

**Aus der Klinik und Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
der Universität Würzburg**

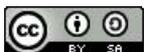
Direktor: Professor Dr. med. dent. Marc Schmitter

**EMG, Kaukraft und Unterkieferkinematik beim unilateralen
Kauen elastischer und spröder Testnahrung**

**Inaugural - Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der
Medizinischen Fakultät
der
Julius-Maximilians-Universität Würzburg**

**vorgelegt von
Patrick Pascal Trautner
aus Forst (Baden)**

Würzburg, Juli 2021



**Referent: Priv.-Doz. Dr. med. dent. Nikolaos N.
Giannakopoulos, M. Sc.**

Korreferentin: Univ.-Prof. Dr. med. Claudia Sommer

Dekan: Professor Dr. med. Matthias Frosch

Tag der mündlichen Prüfung: 07.04.2022

Der Promovend ist Zahnarzt.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Theoretischer Hintergrund.....	3
2.1 Physiologie des Kauens.....	3
2.2 Sensorik.....	11
2.3 Periphere Rezeptorsysteme	12
2.4 Kaumuskulatur.....	16
2.5 Der Kauvorgang.....	25
2.6 Messbare Parameter beim Kauen	26
2.7 Wissenschaftliche Fragestellung	27
3 Methodik	29
3.1 Studiendesign	29
3.2 Studienteilnehmer	29
3.3 Zielparameter.....	30
3.4 Ablauf der Studie	30
3.5 Versuchsanordnung.....	32
3.6 Unerwünschte Wirkungen und Risiken	52
3.7 Abbruchkriterien der Studie	53
3.8 Rechtliche und ethische Aspekte.....	53
3.9 Datenanalyse.....	54
4 Ergebnisse	55
4.1 Charakteristika der Studienteilnehmer.....	55
4.2 EMG-Aktivität.....	55
4.3 Kaukraft	88
4.4 Unterkieferbewegung.....	89
4.5 Druck in Relation zur Muskelaktivität	90
5 Diskussion.....	92
5.1 Ko-Kontraktionsmuster	92

5.2	Vergleich Muskelaktivität Kauseite und Nicht-Kauseite	93
5.3	Vergleich Muskelaktivität in Abhängigkeit vom Geschlecht	96
5.4	Vergleich Muskelaktivität in Abhängigkeit vom Kauschlag.....	96
5.5	Vergleich Muskelaktivität Kauen von Karotte und Fruchtgummi	97
5.6	Vergleich Kaukraft in Relation zur Muskelaktivität	98
5.7	Limitationen der Studie	98
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	101
	Literaturverzeichnis	102
	Appendix	110

Abkürzungsverzeichnis

CN	Kranialer Nerv (Cranial nerve)
DI	Digastricus
EMG	Elektromyogramm
FE	Finite Elemente
M	Männlich
MA	Masseter
MRT	Magnetresonanztomogramm
MVC	Maximale volontäre Kontraktion
PL	Pterygoideus lateralis
PM	Pterygoideus medialis
RMS	Root Mean Square
TA	Temporalis anterior
TP	Temporalis posterior
USA	Vereinigte Staaten von Amerika
W	Weiblich
ZMG	Zentraler Muster Generator (Central Pattern Generator)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schemazeichnung der verschiedenen Variablen des CMS aus Turker, K. S. (2002).....	15
Abbildung 2: Typisches Mosaikmuster des Biceps brachii	19
Abbildung 3: Muskelzellen eines Fasertyps in Faszikel gruppiert.....	20
Abbildung 4: Schematische Darstellung des Probandenflusses.....	32
Abbildung 5: Axiales MRT ohne Sperrung. Beide axiale Sequenzen dienen der Lagebestimmung des M. pterygoideus lateralis links und rechts.	33
Abbildung 6: Axiales MRT mit Sperrung.....	33
Abbildung 7: Coronales MRT ohne Sperrung.....	34
Abbildung 8: Trägerschienen im Oberkiefer und Unterkiefer.....	36
Abbildung 9: Oberkiefermodell mit okklusaler Trägerschiene, Haltedornen und fixiertem Kaugut.....	37
Abbildung 10: Unterkiefermodell mit okklusaler Trägerschiene, Haltedornen und fixiertem Drucksensor zur Messung der beim Kauen generierten Kaukraft.	37
Abbildung 11: Feindrahtelektrode mit Applikationsstop.....	38
Abbildung 12: Kaugut verpackt in verklebtem Kofferdam.....	43
Abbildung 14: Detailaufnahme eines Probanden nach Applikation der EMG – Elektroden	44
Abbildung 15: aufgezeichnete kinematische Daten eines Probanden.....	46
Abbildung 16: Unterkiefermodell mit Trägerschiene und okklusal fixiertem „Pad“.	47
Abbildung 17: Druckmesser der Firma Althen	47
Abbildung 19: Kontrolle der Messung.....	49
Abbildung 20: Komplette Hauptmessung für einen Probanden in Acquire.	49
Abbildung 21: Rohdaten in MatLab	51
Abbildung 22: Ko-kontraktionsmuster der Kaumuskulatur.....	57
Abbildung 23: Durchschnittliche EMG Aktivität des M. digastricus, bevorzugte Kauseite vs nicht bevorzugte Seite.....	58
Abbildung 24: Durchschnittliche EMG Aktivität des Pterygoideus lateralis, bevorzugte Kauseite vs nicht bevorzugte Seite	59
Abbildung 25: Durchschnittliche EMG Aktivität des Temporalis posterior, bevorzugte Kauseite vs nicht bevorzugte Seite	60
Abbildung 26: Durchschnittliche EMG Aktivität des Temporalis anterior, bevorzugte Kauseite vs nicht bevorzugte Seite	61
Abbildung 27: Durchschnittliche EMG Aktivität des M. masseter, bevorzugte Kauseite vs nicht bevorzugte Seite.....	62
Abbildung 28: Durchschnittliche EMG Aktivität des Pterygoideus medialis, bevorzugte Kauseite vs nicht bevorzugte Seite	63
Abbildung 29: Durchschnittliche EMG Aktivität der Kieferöffner, weibliche vs männliche Probanden.....	64
Abbildung 30: Durchschnittliche EMG Aktivität der Kiefererschließer, weibliche vs männliche Probanden.....	64

