bessere Visualisierung im Diagramm wurden nur Muskeln ausgewählt, die ein ähnliches Muskelvolumen haben.

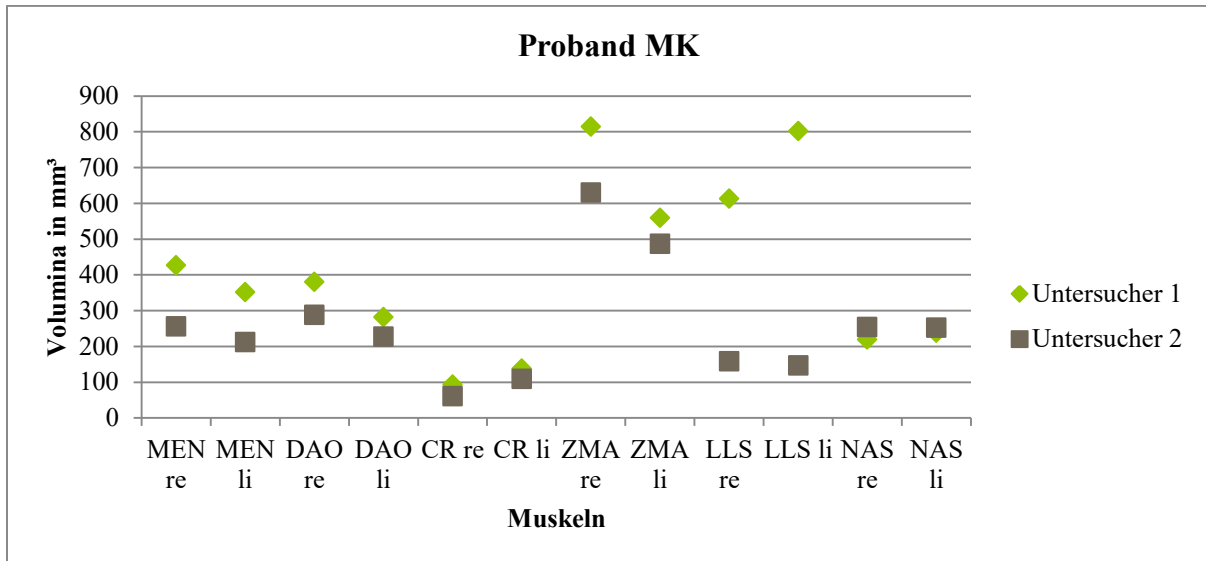


Abb. 32 Unterschiede in den segmentierten Volumina der Muskeln *M. mentalis* (MEN), *M. depressor anguli oris* (DAO), *M. corrugator supercilii* (CR), *M. zygomaticus major* (ZMA), *M. levator labii sup.* (LLS), *M. nasalis* (NAS) zwischen zwei Untersuchern am Probanden MK

Untersucher 1 erzielte in allen Fällen außer dem *M. nasalis* höhere Messergebnisse als Untersucher 2. Auch die Überprüfung der anderen sieben Datensätze zeigte eine ähnliche Tendenz. Dies lässt eine gewisse Konstanz erkennen. Für die Muskeln *Mm. depressores anguli oris*, *Mm. corrugatores supercilii*, *M. zygomaticus major* rechts sowie die *Mm. nasales* lagen die Ergebnisse sehr nah beieinander. Für die *Mm. mentales* und den *M. zygomaticus major* links variierten die Ergebnisse um etwa 35%. Die weit voneinander entfernten Ergebnisse des Muskelvolumens der *Mm. levatores labii sup.* zeigten, dass auch unter Zuhilfenahme der Segmentierungsanleitung in manchen Fällen immer noch Defizite in der eindeutigen Segmentierung aufkommen.

4.6 Zeitaufwand

Um den Zeitaufwand der Segmentierungen beurteilen zu können, wurde mittels Wilcoxon-Test berechnet, ob die Zeitunterschiede für die Segmentierung der einzelnen Muskeln ohne und mit Segmentierungsanleitung signifikant sind (Tab. 9).

Ergebnisse

Tab. 9 deskriptive Statistik und Wilcoxon-Test zum Vergleich der benötigten Zeit zum Segmentieren der einzelnen Kennmuskeln in drei Datensätzen ohne und mit Segmentierungsanleitung; Perzentilen in Sekunden

Muskel	ohne/mit Anleitung	n	Perzentile			p-Wert
			25.	50. Median	75.	
M. mentalis	ohne	2	132,75	186,00	146,25	0,180
	mit	6	93,25	103,50	122,75	
M. depressor anguli oris	ohne	2	194,25	295,50	249,00	0,180
	mit	6	132,75	221,50	264,25	
M. corrugator supercilii	ohne	2	189,00	275,50	224,25	0,180
	mit	6	178,75	212,50	238,75	
M. zygomaticus major	ohne	6	323,75	444,00	511,00	0,046
	mit	6	197,00	235,50	306,00	
M. orbicularis oculi	ohne	6	793,00	829,00	961,25	0,046
	mit	6	642,25	723,50	837,75	
M. orbicularis oris	ohne	2	489,75	723,50	595,50	0,180
	mit	6	501,50	577,50	609,25	
M. levator labii sup.	ohne	2	240,00	372,50	318,75	0,180
	mit	6	69,00	97,00	123,25	
M. nasalis	ohne	0	-	-	-	-
	mit	6	243,75	291,50	331,50	
M. buccinator	ohne	6	389,50	553,00	1191,25	0,028
	mit	6	260,50	310,50	357,25	
M. temporalis	ohne	6	1031,50	1133,50	1181,75	0,028
	mit	6	717,00	737,00	857,00	
M. masseter	ohne	6	721,50	775,00	816,00	0,028
	mit	6	371,50	425,50	487,75	

Es überprüft, ob es zwischen den beiden Segmentierungen ohne und mit Anleitung signifikante Zeitunterschiede gab. Aus den Ergebnissen ließ sich erkennen, dass vor allem für die mimischen Muskeln M. zygomaticus major ($p=0,046$), M. orbicularis oculi ($p=0,046$) sowie M. buccinator ($p=0,028$) und die Kaumuskeln M. temporalis ($p=0,028$) und M. masseter ($p=0,028$) durch die Anwendung der Segmentierungsanleitung die Segmentierung signifikant schneller erfolgen konnte. Für den M. mentalis, M. depressor anguli oris, M. corrugator supercilii, M. orbicularis oris und M. levator labii inf. lagen keine signifikanten Zeitunterschiede vor. Die errechneten Mediane zeigten, dass sich der Zeitaufwand für alle Muskeln verringert hat, wenn auch nicht signifikant. Für den M. nasalis konnte die statistische Signifikanz nicht errechnet werden, da der Muskel ohne Anleitung in allen drei Fällen nicht aufgefunden werden konnte. Auch die Muskeln M. mentalis, M. depressor anguli oris, M.

corrugator supercilii, M. orbicularis oris, M. levator labii sup. und M. nasalis konnten in zwei von drei Fällen überhaupt erst mit Hilfe der Segmentierungsanleitung identifiziert werden. Im folgenden Diagramm sind die für die Segmentierung der einzelnen Muskeln benötigten Zeiten exemplarisch für jeden den Probanden AS aufgeschlüsselt (Abb. 33).

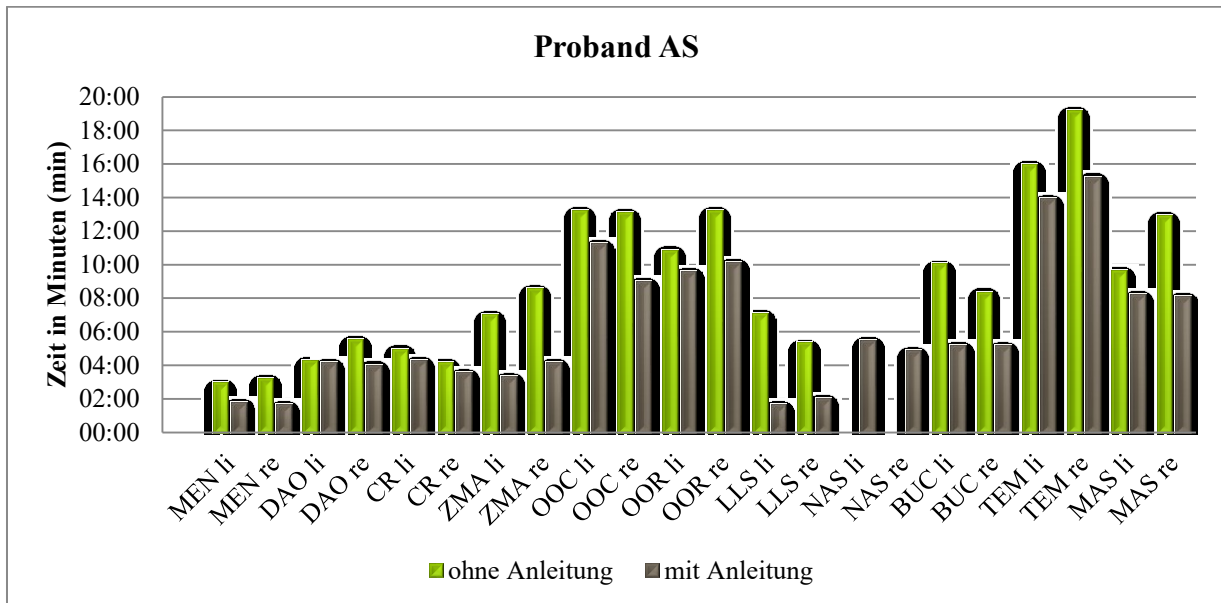


Abb. 33 Zeitaufwand zur Segmentierung der Kennmuskeln *M. mentalis* (MEN), *M. depressor anguli oris* (DAO), *M. corrugator supercilii* (CR), *M. zygomaticus major* (ZMA), *M. orbicularis oculi* (OOC), *M. orbicularis oris* (OOR), *M. levator labii sup.* (LLS), *M. nasalis* (NAS), *M. buccinator* (BUC) sowie *M. temporalis* (TEM) und *M. masseter* (MAS) im MRT-Datensatz von Proband AS; rechts [re], links [li]

Bei allen segmentierten mimischen Muskeln des Probanden AS erbrachte die Segmentierungsanleitung eine Zeitersparnis. Einen Zeitvorteil ergab sich besonders für den *M. zygomaticus major* (ZMA re: von 08:34 min auf 04:09 min; ZMA li: von 07:03 min auf 03:21 min) und den *M. buccinator* (BUC re: von 10:03 min auf 05:11 min; BUC li: von 08:23 min auf 05:10 min).

Der *M. nasalis* konnte überhaupt erst mit Segmentierungsanleitung aufgefunden werden. Auch die Kaumuskeln *M. temporalis* und *M. masseter* konnten mit Hilfe der Anleitung schneller segmentiert werden (TEM re: von 19:12 min auf 15:14 min; TEM li: von 15:58 min auf 13:58 min; MAS re: von 12:58 min auf 08:06 min; MAS li von 09:39 auf 08:13 min).

Ergebnisse

Tab. 10 deskriptive Statistik und Wilcoxon-Test zum Vergleich der benötigten Zeit zum Segmentieren der drei Datensätze (9 Kennmuskeln + Mm. masseter et temporalis beidseits) mit und ohne Segmentierungsanleitung; Perzentilen in Sekunden

Proband	ohne/mit Anleitung	n	Perzentile			p-Wert
			25.	50. Median	75.	
MP	ohne	10	706,50	952,00	1181,75	0,005
	mit	22	169,00	295,00	515,50	
AT	ohne	10	336,75	778,50	974,25	0,012
	mit	22	163,25	291,50	526,00	
AS	ohne	20	304,25	508,50	784,75	<0,001
	mit	22	211,25	301,50	549,50	

In Tab. 10 wurde die Zeitersparnis in der Betrachtung der gesamten MRT-Datensätze evaluiert. Dabei ergab sich für alle drei Datensätze ein signifikanter Zeitunterschied ($p < 0,05$).

In Abb. 34 wurde die Zeitersparnis für den gesamten MRT-Datensatz graphisch dargestellt.

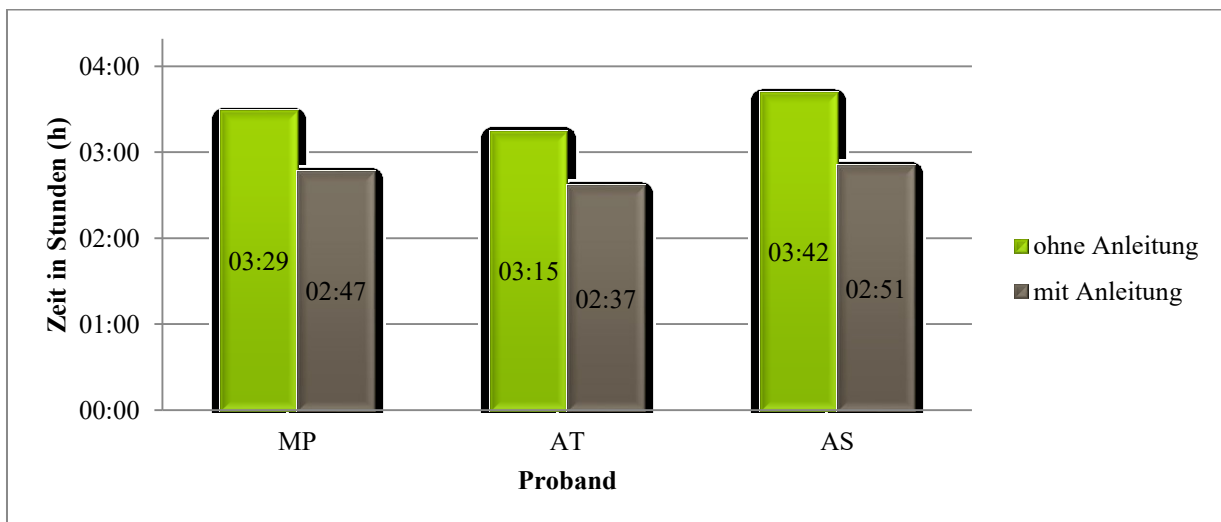


Abb. 34 . Zeitaufwand zur Segmentierung der gesamten mimischen Muskulatur sowie M. temporalis und M. masseter im MRT-Datensatz von drei Probanden ohne und mit Segmentierungsanleitung

Durch die Umsetzung der Segmentierungsanleitung konnte in allen drei Fällen eine erhebliche Zeitersparnis erreicht werden. Der gesamte Zeitaufwand für die Segmentierung aller Kennmuskeln sowie den M. masseter und M. temporalis betrug ohne Anleitung im Mittel 3h 28 min. Unter Zuhilfenahme der Segmentierungsanleitung verkürzte sich diese auf 2h 45 min. Die Betrachtung des gesamten Zeitaufwandes zeigt damit im Mittel eine Zeitersparnis von etwa 43 min.

5 Diskussion

In der vorliegenden Studie sollte die 3D-Segmentierung von MRT Bildern als non-invasive Methode zur quantitativen Untersuchung der mimischen Muskulatur evaluiert und vereinfacht werden, um sie künftig vermehrt in den Klinikalltag integrieren zu können. Dazu wurden die MRT-Datensätze von acht Probanden segmentiert und aus den Daten 3D-Modelle erstellt. Außerdem wurde ein Vergleich zur anatomischen Präparation angestellt, in dem sowohl MRT als auch anatomische Präparation an einem Körperspender erfolgten. Neun Muskelpaare der mimischen Muskulatur sowie die Kaumuskeln M. masseter et temporalis konnten konstant dargestellt und segmentiert werden. Für diese Muskeln wurde im Folgenden eine Segmentierungsanleitung erstellt, mit der die Segmentierung der mimischen Muskeln erleichtert werden soll, indem die Lage der Muskeln im MRT-Datensatz genau erklärt wird und mit Bildern unterlegt ist. Darauffolgend wurde die Segmentierungsanleitung auf ihre Anwendbarkeit untersucht, indem die Interobserver-Reliabilität und der Zeitaufwand mit und ohne Segmentierungsanleitung verglichen wurden.

5.1 Untersuchung der mimischen Muskulatur im MRT-Datensatz

In dieser Studie wurden alle MRT-Untersuchungen mit einem 3 Tesla MRT durchgeführt (Magnetom TIM Trio, Siemens, Erlangen, Deutschland). Als klinischer Standard gilt das 1,5 Tesla MRT. Der Vorteil der 3 Tesla MRT ist ein erhöhtes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) (Salvolini u. Scarabino 2006). Dabei handelt es sich um das Verhältnis von MR-Signal zum Hintergrundrauschen und bezieht sich dabei auf das einzelne Raumelement. MR-Bilder mit einem niedrigen SNR erscheinen verpixelter als Bilder mit hohem SNR (Nitz 2007). Farrugia et al. zeigten in einer Studie 2007, dass die Darstellung der mimischen Muskulatur auch im 1,5 Tesla MRT möglich ist (Farrugia et al. 2007). Die erstellte Anleitung ist somit auch auf 1,5-Tesla-Datensätze anwendbar. Zur guten Darstellung des Kopfes wurde eine 12-Kanal Kopfspule verwendet. Alle Probanden wurden in Rückenlage untersucht. Die Segmentierung der MRT-Daten ist stark abhängig von der verwendeten Messsequenz. Zur Untersuchung der Probanden wurden in diesem Fall die T₁-gewichteten Sequenzen MP-RAGE und VIBE verwendet, da diese zur Untersuchung der mimischen Muskulatur am besten geeignet sind (Gargiulo et al. 2011b). Den Vergleich dieser beiden Sequenzen bearbeitet Josefine Druse in ihrer Dissertation. Dazu wurden die beiden Sequenzen gegeneinander getestet und neben der Untersuchung von Probanden auch bei Patienten angewendet.

Auch im CT-Datensatz ist es möglich, die mimische Muskulatur darzustellen und zu segmentieren. Es wurden dennoch MRT-Daten genutzt, da die MRT die übliche Methode zur Darstellung von Weichteilen ist (Rezaeitabar u. Ulusoy 2012). Ein in dieser Arbeit angestellter Vergleich (Kapitel 5.4) zeigt ebenfalls, dass die MRT die bessere Methode zur Darstellung der mimischen Muskulatur ist.

Zur Auswertung der MRT-Daten wurde das Segmentierungsprogramm MITK Workbench genutzt. Es gibt verschiedene Programme zur Visualisierung und Segmentierung von 3D-Daten auf dem Markt. Vorangegangene Studien nutzten andere Software wie MIMICS (Gargiulo et al. 2011b) oder Avizo Fire (Volk et al. 2014a) zur Segmentierung der mimischen Muskulatur. Auch in dieser Studie wurde zu Beginn mit der Software Avizo Fire 7.1 (Visage Imaging Inc., Carlsbad, Calif.) gearbeitet. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Handhabung des Programmes sehr schwierig und der Aufbau sehr komplex ist, da das Programm nicht nur zur Segmentierung von ROIs entwickelt wurde, sondern auch die Analyse von vielen verschiedenen naturwissenschaftlichen und industriellen Daten ermöglicht. Da es Ziel dieser Arbeit war, die Segmentierung der mimischen Muskulatur zu optimieren, wurde nach einem Programm gesucht, das die Arbeit mit den MRT-Daten vereinfacht. MITK schien dafür geeignet. Zum einen ist es eine open-source Software, die für jeden Anwender frei zur Verfügung steht und stetig weiterentwickelt wird. Des Weiteren ist es verständlicher aufgebaut, da es speziell für die medizinische Bildgebung entwickelt wurde. So beinhaltet alle Tools, die zum Segmentieren und Auswerten der 3D-Daten nötig sind, aber der Anwender wird nicht von vielen, für die Segmentierung unwichtigen, Tools irritiert.

Die Segmentierung der ROI erfolgte im MITK zumeist durch manuelle Segmentierungstools wie „Paint“ oder „Add“. In einer Studie von Volk et al. 2014 wurde bereits für die Muskeln M. procerus, M. risorius, M. orbicularis oculi, M. nasalis, M. zygomaticus major, M. zygomaticus minor, M. levator labii superioris, M. orbicularis oris und zwei Kaumuskeln ein halbautomatisches Segmentierungstool verwendet (Volk et al. 2014a). Diese Methode erbringt einen großen Zeitvorteil, da nicht jeder Voxel einzeln markiert werden muss. Allerdings birgt es auch den Nachteil, dass die ROI nicht ganz exakt markiert werden kann. Vergleiche dazu wurden der Segmentierung der Datensätze dieser Studie vorangestellt (Siehe Abb. 2). Da es vorerst darum ging, die einzelnen Muskeln exakt zu markieren und ihre Lage im MRT zu definieren, wurde auf die halbautomatische Segmentierung verzichtet.

In der Orientierungsphase wurde zunächst versucht, alle mimischen Muskeln im MRT-Datensatz zu identifizieren. Aufgrund des fehlenden Bildmaterials in der Literatur zu diesem Thema nahm das Erlernen der Segmentierung mehrere Monate in Anspruch. Es wurde

versucht, die Kenntnisse aus anatomischen Bildatlanten (Schumacher u. Aumüller 2004) auf den Datensatz zu projizieren und so die verschiedenen Muskeln ausfindig zu machen. Nach der Segmentierung wurden aus den segmentierten Daten 3D-Modelle erstellt, welche dann wiederum mit den anatomischen Bildern verglichen werden konnten, um durch die Form und Lage der segmentierten ROI sicher zu stellen, dass es sich dabei um den gewählten Muskel handelt. Es konnten 14 mimische Muskeln und zwei Kaumuskeln in den Datensätzen der Probanden aufgefunden werden. Es blieb jedoch trotz der Korrelation mit anatomischen Atlanten oft unklar, ob es sich bei der segmentierten ROI wirklich um Muskelgewebe handelt. Einige dieser Muskeln konnten nur selten identifiziert werden. Zum einen handelt es sich bei den Atlanten um gezeichnete Bilder, die schwer mit MRT Bildern verglichen werden können. In den Schnittbildern des Kopfes wurden die mimischen Muskeln außerdem meist ganz außer Acht gelassen (Schumacher u. Aumüller 2004). Zum anderen sind die mimischen Muskeln individuell sehr unterschiedlich ausgeprägt (Goktepe et al. 2004). All diese Faktoren machen den Vergleich mit den anatomischen Atlanten sehr schwierig. Aus diesem Grund wurde parallel zur Untersuchung der mimischen Muskulatur an Probanden ein MRT eines mit Formalin fixierten Körperspenders aufgenommen. Für diese Untersuchung wurde eine spezielle individualisierte VIBE Sequenz entwickelt, in der auf die Anforderungen des mit Formalin fixierten Gewebes eingegangen wurde. Außerdem wurden die Mittelungen auf zwölf erhöht, wodurch eine erhöhte Bildqualität erzielt werden konnte. Nachfolgend wurden die 3D-Modelle der segmentierten Muskeln mit den anatomisch präparierten Muskeln desselben Körperspenders verglichen.

5.2 Identifikation der einzelnen mimischen Muskeln im MRT-Datensatz

Durch die Korrelation der segmentierten Daten mit den präparierten Muskeln des Körperspenders konnten detaillierte anatomische Kenntnisse erworben und die korrekte Identifikation und Segmentierung der Muskeln erstmalig sichergestellt werden. So war die Segmentierung des M. orbicularis oculi am Probanden während der Orientierungsphase stets unsicher, da das erstellte 3D-Modell nicht den anatomischen Bildern glich. Als ein Grund dafür wurde angenommen, dass die Pars palpebralis durch die Bewegung des Lids nicht gut darstellbar ist. Den Probanden steht es im MRT frei, ob sie die Augen geschlossen oder offen halten. Bleibt das Auge offen, kommt es durch den Lidschlag zu einer regelmäßigen Bewegung des Lids. Bei der Präparation des Körperspenders stellte sich heraus, dass es im MRT aufgrund seiner Lage direkt unter der Haut und dem fehlende subkutanen Gewebe nicht möglich ist, die Pars palpebralis zu segmentieren. Die Pars palpebralis sollte daher außer Acht

gelassen werden. Dies muss in der Evaluierung der Segmentierungsergebnisse immer berücksichtigt werden, da das errechnete Volumen nie Auskunft über die Größe des gesamten Muskels gibt. Trotz dieser Tatsache sind die Ergebnisse vergleichbar, da die Pars palpebralis in den Segmentierungen immer fehlt. Der Muskel zeigte außerdem starke Fetteinlagerungen, was das „fleckige“ Aussehen des 3D-Modells erklärte.