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 31: Durchschnittliche EMG Aktivität des M. digastricus, erster Kauschlag vs letzter Kauschlag.....	65
Abbildung 32: Durchschnittliche EMG Aktivität des Pterygoideus lateralis, erster Kauschlag vs letzter Kauschlag.....	66
Abbildung 33: Durchschnittliche EMG Aktivität des Temporalis posterior, erster Kauschlag vs letzter Kauschlag.....	67
Abbildung 34: Durchschnittliche EMG Aktivität des Temporalis anterior, erster Kauschlag vs letzter Kauschlag.....	67
Abbildung 35: Durchschnittliche EMG Aktivität des M. masseter, erster Kauschlag vs letzter Kauschlag.....	68
Abbildung 36: Durchschnittliche EMG Aktivität des Pterygoideus medialis, erster Kauschlag vs letzter Kauschlag.....	69
Abbildung 37: Ko-kontraktionsmuster der Kaumuskulatur.....	70
Abbildung 38: Durchschnittliche EMG Aktivität des M. digastricus, bevorzugte Kauseite vs nicht bevorzugte Seite	71
Abbildung 39: Durchschnittliche EMG Aktivität des Pterygoideus lateralis, bevorzugte Kauseite vs nicht bevorzugte Seite	72
Abbildung 40: Durchschnittliche EMG Aktivität des Temporalis posterior, bevorzugte Kauseite vs nicht bevorzugte Seite	73
Abbildung 41: Durchschnittliche EMG Aktivität des Temporalis anterior, bevorzugte Kauseite vs nicht bevorzugte Seite	73
Abbildung 42: Durchschnittliche EMG Aktivität des M. masseter, bevorzugte Kauseite vs nicht bevorzugte Seite	74
Abbildung 43: Durchschnittliche EMG Aktivität des Pterygoideus medialis, bevorzugte Kauseite vs nicht bevorzugte Seite	75
Abbildung 44: Durchschnittliche EMG Aktivität der Kieferöffner, weibliche vs männliche Probanden	76
Abbildung 45: Durchschnittliche EMG Aktivität der Kierferschließer, weibliche vs männliche Probanden	77
Abbildung 46: Durchschnittliche EMG Aktivität des M. digastricus, erster Kauschlag vs letzter Kauschlag.....	78
Abbildung 47: Durchschnittliche EMG Aktivität des Pterygoideus lateralis, erster Kauschlag vs letzter Kauschlag.....	79
Abbildung 48: Durchschnittliche EMG Aktivität des Temporalis posterior, erster Kauschlag vs letzter Kauschlag.....	80
Abbildung 49: Durchschnittliche EMG Aktivität des Temporalis anterior, erster Kauschlag vs letzter Kauschlag.....	81
Abbildung 50: Durchschnittliche EMG Aktivität des M. masseter, erster Kauschlag vs letzter Kauschlag.....	82
Abbildung 51: Durchschnittliche EMG Aktivität des Pterygoideus medialis, erster Kauschlag vs letzter Kauschlag.....	83
Abbildung 52: Durchschnittliche EMG Aktivität des M. digastricus.....	84
Abbildung 53: Durchschnittliche EMG Aktivität des Pterygoideus lateralis.....	84
Abbildung 54: Durchschnittliche EMG Aktivität des Temporalis posterior	85
Abbildung 55: Durchschnittliche EMG Aktivität des Temporalis anterior	86
Abbildung 56: Durchschnittliche EMG Aktivität des M. masseter	87
Abbildung 57: Durchschnittliche EMG Aktivität des Pterygoideus medialis	88
Abbildung 58: Mittlere Kaukraft über 10 Kauschläge, Karotte vs Fruchtgummi	89

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 59: Kaukraft (Druck) in Relation zur Muskelaktivität	91
--	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Kaumuskeln.....	18
Tabelle 2: Studiencharakteristika	55
Tabelle 3: Durchschnittliche EMG-Aktivität der Kaumuskulatur.....	56
Tabelle 4: Durchschnittliche EMG-Aktivität der Kaumuskulatur.....	70
Tabelle 5: Mittlere Kaukraft über 10 Kauschläge, Karotte vs Fruchtgummi	88
Tabelle 6: Vertikale Bewegung während des Kauschlages	89

Einleitung

Bei der Herstellung von Zahnersatz spielt die okklusale Gestaltung der Restaurationen eine entscheidende Rolle. Durch die notwendige „Verlagerung“ der Herstellung nach extraoral ist man auf möglichst exakte technische Simulationen der Unterkieferbewegung angewiesen. Nur so kann interferenzfreier, aber dennoch kaueffizienter Zahnersatz hergestellt werden. Seit einigen Jahren werden prothetische Restaurationen in zunehmendem Maße computergestützt konstruiert und gefertigt. Dies bietet die Möglichkeit, individuelle patientenspezifische Funktionsparameter bei der Herstellung noch besser zu berücksichtigen, als dies bei händisch gefertigten Restaurationen möglich war. Dies setzt jedoch voraus, dass nicht nur kinematische, sondern auch kinetische Daten (Kinetik: Bewegungen und Verformungen unter dem Einfluss von Kräften und Spannungen) zur Verfügung stehen. Dies ist bisher nicht der Fall; lediglich kinematische Daten können bei der Herstellung von Zahnersatz berücksichtigt werden. Bewegungen der Zähne, die Deformation der Unterkieferspange bei Kieferbewegungen, die Nachgiebigkeit des Discus articularis der Kiefergelenke resp. aller beteiligten Gewebe unter dem Einfluss von Beiß- und Kaukräften können derzeit nicht erfasst werden, insbesondere nicht solche Kräfte, die während der Dynamik des Kauprozesses entwickelt werden. In diesem Zusammenhang spielt auch Bruxismus (Zähneknirschen und Kieferpressen) eine zentrale Rolle, da hier außergewöhnlich hohe exzentrische Kräfte auf die Restaurationen wirken können. Gerade bei vollkeramischem oder keramisch verblendetem Zahnersatz kann dies aufgrund der materialspezifischen Eigenschaften der Keramik äußerst problematisch sein. Eine exakte interferenzfreie Anfertigung der okklusionsnahen Verzahnung (Bereich, der eine vertikale Dimension von der maximalen Verzahnung bis zu einer Trennung der Zähne beim Öffnen von ca. 3 mm umfasst) der Restaurationen unter kinetischen Bedingungen ist hier besonders wichtig.

Einleitung

Daher sollen in der geplanten Studie die „fehlenden“ Informationen mit Hilfe funktioneller Daten, die bei gesunden Probanden erfasst wurden, ergänzt werden. Hierzu werden Beiß- und Kaukräfte, elektrische Muskelaktivitäten und Kieferbewegungen synchron registriert sowie MRT-Bilder angefertigt. Die gewonnenen Daten sollen dann ermöglichen, ein bereits bestehendes Finite-Element-Modell des Kausystems (Kiefergelenke, alle Kaumuskeln, Mandibula, Maxilla, Zähne und Parodontien) mit Hilfe der ermittelten funktionellen Informationen und individuellen anatomischen Geometrien so zu ergänzen, dass die Kinetik des Kauvorgangs und des Zähneknirschens realitätsnah simuliert werden kann. Schließlich sollen die unter kinetischen Bedingungen ermittelten Bewegungsbahnen (genauer, die für eine interferenzfreie Funktion notwendigen Bewegungsräume) dazu dienen, Algorithmen zu entwickeln, die eine computergestützte Fertigung von Zahnersatz okklusionsnah optimieren können. So kann eine störungsfreie Funktion des Zahnersatzes gewährleistet oder dessen Beschädigung während der Gebrauchsphase (z.B. Abplatzen der keramischen Verblendung) verhindert bzw. reduziert werden. Insbesondere auch vor der steigenden Anzahl endossaler dentaler Implantate erscheinen diese Daten sehr wichtig, weshalb auch der Einsatz von Implantaten simuliert werden soll. Denn bei Implantatversorgungen ist das Implantat sehr rigide mit dem Knochen verbunden und in der Funktion oder Parafunktion auftretende okklusale Kräfte können nicht, wie dies beim natürlichen Zahn gewährleistet wird, „gedämpft oder abgefedert“ werden.