Auch bei der Form und Lage der Mm. zygomatici kamen zuvor Unsicherheiten in der Segmentierung auf. Vor allem durch die Mitarbeiter der Anatomie wurde zunächst angezweifelt, dass es sich um die beiden Muskeln handelt, da sie von einer breiten Fettschicht bedeckt waren und die mimische Muskulatur eigentlich oberflächlich unter der Haut liegt (Bentsianov u. Blitzer 2004). Beide konnten jedoch eindeutig durch die Korrelation mit der Präparation identifiziert werden. Auf der linken Seite wurde dazu die Fettschicht oberhalb des Muskels erhalten um das Ergebnis mit dem MRT-Bild vergleichen zu können. Die Lage der Muskeln im MRT wird eventuell auch dadurch etwas verfälscht, da die Ebene coronar angeschnitten wird und der Bezug nach anterior fehlt. Es war im MRT-Datensatz außerdem möglich einen kleinen Seitenast des M. zygomaticus major rechts darzustellen. Dies zeigt, dass es prinzipiell möglich ist, auch feine Muskelzüge im MRT segmentieren zu können.

Es konnten außerdem neue Erkenntnisse zur Ausdehnung und Abgrenzung der Muskulatur im Kinnbereich erzielt werden. Die Muskeln liegen direkt unter der Haut und sind stark ineinander verflochten, sodass eine Differenzierung der einzelnen Muskeln nur bedingt möglich war. Die Segmentierung des M. depressor anguli oris konnte durch die Präparation bestätigt werden. Der M. mentalis war zwar am Präparat nicht zu unterscheiden, zeigte sich aber im MRT-Datensatz des Körperspenders wie auch denen der Probanden gut abgegrenzt. Der M. depressor labii inferioris jedoch konnte sowohl am Präparat als auch im MRT-Datensatz nicht ausreichend dargestellt werden, da eine Trennung zum umliegenden Gewebe nicht möglich war. Ein weiterer Grund für die geringe Darstellbarkeit des M. depressor labii inferioris könnte außerdem sein, dass im Bereich des Kinns während der MRT Messung mehr Bewegung erfolgt als am Rest des Kopfes. Durch das Schlucken und Atmen ist die Mundregion ständig in leichter Bewegung. Außerdem weist die verwendete Kopfspule womöglich Signaldefizite im Bereich des Kinns auf. So sollten MRT-Untersuchungen im Kopfbereich im besten Fall unter der Verwendung einer Kopf-Hals-Spule erfolgen (Dammann et al. 2014). Sie liefert ein homogeneres Bild. Wir konnten diese jedoch für die Untersuchungen der Probanden nicht verwenden, da im 3 Tesla Forschungs-MRT keine existierte. Für die MRT-Messung des Präparates konnte aufgrund der Umhüllung aus Kunststoff auch die Kopfspule nicht verwendet werden. Wir nutzten ersatzweise zwei

Bodymatrizes, die im Bereich des Kopfes platziert wurden. Es fällt auf, dass sich auch im MRT-Datensatz des Körperspenders die gleichen Defizite im Kinnbereich zeigten wie am Probanden. Damit ist fraglich, ob die Bewegung im Kinnbereich relevant für die verminderte Bildqualität im Kinnbereich ist. Auch die Kopfspule als Grund für die schlechte Darstellbarkeit kann damit ausgeschlossen werden.

Die Präparation zeigte, dass die mimischen Muskeln im Kinnbereich stark ineinander verworren sind. Eine Alternative zur getrennten Segmentierung der Kinnmuskeln könnte es sein, die Kinnregion als ein gemeinsames Muskelkonglomerat anzusehen und in einer gemeinsamen ROI zu segmentieren. Würden sie gemeinsam segmentiert, müsste keine strikte Trennung erfolgen. Es stellt sich jedoch die Frage, an welchen Punkt die gemeinsame ROI abgegrenzt werden würde, da alle mimischen Muskeln in irgendeiner Art kommunizieren. So könnte auch der *M. orbicularis oris* in diese ROI integriert werden. Am Modiolus inserieren jedoch viele andere mimische Muskeln wie der *M. zygomaticus major*, *M. zygomaticus minor* und *M. labii superioris*. Diese wiederum zeigen starke Verbindungen zum *M. orbicularis oculi*. Eine gemeinsame ROI nur für die Kinnmuskulatur ist also ebenso kritisch zu sehen.

Die Darstellung kleiner und dünner Muskeln war im MRT Datensatz der Probanden wie auch des Körperspenders oft nicht möglich. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Muskeln zum Teil dünner sind als die Schichtdicke des MRT-Datensatzes. In MP-RAGE beträgt diese 1 mm. Der *M. frontalis* ist zwar, flächig gesehen, ein sehr großer Muskel, allerdings ist er sehr dünn ($<0,5\text{mm}$) und kann damit schlecht im MRT-Datensatz dargestellt werden (van Alfen et al. 2013). Auch der *M. procerus* ist durchschnittlich nur etwa 0,56 mm dick und kann so ebenso schwer dargestellt werden (van Alfen et al. 2013). Ein weiterer Grund ist, dass die mimische Muskulatur in ihrer Morphologie interindividuell sehr unterschiedlich ausgeprägt ist und nicht immer alle mimischen Muskeln angelegt sind. Nur die sog. Basismuskeln zur Ausführung der sechs Basisemotionen sind bei jedem Menschen konstant angelegt (Waller et al. 2008). Zu diesen gehören der *M. frontalis*, *M. orbicularis oculi*, *M. zygomaticus major*, *M. orbicularis oris*, sowie der *M. depressor anguli oris*.

Zur Einschätzung dieser Methode fällt es nicht erheblich ins Gewicht, dass nicht alle mimischen Muskeln im MRT dargestellt werden können. So sollte zur Evaluierung des Krankheitsbildes oder des Therapieerfolges nur die mimischen Muskeln vermessen werden, die sicher vom Untersucher aufgefunden werden können, um Fehldiagnosen zu vermeiden. Daher wurden aus den Erkenntnissen der Orientierungsphase und dem Vergleich der segmentierten Datensätze und der anatomischen Präparation des Körperspenders neun Muskeln ausgewählt, die gut und reproduzierbar segmentiert werden konnten. Für diese

Kennmuskeln wurden charakteristische Ebenen definiert. Voraussetzungen dazu waren eine eindeutige Zuordnung zu festen Landmarken und eine gute Erkennbarkeit der Zielstruktur. Die ausgewählten Kennmuskeln sind: M. mentalis, M. depressor anguli oris, M. corrugator supercilii, M. zygomaticus major, M. orbicularis oculi, M. orbicularis oris, M. levator labii sup., M. nasalis, M. buccinator.

Bereits in vorangegangenen Studien konnten die mimischen Muskeln im MRT bereits identifiziert und vermessen werden. Allerdings konnten meist weniger Muskeln dargestellt werden als in dieser aktuellen Studie. So gelang es Kleinheinz und Joos 2002, M. orbicularis oris, M. zygomaticus major und M. levator labii sup. zu identifizieren (Kleinheinz u. Joos 2001). Farrugia et al. konnten 2007 nur den M. orbicularis oris sowie den M. buccinator darstellen (Farrugia et al. 2007). Gargulio et al. war es 2011 möglich, die Mm. zygomatici und den M. orbicularis oculi als einzelne Muskeln zu visualisieren und zu quantifizieren (Gargiulo et al. 2011b).

2014 gelang es Volk et al. erstmals, mehrere mimische Muskeln zu identifizieren: M. frontalis, M. procerus, M. risorius, M. corrugator supercilii, M. orbicularis oculi, M. nasalis, M. zygomaticus major, M. zygomaticus minor, M. levator labii superioris, M. orbicularis oris, M. depressor anguli oris, M. depressor labii inferioris und M. mentalis (Volk et al. 2014a).

Auch in der aktuellen Studie konnten alle diese Muskeln dargestellt werden. Allerdings wurden durch die Korrelation mit der Präparation neue Erkenntnisse erzielt und deshalb wurden einige Muskeln als nicht reproduzierbar segmentierbar von der Gruppe der Kennmuskeln ausgeschlossen.

Wie auch in den vorangegangenen Studien zeigt die aktuelle Studie auf, dass nicht alle mimischen Muskeln mit Hilfe der 3D-Segmentierung von MRT-Datensätzen aufgefunden werden können. Doch es wurde erstmalig, auf Fakten basierend, evaluiert, welche mimischen Muskeln gut und reliabel zu segmentieren sind.

5.3 Klinische Anwendbarkeit der Methode

Die 3D-Segmentierung von MRT Bildern zur Darstellung der mimischen Muskulatur ist sehr diffizil und bisher kaum erforscht. Aufgrund der fehlenden Faszien und der damit schwierigen Abgrenzbarkeit zwischen Muskelgewebe und dem umliegenden Geweben sowie der feinen Strukturen und der räumlichen Anordnung ist die Segmentierung der mimischen Muskulatur nicht einfach. Bisher gibt es keine größeren Studien mit hohen Fallzahlen zu diesem Thema. Doch die Methode ist vielseitig anwendbar.

Die Fazialisparese ist die am häufigsten auftretende Parese eines Hirnnervens. Trotzdem wurde bisher keine Methode entwickelt, um den Status der mimischen Muskulatur objektiv und quantitativ evaluieren zu können (Volk et al. 2014a; Westin u. Zuker 2003). Bisher wird die mimische Muskulatur vor allem klinisch untersucht, indem der Patient verschiedene Bewegungen ausführen muss. Außerdem wird das EMG genutzt, um den Schweregrad der Parese einschätzen zu können (Grosheva et al. 2008; Volk et al. 2013a). Es kann aufzeigen, welche Endäste des N. facialis und welche mimischen Muskeln von der Parese betroffen sind (Volk et al. 2010). Außerdem kann damit eingeschätzt werden, wie hoch die Wahrscheinlichkeit einer Spontanheilung ist (Grosheva et al. 2008).

Eine länger anhaltende Denervierung führt im Laufe der Zeit zur Atrophie des Muskels. Das Ausmaß der Atrophie kann aber auch mit Hilfe der EMG nicht ausreichend quantitativ beurteilt werden (Volk et al. 2014b). So basiert momentan die Entscheidung, ob eine Nervenrekonstruktion durchgeführt werden sollte oder nicht, hauptsächlich auf der Dauer der bestehenden Denervierung (Terzis u. Konofaos 2008). Dies scheint jedoch sehr ungenau, da der Verlauf der Muskelatrophie sehr variabel ist. Es besteht keine klare Korrelation zwischen der Dauer der Denervierung und der Muskelatrophie, da auch andere Faktoren, wie die Art der Läsion, das Alter des Patienten und die konservative Therapie den Grad der Atrophie beeinflussen (Guntinas-Lichius et al. 2006). Die 3D-Segmentierung der mimischen Muskulatur könnte in dieser Hinsicht einen hohen diagnostischen und prognostischen Wert aufweisen. Denn die Muskelatrophie und –fibrose führt im Verlauf der Denervierung zu einer Asymmetrie der Muskelvolumina in Relation zur gesunden Seite, welche gut im MRT sichtbar gemacht werden kann (Kaylie et al. 2003). In zwei retrospektiven MRT Studien untersuchten Kaylie et al. MRT-Aufnahmen von Patienten vor chirurgischer Fazialis-Rekonstruktion bzw. Vestibularis-Schwannom-Operation (die Feldstärke des MRT ist in der Publikation nicht angegeben) und stellten fest, dass die präoperative Darstellung der mimischen Muskulatur im MRT Hinweise darauf geben kann, wie gut die mimischen Funktionen wieder hergestellt werden können (Kaylie et al. 2003; Kaylie et al. 2004). Denn die Asymmetrie der mimischen Muskeln auf den präoperativen Bildern ist ein guter Prädiktor für eine perineurale Invasion, welche die Erfolgsrate der Nervenrekonstruktionen senkt. So kann eine präoperative MRT-Untersuchung sowohl dem Operateur als auch dem Patienten eine realistische Erwartung an die bevorstehende Operation geben (Kaylie et al. 2003). Die mimischen Muskeln, die dazu untersucht wurden, waren M. zygomaticus, M. orbicularis oris, M. orbicularis oculi, M. levator labii superioris und M. nasalis. Eine Seite wurde als asymmetrisch eingeschätzt, wenn mehr als ein Muskel atrophiert war. Die asymmetrische

Gruppe wurde dann weiter eingeteilt in milde und fortgeschrittene Atrophie. Für diese Studien existieren jedoch keinerlei Daten zur Reliabilität, was zeigt, dass im Gegensatz zu der aktuellen Studie noch keine quantitative und reproduzierbare Messmethode entwickelt werden konnte.

Gargulio et al. gelang es 2011 in einer Studie, einzelne mimische Muskeln (M. orbicularis oculi, M. zygomaticus major, M. nasalis und M. levator labii superioris) von 17 Patienten mit unilateraler peripherer Fazialisparese mit Hilfe von 3D-Segmentierung darzustellen und Grauwertanalysen anzustellen (Gargiulo et al. 2011b). Die Segmentierung der mimischen Muskulatur wurde auch in diesem Zusammenhang als sehr wertvoll eingeschätzt. Sie gibt dem Untersucher die Möglichkeit, Strukturveränderungen einzelner Muskeln zu analysieren, um einschätzen zu können, welche Muskeln genau von der Parese betroffen sind. Eine tiefgründige Untersuchung der mimischen Muskulatur ist essentiell für die Entscheidung, wie die Parese therapiert werden sollte. So kann der Operateur schon vor der OP wichtige Informationen über die Qualität und Quantität der mimischen Muskeln erhalten (Gargiulo et al. 2011b). Allerdings konnten in diesem Zusammenhang nur prozentuale Volumenveränderungen beschrieben werden. Die absoluten Volumina zeigten sich noch nicht ausreichend reliabel. Neben der Volumenmessung wurden auch Grauwertanalysen angestellt. Diese könnten wichtig sein, da sich der Muskel durch Denervierung strukturell verändert und sich damit der Grauwert des Muskels im MRT wandelt. So zeigte der M. orbicularis oculi auf der Pareseseite oft höhere Werte als auf der gesunden Gesichtshälfte. Der M. zygomaticus major wiederum wies auf der Pareseseite niedrigere Grauwerte auf (Gargiulo et al. 2011b). Daher wurde auch die Reliabilitätsanalyse der Grauwerte in diese Arbeit integriert. In künftigen Studien könnte überprüft werden, ob sich die Grauwertveränderung in denervierten Muskeln für die Diagnostik von peripheren Fazialisparesen eignet.

Doch nicht nur in der Diagnostik der Fazialisparese kann die 3D-Segmentierung der mimischen Muskulatur wertvolle Informationen liefern. Auch der Therapieerfolg kann anhand der 3D-Segmentierung evaluiert werden. Frau Josefine Druse untersucht dazu in Ihrer Dissertation die 3D-Segmentierung der mimischen Muskulatur als Methode zur Verlaufskontrolle bei Patienten mit peripherer Fazialisparese. Wichtig ist in diesem Zusammenhang vor allem die Volumenveränderung und nicht zwingend das absolute Volumen. Helgason et al. veröffentlichten 2005 eine Studie, die zeigte, dass die Volumen- und Gewebsveränderungen von denervierten, degenerierten Muskeln anhand von 3D-Datensätzen evaluiert werden können. Dazu wurden denervierte Extremitätenmuskeln elektrisch stimuliert und die Gewebsveränderung im CT-Datensatz analysiert. Die

Volumenveränderung konnte quantitativ und qualitativ beurteilt werden (Helgason et al. 2005). Auch zur mimischen Muskulatur existieren bereits Studien zu diesem Thema. So können Vergleiche zwischen beiden Gesichtshälften oder derselben Muskeln im Therapieverlauf angestellt werden und so der Grad der Reinnervation quantifiziert werden (Gargiulo et al. 2011b). Damit könnte beispielsweise die Logopädie oder Physiotherapie durch entsprechendes Schwerpunkttraining individuell auf den Patienten abgestimmt werden. Doch nicht nur im Hinblick auf die Fazialisparese kann die Segmentierung der mimischen Muskulatur nützlich sein. So erkannte schon Freilinger et al. 1987, dass präoperative anatomische Kenntnisse essentiell sind für alle Operationen im Gesichtsbereich (Freilinger et al. 1987). Wie bereits erwähnt, ist die mimische Muskulatur bei jedem Individuum unterschiedlich ausgeprägt, was dazu führt, dass nicht bei jedem Patienten von einer Anatomie wie aus dem Lehrbuch ausgegangen werden kann (Waller et al. 2008). Die 3D-Segmentierung von MRT-Datensätzen könnte auch im Hinblick auf ästhetische Operationen präoperativ gute anatomische Kenntnisse vermitteln. In einer Studie von Gosain et al. wurden die Veränderungen der Nasolabialfalte mit Hilfe der MRT dynamisch analysiert, um so Schlussfolgerungen für Verjüngungsoperationen ziehen zu können (Gosain et al. 1996).

Die 3D-Segmentierung der mimischen Muskulatur kann auch im Hinblick auf Patienten mit Lippen-Kiefer-Gaumen-Spalten wertvolle Informationen liefern. Bei jedem Spaltpatienten sind die perioralen, perinasalen und nasalen Strukturen unterschiedlich stark betroffen (Precious u. Delaire 1993). Rekonstruktive Operationen sollen die exakte anatomische Form und physiologische Funktion der beteiligten Strukturen erzielen. Damit ist die präoperative Kenntnis über die individuelle Form und Position der involvierten Muskeln grundlegend für eine gelungene Rekonstruktion (Precious u. Delaire 1993). Die Untersuchung der mimischen Muskulatur stellte sich jedoch bisher schwierig dar. Palpation erbrachte aufgrund der geringen Größe der Muskeln unzufriedene Ergebnisse. Auch die Inspektion von funktionellen Effekten hat aufgrund der multiplen Vernetzungen innerhalb der verschiedenen Muskeln wenig Aussagekraft (Kleinheinz u. Joos 2001). 2001 gelang es Kleinheinz und Joos, den Knorpel und die mimische Muskulatur von Patienten mit unilateraler Lippen-Kiefer-Gaumen-Spalte im perioralen, nasalen und paranasalen Bereich im MRT-Datensatz darzustellen (Kleinheinz u. Joos 2001). Auch die postoperative Differenzierung zwischen Narbengewebe, Bindegewebe und Muskelgewebe war möglich. So ist die MRT auch in dieser Hinsicht ein bedeutsames Mittel in der präoperativen Planung und postoperativen Nachsorge. Die MRT-Bildgebung ermöglicht dem Untersucher die Deformität besser zu verstehen. Speziell bei schwierigen Lippen-Kiefer-Gaumen-Spalten könnte die MRT auch durch unsere Versuche die

Segmentierung der Muskeln zu vereinfachen, vermehrt in die Untersuchung mit eingebunden werden. In die Routineuntersuchung von Spaltpatienten wird die Methodik jedoch aufgrund der hohen Kosten wohl auch in Zukunft nicht integriert werden. Außerdem wäre bei Kindern eine Narkose zur MRT Untersuchung notwendig, da es wichtig ist, dass der Patient ruhig liegen bleibt.

2006 nutzte Farrugia die Methode der MRT zur Darstellung der mimischen Muskeln, um die Entwicklung dieser bei Myasthenia gravis Patienten einschätzen zu können (Farrugia et al. 2006). Dazu wurden M. orbicularis oris, M. orbicularis oculi und M. buccinator dargestellt und die breitesten Durchmesser ausgemessen und darauffolgend mit gesunden Probanden und Patienten mit Muskeldystrophie verglichen.

In einer weiteren Studie wurde die manuelle Volumetrie am M. procerus genutzt, um den Effekt der Muskelatrophie nach Botulinumtoxin Injektion zu quantifizieren (Koerte et al. 2013). Allerdings stellten auch diese Autoren nur prozentuale Volumenveränderungen dar und keine absoluten Werte.

In all diesen Bereichen könnte die erstellte Segmentierungsanleitung von großem Nutzen sein, da in vielen Studien darauf hingewiesen wurde, dass die Segmentierung der mimischen Muskulatur sehr schwierig ist (Farrugia et al. 2007; Gargiulo et al. 2011b). Die erstellte Segmentierungsanleitung könnte die Arbeit erleichtern und die Forschungen auf den verschiedenen Gebieten voranbringen.

5.4 Vergleich MRT, CT, Sonographie

Aufgrund der komplexen Anatomie des Kopfes und der Halsregion führen in diesem Bereich konventionelle radiologische Verfahren zu unzuverlässigen Ergebnissen und eventuellen Fehldiagnosen. Daher werden die konventionellen Verfahren mehr und mehr durch tomographische Bildgebungen ersetzt (Sanders et al. 1994).

Um zukünftig die Genauigkeit und Vergleichbarkeit von MRT, CT und Sonographie bei der Darstellung der Muskulatur des Kopfes, besonders der mimischen Muskulatur, besser beurteilen zu können, wurde vor der Durchführung einer anatomischen Präparation der mimischen Muskulatur ein MRT, CT sowie eine sonographische Vermessung des Gesichtes eines Ganzkörperpenders vorgenommen.

Die MRT ist die 3D-Bildgebungstechnik mit dem höchsten diagnostischen Wert. Sie zeigt eine hohe räumliche Auflösung und ist für die Darstellung von Weichgeweben am besten geeignet (Dammann et al. 2014). Die MRT ist kontraindiziert bei Patienten mit kardialen Schrittmachern, aktiven Implantaten oder anderen ferromagnetischen Fremdkörpern

(Bovenschulte et al. 2012). In Bezug auf die Fazialisparese wird sie bisher zumeist dazu genutzt, den N. facialis in seinem Verlauf darzustellen und eventuelle Läsionen zu lokalisieren (Veillon et al. 2008).

Die CT ist das am häufigsten verwendete bildgebende Verfahren in der Diagnostik von Kopf- und Halserkrankungen (AWMF 2015). Wichtige Vorteile der CT im Vergleich zur MRT sind zum einen die bessere Toleranz der Untersuchung durch den Patienten aufgrund der kürzeren Untersuchungszeit sowie die geringer ausfallenden Kosten (Walden u. Aygun 2013). Grundsätzlich ist es möglich, auch in CT-Aufnahmen die Zusammensetzung von Muskelgewebe zu analysieren (Gargiulo et al. 2011a). Es gibt dem Untersucher die Möglichkeit, nicht nur makroskopische sondern auch mikroskopische Veränderungen im Muskelgewebe erkennen zu können (Gargiulo et al. 2010). So konnten von Gargiulo et al. 2010 farbige 3D-Darstellungen der Muskeln zu diesem Zwecke entwickelt werden. (Gargiulo et al. 2010). Die CT-Bildgebung kann durch 3D-Segmentierung von Datensätze ebenso Informationen über das Volumen und einen eventuell erhöhten Fett- und Bindegewebsanteil von denervierten Skelettmuskeln liefern wie das MRT. Während das CT nur chronische Veränderungen einer Atrophie oder den Ersatz durch Fettgewebe aufzeigen kann, gibt der gute Weichgewebkontrast der MRT die Möglichkeit, auch die progressive Entwicklung eines denervierten Muskels von der akuten Phase über die subakute Phase bis hin zur chronischen Phase darzustellen (Fischbein et al. 2001; Harnsberger u. Dillon 1985; Russo et al. 1997). Auch reversible Vorgänge einer akuten oder subakuten Veränderung können im MRT sichtbar gemacht werden. Außerdem zeigt die MRT mehr Details in Weichgeweben, im CT dagegen sind mineralisierte Gewebe besser beurteilbar. Die Analyse von MRT-Daten gestaltet sich jedoch oft schwieriger und zeitaufwendiger, da die Grenzen zwischen den verschiedenen Geweben nicht so scharf begrenzt sind (Gargiulo et al. 2011a).