Ziel der vorliegenden Studie ist es im Rahmen eines interdisziplinären DFG Projekts (Karlsruher Institut für Technologie und Universität Würzburg), das die oben beschriebenen fehlenden kinetischen Daten erarbeiten soll, ein bereits bestehendes Finite-Element-Modell des Kausystems mit klinisch-experimentellen Informationen zu versorgen, die es ermöglichen, valide FEM Simulationen zu generieren.

Theoretischer Hintergrund

1.1 Physiologie des Kauens

Kauen ist der erste Schritt in der Verdauung und soll die Nahrung für das Schlucken und die Weiterverarbeitung im Verdauungssystem vorbereiten (van der Bilt et al., 2006). Beim Kauen werden der Lebensmittelbolus oder die Lebensmittelpartikel zerkleinert, Speichel wird produziert, um die Nahrung zu befeuchten und um Aromen freizusetzen. Geschmack und Textur des Essens werden wahrgenommen und haben ihren Einfluss auf den Kauprozess. Das Wasser im Speichel befeuchtet die Nahrungspartikel, während die Speicheldrüsenmucine zerspannte Nahrung in einen kohärenten Bolus binden, der leicht verschluckt werden kann (Pedersen et al., 2002; van der Bilt et al., 2006). Es wird angenommen, dass die Einleitung des Schluckens, die unbewusst stattfindet, von der Partikelgröße der Lebensmittel und der Partikelschmierung abhängt (Hutchings und Lillford 1988; van der Bilt et al., 2006). Anstelle dieser Vorstellung wurde jedoch auch postuliert, dass das Schlucken eingeleitet wird, wenn man spürt, dass eine bestimmte Ladung von Lebensmittelpartikeln unter viskosen Kräften miteinander verbunden ist, welche einen Bolus zu bilden (Prinz und Lucas 1997; van der Bilt et al., 2006). Es gibt mehrere Faktoren, die das Kauergebnis bestimmen. Die Zähne sind wichtiges Element im Kausystem. Sie bilden den okklusalen Bereich, in dem die Lebensmittelpartikel fragmentiert werden. Diese Fragmentierung hängt von der gesamten okklusalen Fläche und damit von der Anzahl der Zähne ab. Ein weiterer wichtiger Faktor bei der Mastikation ist die Beißkraft. Die Beißkraft hängt vom Muskelvolumen, der Kiefermuskulaturaktivität und der Koordination zwischen den verschiedenen Kaumuskeln ab. Ebenso spielt die Bewegung des Kiefers und damit die neuromuskuläre Kontrolle des Kauens eine wichtige Rolle bei der Fragmentierung der Nahrung. Ein weiterer Aspekt des Kauens ist, wie gut die Zunge und die Wangen die Lebensmittelpartikel zwischen den Zähnen platzieren. Schließlich ist die Produktion von ausreichend Speichel für gutes Kauen unerlässlich. Während Speichel und Nahrung nachweislich den Kauprozess beeinflussen, wurde die Beziehung

zwischen Speichelmenge und Kauen nicht ausgiebig untersucht (van der Bilt et al., 2006). Geschmack und Textur des Essens werden wahrgenommen und haben einen Einfluss auf den Kauprozess. Experimente haben gezeigt, dass je besser die Nahrung schmeckte, die Zeit bis zum Schlucken kürzer und die Kauaktivität geringer war (Bellisle et al., 2000; van der Bilt et al., 2006). Die Auswirkungen der sensorischen Faktoren waren am deutlichsten zu Beginn der Mahlzeiten und verringerten sich zum Ende der Mahlzeiten (Bellisle et al., 1984; van der Bilt et al., 2006).

1.1.1 Einfluss der oralen Physiologie auf das Kauen

Alle aufgenommenen festen Lebensmittel, unabhängig von Größe und Ausgangstextur, werden vom Menschen stereotyp verarbeitet (German et al., 2004; Hiimae 2004; van der Bilt et al., 2006). Nach der Einnahme wird das Lebensmittel von der Vorderseite des Mundes zu den okklusalen Oberflächen der Zähne transportiert (Stufe I Transport). Dann wird das Essen durch eine Reihe von Kauzyklen verarbeitet, die nötig sind, um die Nahrung zu zerkleinern und zu erweichen (Lebensmittelverarbeitungsstadium). Die Anzahl der Kauzyklen nimmt zu, je schwieriger es ist, Lebensmittel zu zerspanen. Bevor die Lebensmittel verschluckt werden, werden sie in den Oropharynx transportiert (Transport der Stufe II). Die Nahrung sammelt sich im Oropharynx an, bis sie schließlich verschluckt wird. Eigenschaften des oralen Systems, wie Beißkraft, Kauleistung und Speichelflussrate beeinflussen den Kauprozess, durch Größenreduzierung von Lebensmittelpartikeln, Speichelfluss und Mischen von Lebensmittelpartikeln in einen Lebensmittelbolus, der verschluckt werden kann. Die Anzahl der Kauzyklen, die zur Zubereitung von Nahrung bis zum Schlucken benötigt werden (Stufe I Transport bis zum Schlucken), hier als Schluckschwelle oder Schluckmoment definiert, ist probandenspezifisch für eine Art von Nahrung weitgehend konstant, während große Schwankungen in der Anzahl der Kauzyklen bis zum Schlucken zwischen verschiedenen Probanden beobachtet wurden (Lucas und Luke 1986; Fontijn-Tekamp et al., 2004; van der Bilt et al., 2006). Probanden, die eine kleine Anzahl von Kauzyklen für eine Art von Lebensmit-

Theoretischer Hintergrund

teln benötigen, nutzen auch weniger Kauzyklen für alle anderen Arten von Lebensmitteln. Dies impliziert, dass es „langsame“ und „schnelle“ Schlucker gibt. Dies ist zum Teil das Ergebnis der Physiologie des Individuums, aber möglicherweise auch des sozialen Kontextes. Die Kauleistung kann durch Quantifizierung des Fragmentierungsgrades eines künstlichen Testnahrungsmittels nach einer festen Anzahl von Kauzyklen bestimmt werden (van der Bilt et al., 1993; van der Bilt et al., 2006). Große Unterschiede in der mittleren Partikelgröße nach 15 Kauzyklen auf 5,6 mm Optosil-Würfeln wurden bei gesunden Probanden im Bereich von 1,60 bis 5,27 mm festgestellt (Fontijn-Tekamp et al., 2004). Der Moment des Schluckens war nur schwach mit der Kauleistung korreliert (Fontijn-Tekamp et al., 2004; Engelen et al., 2005; van der Bilt et al., 2006).