Vergleiche zwischen der Darstellbarkeit der mimischen Muskulatur im MRT und CT sind bisher sehr spärlich (Volk et al. 2014a). Daher wurde in dieser Arbeit versucht, einen Vergleich herzustellen, indem sowohl ein CT als auch ein MRT desselben Körperspenders erstellt wurde, bevor die mimische Muskulatur am selbigen präpariert wurde. Durch den direkten Vergleich von MRT, CT und der anatomischen Präparation konnten die vorangegangenen Einschätzungen bestätigt werden. Es war möglich, die Muskulatur im CT-Datensatz darzustellen, allerdings ließen sich nur drei der mimischen Muskeln im CT identifizieren und segmentieren. Alle anderen Muskeln wurden entweder von dem starken Signal naheliegender mineralisierter Gewebe überstrahlt oder waren aufgrund ihrer geringen Dicke nicht darstellbar. In der MRT hingegen war es möglich, zwölf mimische Muskeln

darzustellen. Der Vergleich der Bilddaten machte außerdem deutlich, dass die MRT-Bilder weniger verpixelt erschienen. Die Muskeln sind gut von der Umgebung abgrenzbar und erschienen graziler als im CT. Dabei ist jedoch die Messzeit zu bedenken. So dauerte die CT-Aufnahme nur etwa eine Minute, wohingegen die VIBE Sequenz für die Anforderungen des formalinfixierten Gewebes individualisiert wurde und damit aufgrund der zwölf Wiederholungen acht Stunden gemessen wurde. Dies lässt sich jedoch damit relativieren, dass auch die standardisierte VIBE Sequenz gefahren wurde, welche auch für die Untersuchung von Probanden genutzt wird. Die Messzeit für diese beträgt 9:35 min (Gargiulo et al. 2011b). In dieser waren die Muskeln zwar nicht so eindeutig abgegrenzt wie in der individualisierten VIBE Sequenz, jedoch war es auch in dieser möglich, alle zwölf Muskeln zu identifizieren. Zusätzlich muss die hohe Strahlenbelastung des Patienten bei der CT bedacht werden. Auch wenn in den letzten 15 Jahren die Strahlenbelastung einer CT um 30% gesenkt werden konnte, kann dennoch nicht darüber hinweggesehen werden (Cohnen et al. 2000). Um einen Therapieerfolg beurteilen zu können, müsste die CT-Untersuchung des Patienten mehrmals wiederholt werden, was im Hinblick auf die entstehende hohe Strahlenbelastung und auf Alternativen wie Sonographie und MRT nicht zu rechtfertigen wäre. Die MRT wiederum hat den großen Nachteil, dass viele Menschen sich aufgrund von Klaustrophobie vor der Untersuchung scheuen. Außerdem dauert diese um einiges länger als die CT und damit muss der Patient auch länger ruhig liegen bleiben. Auch die lauten Geräusche empfinden viele Patienten als unangenehm. Damit fällt die Patientencompliance der MRT eher gering ausfällt. Neben dem Vergleich von CT und MRT wurde außerdem ein Vergleich zwischen MRT und Sonographie zur Darstellung der mimischen Muskulatur angestrebt. Diagnostische Sonographie wird v.a. dazu genutzt, Organe zu betrachten bzw. Läsionen zu erkennen, die nahe der Oberfläche liegen, wie z.B. Speicheldrüsen, Schilddrüse oder vergrößerte Lymphknoten (Dammann et al. 2014). Aber auch die mimische Muskulatur kann sonographisch untersucht werden. Die Fazialis-Arbeitsgruppe der HNO-Klinik Jena konnte dazu schon einige Fortschritte erzielen (Volk et al. 2013b; Volk et al. 2014b; Volk et al. 2014c; Volk et al. 2014d).

Im Vergleich zur Sonographie birgt das MRT einige Nachteile. So ist der Zugang zur MRT begrenzt, da die Messzeiten beschränkt sind. Außerdem ist es sehr zeit- und kostenintensiv (Volk et al. 2014b). Des Weiteren ist die Auswertung der MRT-Datensätze sehr komplex und verlangt gute praktische Kenntnisse. Die sonographische Vermessung der mimischen Muskulatur dagegen ist leichter zu erlernen. Die Untersuchung ist kostengünstig und das Ultraschallgerät ist einfach zu bedienen und transportabel (Raadsheer et al. 1994). Die

Untersuchung der mimischen Muskulatur konnte durch die Anleitung zur quantitativen Sonographie aus der Fazialis-Forschungsgruppe der HNO-Klinik Jena noch weiter vereinfacht und standardisiert werden (Sauer 2013). Auch sonographisch können charakteristische durch neuromuskuläre Störungen verursachte Muster in Muskeln dargestellt werden (Arts et al. 2011). Noch dazu erfolgt die Vermessung in Echtzeit und getrennt für jeden Muskel, sodass der Patient auch aufgefordert werden kann, verschiedene Bewegungen durchzuführen. So kann der Muskel auch in Kontraktion vermessen werden. Außerdem kann durch die Kontraktion die richtige Identifikation der Muskeln sichergestellt werden. In der MRT ist dies schwierig zu realisieren, da die Messung einer Sequenz einige Minuten dauert und der Patient die Kontraktion für diese Zeit beibehalten müsste.

Ein großer Vorteil der MRT ist, dass mit Hilfe der 3D-Segmentierung von MRT-Datensätzen das gesamte Volumen des jeweiligen Muskels betrachtet werden kann. Im Gegensatz dazu wird bei der sonographischen Vermessung stets nur ein charakteristischer Muskelquerschnitt dargestellt. Es gibt jedoch bereits Studien zur 3D-Sonographie, in der ebenfalls Volumina der Gesichtsmuskulatur errechnet werden können (Min et al. 2008; Volk et al. 2014b). Bei der 3D-Sonographie wird eine Serie von konsekutiv angefertigten 2D-Sonographie-Bildern mit einer individuellen Positionsangabe gekoppelt (Akquisition) und daraus ein 3D-Datensatz errechnet (Riccabona 2005). In einer Studie von Volk et al. 2014 gelang es, *M. frontalis*, *M. orbicularis oculi*, *M. depressor anguli oris*, *M. depressor labii inferioris* sowie *M. mentalis* mit Hilfe der 3D-Sonographie bei einem Probanden und sieben Patienten darzustellen und mit den Ergebnissen aus EMG Messungen zu korrelieren (Volk et al. 2014b). Mit Hilfe der 3D-Segmentierung war es jedoch nicht möglich, das gesamte Volumen des Muskels zu betrachten sondern nur das gleiche Teilvolumen eines Muskels auf beiden Seiten. Damit können zwar die gesunde und gelähmte Seite verglichen werden, es ist jedoch nicht möglich, das gesamte Volumen zu evaluieren, wie es in der 3D-Segmentierung des MRT-Datensatzes der Fall ist. Da nur ein Teil des Muskels vermessen wurde, war es wichtig, immer den gleichen Teil auf beiden Seiten und in verschiedenen Probanden zu vermessen. Dazu wurde sich an anatomischen Landmarken orientiert. In der gleichen Weise erfolgt auch die gängige sonographische Vermessung. Jeder Muskel wird in einer charakteristischen Ebene aufgefunden, in welcher der Muskelquerschnitt vermessen wird. Ob jedoch an unterschiedlichen Gesichtshälften, verschiedenen Probanden oder im Therapieverlauf zu unterschiedlichen Untersuchungszeitpunkten in der sonographischen Vermessung stets der gleiche Muskelquerschnitt aufgefunden werden kann, um die Querschnitte optimal

vergleichen zu können, ist fraglich. So sind die Volumina im MRT-Datensatz besser reproduzierbar, da stets der gesamte Muskel segmentiert wird.

Weiterhin muss bedacht werden, dass durch die nur teilweise Betrachtung der Muskeln in der Sonographie eventuelle Atrophien nicht aufgezeigt werden können, wenn sie in einem Teil des Muskels beginnen, der nicht betrachtet wurde. Auch in diesem Gesichtspunkt kann die 3D-Segmentierung der MRT-Datensätze Vorteile erbringen.

Bisher gibt es kaum Literatur, die die Darstellung der Gesichtsmuskeln durch Sonographie und MRT vergleicht. Macrae et al. verglichen 2013 MRT- und Sonographiemessungen anhand von Querschnitten des Venter anterior m. digastrici (Macrae et al. 2013). Die Studie ergab, dass die Sonographie vergleichsweise kleinere Messwerte erbrachte als die MRT. Vergleiche von Raadsheer et al. 1994 am M. masseter zeigten bereits eine ähnliche Tendenz (Raadsheer et al. 1994). Aufgrund der besseren Zugänglichkeit und den geringeren Kosten wurde die Sonographie als bessere Methode zur Untersuchung der submentalen Muskelgruppe eingeschätzt (Macrae et al. 2013).

In der vorliegenden Studie wurde sowohl das MRT als auch die sonographische Vermessung eines Körperspenders ausgewertet. Zunächst wurden alle identifizierbaren Muskeln dargestellt. Mit Hilfe der Sonographie konnten sieben mimische Muskeln dargestellt werden. Im MRT-Datensatz konnten zwölf mimische Muskeln identifiziert werden. Ein Grund für die Differenz könnte sein, dass die Gewebsveränderungen der Muskeln aufgrund der Formalinfixierung mehr Auswirkungen auf die sonographische Untersuchung hatten als auf die Darstellbarkeit der Muskeln im MRT, da die Veränderungen im Gewebe die Schalleitungseigenschaften des Gewebes verändern. Der Vergleich müsste in folgenden Studien auch auf Probanden ausgeweitet werden. Als nächstes wurde versucht, im MRT die Ebenen der sonographischen Vermessung aufzufinden. Daraufhin konnten die Fläche sowie der Durchmesser verglichen werden. Der Vergleich stellte sich als sehr schwierig heraus, da es kaum möglich war, nur anhand der MRT-Daten exakt die gleiche Ebene zu finden, was die Messergebnisse wirklich vergleichbar machen würde. Nur für den M. mentalis konnte eine ähnliche Form im MRT und im sonographischen Querschnitt nachgewiesen werden. Für diesen Muskel erfolgte daher exemplarisch ein Vergleich der Messwerte. Die absoluten Werte waren sehr unterschiedlich. Im Gegensatz zu den anderen Studien zeigte dieser Vergleich jedoch verhältnismäßig größere Messwerte in der Sonographie. Allerdings basiert dieser Vergleich nicht auf reliablen Ergebnissen sondern gleicht eher einer Stichprobe.

Bei den anderen Muskeln war ein Vergleich nicht möglich. Schon der visuelle Vergleich der Querschnitte zeigte große Unterschiede. Es war dementsprechend nicht möglich die x-Achse

so zu verschieben, dass sie der Lage des Schallkopfes ausreichend angeglichen war. Es ist fraglich, ob ein derartiger Vergleich der Messwerte überhaupt sinnvoll ist, da die Messmethoden verschieden sind und auf Unterschiedlichen Eigenschaften zur Bildgebung herangezogen werden. Die MRT beruht auf der Anregung von Wasserstoffprotonen und die Sonographie wiederum auf der Ausbreitung von hochfrequenten Ultraschallwellen als longitudinale mechanische Schwingungen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass alle drei Methoden Vor- und Nachteile bergen. Die CT ist jedoch aufgrund der hohen Strahlenbelastung und der geringen Darstellbarkeit der mimischen Muskeln für diese Zwecke ungeeignet.

Die MRT scheint die mimischen Muskeln am genauesten darzustellen, ist aber mit einem hohen Zeitaufwand und hohen Kosten verbunden. Daher erscheint die Sonographie für den klinischen Alltag weiterhin besser praktikabel. Nur für die Untersuchung der mimischen Muskulatur werden wohl auch künftig Patienten nicht gesondert ein MRT erhalten. Doch bei besonders anspruchsvollen Fällen kann die MRT sowohl präoperativ als auch im Therapieverlauf wertvolle Informationen liefern, die durch die Sonographie nicht zwingend erbracht werden können. Noch dazu erhalten Patienten mit Erkrankungen im Kopf-Hals-Bereich sowieso sehr oft ein MRT. Auch die genutzten Sequenzen MP-RAGE sowie die coronare VIBE benötigen keinen speziellen Aufwand, da sie routinemäßig im Messprotokoll für ein Kopf-MRT integriert sind.

5.5 Segmentierungsanleitung

Um die quantitative Untersuchung der mimischen Muskulatur mit Hilfe der MRT zu vereinfachen, wurde im Anschluss an die Orientierungsphase auf Grundlage der hier gewonnen Erkenntnisse eine Segmentierungsanleitung erarbeitet. Für die Anleitung wurden insgesamt neun gut segmentierbare mimische Muskeln und zwei Kaumuskeln ausgewählt. Bei der Auswahl der mimischen Muskeln wurde darauf geachtet, dass sie sowohl im MRT-Datensatz des Körperspenders als auch in den Datensätzen der acht Probanden sicher auffindbar waren und sich gegen das umliegende Fett- und Bindegewebe abgrenzen ließen. Weiterhin sollten sie möglichst von den verschiedenen Ästen des N. facialis versorgt werden. So konnte sichergestellt werden, dass bei der späteren Diagnostik und Verlaufskontrolle auch partielle Fazialispareesen beurteilt werden konnten. Die mimischen Muskeln, welche die Kriterien erfüllten, waren: M. mentalis, M. depressor anguli oris, M. corrugator supercillii, M. zygomaticus major, M. orbicularis oculi, M. orbicularis oris, M. levator labii sup., M. nasalis sowie der M. buccinator. Des Weiteren wurden die Kaumuskeln M. temporalis und M.

masseter mit in die Segmentierungsanleitung eingebunden. Diese vom N. mandibularis innervierten Muskeln sind im Falle einer Fazialisparese nicht von einer Atrophie betroffen sein und bieten damit einen Anhaltspunkt bei der Beurteilung der Atrophie. Sie wurden außerdem ausgewählt, da sie eine relative Nähe zur mimischen Muskulatur bieten. Für die ausgewählten Kennmuskeln wurden Segmentierungsanleitungen verfasst sowie spezifische Landmarken definiert und mit Bildern der Muskeln in allen drei Ebenen kombiniert. Der M. zygomaticus minor und M. frontalis wurden ebenso in die Anleitung mit eingebunden, auch wenn sie aus der Gruppe der gut segmentierbaren Kennmuskeln ausgeschlossen wurden. Der M. frontalis ist einer der Basismuskeln und aus diesem Grund sehr wichtig. Der M. zygomaticus minor wurde aufgrund seiner Nähe zum M. zygomaticus major integriert, um seine Lage genau zu erläutern und die Verwechslungsgefahr zu minimieren.

Die Segmentierungsanleitung wurde als Website online gestellt (www.facial.muscles.wiki), um möglichst viele Anwender erreichen zu können. Neben den reinen Anleitungen zur Segmentierung der einzelnen mimischen Muskeln wurden außerdem wichtige Segmentierungsparameter definiert, die von jedem Untersucher eingehalten werden sollten, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen. So wurde für jedes Muskelpaar eine spezifische Farbe festgelegt, in der dieses segmentiert werden soll. Damit kann der Untersucher auf den ersten Blick erkennen, um welchen segmentierten Muskel es sich handelt, ohne eine Legende bemühen zu müssen. Außerdem wurde für die Sequenz MP-RAGE die Kontrasteinstellung 258-302 festgelegt. Aufgrund der fehlenden Faszien sind die mimischen Muskeln im MRT unscharf begrenzt. Unterschiedliche Einstellungen von Kontrast und Helligkeit haben zur Folge, dass die Abgrenzungen der mimischen Muskeln variieren und sich damit auch die segmentierten ROIs stark voneinander unterscheiden. Für die coronare VIBE Sequenz war die Festlegung auf einen bestimmten Kontrast aufgrund von anderen Untersuchungsparametern nicht möglich. Des Weiteren wurde genau definiert, wo in dieser Kontrasteinstellung in MP-RAGE die Abgrenzung zwischen Muskel und umliegenden Gewebe zu ziehen ist. Damit wurde entschieden, dass nur Voxel mit Grauwerten segmentiert werden, die näher dem Grauwert des Muskels als dem der Umgebung liegen, also deutlich von der Umgebung abzugrenzen sind. Die Abgrenzung über einen definierten Grauwert war nicht möglich, da die mimischen Muskeln teilweise stark unterschiedliche Grauwerte aufweisen. Die Mehrzahl der mimischen Muskeln wird in den genannten Kontrasteinstellungen sehr dunkel dargestellt. So werden im Fall des M. mentalis oder M. orbicularis oris nur die sehr dunklen Voxel segmentiert. Die Skelettmuskeln liegen mit ihrer T₁-Zeit von etwa 1400 ms zwischen der grauen (ca. 1800 ms) und der weißen Substanz (ca.

1000 ms) (Stanisz et al. 2005). Sie wird also nicht ganz schwarz dargestellt. Daher ist anzunehmen, dass die mimische Muskulatur möglicherweise mehr Wasser enthält als beispielsweise die Kaumuskulatur und somit ebenso wie Wasser längere T_1 -Zeiten aufweist und damit dunkler dargestellt wird. In der MP-RAGE Sequenz wird dieser Kontrast maximal verstärkt. Die Muskeln M. temporalis, M. masseter, M. buccinator und M. orbicularis oculi erscheinen im MRT heller, was auf einen hohen Fettanteil und eine inhomogene Dichte schließen lässt.

Das Segmentieren der mimischen Muskulatur im MRT-Datensatz ist aufgrund der fehlenden Faszen und der dünnen Strukturen sehr schwierig zu erlernen und durchzuführen. Mit der Anleitung sollte erreicht werden, dass die Methode für mehr Untersucher zugänglich wird. Durch das Festlegen der oben genannten Segmentierungsparameter und Muskelgrenzen sollte das Verfahren standardisiert werden.

Auf unsere Website sind bereits andere Forschungsgruppen aufmerksam geworden und haben Kontakt zu uns hergestellt, da sie bisher Probleme mit der Segmentierung der mimischen Muskeln hatten. Dies zeigt, wie aufwendig die Bearbeitung der MRT Datensätze ist und erklärt, warum das MRT bisher so selten zu solchen Zwecken genutzt wurde. Außerdem macht es deutlich, dass die Segmentierungsanleitung bereits jetzt Zuspruch auch von anderen Forschungsgruppen erhält und ihnen das Segmentieren durch die erstellte Segmentierungsanleitung erheblich vereinfacht.

5.6 Interobserver-Reliabilität und Zeitaufwand der Methode

Zu Beginn der Arbeit wurde überprüft wie reliabel die Methode zur 3D-Segmentierung des MRT-Datensatzes zur Darstellung der mimischen Muskulatur ist. Dazu wurde evaluiert, wie stark die Messwerte bei Segmentierung von drei Probanden-Datensätzen durch zwei Untersucher korrelierten. Dies war für die spätere klinische Anwendung besonders wichtig, da es zeigt, wie gut die Messergebnisse auch unter verschiedenen Untersuchern reproduzierbar sind. Bei der Betrachtung aller mimischen Muskeln der drei Datensätze konnte ein ICC von 0,731 erreicht werden. Quantitativ evaluiert, konnten insgesamt nur 27 von 54 Muskeln überhaupt identifiziert werden. Wie bereits erwartet, fielen die Ergebnisse nur mäßig aus, da das Segmentieren der mimischen Muskulatur sehr komplex ist und es kaum Literatur zu diesem Thema gab.

Nach Erstellung der Segmentierungsanleitung wurden erneut drei Probandendatensätze von zwei Untersuchern getrennt voneinander segmentiert. Es handelte sich dabei um drei andere Probanden, da sonst anzunehmen wäre, dass die Muskeln durch Übung besser aufgefunden

werden konnten. Andererseits ist in dieser Weise nicht auszuschließen, dass die Muskeln in den drei neuen Datensätzen besser aufgefunden werden konnten als in den ersten. Dies wurde jedoch damit überprüft, dass auch alle drei vorherigen Datensätze von einem Untersucher auch mit der Anleitung nochmals segmentiert wurden. Die Ergebnisse wurden jedoch nicht in die Interobserver-Reliabilitätsanalyse einbezogen sondern nur quantitativ evaluiert. Auch in diesem Fall zeigte sich eine deutliche quantitative Verbesserung der Ergebnisse. So konnte auch hier die Zahl der identifizierten Muskeln auf 100% gesteigert werden.

Der Vergleich der Interobserver-Reliabilitäten zeigte, dass die Untersuchungsergebnisse durch die Nutzung der Segmentierungsanleitung deutlich vereinheitlicht werden konnten. Der ICC-Koeffizient der Betrachtung aller mimischen Muskeln von drei Probanden konnte von 0,731 auf 0,820 gesteigert werden. Quantitativ stieg der Anteil von identifizierbaren Muskeln von 50 auf 100%. Es war also mit Hilfe der Segmentierungsanleitung möglich, alle zuvor festgelegten Kennmuskeln zu identifizieren. Der Vergleich der Interobserver-Reliabilität mit und ohne Anleitung verdeutlicht, dass die Ergebnisse der Segmentierungen durch Nutzung der Anleitung sowohl qualitativ als auch quantitativ verbessert werden konnte.

Außerdem erfolgte die Reliabilitätsanalyse für die Volumina und Grauwerte der einzelnen Muskeln. Die ICC-Koeffizienten zeigen, dass die Ergebnisse mit Anleitung deutlich ähnlicher sind als ohne Anleitung. Natürlich ist die Betrachtung von jeweils drei Muskelpaaren zu wenig, um sie als repräsentativ ansehen zu können. Es konnte damit jedoch exemplarisch evaluiert werden, bei welchen Muskeln es zu einer deutlichen Besserungen der Segmentierungsergebnisse kam. So wurde deutlich, dass die Volumenwerte des *M. mentalis*, *M. corrugator supercilii*, *M. zygomaticus major* und *M. masseter* signifikant vereinheitlicht werden konnten. Damit liegt die Vermutung nahe, dass die genaue Lagebeschreibung besonders für diese Muskeln sehr nützlich ist.

Es kam dennoch bei einigen Muskeln zu größeren Differenzen. So zeigt auch ein direkter Vergleich der Segmentierungsergebnisse zwischen zwei Untersuchern, wie weit die ermittelten Volumina voneinander abweichen können. Die mimische Muskulatur ist nicht bei jedem Menschen gleich angelegt und so differieren Lokalisation und Ausdehnung der Muskeln von Fall zu Fall und müssen trotz der präzisen Erläuterungen nicht immer den Angaben entsprechen. Trotz des Versuches, die Segmentierung zu standardisieren, liegt die Auswertung immer noch im Auge des Betrachters und zeigt damit eine stark subjektive Komponente. Es ist zu empfehlen, die Segmentierung der Datensätze eines Patienten im Therapieverlauf immer vom gleichen Untersucher vornehmen zu lassen, um die Vergleichbarkeit gewährleisten zu können. Außerdem differieren Helligkeit und Kontrast

trotz gleicher Einstellungen stark abhängig vom verwendeten Monitor. Um annähernd gleiche Bedingungen zu schaffen, müsste also stets der gleiche Bildschirm verwendet werden. Es ist damit dringend zu empfehlen bei der Segmentierung der Datensätze eines Probanden im Therapieverlauf immer denselben Bildschirm zu verwenden um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten und Fehlerquellen auszuschließen.

Auch die Betrachtung des Zeitaufwandes für die Segmentierung eines MRT-Datensatzes verdeutlicht den Nutzen der Segmentierungsanleitung. So konnte durch die Anleitung bei der Segmentierung von drei Datensätzen im Mittel eine Zeitersparnis von 43 min erzielt werden. Es ist außerdem anzunehmen, dass sich der Zeitaufwand mit jedem segmentierten Datensatz noch weiter verkürzt. Zum einen ist die Übung ein wichtiger Faktor. Zum anderen kann durch die Anwendung der Segmentierungsanleitung in eine gewisse Routine übergegangen werden. Die Vergleiche der Interobserver-Reliabilitäten und Zeitaufwände beweisen, dass die Nutzung der Segmentierungsanleitung zur Darstellung der mimischen Muskulatur sinnvoll ist. So sollten diese Überlegungen auch auf andere Studien ausgeweitet werden, um zu untersuchen, ob durch eine solche Anleitung auch bei anderen Messmethoden Vorteile erzielt werden können. Für die Sonographie der mimischen Muskulatur wurde bereits eine Anleitung erstellt (Sauer 2013). Allerdings fehlen dazu momentan noch Reliabilitätsanalysen, die nachgeholt werden sollten.