Damit schluckt ein Proband mit einer hohen Kauleistung nicht unbedingt Nahrung nach einer geringeren Anzahl von Kauschlägen als ein Proband mit einer weniger hohen Kauleistung. Probanden mit einer hohen Kauleistung schlucken im Durchschnitt feinere Lebensmittelpartikel (mittlere Partikelgröße von etwa 1 mm) als Probanden mit einer geringeren Leistung (mittlere Partikelgröße von etwa 3 mm) (Fontijn-Tekamp et al., 2004; van der Bilt et al., 2006). Dadurch kann es zu einer unterschiedlichen Wahrnehmung der Nahrung kommen, wobei Probanden mit einer hohen Kauleistung im Durchschnitt Lebensmittel auf eine andere Weise wahrnehmen als Probanden mit einer weniger hohen Kauleistung. Die mechanisch stimulierte Speichelflussrate in einer Gruppe von 266 gesunden Probanden variierte zwischen 0,16 und 3,8 ml/min, wobei der Moment des Schluckens nur schwach mit der Speichelflussrate (Engelen et al., 2005; van der Bilt et al., 2006) korreliert war. Dies bedeutet, dass ein Subjekt mit einer relativ hohen Speichelflussrate nicht unbedingt Nahrung nach weniger Kauzyklen schluckt als ein Subjekt mit weniger Speichel (van der Bilt et al., 2006).

Die Auswirkungen der Zugabe von Flüssigkeit (Wasser, Lösung von Amylase oder künstlichem Speichel, die Mucine enthalten) zu einem festen Lebensmittel erleichtert eindeutig das Kauen von trockenen Lebensmitteln, wie Toast und Kuchen. Bei Karotten (90% Wasser) und Käse (35% Wasser und 31% Fett) wurden jedoch keine signifikanten Einflüsse auf die orale Physiologie und die Wahrnehmung des zusätzlichen Wassers beobachtet (Pereira et al., 2006).

1.1.2 Einfluss von Lebensmitteleigenschaften auf das Kauen

Eigenschaften der Nahrung, wie z.B. Wasser- und Fettanteil sowie die Härte der Nahrung beeinflussen bekanntermaßen den Kauprozess (Peyron et al., 2002; van der Bilt et al., 2006). Die Nahrungshärte wird beim Kauen wahrgenommen und wirkt sich auf die Kaukraft (Kohyama et al., 2004; van der Bilt et al., 2006), die Kiefermuskelaktivität (Horio und Kawamura 1989; Peyron et al., 2002; van der Bilt et al., 2006) und die mandibulären Kieferbewegungen aus (Pröschel und Hofmann 1988; Peyron et al., 1997; van der Bilt et al., 2006). Die Kaukraft beim Kauen von Proben von Siliziumkautschuk erhöhte sich von 100 auf 150 N, wenn die Härte der Proben um den Faktor 2 erhöht wurde (Fontijn-Tekamp et al., 2004; Kohyama et al., 2004; van der Bilt et al., 2006). Lebensmitteleigenschaften haben auch einen großen Einfluss auf die Anzahl der Kauzyklen, die benötigt werden, um das Nahrungsmittel zum Schlucken vorzubereiten (Fontijn-Tekamp et al., 2004; Engelen et al., 2005; Gaviao et al., 2004; van der Bilt et al., 2006). Zum Beispiel variierte die Anzahl der Kauzyklen von durchschnittlich 17 Zyklen für eine Portion Kuchen bis zu 63 Zyklen für die gleiche Portionsgröße Karotten (Engelen et al., 2005; van der Bilt et al., 2006). Auch das Volumen der Nahrung beeinflusst weitgehend die orale Physiologie. Für größere Portionsgrößen werden mehr Zeit und Kauschläge benötigt, bevor das Essen geschluckt werden kann (Fontijn-Tekamp et al., 2004; Lucas und Luke 1984; van der Bilt et al., 2006). Die Anzahl der Kauschläge, die benötigt werden, um das Essen zum Schlucken vorzubereiten, erhöht sich in Abhängigkeit vom Nahrungsvolumen (Fontijn-Tekamp et al., 2004; van der Bilt et al., 2006). Trockene und harte Produkte erforderten mehr Kauzyklen vor dem Schlucken. Offensichtlich ist mehr Zeit erforderlich, um das Essen aufzubrechen und genügend Speichel hinzuzufügen, um einen kohäsiven Bolus zu bilden, der zum Schlucken geeignet ist (Anderson et al., 1985; van der Bilt et al., 2006). So braucht ein trockenes Produkt eine längere Zeit im Mund, um genügend Speichelsekretion zu ermöglichen. Dies wurde durch Hinzufügen von Butter zu trockenen Lebensmitteln (Kuchen, Toast) deutlich, wobei sich die Anzahl

der Kauzyklen dieser Lebensmittel reduziert (Engelen et al., 2005; van der Bilt et al., 2006). Der Grund dafür ist wahrscheinlich, dass Butter die Schmierung und Bolusbildung von trockenen Produkten verbessert, wodurch die Zeit, die im Mund benötigt wird, um einen kohärenten Bolus zu bilden, verringert wird. Ähnliche Ergebnisse wurden in einer Studie beobachtet, in der die Schmierung des Lebensmittelbolus experimentell variiert worden war (Prinz und Lucas 1995; van der Bilt et al., 2006).

1.1.3 Neuromuskuläre Kontrolle des Kauens

Die Bewegung des Kiefers und damit die neuromuskuläre Kontrolle des Kauens spielt ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Zerkleinerung der Nahrung. Kauen erfordert Muskelaktivität, um die Bewegungen des Unterkiefers zu ermöglichen und die Kräfte zu generieren, die ein Zerspannen der Nahrung benötigt. Ein relativ geringes Maß an Muskelaktivität wird im Oberflächen-Elektromyogramm (EMG) der Kieferschließmuskeln beobachtet, die Pseudokaubewegungen ohne Nahrung durchführen. Mehr Muskelaktivität entsteht, wenn der Schließbewegung durch Nahrungsresistenz entgegengewirkt wird (Thexton 1992, van der Glas et al., 1987; van der Bilt et al., 2006). Anscheinend ist ein kleiner Teil der Muskelaktivität, die beim Kauen beobachtet wird, nur für die grundlegenden rhythmischen Bewegungen des Kiefers erforderlich, und zusätzliche Muskelaktivität ist erforderlich, um den Widerstand der Nahrung zu überwinden. Die Gesamtmenge der EMG-Aktivität hängt nachweislich von der Textur des Lebensmittels ab. Bei härteren Lebensmitteln wird mehr EMG-Aktivität beobachtet (Agrawal et al., 1998; Mioche et al., 1999; Peyron et al., 2002; van der Bilt et al., 2006).

1.1.4 Zentraler Muster Generator (ZMG)

Der Hirnstamm ist ein wesentlicher Teil des zentralen Nervensystems, der für die Mastikation notwendig ist (Lund 1991; van der Bilt et al., 2006). Die grund-

legende rhythmische Aktivität der kieferöffnenden und kieferschließenden Muskeln wird wahrscheinlich durch einen ZMG (engl.: Central Pattern Generator) im Hirnstamm gebildet (Thexton 1992; van der Bilt et al., 2006).

Dellow und Lund zeigten, dass der ZMG abwechselnd Aktivitäten in kieferöffnenden und kieferschließenden Motoneuronen als Reaktion auf die sich wiederholende elektrische Stimulation des Tractus corticobulbaris eines gelähmten Kaninchens erzeugen kann (Dellow und Lund 1971, Lund und Kolta 2006). Rhythmische Aktivitäten traten auch in hypoglossalen Motoneuronen auf. Der ZMG konnte auch dann eine rhythmische Aktivität erzeugen, wenn die Stimulationsfrequenz zufällig variierte (Lund und Kolta 2006). Die Frequenz der Mastikation hing jedoch von der durchschnittlichen Stimulusfrequenz und -spannung ab. Nozaki et al. konnten zeigen, dass, wenn die beiden Seiten der kaudalen Pons und Medulla getrennt sind, jede Seite des Hirnstamms in der Lage ist, ein einseitiges Muster zu erzeugen (Nozaki et al. 1986, Lund und Kolta 2006). Viele Interneuronen haben Axone, die die Mittellinie überqueren, und diese sind wahrscheinlich für die Koordination zwischen den beiden Hälften des ZMG verantwortlich (Landgren et al. 1986, Donga und Lund 1991; Lund und Kolta 2006).

1.1.5 Peripheres Feedback

Der Vergleich der Bewegungen und Aktivitätsmuster in den motorischen Nerven, die durch die kortikale Stimulation eines gelähmten Tieres hervorgerufen werden mit denen des natürlichen Kauens vor der Lähmung, hat die wichtige Rolle der sensorischen Rückkopplung bei der Mastikation gezeigt (Lund 1991; van der Bilt et al., 2006). Während der kortikalen Stimulation erzeugt der ZMG stereotypisierte Auf-und-Zu-Zyklen, während beim natürlichen Kauen die Bewegungsbahnen der aufeinander folgenden Kauzyklen erheblich variieren (Lund 1991; van der Bilt et al., 2006). Darüber hinaus ist die Aktivität der α -Motoneuronen in Kiefernähe bei der fiktiven Mastikation viel kleiner als beim natürlichen Kauen. Dies legt nahe, dass das zentrale Nervensystem Informationen über die Position und Geschwindigkeit des Unterkiefers, über die auf den Unterkiefer und auf die Zähne wirkenden Kräfte sowie über die Länge und Kon-

traktionsgeschwindigkeit der beteiligten Muskeln benötigt, um die motorischen Aufgaben des Unterkiefers beim Kauen angemessen zu erfüllen (van der Bilt et al., 2006). Eine Zunahme der Amplitude und der Dauer der Aktivität der Kiefferverschlussmuskulatur des Kaninchens wurde beobachtet, wenn kortikal induzierte rhythmische Öffnungs-und-Schließbewegungen durch eine Stahlkugel oder einen Schaumstreifen zwischen antagonistischen Zähnen behindert wurden (Marimoto et al., 1989, Lavigne et al., 1987; van der Bilt et al., 2006). Dieser Effekt wurde nach Eliminierung des Feedbacks aus den parodontalen Pressorezeptoren durch Ausschaltexperiment reduziert. Dies bedeutet, dass parodontale Pressorezeptoren und Muskelspindeln positive Rückmeldungen an die Kieferschließmuskeln während der Mastikation aussenden (Marimoto et al., 1989; Lavigne et al., 1987; van der Bilt et al., 2006).

1.1.6 Symmetrie im Craniomandibulären System

Der Mensch strebt stets nach Symmetrie. Wir umgeben uns im alltäglichen Leben häufig mit symmetrischen Formen und Proportionen. Betrachtet man allerdings die Realität auf anatomischer Ebene und sucht nach symmetrischen Proportionen, wird man schnell feststellen, dass eine absolute Symmetrie in der Realität niemals erreicht wird. Auch in der Anatomie des CMS und vor allem der Muskulatur, lässt sich diese Symmetrie vergeblich suchen. In einer Studie von Close et al. wurde die Muskelquerschnittsfläche des rechten mit der des linken M. masseter verglichen. Für den M. masseter als wichtigen Vertreter der Kau- muskulatur lassen sich geschlechtsspezifische Unterschiede feststellen. Dabei ergaben sich bei der Muskelquerschnittsfläche für Männer eine Seitabweichung von $12\pm 8\%$ und für Frauen von $22\pm 11\%$ (Close et al., 1995). Nicht nur für die Muskulatur, sondern auch für die Okklusion lassen sich im Seitenvergleich Abweichungen nachweisen. Koriath konnte für die Anzahl der Okklusionskontakte zeigen, dass ein signifikanter rechts-links Unterschied besteht (Koriath, 1990). Doch nicht nur auf anatomischer Ebene lassen sich Asymmetrien finden. Betrachtet man komplexere Vorgänge wie das Kauen, Beißen und Schlucken genauer, zeigen sich auch hier überwiegend Ergebnisse, die von symmetrischen