5.7 Grenzen der Methode, Optimierungsmöglichkeiten, Zukunftsperspektiven

Auch wenn die erstellte Segmentierungsanleitung die Segmentierung der mimischen Muskulatur im MRT-Datensatz erheblich vereinfachen konnte, ist sie dennoch äußerst schwierig und muss aufwendig erlernt werden. Sie erfordert gute anatomische Kenntnisse über die mimischen Muskeln und die Schnittbildanatomie im Gesichtsbereich. Außerdem ist eine gewisse Erfahrung notwendig. So sollte der Untersucher zunächst einige Probanden-Datensätze segmentieren, bevor die Methode klinisch angewendet werden könnte.

Ein wichtiges Kriterium ist außerdem der Zeitaufwand. Der Zeitfaktor ist im klinischen Alltag von enormer Bedeutung. In kürzester Zeit muss ein Arzt Untersuchungen vornehmen, zahlreiche Diagnosen stellen und Therapien einleiten. Daher sollten neue Methoden zur Diagnostik und Therapie auch in dieser Hinsicht beurteilt werden. Die Untersuchungen zeigen, dass der Zeitaufwand der Segmentierung kein unerheblicher Faktor ist. Eine vollständige Segmentierung der gesamten darstellbaren Muskeln benötigt etwa drei Stunden. Zwar konnte der Zeitaufwand durch die erstellte Segmentierungsanleitung deutlich verringert werden, jedoch stellt die Segmentierung immer noch einen erheblichen Zeitaufwand dar, was

eine Einbindung der Methode in den klinischen Alltag sehr schwierig macht. Dieser könnte jedoch dadurch gemindert werden, dass nicht immer alle mimischen Muskeln untersucht werden müssten. Zum einen betreffen gewisse Krankheiten nicht immer die gesamte mimische Muskulatur, zum anderen könnte auch die Quantifizierung nur weniger Muskeln Auskunft über einen etwaigen Therapieerfolg geben.

Für die Zukunft wäre es ebenso vorstellbar, eine halb- bzw. vollautomatische Segmentierungsmethode zur Untersuchung der mimischen Muskulatur zu entwickeln. Dadurch würde der Zeitaufwand deutlich gekürzt und durch die automatische Erkennung der ROI auch der Faktor der subjektiven Wahrnehmung eines jeden Untersuchers minimiert werden. Für andere Muskelgruppen wie z.B. die Rückenmuskulatur sind derartige Methoden schon seit längerem in Gebrauch. Erste Überlegungen wurden dazu schon angestellt. Es stellt sich jedoch in diesem Falle als sehr schwierig dar, da die mimischen Muskeln von keiner Faszie eindeutig zum umliegenden Gewebe abgegrenzt werden und zum anderen noch dazu sehr klein und variabel sind. Durch die erstellte Segmentierungsanleitung sollte es dennoch möglich sein, einen automatischen Algorithmus zu entwickeln, der die mimischen Muskeln erkennt und ohne Variabilität segmentiert. 2012 gab es bereits einen ähnlichen Versuch, eine automatische 3D-Segmentierungsmethode für die fazialen Muskeln zu entwickeln. Allerdings lag die Übereinstimmung zwischen automatischer und manueller Segmentierung für die aufgrund ihrer Faszie besser segmentierbaren Kaumuskeln M. masseter und M. temporalis nur bei 82,6% bzw. 78,8% (Rezaeitabar u. Ulusoy 2012). Durch die nun klar definierte Lage der mimischen Muskeln im MRT wäre es vorstellbar, anhand von Koordinaten im dreidimensionalen Raum einen Punkt zu definieren, der in jedem Fall im zu untersuchenden Muskel/in der ROI zu liegen hat. Gestützt durch definierte, im MRT nachweisbare Landmarken könnte dieser ausfindig gemacht werden. Nachfolgend wäre ein Programm mit Sicherheit in der Lage, den Grauwert in diesen Kennpunkten mit denen der Umgebung zu vergleichen und den möglichen Muskelumriss standardisiert zu ermitteln, unabhängig von den Grauwertschwankungen der einzelnen Individuen. Ob es möglich ist, solche Kennpunkte zu entwickeln, sollte in zukünftigen Studien untersucht werden.

Im Hinblick auf die Segmentierungsanleitung könnten weitere Studien folgen, um den Nutzen der Segmentierungsanleitung weiter zu quantifizieren und die Anleitung zu optimieren. Zum Beispiel könnte eine Studie angelegt werden, in der Probanden einzelne mimische Muskeln in einem Datensatz segmentieren sollen, unter Zuhilfenahme zum einen eines herkömmlichen anatomischen Farbatlanten und zum anderen der Segmentierungsanleitung. Als Probanden könnten Medizinstudenten dienen, da ein gewisses Grundverständnis für die anatomischen

Gegebenheiten Voraussetzung ist, um die mimischen Muskeln überhaupt erkennen zu können.

Nachdem die Methode mit Hilfe der Segmentierungsanleitung besser etabliert werden konnte, ließen sich damit in Zukunft interessante Fragestellungen untersuchen. So gibt uns die Segmentierung der mimischen Muskeln die Möglichkeit zu ermitteln, inwiefern das Gemüt eines jeden Menschen Einfluss auf die Ausprägung der verschiedenen mimischen Muskeln hat. Sind die lippenanhebenden Muskeln, wie beispielsweise der M. zygomaticus major, bei fröhlichen Menschen ausgeprägter als bei ernsten Gemütern? Oder verändert sich das Muskelvolumen im Laufe des Lebens? Es könnte außerdem die Frage geklärt werden, welchen Einfluss Depressionen auf die Muskelgröße der mimischen Muskeln nehmen. Hier wäre wahrscheinlich eine Veränderung im Sinne einer Inaktivitätsatrophie zu erwarten.

6 Schlussfolgerung

Die MRT eignet sich zur Darstellung der mimischen Muskulatur. Durch die anatomische Präparation der mimischen Muskulatur eines Körperspenders, von dem zuvor ein MRT-Datensatz aufgenommen wurde, konnte die korrekte Identifikation und die Segmentierung von neun mimischen Muskeln erstmalig sichergestellt werden.

Neben der EMG und der Sonographie kann die MRT ein nützliches Instrument in der Beurteilung von Atrophien oder morphologischen Veränderungen der mimischen Muskulatur sein. So kann sie beispielsweise in Bezug auf die periphere Fazialisparese hilfreiche Informationen liefern zur präoperativen Evaluation und Prognoseeinschätzung vor Nervenrekonstruktionen oder auch zur Verlaufskontrolle und Beurteilung der Rehabilitation (Kaylie et al. 2003; Gargiulo et al. 2011b).

Die entwickelte Segmentierungsanleitung ermöglicht eine effiziente nicht-invasive Quantifizierung der Volumina von neun mimischen Muskeln und zwei Kontroll-Kaumuskeln. Vergleiche der Segmentierungen mit und ohne Segmentierungsanleitung ergaben sowohl quantitativ als auch qualitativ verbesserte Ergebnisse durch die Segmentierungsanleitung. Unabhängig von der Segmentierungsanleitung konnten noch fünf weitere mimische Muskeln im MRT dargestellt werden. Sie waren jedoch nicht konstant auffindbar oder hatten nur eine geringe klinische Relevanz.

Mit der erstellten Anleitung ist der Grundstein für präzisere Diagnostik von pathologischen Veränderungen, wie sie z.B. durch Fazialis paresen oder angeborene Fehlbildungen verursacht werden, gelegt worden.

Die Dissertation diene vor allem der Etablierung der Methode. Weiterführende Doktorarbeiten folgen. Diese bearbeiten beispielsweise die Darstellung der mimischen Muskulatur im MRT-Datensatz bei Patienten mit peripherer Fazialisparese.

7 Literaturverzeichnis

- Adour KK, Bell DN, Hilsinger, R L Jr (1975) Herpes simplex virus in idiopathic facial paralysis (Bell palsy). *JAMA* 233 (6): 527–530.
- Arts IM, Overeem S, Pillen S, Schelhaas HJ, Zwartz MJ (2011) Muscle changes in amyotrophic lateral sclerosis: a longitudinal ultrasonography study. *Clin Neurophysiol* 122 (3): 623–628.
- AWMF (2015). Radiologische Diagnostik im Kopf-Hals-Bereich. Leitlinien der Deutschen Röntgengesellschaft (DRG). Letztes Update: 5. Mai 2015. [Online im Internet:] URL: <http://www.awmf.org/leitlinien/detail/II/039-093.html> (28. Juni 2015).
- Bentsianov B, Blitzer A (2004) Facial anatomy. *Clin Dermatol* 22 (1): 3–13.
- Berends F (2009) Hendrik Antoon Lorentz: his role in physics and society. *J Phys Condens Matter* 21 (16): 164223.
- Bovenschulte H, Schlüter-Brust K, Liebig T, Erdmann E, Eysel P, Zobel C (2012) MRI in patients with pacemakers: overview and procedural management. *Dtsch Arztebl Int* 109 (15): 270–275.
- Bühl A (2008) SPSS 16: Einführung in die moderne Datenanalyse. Hallbergmoos: Pearson Studium.
- Burmeister HP, Baltzer PAT, Volk GF, Klingner CM, Kraft A, Dietzel M, Witte OW, Kaiser WA, Guntinas-Lichius O (2011) Evaluation of the early phase of Bell's palsy using 3 T MRI. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 268 (10): 1493–1500.
- Castro-Mateos I, Pozo J, Eltes PE, Rio LD, Lazary A, Frangi AF (2014) 3D segmentation of annulus fibrosus and nucleus pulposus from T2-weighted magnetic resonance images. *Phys Med Biol* 59 (24): 7847–7864.
- Cohnen M, Fischer H, Hamacher J, Lins E, Kotter R, Modder U (2000) CT of the head by use of reduced current and kilovoltage: relationship between image quality and dose reduction. *Am J Neuroradiol* 21 (9): 1654–1660.
- Dallenbach-Hellweg G (2013) Endometrium: Pathologische Histologie in Diagnostik und Forschung. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Dammann F, Bootz F, Cohnen M, Hassfeld S, Tatagiba M, Kösling S (2014) Diagnostic imaging modalities in head and neck disease. *Dtsch Arztebl Int* 111 (23-24): 417–423.
- Deichmann R, Good CD, Josephs O, Ashburner J, Turner R (2000) Optimization of 3-D MP-RAGE sequences for structural brain imaging. *NeuroImage* 12 (1): 112–127.
- Delorme S, Debus J (2005) Sonographie: 105 Tabellen. Stuttgart: Thieme.
- Diamond M, Wartmann CT, Tubbs RS, Shoja MM, Cohen-Gadol AA, Loukas M (2011) Peripheral facial nerve communications and their clinical implications. *Clin Anat* 24 (1): 10–18.
- Ekman P (1993) Facial expression and emotion. *Am Psychol* 48 (4): 384–392.
- Farrugia ME, Bydder GM, Francis JM, Robson MD (2007) Magnetic resonance imaging of facial muscles. *Clin Radiol* 62 (11): 1078–1086.
- Farrugia ME, Robson MD, Clover L, Anslow P, Newsom-Davis J, Kennett R, Hilton-Jones D, Matthews PM, Vincent A (2006) MRI and clinical studies of facial and bulbar muscle involvement in MuSK antibody-associated myasthenia gravis. *Brain* 129 (Pt 6): 1481–1492.
- Fetzer A (2011) 3D Oberflächeninterpolation für die interaktive Segmentierung medizinischer Strukturen [Diplomarbeit]. Heilbronn: FH.
- Finkensieper M, Volk GF, Guntinas-Lichius O (2012) Erkrankungen des Nervus facialis. *Laryngorhinootologie* 91 (2): 121-41; quiz 142.

- Fischbein NJ, Kaplan MJ, Jackler RK, Dillon WP (2001) MR imaging in two cases of subacute denervation change in the muscles of facial expression. *Am J Neuroradiol* 22 (5): 880–884.
- 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. *Plast Reconstr Surg* 80 (5): 686–690.
- Fröber R (2012). Präparieranweisung: Kurs I - Bewegungsapparat - Kopf. [Online im Internet:] URL: http://www.anatomie1.uniklinikum-jena.de/anatomie1_media/Wintersem_+2014_15/ZM/Pr%C3%A4parieranweisung_1_RS_ZM_Kopf_WS+2012_13-p-3294.pdf (28. Juni 2015).
- Frühwald F (1988) Faciale Weichteile. In: Czembirek H, Frühwald F, Gritzmann N (Hrsg.) *Kopf-Hals-Sonographie*, Vienna: Springer, S 59–70.
- Gargiulo P, Helgason T, Reynisson PJ, Helgason B, Kern H, Mayr W, Ingvarsson P, Carraro U (2011a) Monitoring of muscle and bone recovery in spinal cord injury patients treated with electrical stimulation using three-dimensional imaging and segmentation techniques: methodological assessment. *Artif Organs* 35 (3): 275–281.
- Gargiulo P, Kern H, Carraro U, Ingvarsson P, Knútsdóttir S, Gudmundsdóttir V, Yngvason S, Vatnsdal B, Helgason T (2010) Quantitative color three-dimensional computer tomography imaging of human long-term denervated muscle. *Neurol Res* 32 (1): 13–19.
- Gargiulo P, Klingner C, Friðgeirsson EA, Burmeister HP, Volk GF, Guntinas-Lichius O (2011b). Side differences in MRI-scans in facial palsy: 3-D modeling, segmentation and gray value analysis. [Online im Internet:] URL: http://www.researchgate.net/publication/230759422_Side_Differences_in_Mri-Scans_In_Facial_Palsy_3-D_Modelling_SegmentationAnd_Voxel_Gradient_Changes (22. Juni 2015).
- Goktepe AS, Chiou-Tan FY, Zhang H, Taber KH (2004) Sectional neuroanatomy of the face. *J Comput Assist Tomogr* 28 (6): 865–869.
- Gosain AK, Amarante MT, Hyde JS, Yousif NJ (1996) A dynamic analysis of changes in the nasolabial fold using magnetic resonance imaging: implications for facial rejuvenation and facial animation surgery. *Plast Reconstr Surg* 98 (4): 622–636.
- Grieser C, Denecke T, Rothe J, Geisel D, Stelter L, Cannon Walter T, Seehofer D, Steffen IG (2014) Gd-EOB enhanced MRI T1-weighted 3D-GRE with and without elevated flip angle modulation for threshold-based liver volume segmentation. *Acta Radiol*.
- Grosheva M, Wittekindt C, Guntinas-Lichius O (2008) Prognostic value of electroneurography and electromyography in facial palsy. *Laryngoscope* 118 (3): 394–397.
- Guntinas-Lichius O, Sittel C (2004) Diagnostics of diseases and the function of the facial nerve. *HNO* 52 (12): 1115-30; quiz 1131-2.
- Guntinas-Lichius O, Streppel M, Stennert E (2006) Postoperative functional evaluation of different reanimation techniques for facial nerve repair. *Am J Surg* 191 (1): 61–67.
- 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. *Anat Rec* 249 (2): 276–284.
- Harnsberger HR, Dillon WP (1985) Major motor atrophic patterns in the face and neck: CT evaluation. *Radiology* 155 (3): 665–670.
- Helgason T, Gargiulo P, Jóhannesdóttir F, Ingvarsson P, Knútsdóttir S, Gudmundsdóttir V, Yngvason S (2005) Monitoring muscle growth and tissue changes induced by electrical stimulation of denervated degenerated muscles with CT and stereolithographic 3D modeling. *Artif Organs* 29 (6): 440–443.
- Jager L, Reiser M (2001) CT and MR imaging of the normal and pathologic conditions of the facial nerve. *Eur J Radiol* 40 (2): 133–146.

- Kaylie DM, Jackson CG, Aulino JM, Gardner EK, Weissman JL (2004) Preoperative appearance of facial muscles on magnetic resonance predicts final facial function after acoustic neuroma surgery. *Otol Neurotol* 25 (4): 622–626.
- Kaylie DM, Wax MK, Weissman JL (2003) Preoperative facial muscle imaging predicts final facial function after facial nerve grafting. *Am J Neuroradiol* 24 (3): 326–330.
- Kim IS, Shin S, Kim J, Lee W, Lee H (2007) Correlation between MRI and operative findings in Bell's palsy and Ramsay Hunt syndrome. *Yonsei Med J* 48 (6): 963–968.
- Kleinheinz J, Joos U (2001) Imaging of cartilage and mimic muscles with MRI: anatomic study in healthy volunteers and patients with unilateral cleft lip and palate. *Cleft Palate Craniofac J* 38 (4): 291–298.
- Koerte IK, Schroeder AS, Fietzek UM, Borggraefe I, Kerscher M, Berweck S, Reiser M, Ertl-Wagner B, Heinen F (2013) Muscle atrophy beyond the clinical effect after a single dose of OnabotulinumtoxinA injected in the procerus muscle: a study with magnetic resonance imaging. *Dermatol Surg* 39 (5): 761–765.
- Korsager AS, Fortunati V, van der Lijn, Fedde, Carl J, Niessen W, Østergaard LR, van Walsum T (2015) The use of atlas registration and graph cuts for prostate segmentation in magnetic resonance images. *Med Phys* 42 (4): 1614.
- Krentz H (2005) *Statistische Analysen mit SPSS in der Medizin*. Aachen: Shaker.
- Macrae PR, Jones RD, Myall DJ, Melzer TR, Huckabee M (2013) Cross-sectional area of the anterior belly of the digastric muscle: comparison of MRI and ultrasound measures. *Dysphagia* 28 (3): 375–380.
- Marur T, Tuna Y, Demirci S (2014) Facial anatomy. *Clin Dermatol* 32 (1): 14–23.
- Midrio M (2006) The denervated muscle: facts and hypotheses. A historical review. *Eur J Appl Physiol* 98 (1): 1–21.
- Min L, Lai G, Xin L (2008) Changes in masseter muscle following curved ostectomy of the prominent mandibular angle: an initial study with real-time 3D ultrasonography. *J Oral Maxillofac Surg* 66 (12): 2434–2443.
- Morrow MJ (2000) Bell's Palsy and Herpes Zoster Oticus. *Curr Treat Options Neurol* 2 (5): 407–416.
- Mugler J, Brookeman JR (1990) Three-dimensional magnetization-prepared rapid gradient-echo imaging (3D MP RAGE). *Magn Reson Med* 15 (1): 152–157.
- Murphy TP (1991) MRI of the facial nerve during paralysis. *Otolaryngol Head Neck Surg* 104 (1): 47–51.
- Nitz WR (2007) *Praxiskurs MRT: Anleitung zur MRT-Physik über klinische Bildbeispiele*. Stuttgart: Thieme.
- Nitz WR (2012) *MRT-Guide für MTRA/RT*. Stuttgart: Thieme.
- Pabst C (2013). *Grundlagen der Magnetresonanztomographie (MRT)*. Letztes Update: Januar 2013. [Online im Internet:] URL: http://www.ukgm.de/ugm_2/deu/umr_rdi/Teaser/Grundlagen_der_Magnetresonanztomographie_MRT_2013.pdf (28. Juni 2015).
- Pillen S, van Alfen N (2011) Skeletal muscle ultrasound. *Neurol Res* 33 (10): 1016–1024.
- Precious DS, Delaire J (1993) Clinical observations of cleft lip and palate. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 75 (2): 141–151.
- Raadsheer MC, van Eijden T, van Spronsen PH, van Ginkel FC, Kiliaridis S, Prahl-Andersen B (1994) A comparison of human masseter muscle thickness measured by ultrasonography and magnetic resonance imaging. *Arch Oral Biol* 39 (12): 1079–1084.
- Reiß M (2009) *Facharztwissen HNO-Heilkunde: Differenzierte Diagnostik und Therapie*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Rezaeitabar Y, Ulusoy I (2012) Automatic 3D segmentation of individual facial muscles using unlabeled prior information. *International journal of computer assisted radiology and surgery* 7 (1): 35–41.

- Riccabona M (2005) Pediatric three-dimensional ultrasound: basics and potential clinical value. *Clin Imaging* 29 (1): 1–5.
- Rummeny E, Reimer P (2009) *MR Imaging of the Body*. Stuttgart: Thieme.
- Russo CP, Smoker WR, Weissman JL (1997) MR appearance of trigeminal and hypoglossal motor denervation. *Am J Neuroradiol* 18 (7): 1375–1383.
- Salvolini U, Scarabino T (2006) *High field brain MRI: Use in clinical practice*. Berlin, New York: Springer.
- Sanders R, MacEwen CJ, McCulloch AS (1994) The value of skull radiography in ophthalmology. *Acta Radiol* 35 (5): 429–433.
- Sauer M (2013) *Statische und dynamische Sonographie der mimischen Muskulatur bei Probanden und Patienten mit peripherer Fazialisparese - Erhebung geschlechtsspezifischer Referenzbereiche [Dissertation]*. Jena: Friedrich-Schiller-Universität.
- Schiebler TH, Korf HW (2007) *Anatomie: Histologie, Entwicklungsgeschichte, makroskopische und mikroskopische Anatomie, Topographie*. Darmstadt: Steinkopff.
- Schumacher G, Aumüller G (2004) *Topographische Anatomie des Menschen*. München, Jena: Elsevier, Urban und Fischer.
- Schünke M, Schulte E, Schumacher U (2012) *Prometheus LernAtlas der Anatomie, Kopf, Hals und Neuroanatomie*. Stuttgart, New York: Thieme.
- Siemens AG (2008). *MR-Glossar*. [Online im Internet:] URL: http://www.healthcare.siemens.com/siemens_hwem-hwem_sxxa_websites-context-root/wcm/idc/groups/public/@global/@imaging/@mri/documents/download/mdaw/mtm3/~edisp/mr_glossar-00016928.pdf (28. Juni 2015).
- Stanisz GJ, Odobina EE, Pun J, Escaravage M, Graham SJ, Bronskill MJ, Henkelman RM (2005) T1, T2 relaxation and magnetization transfer in tissue at 3T. *Magnetic resonance in medicine* 54 (3): 507–512.
- Stennert E, Limberg CH, Frentrup KP (1977) An index for paresis and defective healing--an easily applied method for objectively determining therapeutic results in facial paresis (author's transl). *HNO* 25 (7): 238–245.
- Stevenson J, Knopp EA, Litt AW (1995) MP-RAGE subtraction venography: a new technique. *J Magn Reson Imaging* 5 (2): 239–241.
- Sullivan FM, Swan, Iain R C, Donnan PT, Morrison JM, Smith BH, McKinstry B, Davenport RJ, Vale LD, Clarkson JE, Hammersley V, Hayavi S, McAteer A, Stewart K, Daly F (2007) Early treatment with prednisolone or acyclovir in Bell's palsy. *N Engl J Med* 357 (16): 1598–1607.
- Terzis JK, Konofaos P (2008) Nerve transfers in facial palsy. *Facial Plast Surg* 24 (2): 177–193.
- Trepel M (2012) *Neuroanatomie: Struktur und Funktion*. München: Urban & Fischer in Elsevier.
- Vahlensieck M, Reiser M (2014) *MRT des Bewegungsapparats*. Stuttgart: Thieme.
- Valls-Solé J (2007) Electrodiagnostic studies of the facial nerve in peripheral facial palsy and hemifacial spasm. *Muscle Nerve* 36 (1): 14–20.
- van Alfen N, Gilhuis HJ, Keijzers JP, Pillen S, Van Dijk, Johannes P (2013) Quantitative facial muscle ultrasound: feasibility and reproducibility. *Muscle Nerve* 48 (3): 375–380.
- Veillon F, Taboada LR, Eid MA, Riehm S, Debry C, Schultz P, Charpiot A (2008) Pathology of the facial nerve. *Neuroimaging Clin N Am* 18 (2): 309-20, x.
- Vogl TJ, Reith W, Rummeny EJ (Hrsg.) (2011) *Diagnostische und Interventionelle Radiologie*. Berlin: Springer.
- Volk GF, Karamyan I, Klingner CM, Reichenbach JR, Guntinas-Lichius O (2014a) Quantitative magnetic resonance imaging volumetry of facial muscles in healthy patients with facial palsy. *Plast Reconstr Surg Glob Open* 2 (6): e173.

- Volk GF, Klingner C, Finkensieper M, Witte OW, Guntinas-Lichius O (2013a) Prognostication of recovery time after acute peripheral facial palsy: a prospective cohort study. *BMJ open* 3 (6).
- Volk GF, Pantel M, Guntinas-Lichius O (2010) Modern concepts in facial nerve reconstruction. *Head Face Med* 6: 25.
- Volk GF, Pohlmann M, Finkensieper M, Chalmers HJ, Guntinas-Lichius O (2014b) 3D-Ultrasonography for evaluation of facial muscles in patients with chronic facial palsy or defective healing: a pilot study. *BMC Ear Nose Throat Disord* 14: 4.
- Volk GF, Pohlmann M, Sauer M, Finkensieper M, Guntinas-Lichius O (2014c) Quantitative ultrasonography of facial muscles in patients with chronic facial palsy. *Muscle Nerve* 50 (3): 358–365.
- Volk GF, Sauer M, Pohlmann M, Guntinas-Lichius O (2014d) Reference values for dynamic facial muscle ultrasonography in adults. *Muscle Nerve* 50 (3): 348–357.
- Volk GF, Wystub N, Pohlmann M, Finkensieper M, Chalmers HJ, Guntinas-Lichius O (2013b) Quantitative ultrasonography of facial muscles. *Muscle Nerve* 47 (6): 878–883.
- Walden MJ, Aygun N (2013) Head and neck cancer. *Semin Roentgenol* 48 (1): 75–86.
- Waller BM, Cray JJ, Burrows AM (2008) Selection for universal facial emotion. *Emotion (Washington, D.C.)* 8 (3): 435–439.
- Wehrli HF, Bezrukov I, Wiehr S, Lehnhoff M, Fuchs K, Mannheim JG, Quintanilla-Martinez L, Kohlhofer U, Kneilling M, Pichler BJ, Sauter AW (2015) Assessment of murine brain tissue shrinkage caused by different histological fixatives using magnetic resonance and computed tomography imaging. *Histol Histopathol* 30 (5): 601–613.
- Weishaupt D, Köchli VD, Marincek B (2014) *Wie funktioniert MRI?* Berlin-Heidelberg: Springer.
- Westin LM, Zuker R (2003) A new classification system for facial paralysis in the clinical setting. *J Craniofac Surg* 14 (5): 672–679.
- Wirtz M, Caspar F (Hrsg.) (2002) *Beurteilerübereinstimmung und Beurteilerreliabilität Methoden zur Bestimmung und Verbesserung der Zuverlässigkeit von Einschätzungen mittels Kategoriensystemen und Ratingskalen.* Göttingen [u.a]: Hogrefe.
- Zilles K, Tillmann BN, Zilles T (Hrsg.) (2010) *Anatomie mit 121 Tabellen.* Heidelberg [u.a.]: Springer.

8 Anhang

8.1 Danksagung

Eine wissenschaftliche Arbeit ist nie das Werk einer einzelnen Person, daher möchte ich mich bei allen Beteiligten bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt haben. Besonderer Dank gilt:

Herrn Prof. Dr. O. Guntinas-Lichius, Direktor der Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde des Universitätsklinikums Jena, für die Betreuung der Dissertation als Doktorvater, seine fachliche Beratung und die kritische Durchsicht meines Skriptes.

Herrn Dr. G. F. Volk, HNO-Facharzt der Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde des Universitätsklinikums Jena, für die große Unterstützung in den letzten Jahren. Er stand mir stets mit Rat und Tat zur Seite und hat meine Arbeit immer in die richtige Richtung geleitet.

Frau Dr. R. Fröber sowie Frau Dr. G. Stoya, Institut für Anatomie I des Universitätsklinikums Jena, für die gute und problemlose Kooperation während der Präparation und der Messungen des Körperspenders. Beide standen stets für Fragen zur Verfügung und haben mich bei der Präparation und Fotodokumentation unterstützt.

Frau I. Krumbein, Herrn P. Hiepe, und Herrn K.-H. Herrmann und allen anderen Mitarbeitern des Forschungs-MRT am Steiger für die gute und unkomplizierte Zusammenarbeit während der MRT Messungen des Körperspenders sowie auch der Probanden.

Josefine Druse, für die tolle Zusammenarbeit über die letzten Jahre und die Freundschaft, die sich daraus entwickelt hat.

Sophie Kögl, für die große Hilfe beim Erstellen der Website.

Meinen Freunden und meiner Familie danke ich für die große Unterstützung im Laufe der letzten Jahre.

Großer Dank gilt meinen Eltern für das Korrekturlesen, für die Ermutigung und den Rückhalt bei der Erstellung dieser Arbeit. Ohne ihre Unterstützung in jeglicher Hinsicht, wären mir das Studium und die Doktorarbeit so sicherlich nicht möglich gewesen.

Zu guter Letzt möchte ich meinem Verlobten Martin Möller danken, der jede meiner Launen in den letzten Jahren mit viel Ausdauer, Ruhe und Geduld tapfer ertragen hat. Er stand mir stets zur Seite, um mir zu helfen, wo er nur konnte und mich wieder aufzumuntern, wenn es mal nicht so gut lief. Tausend Dank!

8.2 Lebenslauf

Persönliches

Name: Anika Meyer
Geburtsdatum: 20.12.1990 in Erfurt
Anschrift: Brehmestraße 1
99423 Weimar
Staatsangehörigkeit: deutsch
Telefon: 0162 - 4166411
Email: meyer.anika@uni-jena.de

Schulausbildung:

08/1997 – 06/2001 Grundschule 30, Erfurt
08/2001 – 06/2007 Buchenberggymnasium, Erfurt
08/2007 – 07/2008 Austauschjahr in USA
Diplom an der High School in Bellevue, Iowa
08/2008 – 06/2010 Heinrich-Mann-Gymnasium, Staatliches Gymnasium zur
Himmelspforte, Erfurt
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Studium und Promotion:

seit 10/2010 Studium der Zahnmedizin an der Friedrich-Schiller-Universität
Jena
01/2013 – 12/2013 Stipendium der Richard-Winter-Stiftung
seit 07/2013 Doktorandin der Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und
Ohrenheilkunde des Universitätsklinikums Jena

Vorträge:

14.05.2015 Magnetresonanztomographie zur Untersuchung der mimischen
Muskulatur – Erstellung einer Segmentierungsanleitung. In:
Hosemann W, Hrsg. Abstractband zur 86. Jahresversammlung
der Deutschen Gesellschaft für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde,
Kopf- und Hals-Chirurgie e.V. Berlin, 13.-16.05.2015:
Rheinware Verlag. S.46. [doi: 10.3205/15hnod099](https://doi.org/10.3205/15hnod099)

Zusätzliche Tätigkeiten und Engagements:

2007-2011 ehrenamtliche Mitarbeit im Kirchspiel
Windischholzhausen-Büßleben
Leiter der Jungen Gemeinde
seit 01/2011 Mitarbeiter Kundenservice IKEA Erfurt

Weimar, 30.06.2015

(Anika Meyer)

8.3 Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich,

- dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität bekannt ist,
- dass ich die Dissertation selbst angefertigt habe und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben sind,
- dass mich folgende Personen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts unterstützt haben:
Herr Prof. Dr. O. Guntinas-Lichius, Herr Dr. G. F. Volk
- dass ich die Daten in Kooperation mit Frau cand. med. J. Druse erhoben habe, wir sie jedoch unter verschiedenen Gesichtspunkten analysiert haben. Frau Druse vergleicht mit Hilfe der Probanden-Daten die Sequenzen MP-RAGE und VIBE,
- dass die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen wurde und dass Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,
- dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und
- dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

Weimar, 30.06.2015

(Anika Meyer)

Anleitung zur quantitativen Segmentierung der mimischen Muskulatur im MRT

Jena 2014
© Anika Meyer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Allgemeine Hinweise zur Durchführung einer Segmentierung	2
2.1	Sequenz	2
2.2	Kontrast, Helligkeit	2
2.3	Abgrenzung	2
2.4	Reihenfolge und Farbe	3
3	Segmentierungsprogramm MITK	3
4	Anatomie der mimischen Muskulatur	5
5	Segmentierung der mimischen Muskulatur	8
5.1	M. mentalis	8
5.2	M. depressor anguli oris	9
5.3	M. corrugator supercilii	10
5.4	M. zygomaticus major	11
5.5	M. zygomaticus minor	12
5.6	M. orbicularis oculi	13
5.7	M. orbicularis oris	14
5.8	M. levator labii superioris	15
5.9	M. nasalis	16
5.10	M. frontalis	17
5.11	M. buccinator	18
6	Anatomie der Kaumuskulatur	19
7	Segmentierung der Kaumuskulatur	20
7.1	M. temporalis	20
7.2	M. masseter	21

1 Einleitung

Die vorliegende Anleitung zur Segmentierung der mimischen Muskulatur im MRT soll dem Anwender dabei helfen, die zum Teil sehr komplexen kernspintomographischen Schnittbilder des Gesichtes zu verstehen und die Segmentierung der Mimischen- und Kaumuskulatur nachvollziehen zu können. Die Anatomie der mimischen Muskulatur ist sehr besonders, da die Muskeln von keiner Faszie umschlossen sind und direkt dem umliegenden Gewebe anliegen. Sie inserieren als einzige Muskeln direkt in die Haut und zeigen zum Teil einen sehr variablen Verlauf. Daher ist es nicht immer einfach die Muskeln von Fett- und Bindegewebe abzugrenzen oder sie überhaupt zu erkennen.

In dieser Anleitung wird erläutert, worauf beim Segmentieren der mimischen Muskulatur geachtet werden muss und wie jeder einzelne Muskel in allen drei Ebenen aufzufinden ist. Die Anleitung enthält nur Erläuterungen zu den Muskeln, die im MRT Datensatz gut identifizierbar und segmentierbar sind. Sie beinhaltet neben den reinen Erklärungen auch MRT Bilder in einer für den jeweiligen Muskel charakteristischen Schicht jeder Ebene. Der Muskel ist seiner entsprechenden Farbe markiert. Um die Orientierung zu erleichtern, werden alle detaillierten MRT Bilder von einem Übersichtsbild in der entsprechenden Schicht begleitet, in welchem die anderen beiden dargestellten Ebenen mit Linien markiert sind. Unter den entsprechenden Abbildungen werden die mit Zahlen markierten Strukturen benannt und erläutert. Um den Atlas übersichtlich zu gestalten, erfolgen die Anleitungen ausnahmslos für die rechte Gesichtshälfte.

Für diesen Atlas wurde das Programm MITK (www.mitk.org) verwendet.

Die Lokalisation und die Ausdehnung der Muskeln können von Fall zu Fall differieren und nicht immer den Angaben entsprechen. Trotz der Standardisierung der Segmentierung sollten die Datensätze eines Patienten im Therapieverlauf immer vom gleichen Untersucher vorgenommen werden um die Vergleichbarkeit gewährleisten zu können. Außerdem differieren Helligkeit und der Kontrast trotz gleicher Einstellungen stark abhängig vom verwendeten Monitor, daher sollte stets der gleiche Bildschirm verwendet werden.

2 Allgemeine Hinweise zur Durchführung einer Segmentierung

2.1 Sequenz

Zur Beurteilung der mimischen Muskulatur eignen sich am besten die Sequenzen MP-RAGE bzw. eine spezielle, an der FSU Jena entwickelte coronare VIBE. Die für diesen Atlas verwendete Sequenz ist MP-RAGE (magnetization prepared rapid

gradient-echo). Bei der MP-RAGE handelt es sich um eine dreidimensionale Turbo Fast Low Angle Shot Sequenz. Diese 3D T₁-gewichtete Aufnahmetechnik kann aufgrund der geringen effektiven Schichtdicke zur Darstellung kleiner anatomischer Strukturen genutzt werden und ist daher für die Untersuchung der mimischen Muskulatur ideal.

2.2 Kontrast, Helligkeit

Der Kontrast ist immer abhängig von der jeweiligen Sequenz. Wichtig ist, dass bei der Beurteilung eines Datensatzes immer der gleiche Kontrast und Helligkeit eingestellt wird um eine Vergleichbarkeit unter den Untersuchern und innerhalb verschiedener Untersuchungszeitpunkte gewährleisten zu können. Für die Arbeit in einer MP-RAGE Sequenz wird die Kontrasteinstellung 258-302 (MITK) vorgeschlagen. In dieser Einstellung grenzen sich die Muskeln gut vom umliegenden Gewebe ab. Für die Sequenz VIBE muss in jedem Datensatz individuell der Kontrast eingestellt werden.

2.3 Abgrenzung

Die Segmentierung der Grenzzone zwischen Muskel und umliegendem Gewebe ist sehr schwierig, da die mimischen Muskeln von keiner Faszie begrenzt sind. Dieses Problem kann während der Segmentierung zu erheblichen Unterschieden in den Ergebnissen führen. Daher muss die Herangehensweise vor der Segmentierung geklärt und festgelegt werden. Daher wird die Grenzzone außer Acht gelassen. Es werden nur die Grautöne segmentiert werden, die eindeutig dem Grauwert des Muskels näher sind als dem der Umgebung, also eindeutig von der Umgebung abzugrenzen sind. In der oben genannten Einstellung gilt dies nur für die sehr dunklen Voxel.

Da jeder Muskel unterschiedliche Dichte und Fettanteil besitzt, erscheint er dadurch im MRT unterschiedlich hell. Die Abgrenzung über einen definierten Grauton ist damit nicht möglich und muss für jeden Muskel individuell festgelegt werden. Abgrenzungen, die durch fehlende Kontraste nicht möglich sind, müssen durch anatomische Kenntnisse getätigt werden.

2.4 Reihenfolge und Farbe

Es wird empfohlen während der Segmentierung immer die gleiche Reihenfolge einzuhalten und die einzelnen Muskeln immer in der gleichen Farbe zu markieren. Die beiden Gesichtshälften sollten getrennt segmentiert werden um etwaige Seitenunterschiede analysieren zu können. Dabei wird sich an der Mittellinie orientiert. Die Mittellinie kann anhand des Interhemisphärenspaltes festgelegt werden. Die rechte und linke Seite können farbig durch einen helleren und dunkleren Farbton unterschieden werden. Jeder Muskel wird zunächst in einer charakteristischen Ebene segmentiert. Das Ergebnis wird daraufhin in den beiden anderen Ebenen korrigiert.

Reihenfolge der gut segmentierbaren Muskeln mit Farbkonzept:

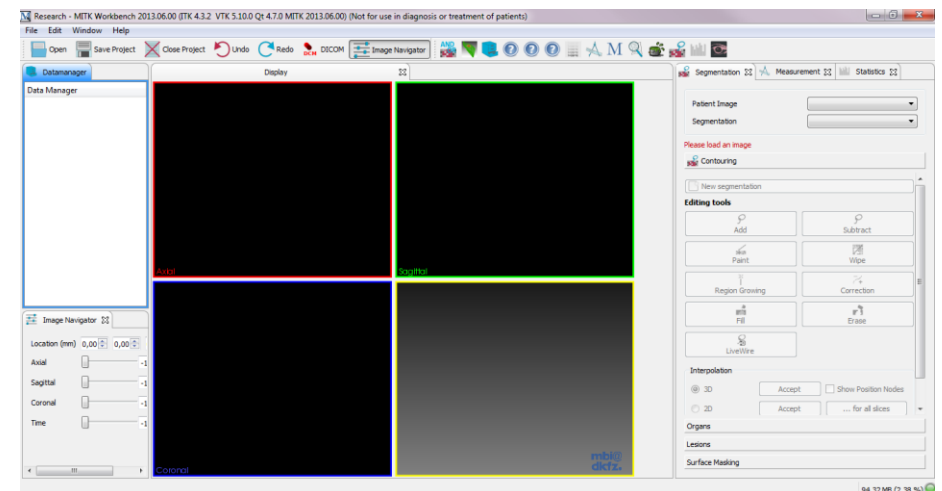
M. mentalis	weiß
M. depressor anguli oris	gelb
M. corrugator supercilii	rot
M. zygomaticus major	rosa
M. zygomaticus minor	pink
M. orbicularis oculi	lila
M. orbicularis oris	blau
M. levator labii sup.	hellblau
M. nasalis	türkis
M. frontalis	braun
M. buccinator	olivgrün
M. temporalis	dunkelrot
M. masseter	dunkelblau

rechts hell, links dunkel

Nach der vollständigen Segmentierung jeden Muskels sollte ein 3D Bild der segmentierten ROI erstellt werden, um die Segmentierung anhand anatomischer Kenntnisse nochmals überprüfen zu können.

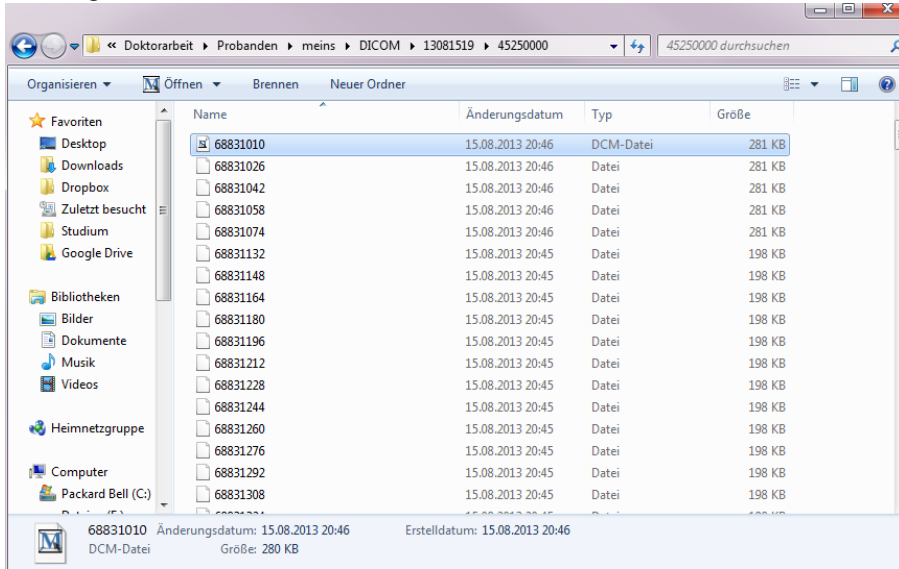
3 Segmentierungsprogramm MITK

Für die Segmentierung kann jedes Segmentierungsprogramm verwendet werden. Wir empfehlen das Programm MITK Workbench. Es ist ein open-source Segmentierungsprogramm und noch dazu sehr strukturiert aufgebaut und leicht verständlich. Das Programm kann unter <http://mitk.org/wiki/Downloads> heruntergeladen werden. Im Folgenden wird Schritt für Schritt erklärt, wie eine Segmentierung im MITK begonnen wird.

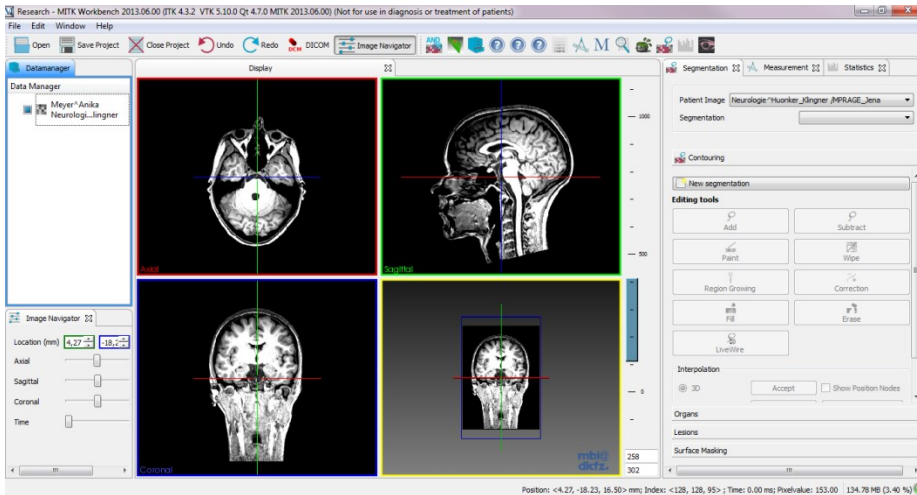


1. Programm öffnen
2. Datensatz öffnen
 - Zur Segmentierung der mimischen Muskulatur eignen sich der Standarddatensatz MPRAGE oder andere speziellere Sequenzen wie z.B. eine coronale VIBE. Für dieses Tutorial wurde die ein MPRAGE Datensatz verwendet.

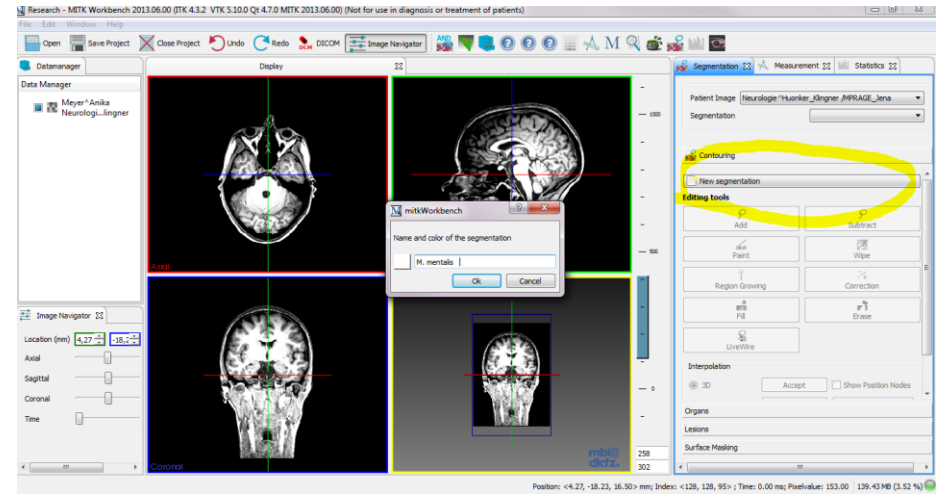
- Der Datensatz muss im DICOM-Format gespeichert sein. Ist das nicht der Fall, muss eine Datei des Datensatzes in „.dcm“ umbenannt werden, damit es von MITK erkannt wird. Klickt man auf dieses, öffnet sich daraufhin der gesamte Datensatz.