Modellen abweichen. Auf der Grundlage von Messdaten der EMG - Aktivität des M. masseter, M. temporalis, und M. sternocleidomastoideus während maximalen Beißens versuchten Ferrario et al. Symmetrien in den Muskelaktivitäten zu berechnen. Bei ihren Probanden konnten sie Symmetrieverhalten der Muskelaktivitäten von nur 80,7 – 87,9 % feststellen. Das Symmetrieverhalten wurde mittels dem „Percentage Overlapping Coefficient (POC)“ bestimmt. Dieser POC lässt sich ermitteln, indem die EMG Daten eines Muskels mit denen der kontralateralen Seite ins Verhältnis gesetzt werden. Der POC kann dabei die für ein Verhältnis typischen Werte von 0-100% annehmen. Ein Wert von 100% würde dabei auf eine absolute Symmetrie hindeuten (Ferrario et al., 2006). Weitere Aussagen zum Symmetrieverhalten der Muskelaktivitäten lassen sich durch die Studie von Naeije et al. treffen. Bei 21 männlichen Probanden untersuchten sie jeweils die Muskelaktivitäten auf unterschiedlichen Aktivierungsniveaus. Sie erhoben Werte für 10%, 20%, 30%, 40% und 50% der maximalen voluntären Kontraktion (MVC). Die Asymmetrie für hohe Aktivierungsniveaus ist ausgeprägter als für geringere. Speziell der M. masseter zeigte für jedes der gemessenen Aktivierungsniveaus eine stärker ausgeprägte Asymmetrie der Aktivierungsmuster als der M. temporalis. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass der Muskelquerschnitt des M. masseter auf der Seite mit der höheren Muskelaktivität größer war als auf der kontralateralen Seite. Darüber hinaus zeigte die Seite mit der höher ausgeprägten Muskelaktivität auch mehr okklusale Kontakte (Naeije et al., 1989). Weitere Untersuchungen von Ferrario et al. bestätigen diese Erkenntnisse. Sie haben sowohl männliche als auch weibliche Probanden untersucht und konnten zusätzlich auch eine geschlechterspezifische Auffälligkeit verzeichnen. In physiologischer Ruheschwebelage des Unterkiefers und bei leichtem Zahnkontakt beim Schlucken dominierte bei Männern und Frauen der M. temporalis. Beim maximalen Zusammenbeißen dominierte bei Frauen weiter der M. temporalis, bei Männern jedoch der M. masseter (Ferrario et al., 1993). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass man für statische Aufgaben deutliche Asymmetrien beobachten kann. Wie sich dies für funktionelle Aufgaben wie das Kauen genau darstellt, konnte bis heute noch nicht geklärt werden. Die Daten der vorliegenden Studie könnten hier neue Erkenntnisse generieren. Womög-

lich zeigen sich auch geschlechtsspezifische Unterschiede der Aktivierungsmuster beim Kauen.

1.2 Sensorik

1.2.1 Rolle der Okklusion beim Kauen

Wird die natürliche Okklusion in ihrer Dynamik durch veränderte okklusale Kontakte gestört, führt dies zu einer Veränderung in der Muskelaktivität. Diese Modulation macht sich durch veränderte Aktivierungsmuster im elektromyographischen Signal der Kaumusculatur bemerkbar (Nishigawa et al., 1997). Es lässt sich jedoch beobachten, dass das neuromuskuläre System in der Lage ist, solche okklusalen Veränderungen schnell zu adaptieren und die Bewegung des Unterkiefers entsprechend anzupassen. In einem Versuch konnten Giannakopoulos et al. zeigen, dass das okklusale Relief Einfluss auf die Kauleistung hat. Sie simulierten hierfür zum einen Kauen mit einem strukturierten okklusalen Relief und zum anderen Kauen mit einem flachen okklusalen Relief mit Hilfe okklusaler Schienen. Dabei verglichen sie die dabei jeweils erbrachte Kauleistung mittels Partikelgrößenmessung einer Testnahrung nach 15 Kauschlägen. Die Kauleistung war in Bezug auf die Partikelgröße mit dem strukturierten okklusalen Relief größer als mit einer flachen okklusalen Gestaltung der Schiene. Die absolute Muskularbeit zeigte jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Testbedingungen (Giannakopoulos et al., 2014).

1.2.2 Auswirkung von okklusalen Störkontakten auf das Kauen

Der erfolgreiche Ablauf eines Kauschlages erfordert das Vorhandensein gewisser Freiräume auf den Grenzbahnen. Für isolierte okklusale Störkontakte konnte im Hinblick auf die Muskelaktivität jedoch keine Veränderung nachgewiesen werden (De Boever, 1969). Solche Interferenzen der dynamischen Okklusion wirken sich jedoch negativ auf die Kaufunktion aus. Es konnte nachgewiesen werden, dass Interferenzen auf der Balanceseite einen negativen Einfluss auf

die Nahrungszerkleinerung haben (Eberhard et al., 2014). Bereits in einer früheren Arbeit von Karlsson et al. konnte gezeigt werden, dass sich solche Balanceinterferenzen auf die Bewegungsgeschwindigkeit und/oder die Öffnungsamplitude des Unterkiefers auswirken. Es wurde dabei ebenfalls beobachtet, dass diese Veränderungen bereits nach einer Woche vom neuromuskulären System adaptiert wurden. (Karlsson et al., 1992). Das neuromuskuläre System scheint unter physiologischen Bedingungen ein gewisses Maß an Adaptationsfähigkeit für okklusale Veränderungen zu besitzen.

1.2.3 Sensomotorische Kontrolle

Das Zusammenspiel aller menschlichen Kaumuskeln kann hohe Kräfte generieren. Es finden sich in der Literatur Durchschnittswerte für bilaterales Beißen von 569 N (van der Bilt et al., 2008). Diese Kräfte erfassen sämtliche Strukturen des stomatognathen Systems, so dass es Mechanismen geben muss, die diese enormen Kräfte verlässlich kontrollieren können. Würden solche Kontrollmechanismen gänzlich fehlen, könnte es zu einer Schädigung der Strukturen des CMS kommen. Sensorsysteme registrieren folglich die auf Teilbereiche wirkende Kraft und leiten diese Informationen weiter an übergeordnete Kontrollzentren. Der generierte Rhythmus der Mastikation wäre ohne sensorisches Feedback ineffektiv und gegebenenfalls sogar gefährlich für den Organismus (Lund, 1991). Eine Anpassung des Kauvorgangs erfordert eine zuvor erfolgte Verarbeitung und Integration der verfügbaren Informationen der beteiligten Sensorsysteme. Dadurch ist eine individuelle Modulation der Kaumuster gegeben (Lund et al., 1998).

1.3 Periphere Rezeptorsysteme

In der gesamten Gesichtshaut und der Mukosa sind Mechanorezeptoren zu finden. Diese Rezeptoren sind größtenteils langsam adaptierend mit kleinen, gut definierten Rezeptorfeldern (Johansson et al., 1988). Hervorzuheben ist

Theoretischer Hintergrund

besonders die Häufung der afferenten Einheiten in der perioralen Region. Dies in Kombination mit kleinen Rezeptorfeldern, machen diesen kutanen Bereich zu einer der am besten innervierten kutanen Region des menschlichen Körpers (Johansson und Olsson, 1976).

Das Parodontium bildet einen zentralen Bestandteil des CMS und liefert den zentralen Kontrollzentren mit seinen vielen Rezeptoren wichtige Informationen über Richtung und Größe der einwirkenden Kräfte. Somit spielt das Parodontium eine bedeutende Rolle für orale Reflexe und die Mastikation (Hugger et al., 2006). Kommt es zu einer Schädigung des Zahnhalteapparates z.B. durch eine Parodontitis, wird hierdurch die Regulation der Kaukraft beeinflusst. Die Zahnbeweglichkeit nimmt zu und Mechanorezeptoren gehen verloren. Es zeigt sich, dass die generierten Kräfte größer und variabler sind als bei parodontal Gesunden. Hierfür könnte ein reduziertes positives Feedback der Mechanorezeptoren verantwortlich sein (Johansson et al., 2006).

Über die Afferenzen des Kiefergelenks ist wenig bekannt. Ihr Einfluss auf das Reflexverhalten der Kaumuskulatur ist noch weitgehend ungeklärt. Es lassen sich zahlreiche Rezeptoren in der Gelenkkapsel nachweisen. Freie Nervenendigungen, Ruffini-Körperchen, Golgi-Sehnenorgane und Vater-Pacini-Körperchen sind Bestandteil der sensorischen Ausstattung der Gelenkkapsel (Zimny, 1988).

In der Muskulatur befindet sich eine weitere wichtige Gruppe von Rezeptoren, die an der Steuerung des Kauvorgangs beteiligt ist. Die Afferenzen werden durch Propriozeptoren gebildet, die z.B. die Muskellänge messen. Es wird angenommen, dass die Muskelspindeln einen wichtigen Anteil an der Propriozeption von Kieferbewegungen haben (Eriksson et al., 1994). Es lässt sich eine anatomische Nähe zu den Afferenzen der Parodontalrezeptoren im Ncl. mesencephalicus n. trigemini. feststellen. Dieser räumliche Kontakt und die Tatsache, dass beide sensorischen Systeme in den gleichen Bereich der Kleinhirnrinde projizieren, könnte Hinweis auf eine funktionelle Verbindung sein (Baker und Llinas, 1971; Weinberg, 1928).

Schaltet man die Mechanorezeptoren des Parodontiums aus, dann nimmt die Aktivität des M. masseter ab. Gleiches gilt für das Ausschalten der Muskelspin-

deln (Morimoto et al., 1989). Schindler et al. bestätigten diese Ergebnisse und untersuchten darüber hinaus noch die Auswirkung einer Ausschaltung der Rezeptoren der Kiefergelenke auf die Kaukraft und -bewegung. Innerhalb des neuromuskulären Systems scheint dieses Feedback aus dem Kiefergelenk jedoch eine untergeordnete Rolle zu spielen (Schindler et al., 1998; Türker, 2002).

1.3.1 Rolle der peripheren Rezeptoren für die Steuerung des Kauvorgangs

Damit die Steuerung der Bewegungen des Unterkiefers beim Kauvorgang zielorientiert funktionieren kann, müssen die vielen verschiedenen Variablen ununterbrochen einbezogen werden. Man muss sich auch die Frage stellen, welche Gewichtung den einzelnen Variablen dabei zukommt und ob es womöglich Variablen mit dominantem Einfluss gibt. Eine Übersicht von Türker veranschaulicht die verschiedenen Variablen und skizziert deren gegenseitigen Einfluss auf die Steuerung des Systems (siehe Abbildung 1) (Türker, 2002).

Theoretischer Hintergrund

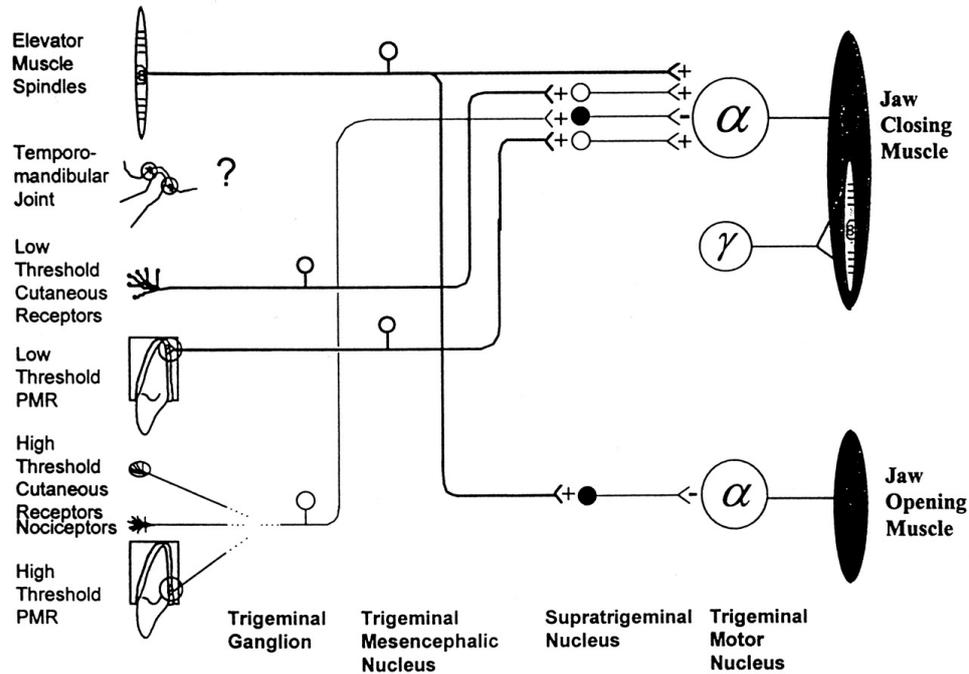


Abbildung 1: Schemazeichnung der verschiedenen Variablen des CMS aus Türker, K. S. (2002). Reflex control of human jaw muscles. *Crit Rev Oral Biol Med*, 13(1), 85-104. Figure 4.

Man findet verschiedene Hypothesen, die unterschiedliche Erklärungsmodelle für diese Fragestellung liefern. Ein vielversprechender Lösungsansatz lässt sich bei Flanagan et al. finden. Ihre „Equilibrium Point“ Hypothese besagt, dass jede Bewegung des Unterkiefers durch eine Verschiebung des motorischen Systems aus dem Equilibrium State erfolgt. Unter dem Equilibrium State versteht man das stetige dynamische Zusammenspiel von zentralen Befehlen, spinalen Reflexmechanismen, Muskeleigenschaften und äußeren Einflüssen. Die Reizschwellen der Motoneurone werden dabei durch zentrale Befehle gesteuert und üben so eine starke Kontrolle über den genauen Vorgang jeder Bewegung aus. Es kommt dabei also zu einer übergeordneten Steuerung des Rekrutierungsverhaltens und somit wird das gesamte System zur gewünschten Bewegung veranlasst (Feldman, 1986; Flanagan et al., 1990).

In einer Untersuchung von Hannam et al. konnte gezeigt werden, dass kurz bevor die maximale Interkuspitation erreicht wird, die neuromuskulären Kontrollmechanismen besonders starken Einfluss auf die Steuerung der Bewegung

ausüben (Hannam et al., 1977). Hellmann et al. fanden heraus, je näher sich die Zahnreihen interokklusal annähern, desto präziser erfolgt die Steuerung der Unterkieferbewegung (Hellmann et al., 2014). Sie untersuchten hierfür kinematische Daten physiologischer Kieferschließbewegungen bei 35 Probanden. Die erhobenen Daten wurden mit Hilfe eines mathematischen Modells, der Uncontrolled Manifold (UCM) Hypothese, ausgewertet. Dabei werden die verschiedenen Parameter der Messung unterteilt in Steuer- und Zielvariablen der Bewegungen (Scholz und Schöner, 1999). Die Ergebnisse deuten an, dass das interferenzfreie Einsteuern in die Okklusion die eigentliche Zielgröße der Bewegung darstellt. Es macht den Anschein, als würde sich dieser Zielgröße „Okklusion“ sowohl Muskelaktivität, als auch räumliche Ausrichtung in den Kiefergelenken unterordnen.