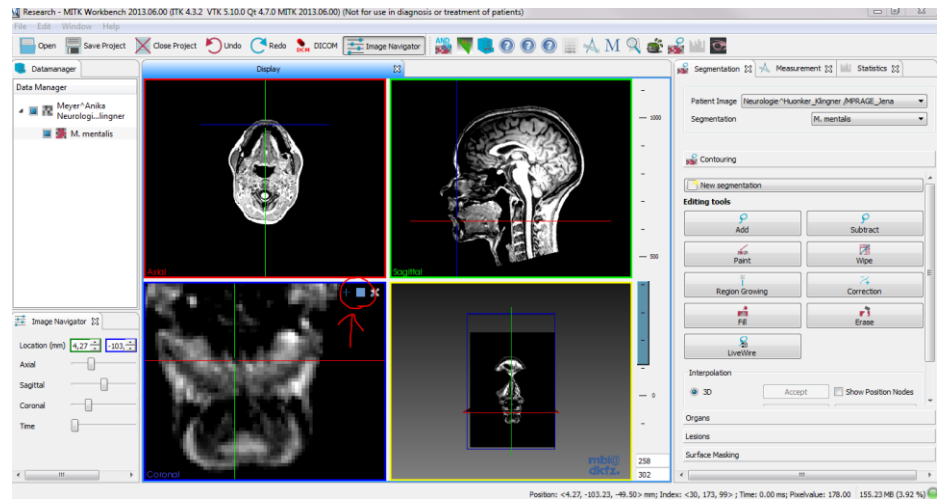
3. Kontrast einstellen (bei MPRAGE 258-302)



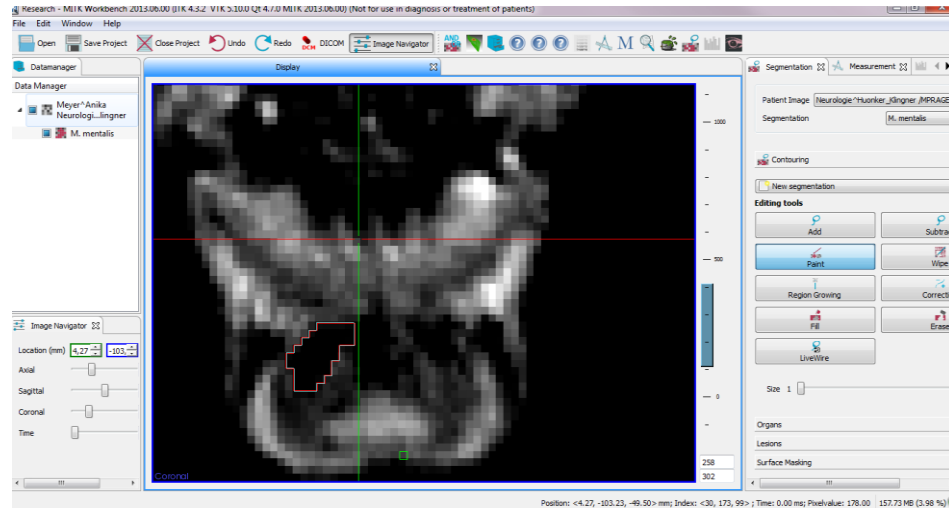
4. Unter Segmentierung, neue Segmentierung erstellen und Farbe auswählen



5. Durch Klicken auf das Quadrat in der oberen rechten Ecke kann die jeweilige Ansicht vergrößert werden.



6. Nutze die Tools “Paint” oder “Add” um zu segmentieren und “Wipe” oder “Substract” um Teile der Segmentierung zu löschen.



4 Anatomie der mimischen Muskulatur

Tab. 1 Anatomie der mimischen Muskulatur (nach Zilles et al. 2010)

Muskel	Ursprung/Ansatz	Innervation/Blutversorgung	Funktion
Muskeln des Schädeldaches			
M. epicranii			
<ul style="list-style-type: none"> M. occipitofrontalis <ul style="list-style-type: none"> Venter frontalis 	Ursprung über den Sehnen benachbarter Muskeln im Bereich der pars nasalis des Os frontale Ansatz Galea aponeurotica	Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. temporales des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. supraorbitalis A. supratrochlearis A. lacrimalis R. frontalis der A. temporalis superficialis 	Verschieben der Kopfhaut Anheben der Augenbrauen und der Stirnhaut
<ul style="list-style-type: none"> Venter occipitalis (M. occipitalis) 	Ursprung Linea nuchalis suprema Ansatz Galea aponeurotica	Innervation <ul style="list-style-type: none"> R. occipitalis des N. auricularis posterior des N. facialis Blutversorgung	

Muskel	Ursprung/Ansatz	Innervation/Blutversorgung	Funktion
		<ul style="list-style-type: none"> A. occipitalis 	
M. temporoparietalis	Ursprung Fascia temporalis Ansatz Galea aponeurotica	Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. temporales des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. temporalis superficialis 	keine nennenswerte Funktion
Muskeln im Bereich der Augenhöhle und der Lidspalte			
M. orbicularis oculi			
<ul style="list-style-type: none"> Pars orbitalis 	Ursprung Crista lacrimalis und Proc. frontalis der Maxilla Ansatz über der Raphe palpebralis lateralis am Os zygomaticum	Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. temporales Rr. zygomatici des N. facialis Blutversorgung	Fester Schluss der Lidspalte
<ul style="list-style-type: none"> Pars palpebralis 	Ursprung Lig. palpebrale mediale Ansatz Lig. palpebrale laterale	Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. facialis R. frontalis der A. temporalis superficialis A. infraorbitalis der A. maxillaris A. supraorbitalis, A. lacrimalis und A. supratrochlearis der A. ophthalmica 	Verschluss der Lipspalte, Beteiligung am Lidschlag und Stabilisierung des Unterlides zur Bildung des Tränensees
<ul style="list-style-type: none"> Pars lacrimalis (Horner-Muskel) 	Ursprung Crista lacrimalis des Os lacrimale Ansatz Canaliculi lacrimales in die Pars palpebralis		Förderung des Tränenflusses, Abfluss der Tränenflüssigkeit
M. corrugator supercilii	Ursprung Os frontale oberhalb der Sutura frontomaxillaris, Glabella, Arcus superciliaris Ansatz Haut oberhalb des mittleren Drittels der Augenbraue, Galea aponeurotica	Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. temporales des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. supraorbitalis und A. supratrochlearis der A. ophthalmica R. frontalis der A. temporalis superficialis 	Verschieben der Augenbrauenhaut nach unten medial
M. depressor supercilii	Ursprung Os frontale Ansatz medialer Teil der Augenbraue	Innervation <ul style="list-style-type: none"> R. temporalis des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> Aa. supratrochleares und supraorbitales der A. ophthalmica 	Verschiebung der Haut über der Nasenwurzel zu einer queren Falte

Muskel	Ursprung/Ansatz	Innervation/Blutversorgung	Funktion
Muskeln im Bereich der Nase			
M. procerus	Ursprung Os nasale, Cartilago nasi lateralis Ansatz Haut der Glabella	Innervation <ul style="list-style-type: none"> R. zygomaticus des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. dorsalis nasi, A. supratrochlearis und Äste der A. ethmoidalis anterior der A. ophthalmica 	Verschiebung der Haut über der Glabella nach unten und Bildung einer Querfalte über der Nasenwurzel
M. nasalis <ul style="list-style-type: none"> Pars transversa Pars alaris 	Ursprung Jugum alveolare des Eckzahnes bis in die Fossa canina der Maxilla Ansatz Aponeurose über dem Nasenrücken Ursprung oberhalb des Jugum alveolare des seitlichen Schneidezahnes Ansatz Haut der Nasenöffnung und des Nasenseptums	Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. zygomatici des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. angularis der A. facialis Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. zygomatici des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. dorsalis nasi und Äste der A. ethmoidalis anterior der A. ophthalmica 	Ziehen den Nasenflügel und die Nasenspitze nach unten, leichte Erweiterung des Nasenloches, Vertiefung des Nasenflügelgrube
M. depressor septi nasi	Ursprung oberhalb des Proc. alveolaris des ersten Schneidezahnes Ansatz knorpeliger Teil des Nasenseptums	Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. zygomatici und buccales des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. labialis superior der A. facialis 	Herabziehen der Nasenspitze und Erweiterung der Nasenlöcher
M. levator labii superioris alaeque nasi	Ursprung Proc. frontalis des Maxilla, Margo infraorbitalis Ansatz Oberlippe, Haut der Nasenflügel	Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. zygomatici des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. infraorbitalis der A. maxillaris A. labialis superior und Äste der A. angularis der A. facialis 	Anheben von Nasenflügel und Oberlippe, Erweiterung der Nasenöffnung

Muskel	Ursprung/Ansatz	Innervation/Blutversorgung	Funktion
Muskeln im Bereich des Mundes			
M. orbicularis oris	Ursprung Jugum alveolare des oberen und des unteren Eckzahnes Ansatz Haut der Ober- und Unterlippe	Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. zygomatici des N. facialis im Bereich der Oberlippe Rr. buccales des N. facialis im Bereich des Mundwinkels R. marginalis mandibulae des N. facialis im Bereich der Unterlippe Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> Aa. labiales superior und inferior der A. facialis Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. buccales des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> Äste der A. facialis und der A. temporalis superficialis A. buccalis und A. alveolaris superior posterior der A. maxillaris 	Gesamter Muskel: Verengen und Schließen der Mundöffnung, Erzeugen der Lippenspannung Alleinige Kontraktion der Pars marginalis: Einziehen des Lippenrotanteils nach innen Alleinige Kontraktion des Pars labialis: Vorwölben der Lippen
M. buccinator	Ursprung Proc. alveolaris maxillae im Bereich der Molaren, Crista buccinatoria im Bereich der Unterkiefermolaren Ansatz Modiolus anguli oris, über dem M. orbicularis oris in der Ober- und Unterlippe	Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. buccales des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> Äste der A. facialis und der A. temporalis superficialis A. buccalis und A. alveolaris superior posterior der A. maxillaris 	Beteiligung am Kauakt, indem er die Speise aus dem Mundvorhof zwischen die Zahnreihen und in die Mundhöhle schiebt. Erzeugung der Wangen- und Lippenspannung.
M. zygomaticus major	Ursprung Os zygomaticum vor der Sutura zygomaticotemporalis Ansatz Haut des Mundwinkels und der Oberlippe	Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. zygomatici des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. zygomaticoorbitalis der A. temporalis superficialis Äste der A. facialis 	Anheben des Mundwinkels nach außen-oben, Vertiefung der Nasolabialfurche und der Lidfurche
M. zygomaticus minor	Ursprung Os zygomaticum medial vom M. zygomaticus major Ansatz Haut des Sulcus nasolabialis	Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. zygomatici des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. zygomaticoorbitalis der A. temporalis superficialis Äste der A. facialis 	Anheben des Mundwinkels nach außen-oben

Muskel	Ursprung/Ansatz	Innervation/Blutversorgung	Funktion
M. risorius	Ursprung Facia masseterica Ansatz Haut der Oberlippe, Schleimhaut des Vestibulum oris, Modiolus anguli oris	Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. buccales des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> Äste der A. facialis 	Zug des Mundwinkels nach lateral, Vertiefung der Nasolabialfurche, Erzeugung des Wangengrübchens
M. levator labii superioris	Ursprung Margo infraorbitalis der Maxilla oberhalb des Foramen infraorbitale Ansatz Haut der Oberlippe und des Nasenflügels, M. orbicularis oris	Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. zygomatici des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. infraorbitalis der A. maxillaris A. labialis superior und Äste der A. angularis der A. facialis 	Anheben der Oberlippe, Erzeugung einer Falte oberhalb und seitlich der Nasenflügel
M. levator anguli oris (M. caninus)	Ursprung Fossa canina unterhalb des Foramen infraorbitale Ansatz Haut und Schleimhaut des Mundwinkelbereiches, Modiolus anguli oris, M. orbicularis oris	Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. zygomatici des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. infraorbitalis der A. maxillaris Äste der A. angularis und A. labialis superior der A. facialis 	Anheben des Mundwinkels nach kranial-medial
M. depressor anguli oris (M. triangularis)	Ursprung Basis mandibulae vom Tuberculum mentale bis zum Jugum alveolare des ersten Molaren Ansatz Haut des Mundwinkels, Modiolus anguli oris	Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. buccales des N. facialis variabel: R. marginalis mandibulae Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> Äste der A. facialis A. labialis inferior der A. facialis Innervation <ul style="list-style-type: none"> R. marginalis mandibulae des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. labialis inferior der A. facialis 	Zug des Mundwinkels nach unten
M. depressor labii inferioris (M. quadratus inferioris)	Ursprung Basis mandibulae unterhalb des Foramen mentale (Verbindung zum Platysma) Ansatz Haut und Schleimhaut der Unterlippe, Haut des Kinnwulstes, M. orbicularis oris	Innervation <ul style="list-style-type: none"> R. marginalis mandibulae des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. labialis inferior der A. facialis 	Zug der Unterlippe nach unten-lateral, Vorwölbung des Lippenrotes
M. mentalis	Ursprung Jugum alveolare des seitlichen Schneidezahnes der Mandibula	Innervation <ul style="list-style-type: none"> R. marginalis mandibulae des N. facialis 	Verschieben der Haut des Kinns nach oben

Muskel	Ursprung/Ansatz	Innervation/Blutversorgung	Funktion
	Ansatz Haut des Kinns	Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. labialis inferior der A. facialis 	
Muskeln im Bereich des äußeren Ohres			
M. auricularis anterior	Ursprung Fascia temporalis, Galea aponeurotica Ansatz Spina helices der Ohrmuschel	Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. temporales des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. temporalis superficialis 	geringgradiger Zug der Ohrmuschel nach vorn
M. auricularis superior	Ursprung Galea aponeurotica Ansatz Hinterfläche der Ohrmuschel im Bereich der Eminentia scaphae und der Eminentia fossae triangularis, Spina helices	Innervation <ul style="list-style-type: none"> Rr. temporalis und R. auricularis des N. auricularis posterior des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. temporalis superficialis A. auricularis posterior 	geringgradiger Zug der Ohrmuschel nach oben
M. auricularis posterior	Ursprung Proc. mastoideus, Linea nuchalis superior Ansatz Eminentia conchae der Ohrmuschel	Innervation <ul style="list-style-type: none"> R. auricularis des N. auricularis posterior des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. auricularis posterior R. auricularis der A. occipitalis 	geringgradiger Zug der Ohrmuschel nach hinten
Muskeln des Halses			
Platysma	Ursprung Basis mandibulae Ansatz Haut der oberen Brustregion	Innervation <ul style="list-style-type: none"> R. colli des N. facialis Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> R. superficialis der A. transversa colli A. submentaliss der A. facialis 	Gesichtsteil: Herabziehen der Mundwinkel nach lateral Halsteil: Verschieben der Haut zur Mandibula Spannen von Haut und Unterhautgewebe

5 Segmentierung der mimischen Muskulatur

5.1 M.mentalis

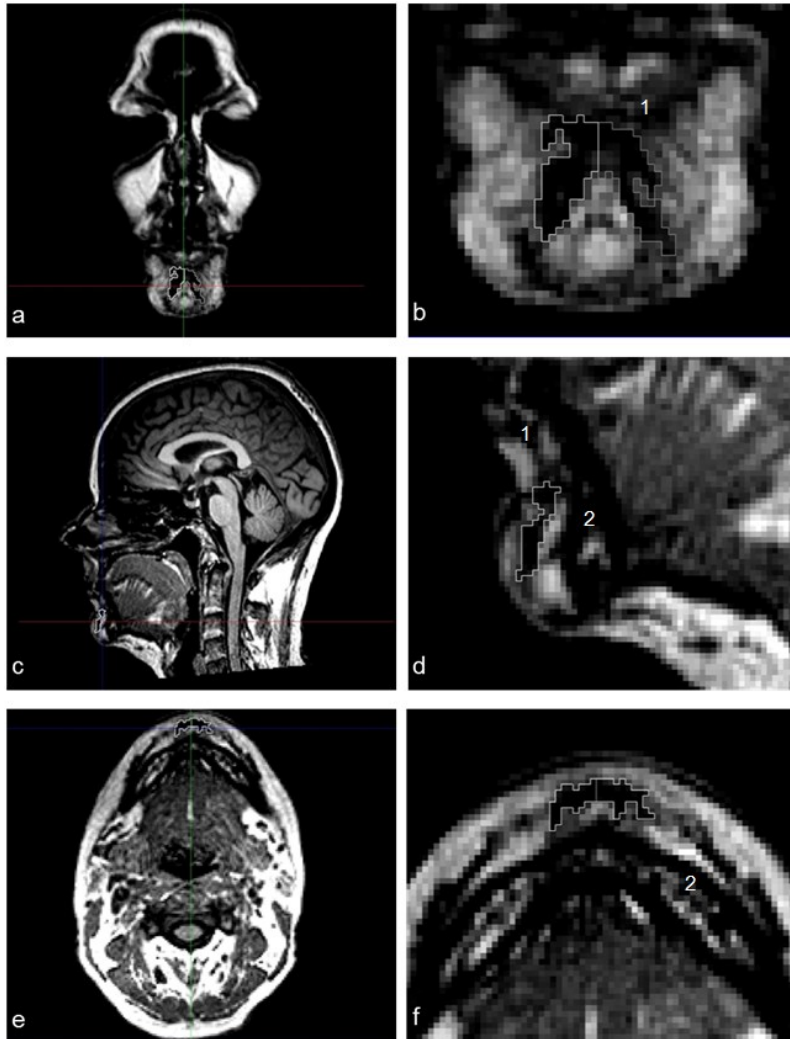


Abb. 1) a Übersichtsbild MRT coronar **b** M. mentalis in coronarer Ebene **c** Übersichtsbild MRT sagittal **d** M. mentalis in sagittaler Ebene **e** Übersichtsbild MRT axial **f** M. mentalis in axialer Ebene
1 M. orbicularis oris
2 Mandibula

Lage des Muskels

Coronar: Segmentierung wird ventral in der Schicht begonnen, in der das Kinn gerade noch zu erkennen ist. Nun wird in die Tiefe gescrollt. Von der Mitte aus verbreitert sich der M. mentalis beidseits in einem Streifen von mediokraniel nach laterokaudal.

Sagittal: Segmentierung mittig beginnen. M. mentalis verläuft als schmaler Streifen von kranial am M. orbicularis oris nach kaudal Höhe Zungenrund. In dieser Ebene erfolgt die Abgrenzung nach dorsal.

Axial: Auf Kinnhöhe sind ventral unter der Haut zwei Muskelbäuche beidseits der Mittellinie sichtbar.

Leitstrukturen

Kranial inseriert er in den M. orbicularis oris. Er hat also mit diesem direkten Kontakt. Dorsal liegt das Vestibulum oris.

Fehlinterpretationen

Das dorsal liegende Vestibulum oris stellt sich im MRT ebenfalls dunkel dar und muss vom M. mentalis abgegrenzt werden.

5.2 M. depressor anguli oris

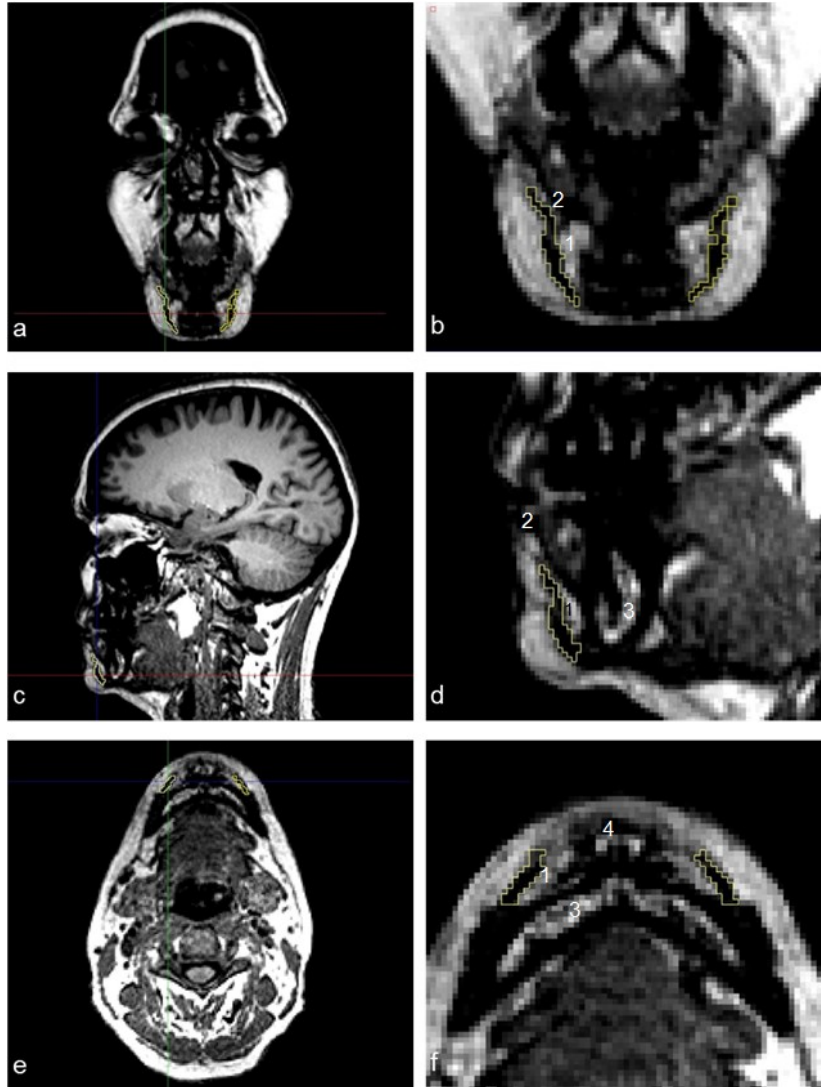


Abb. 2) *a* Übersichtsbild MRT coronar *b* M. depressor anguli oris in coronarer Ebene *c* Übersichtsbild MRT sagittal *d* M. depressor anguli oris in sagittaler Ebene *e* Übersichtsbild MRT axial *f* M. depressor anguli oris in axialer Ebene

- 1 Mandibula
- 2 M. orbicularis oris
- 3 Pars alveolaris mandibulae
- 4 M. mentalis

Lage des Muskels

Coronar: Segmentierung in den tiefen Lagen des M. mentalis beginnen. Laterokaudal der Mm. mentales beginnt sich der M. depressor anguli oris in einem schmalen Streifen entlang der Mandibulaußenkante nach dorsal zu erstrecken. Die kaudale Begrenzung ist auf Höhe der Basis mandibulae zu machen, da der Muskel an dieser entspringt. Nach kranial kann er bis Höhe Mundwinkel reichen.

Sagittal: Von der Mittellinie aus beginnend nach lateral scrollen. Muskel beginnt ventrokaudal und erstreckt sich nach dorsokranial entlang der Mandibula.

Axial: Der Muskel stellt sich als schmaler Schlauch lateral der Mandibula dar.

Leitstrukturen

Der Muskel ist direkt der Mandibula angelagert. Kranial inseriert der Muskel in den Modiolus, kann also Kontakt zu anderen mimischen Muskeln haben, wie z.B. den M. orbicularis oris.

Fehlinterpretationen

Nach dorsal geht der Muskel in das Platysma über, welches unbedingt abzugrenzen ist. Die Trennung erfolgt anhand anatomischer Kenntnisse etwa auf Höhe des Mundwinkels.

5.3 M. corrugator supercilii

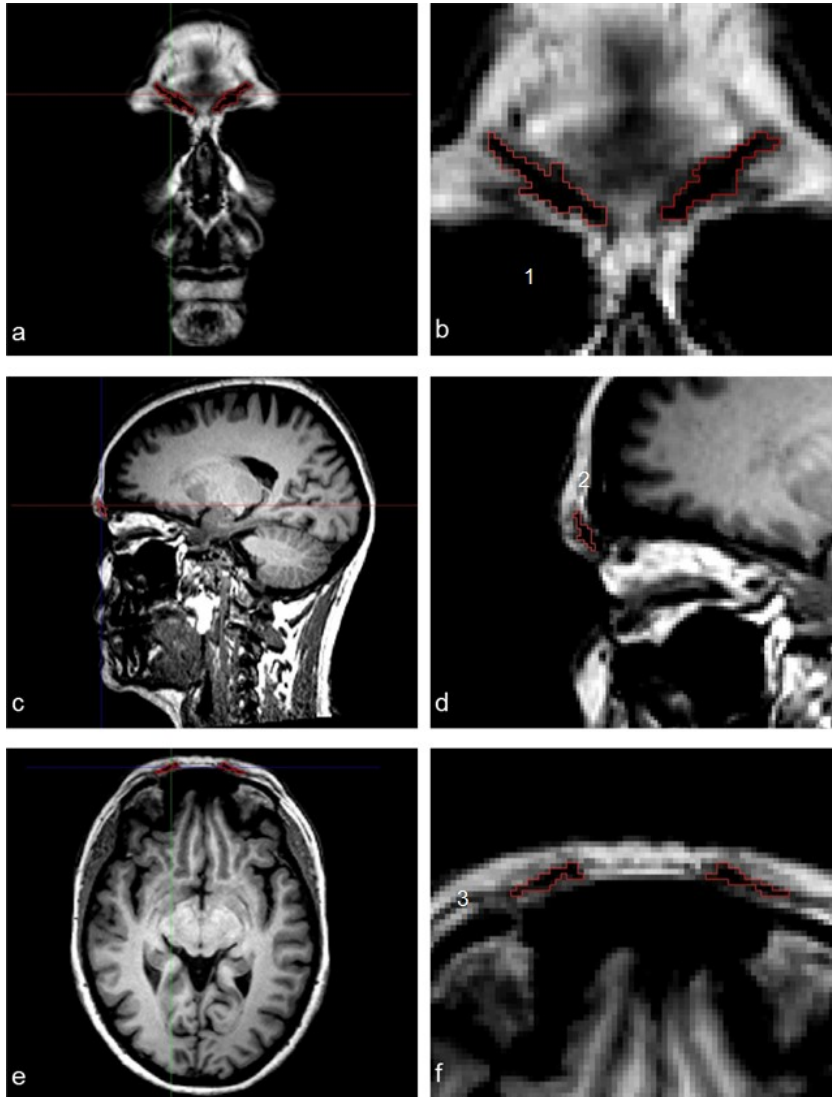


Abb. 3) **a** Übersichtsbild MRT coronar; **b** *M. corrugator supercilii* in coronarer Ebene; **c** Übersichtsbild MRT sagittal; **d** *M. corrugator supercilii* in sagittaler Ebene **e** Übersichtsbild MRT axial; **f** *M. corrugator supercilii* in axialer Ebene

- 1 Orbita
- 2 *M. frontalis*
- 3 *M. orbicularis oculi*

Lage des Muskels

Coronar: Kranial der Orbita erstreckt sich der Muskel in einem Streifen von mediokaudal nach laterokranial.

Sagittal: Segmentierung mittig der Orbita beginnen und in beide Richtungen Korrekturen vornehmen.

Axial: Ausbreitung nach dorsal korrigieren → Muskel liegt ventral der Kalotte auf

Leitstrukturen

Der Muskel liegt kranial der Orbita der Kalotte auf.

Fehlinterpretationen

Der *M. corrugator supercilii* muss in der Coronarebene anhand des Faserverlaufes vom *M. orbicularis oculi* abgegrenzt werden.

5.4 M. zygomaticus major

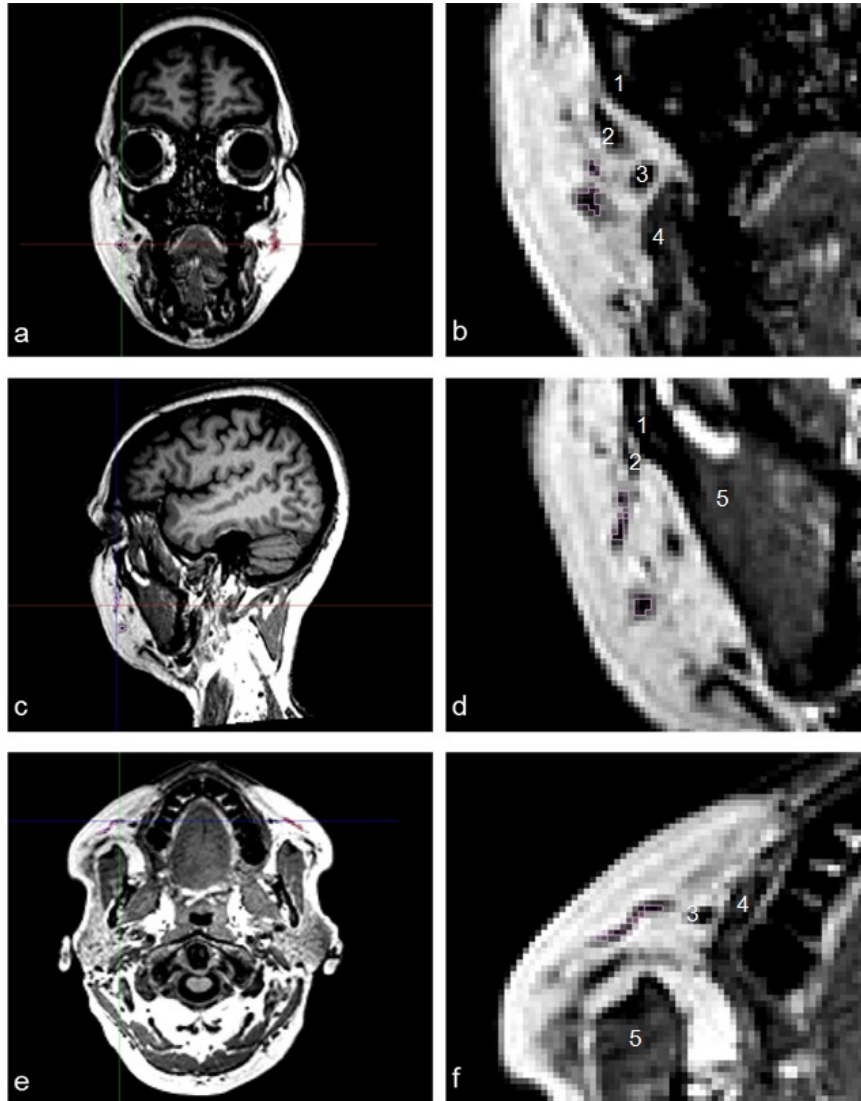


Abb. 4) *a* Übersichtsbild MRT coronar; *b* *M. zygomaticus major* in coronarer Ebene; *c* Übersichtsbild MRT sagittal; *d* *M. zygomaticus major* in sagittaler Ebene; *e* Übersichtsbild MRT axial; *f* *M. zygomaticus major* in axialer Ebene

- 1 *Os zygomaticum*
- 2 *M. zygomaticus minor*
- 3 *A. facialis*
- 4 *M. buccinator*
- 5 *M. masseter*

Lage des Muskels

Coronar: Die ventralsten Lagen des *M. masseter* aufsuchen. Kranial des Muskels liegt das *Os zygomaticum*. Von da aus setzt sich nach laterokaudal hin ein Muskelzug ab. Dieser ist Teil des *M. zygomaticus major*. Der Muskel verläuft in einem Bogen nach mediokaudal zum *Modiolus* und inseriert dort, oft auch zweibäuchig.

Sagittal: Der Muskelstrang verläuft ventral des *M. masseter*.

Axial: Er zieht von kranial vom *Os zygomaticum* nach kaudal zum *Modiolus*

Leitstrukturen

Ursprung am *Os zygomaticum*, inseriert in die Haut Höhe Mundwinkel

Fehlinterpretationen

Der Muskel darf nicht mit der *A. facialis* verwechselt werden, welche zum Augeninnenwinkel zieht. Sie zieht jedoch in der entgegengesetzten Richtung, also von laterokaudal nach mediokranial, was spätestens in der 3D Ansicht auffallen sollte.

5.5 M. zygomaticus minor

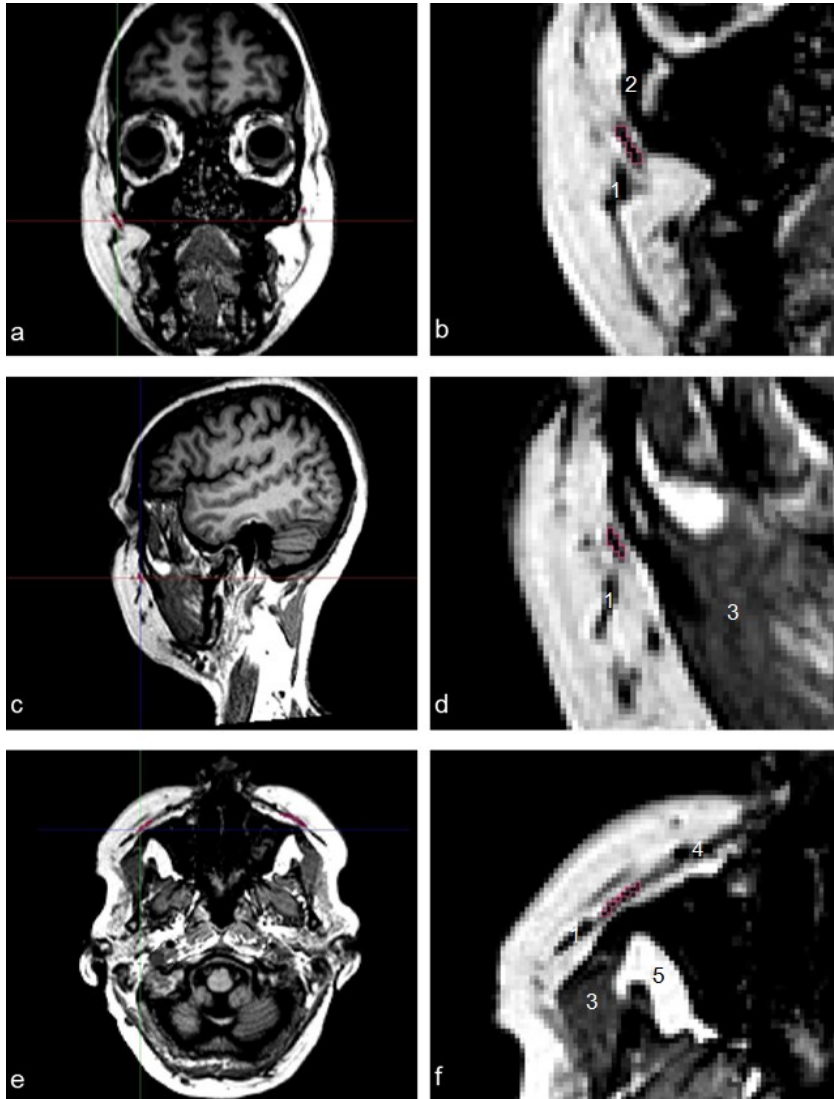


Abb. 5) a Übersichtsbild MRT coronar; b M. zygomaticus minor in coronarer Ebene; c Übersichtsbild MRT sagittal; d M. zygomaticus minor in sagittaler Ebene; e Übersichtsbild MRT transversal; f M. zygomaticus minor in transversaler Ebene

- 1 M. zygomaticus major
- 2 Os zygomaticum
- 3 M. masseter
- 4 M. levator labii superioris
- 5 Mandibula

Lage des Muskels

Coronar: Der Muskel ist nicht in jedem MRT auffindbar. Er befindet sich kranial des M. zygomaticus major und zeigt einen ähnlichen Verlauf.

Sagittal: Der Muskelstrang verläuft ventral des M. masseter und kranial des M. zygomaticus major und ist im Vergleich kleiner als dieser.

Axial: Er zieht von kranial vom Os zygomaticum punktförmig nach kaudal, reicht aber nicht so tief wie M. zygomaticus major.

Leitstrukturen

Ursprung am Os zygomaticum, medial des M. zygomaticus major, inseriert kranial des M. zygomaticus major an Haut des Sulcus nasolabialis

Fehlinterpretationen

Abgrenzung zu M. zygomaticus major vornehmen. Der M. zygomaticus minor entspringt medialer und verläuft nicht so weit nach kaudal.

5.6 M. orbicularis oculi

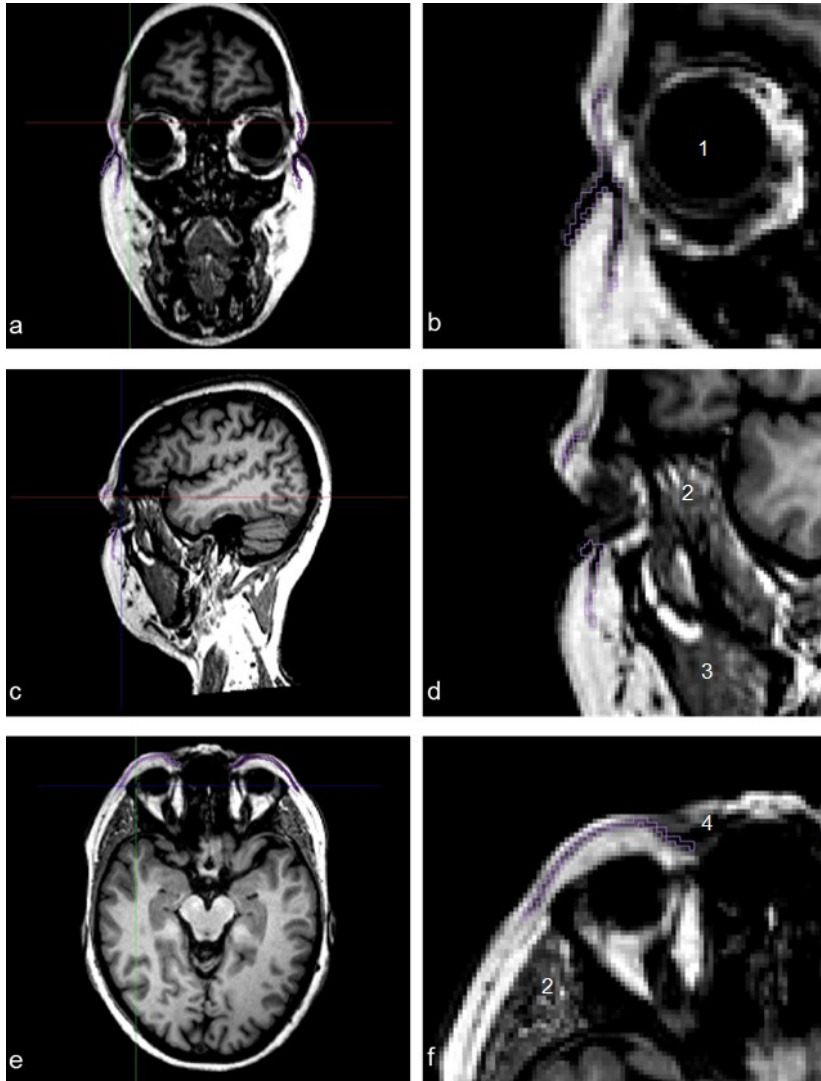


Abb. 6) *a* Übersichtsbild MRT coronar; *b* M. orbicularis oculi in coronarer Ebene; *c* Übersichtsbild MRT sagittal; *d* M. orbicularis oculi in sagittaler Ebene; *e* Übersichtsbild MRT axial; *f* M. orbicularis oculi in axialer Ebene

- 1 Bulbus oculi
- 2 M. temporalis
- 3 M. masseter
- 4 M. corrugator supercilii

Lage des Muskels

Axial: Die Segmentierung unterhalb der Orbita beginnen. Vom Nasenflügel bis lateral der Orbita erstreckt sich ein schmaler Muskelzug, der sich nach kaudal verkürzt. Wird nach kranial gescrollt, eröffnet sich die Orbita, welche den Muskel in einen medialen und einen lateralen Teil unterteilt. Der mediale stellt sich oft kaum dar. Der laterale Anteil ist oft zweischichtig. Wird weiter nach kranial gescrollt, vereinen sich die beiden Anteile wieder oberhalb der Orbita → Ringmuskel

Coronar: In einer Ebene dorsal des Bulbus oculi beginnen. Lateral der Orbita und des M. temporalis erstreckt sich ein senkrechter, schmaler Muskelzug. Wird nach ventral gescrollt, nähert sich dieser der Orbita an und wird in einen kaudalen und einen kranialen Teil getrennt. Die kaudalen Anteile können bis auf Höhe des Nasenbodens reichen. Sie erscheinen inhomogen, da sie von Fettgewebe durchsetzt sind.

Sagittal: Segmentierung lateral der Nase beginnen. Wird weiter nach lateral gescrollt trennt sich Muskel in kaudalen und kranialen Teil auf, welche sich lateral der Orbita wieder vereinen

Leitstrukturen

Ringmuskel um die Orbita

Fehlinterpretationen

Das Muskelgewebe erscheint heller als bei anderen Muskeln.

Die Pars palpebralis kann im MRT nicht segmentiert werden, da sie direkt der Haut anliegt und somit nicht darstellbar ist. Die Segmentierung des M. orbicularis oculi ist somit immer unvollständig.

5.7 M. orbicularis oris

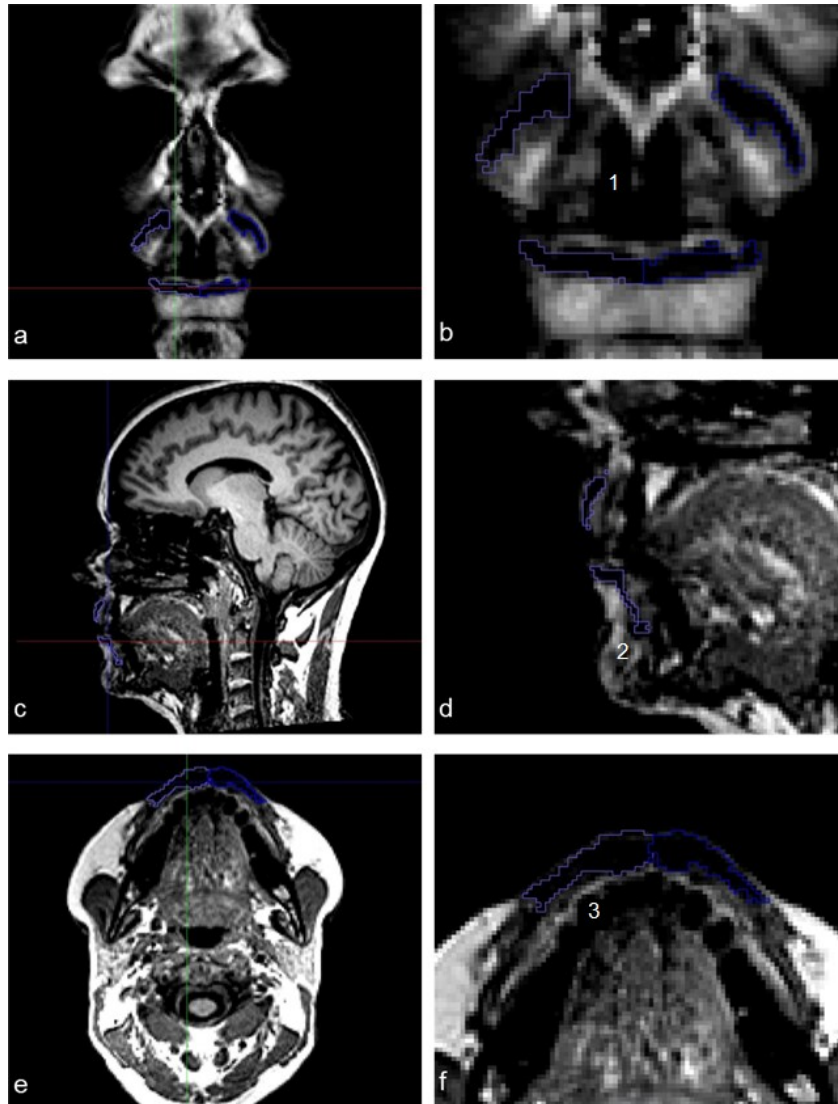


Abb. 7) *a* Übersichtsbild MRT coronar; *b* M. orbicularis oris in coronarer Ebene ; *c* Übersichtsbild MRT sagittal; *d* M. orbicularis oris in sagittaler Ebene; *e* Übersichtsbild MRT transversal; *f* M. orbicularis oris in transversaler Ebene

1 Dens incisivus medialis dexter superior

2 M. mentalis

3 Dens caninus dexter inferior

Lage des Muskels

Axial: Auf Höhe Nasenboden beginnen. Lateral der Nasenflügel werden die rundlichen Querschnitte des M. orbicularis oris sichtbar. Wird nach kaudal gescrollt, vereinigen sich diese zu einem Muskelstrang, der direkt unter der Haut liegt (Oberlippe). Weiter kaudal auf Höhe des Stomions ist kurzzeitig kein Muskelgewebe sichtbar, oder nur im Bereich der Mundwinkel. Wird weiter nach unten gescrollt, stellt sich der Muskeln wieder direkt unter der Haut dar (Unterlippe), unterhalb dieser liegt er etwas weiter in der Tiefe und geht dann über in den M. mentalis bzw. M. depressor anguli oris und M. depressor labii inferior.

Sagittal: Segmentierung in dieser Ebene korrigieren. Mittig beginnen, ein Muskelstrang jeweils in Ober- und Unterlippe, die sich nach lateral vereinigen.

Coronar: Segmentierung in dieser Ebene korrigieren.

Leitstrukturen

Ringmuskel um das Stomion. Von kaudal inserieren M. mentalis, M. depressor anguli oris und M. depressor labii sup.

Fehlinterpretationen

Die dorsal liegenden Zähne stellen sich ebenfalls dunkel dar und dürfen nicht mit dem Muskeln verwechselt werden.

5.8 M. levator labii superioris

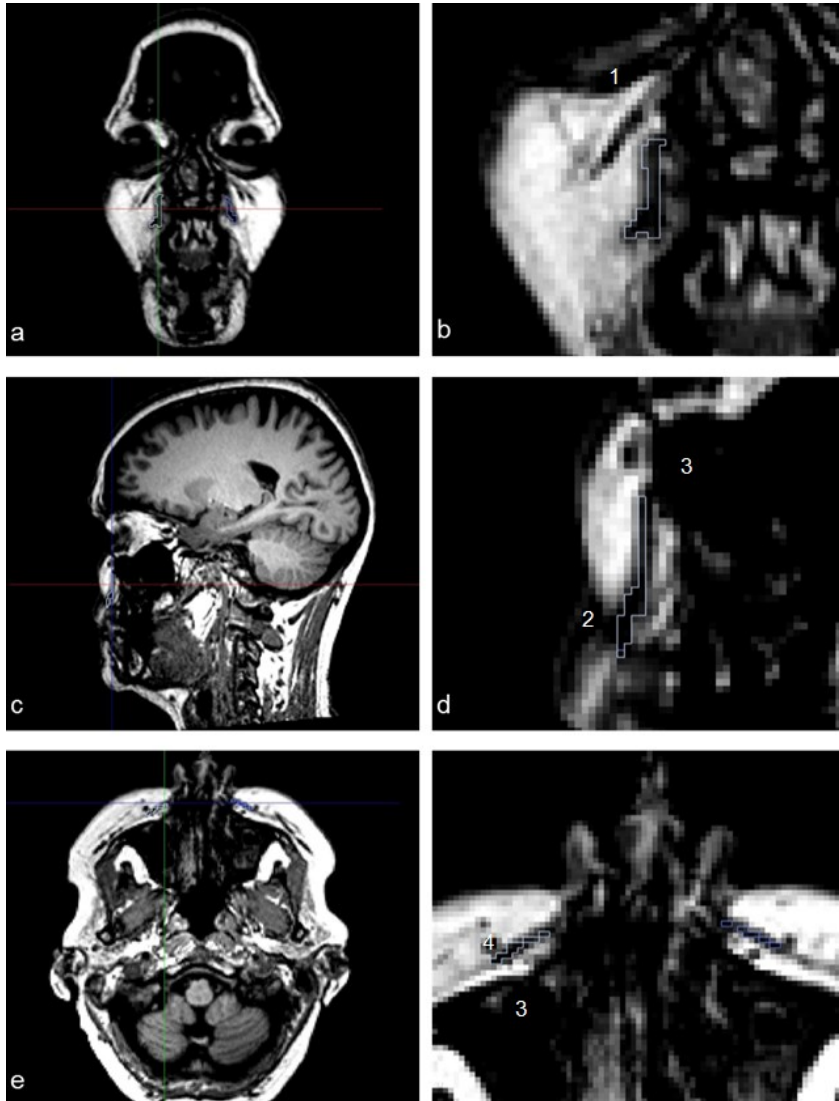


Abb. 8) *a* Übersichtsbild MRT coronar ; *b* M. levator labii superioris in coronarer Ebene; *c* Übersichtsbild MRT sagittal; *d* M. levator labii superioris in sagittaler Ebene; *e* Übersichtsbild MRT axial; *f* M. levator labii superioris in axialer Ebene

- 1 M. orbicularis oculi
- 2 M. orbicularis oris
- 3 Sinus maxillaris
- 4 A. facialis

Lage des Muskels

Coronar: Segmentierung in der tiefsten Schicht des oberen Teiles des M. orbicularis oris beginnen. Wird von dort in die Tiefe gescrollt, setzt sich von da aus ein Muskelzug nach kranial ab der zur Maxilla zieht, etwa Höhe Foramen infraorbitale

Axial: Muskelzug, der kranial an der Vorderwand des Sinus maxillaris beginnt und kaudal am M. orbicularis oris inseriert.

Sagittal: Segmentierung in dieser Ebene korrigieren.

Leitstrukturen

Ursprung an Vorderwand des Sinus maxillaris, inseriert in M. orbicularis oris

Fehlinterpretationen

Der Muskel darf nicht mit der ähnlich verlaufenden A. facialis verwechselt werden, welche jedoch einen längeren Verlauf von der Basis mandibulae aus zeigt

5.9 M. nasalis

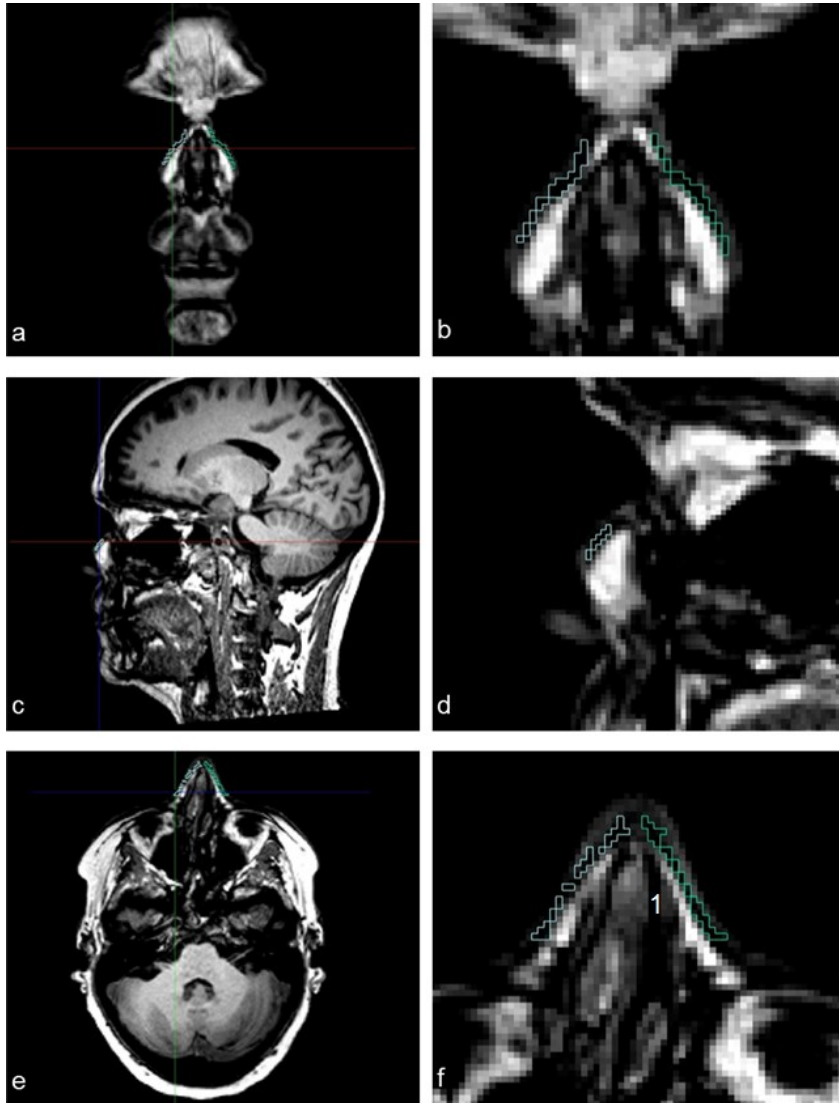


Abb. 9) **a** Übersichtsbild MRT coronar; **b** *M. nasalis* in coronarer Ebene; **c** Übersichtsbild MRT sagittal; **d** *M. nasalis* in sagittaler Ebene; **e** Übersichtsbild MRT transversal; **f** *M. nasalis* in transversaler Ebene

1 *Meatus nasalis*

Lage des Muskels

Coronar: Segmentierung an Nasenspitze beginnen. In die Tiefe scrollen, der Muskel liegt oberflächlich unter der Haut. An der Nasenspitze stellt er sich punktförmig dar und verbreitert sich dann nach dorsal entlang der Nasenflügel.

Axial: Segmentierung in dieser Ebene korrigieren.

Sagittal: Segmentierung in dieser Ebene korrigieren.

Leitstrukturen

Nase

Fehlinterpretationen

Die Nasengänge stellen sich ebenfalls schwarz dar und dürfen nicht mit dem Muskeln verwechselt werden.

5.10 M. frontalis

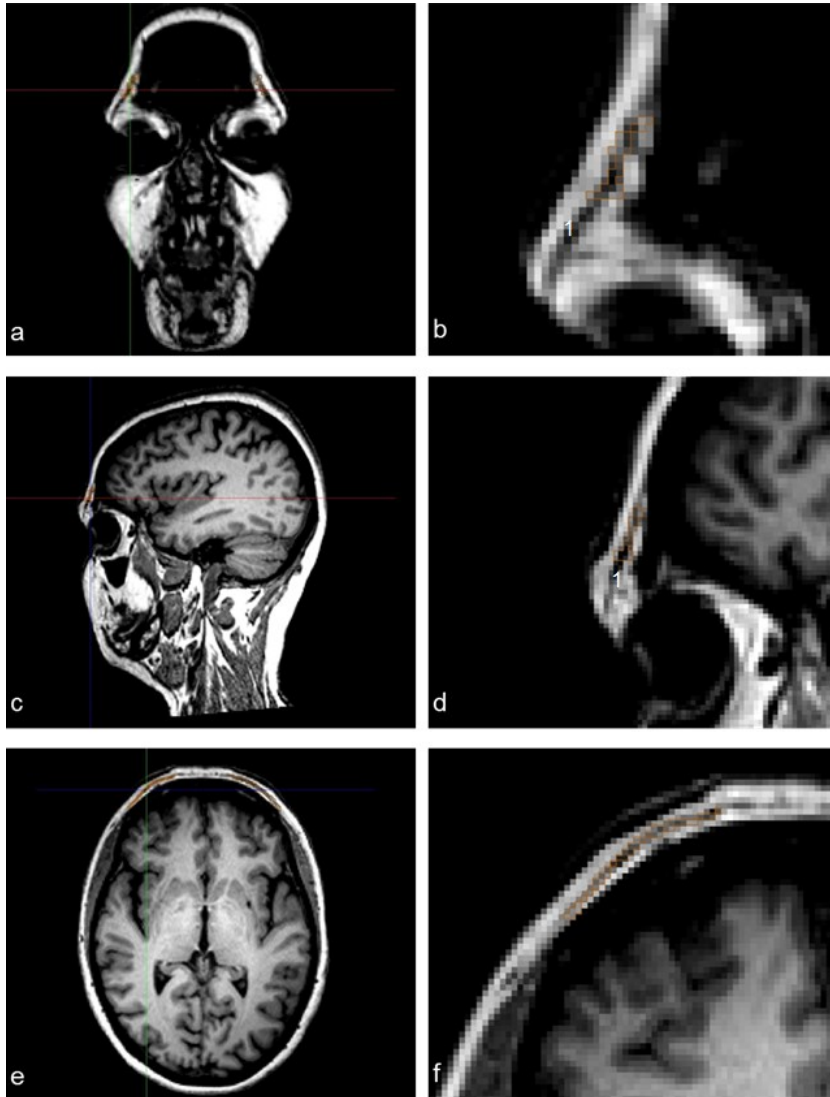


Abb. 10) *a* Übersichtsbild MRT coronar; *b* *M. frontalis* in coronarer Ebene; *c* Übersichtsbild MRT sagittal; *d* *M. frontalis* in sagittaler Ebene; *e* Übersichtsbild MRT axial; *f* *M. frontalis* in axialer Ebene

1 M. orbicularis oculi

Lage des Muskels

Da der Muskel sehr dünn ist und der Galea aponeurotica direkt aufliegt, ist die Segmentierung im MRT kaum möglich. Teile des Muskels können in axialer Ebene kranial des *M. orbicularis oculi* aufgefunden werden.

Leitstrukturen

M. orbicularis oculi

Fehlinterpretationen

Die Abgrenzung zum *M. orbicularis oculi* ist sehr schwer, da die Muskelfasern mit denen benachbarter Muskeln verflochten sind. Die Segmentierung ist an sich nicht vollständig möglich.

5.11 M. buccinator

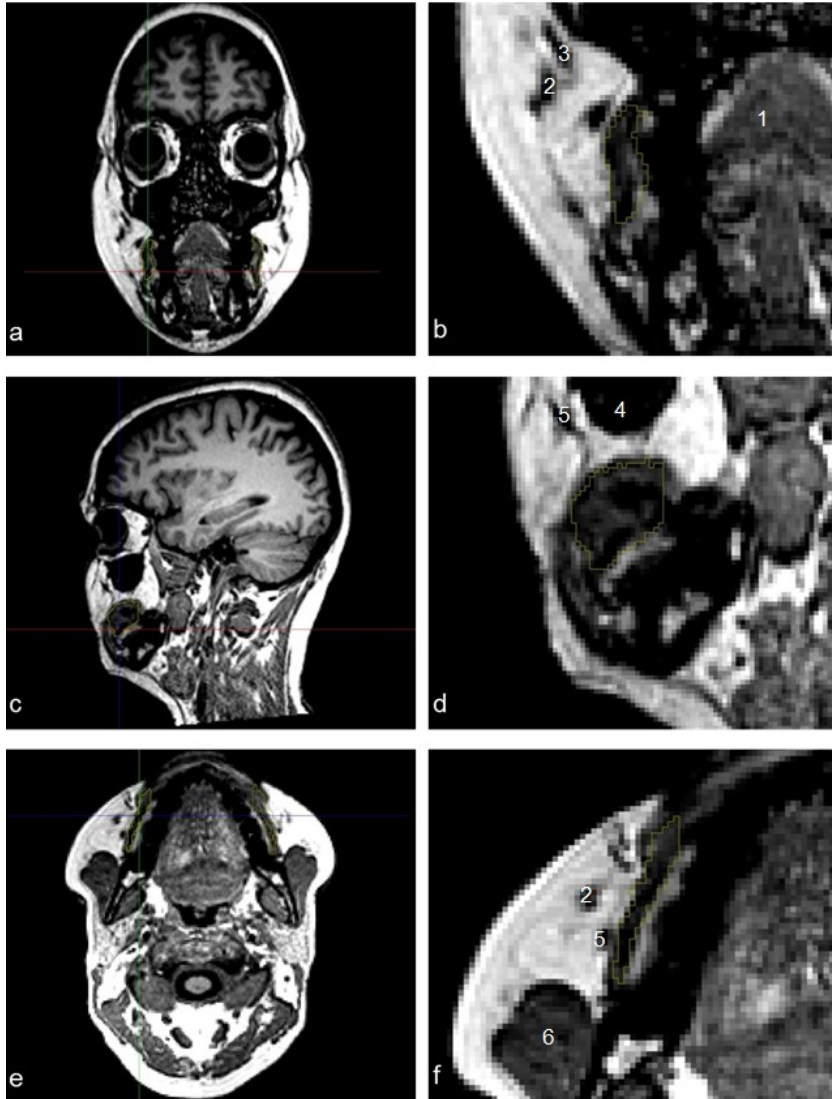


Abb. 11) a Übersichtsbild MRT coronar; **b** M. buccinator in coronarer Ebene; **c** Übersichtsbild MRT sagittal; **d** M. buccinator in sagittaler Ebene; **e** Übersichtsbild MRT axial; **f** M. buccinator in axialer Ebene

1 Lingua

2 M. zygomaticus major

3 M. zygomaticus minor

4 Sinus maxillaris

5 A. facialis

6 M. masseter

Lage des Muskels

Coronar: Der Muskel begrenzt nach lateral die Mundhöhle. Die Segmentierung sollte in den ventralen Schichten des M. masseter begonnen werden. Lateral der Mundhöhle liegt hier ein senkrechter, leicht geschwungener Muskelzug. Diesen nach ventral und dorsal verfolgen. Bei Unsicherheiten zunächst in den anderen Ebenen segmentieren.

Axial: Lateral der Mundhöhle stellt sich der Muskel in einem langen, schmalen Band dar. Nach ventral reicht er bis zum M. orbicularis oris, nach dorsal bis zu den Molaren.

Sagittal: Segmentierung in dieser Ebene korrigieren

Leitstrukturen

Mundhöhle

Fehlinterpretationen

Das umliegende Gewebe ist sehr inhomogen und daher ist der Muskel schwer zu segmentieren.

6 Anatomie der Kaumuskulatur

Tab. 2 Anatomie der Kauuskulatur (nach Zilles et al. 2010)

Muskel	Ursprung / Ansatz	Innervation / Blutversorgung	Funktion
M. masseter	Ursprung Pars profunda: Facies temporalis und Innenseite des Proc. temporalis des Os zygomaticum Pars superficialis: Facies lateralis und Proc. temporalis des Os zygomaticum Ansatz Pars profunda: Ramus mandibulae bis zur Basis des Proc. coronoideus und des Proc. condylaris Pars superficialis: Tuberositas masseterica an der außenfläche des Angulus mandibulae	Innervation <ul style="list-style-type: none"> N. massetericus des N. mandibularis aus dem N. trigeminus Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. masseterica der A. maxillaris A. facialis A. transversa faciei der A. temporalis superficialis A. buccales der A. maxillaris 	Kräftiges Heben (Adduktion) des Unterkiefers, Unterstützung der Protrusion des Unterkiefers
M. temporalis	Ursprung Linea temporalis inferior der Facies externa des Os parietale und der Facies temporalis des Os frontale, Pars squamosa des Os temporale, Facies temporalis des Os zygomaticum, Facies temporalis des Os sphenoidale bis zur Crista infratemporalis Ansatz Proc. coronoideus der Mandibula bis in das Trigonum retromolare	Innervation <ul style="list-style-type: none"> Nn. temporales profundi des N. mandibularis aus dem N. trigeminus Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> Aa. temporales profundae anterior und posterior der A. maxillaris A. temporalis media der A. temporalis superficialis 	beidseitig: kräftiges Heben (Adduktion) des Unterkiefers, Retrusion des Unterkiefers, Unterstützung der Protrusion (vorderer Anteil) einseitig: Stabilisierung des Caput mandibulae, Verlagerung des Caput mandibulae nach vorn und Drehung zur kontralateralen Seite
M. pterygoideus medialis	Ursprung Pars medialis: in der Fossa pterygoidea an der Facies medialis der Lamina lateralis proc. pterygoidei des Os sphenoidale Pars lateralis: Facies lateralis der Lamina lateralis processus pterygoidea des Os sphenoidale, Proc. pyramidalis ossis palatine, Tuber maxillae Ansatz Tuberositas pterygoidea an der Innenseite des Angulus mandibulae	Innervation <ul style="list-style-type: none"> N. pterygoideus medialis des N. mandibularis aus dem N. trigeminus Blutversorgung <ul style="list-style-type: none"> A. alveolaris superior A. alveolaris inferior A. buccalis der A. maxillaris 	beidseitig: Heben (Adduktion) und Protrusion des Unterkiefers einseitig: Mahlbewegung, Verlagerung des Caput mandibulare nach vorn und Drehung zur kontralateralen Seite
M. pterygoideus lateralis	Ursprung Caput superius: Facies temporalis und Crista infratemporalis des Ala major des Os sphenoidale Caput inferius:	Innervation <ul style="list-style-type: none"> N. pterygoideus lateralis des N. mandibularis aus dem N. trigeminus Blutversorgung	Caput superius: beidseitig: Fixierung des Caput mandibulae einseitig: Mahlbewegung, Stabilisierung

Facies lateralis der Lamina lateralis processus pterygoidea des Os sphenoidale Ansatz Caput superius: Fovea pterygoidea, Discus articularis Caput inferius: Fovea pterygoidea	<ul style="list-style-type: none"> R. pterygoideus der A. maxillaris 	des ruhenden Caput mandibulae Caput inferius: beidseitig: Einleitung der Kieferöffnung einseitig: Mahlbewegung
--	--	--

7 Segmentierung der Kaumuskulatur

7.1 M. temporalis

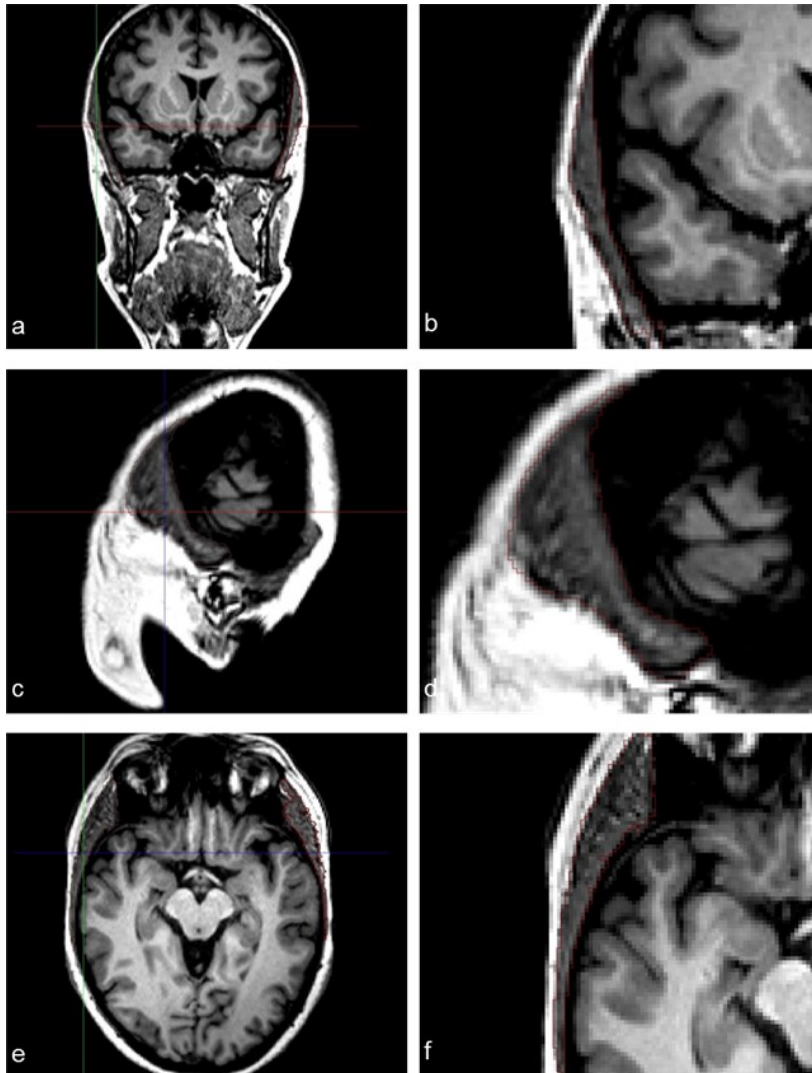


Abb. 12) a Übersichtsbild MRT coronar; *b* M. temporalis in coronarer Ebene; *c* Übersichtsbild MRT sagittal; *d* M. temporalis in sagittaler Ebene; *e* Übersichtsbild MRT axial; *f* M. temporalis in axialer Ebene

Lage des Muskels

Sagittal: Segmentierung weit lateral beginnen und nach medial scrollen. Mittig vergrößert sich zunächst kreisförmig der M. temporalis und verläuft dann nach ventral in Richtung Processus coronoideus der Mandibula.

Axial: Segmentierung auf Höhe des Mesencephalons beginnen. Nach kranial verschmälert sich der Muskel zu einem schmalen Streifen lateral der Kalotte. Nach kaudal verbreitert er sich nach ventral und umfasst dann den Processus coronoideus der Mandibula von ventral und dorsal.

Coronar: In der dorsalsten Ebene des schon markierten Muskels beginnen und Segmentierung nach ventral hin korrigieren. Die Abgrenzung zu den Mm. pterygoidei erfolgt anhand des Faserverlaufes.

Leitstrukturen

Der M. temporalis ist neben dem M. masseter und der Zunge einer der drei großen Muskeln im vorderen Gesichtsbereich.

Fehlinterpretationen

Der Processus coronoideus, sowie eventuelle Bindegewebsstränge innerhalb des Muskels dürfen nicht mitsegmentiert werden.

7.2 M. masseter

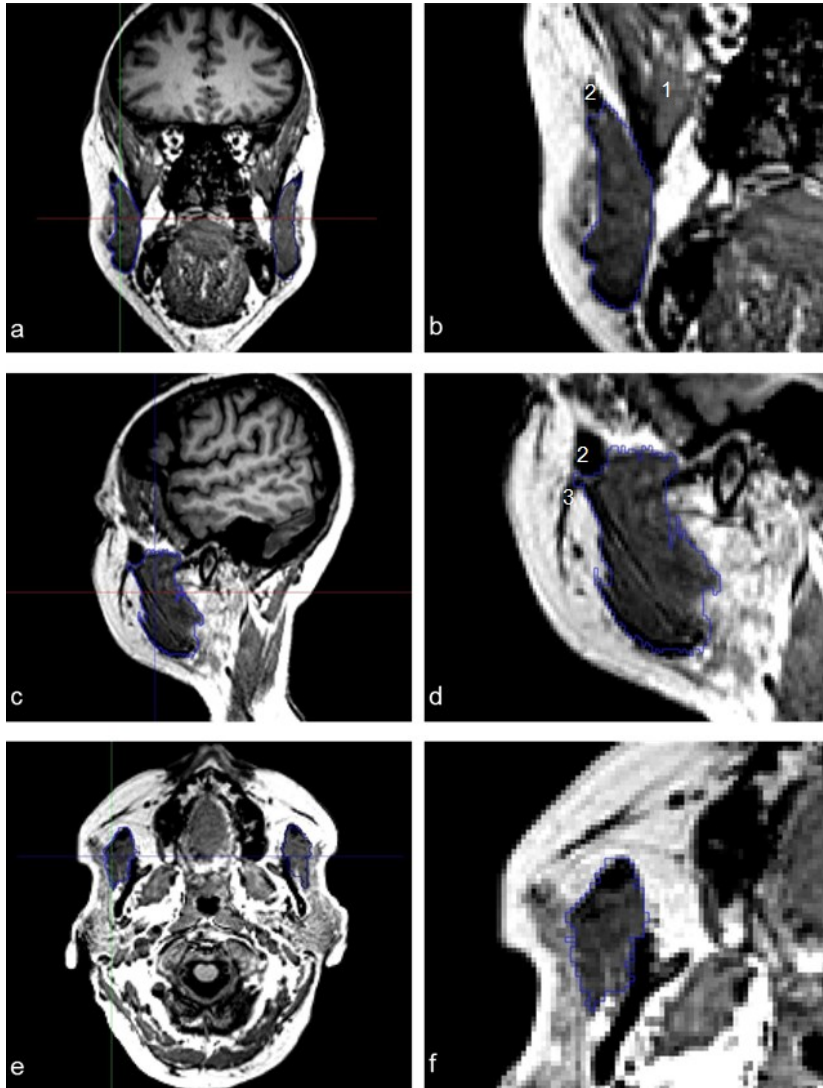


Abb. 13) *a* Übersichtsbild MRT coronar; *b* M. masseter in coronarer Ebene; *c* Übersichtsbild MRT sagittal; *d* M. masseter in sagittaler Ebene; *e* Übersichtsbild MRT axial; *f* M. masseter in axialer Ebene

1 M. temporalis
2 Os zygomaticum
3 M. zygomaticus major

Lage des Muskels

Sagittal: Segmentierung lateral der Mandibula beginnen, dort wo Querschnitt des M. masseter am größten ist. Nach medial grenzt er an Mandibula, nach lateral endet er an Os zygomaticum.

Axial: Ovaler Muskelquerschnitt, lateral der Mandibula

Coronar: Segmentierung in dieser Ebene korrigieren. Ansatz und Ursprung sind gut sichtbar

Leitstrukturen

Mandibulaußenseite, Os zygomaticum

Fehlinterpretationen

-