Schindler und Stengel konnten nachweisen, dass die Kinematik, Kaukraft und EMG - Aktivität der Kaumuskulatur beim Kauen von Testnahrung weitestgehend konstant blieb, obwohl die Propriozeption aus Zähnen und Kiefergelenken fehlte. Sie untersuchten dazu Probanden, bei denen sie sowohl die Kiefergelenke als auch die Zähne der Kauseite anästhesiert haben (Schindler et al., 1998).

Pathologische Veränderungen im Kiefergelenk können durch die Einbindung der sensomotorischen Afferenzen im Hirnstamm jedoch zu einer Beeinträchtigung der muskulären Koordination führen (Yin et al., 2007).

Generell lässt sich festhalten, dass sowohl die Nozizeption als auch die Mechanosensoren der am Kauen beteiligten Gewebearten die motorischen Kontrollmechanismen mit Informationen speisen, um eine Überlastung und Schädigung des Systems zu verhindern.

1.4 Kaumuskulatur

Die Kaumuskulatur fungiert als „Motor“ der Bewegung des Unterkiefers in Relation zum Oberkiefer. Sie ermöglicht die funktionellen Bewegungen des Unterkiefers beim Sprechen und Kauen. Die exakten Bewegungsabläufe sind hoch-

Theoretischer Hintergrund

komplex, da ihnen eine Vielzahl an möglichen inter- und intramuskulären Kontraktionsmustern zu Grunde liegen. Exaktes Wissen des Aufbaus und der Funktionsweise dieser Muskulatur bildet jedoch eine entscheidende Grundlage, um das stomatognathe System in seiner Funktion grundlegend erfassen und beschreiben zu können. Die Kaumuskulatur umfasst 7 paarig angelegte Einzelmuskeln, die in der folgenden Übersicht nach Türp und Schindler (Türp und Schindler, 2005) aufgelistet sind.

Muskeln	Hauptfunktion	Hinweis
M. masseter	<ul style="list-style-type: none"> • Kieferschluss/Kieferpressen • Protrusion 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei einseitiger Kontraktion Seitschub zur ipsilateralen Seite
M. temporalis	<ul style="list-style-type: none"> • Kieferschluss/Kieferpressen • Unterkiefer-Rückschub 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei einseitiger Kontraktion Seitschub zur ipsilateralen Seite
M. pterygoideus medialis	<ul style="list-style-type: none"> • Kieferschluss/Kieferpressen • Protrusion 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei einseitiger Kontraktion Seitschub zur kontralateralen Seite
M. pterygoideus lateralis	<ul style="list-style-type: none"> • Kieferöffnung (pars inferior) • Unterkiefernervorschub (pars inferior) • Stabilisierung bei Unterkiefernervorschub (pars superior) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei einseitiger Kontraktion Seitschub zur kontralateralen Seite • Pars superior und Pars inferior sind funktionelle Antagonisten

Theoretischer Hintergrund

	<ul style="list-style-type: none">• Kieferpressen (pars superior)	
M. digastricus (venter anterior)	<ul style="list-style-type: none">• Kieferöffnung• Retrusion	
M. mylo-hyoideus	<ul style="list-style-type: none">• Kieferöffnung	
M. genio-hyoideus	<ul style="list-style-type: none">• Kieferöffnung	

Tabelle 1: Übersicht der Kaumuskeln (Türp und Schindler, 2005)

In der Tabelle ist ersichtlich, dass sich die Kaumuskulatur entsprechend ihrer Aufgaben in Kieferschließer und Kieferöffner unterteilen lässt. Dabei ist wichtig zu wissen, dass Kieferschließer nicht ausschließlich einen Kieferschluss mit vertikaler Kraftkomponente bewerkstelligen. Die Kaumuskulatur setzt sich aus Faszikeln und Muskelfaserbündeln zusammen, die funktionelle Einheiten innerhalb des Muskels ausbilden. Man könnte dabei quasi von „Müskelchen im Muskel“ sprechen, welche unterschiedliche kinetische Vektoren (Kraftvektoren) generieren. Baron und Debussy postulierten etwa 12 Faszikel pro Seite in ihren Untersuchungen von 4 Kaumuskeln (Baron und Debussy, 1979). Die knöchernen Unterkieferspange wird komplex im Raum stabilisiert und geführt. Durch das Zusammenspiel der in der Tabelle aufgeführten, bilateral verorteten Muskelpaare, wird der Unterkiefer in seiner Kinematik geführt. Dem Kiefergelenk und den Ligamenten scheint dabei eine fürs Kauen eher passive sowie untergeordnete Rolle zuzukommen (Schindler et al., 1998).

1.4.1 Unterschied zwischen Kau- und Skelettmuskulatur

Kaumuskulatur und Skelettmuskulatur unterscheiden sich im Wesentlichen in folgenden Eigenschaften:

Die Extremitätenmuskulatur wird von den Spinalnerven innerviert, da sie entwicklungsgeschichtlich aus den Somiten hervorgeht. Die Kaumuskulatur ent-

Theoretischer Hintergrund

stammt myogenen Zellen des prächordalen Mesoderms (Yu et al., 2002). Mit circa 10-100 μm sind die einzelnen Fasern der Skelettmuskulatur dicker als die Muskelfasern der Kaumuskulatur (Keynes et al., 2001). Gruppierungen von motorischen Einheiten findet man in der Skelettmuskulatur seltener und werden dann, im Gegensatz zu der Kaumuskulatur, eher als pathophysiologischer Befund angesehen. In der Skelettmuskulatur verteilen sich die zugehörigen innervierten Muskelfasern einer motorischen Einheit meist über weite Muskelquerschnitte (Stuart et al., 1988). Die motorischen Einheiten bilden zusammen ein sog. „Mosaikmuster“ (siehe Abbildung 2), das durch spezielle Färbetechniken in histologischen Präparaten sichtbar wird (Stålberg et al., 1986).

In den Muskeln der Extremitäten ist die Geschwindigkeit der Kontraktion höher als die Kontraktionsgeschwindigkeit der Kaumuskulatur (Morris et al., 2001). Heterogene Aktivierungsmuster lassen sich sowohl in den Kaumuskeln als auch in komplexen Muskelbereichen der Skelettmuskulatur finden. (Falla et al., 2007). Die Kraftentwicklung in der Skelettmuskulatur wird hauptsächlich durch die Rekrutierung weiterer motorischer Einheiten und in den Kaumuskeln überwiegend durch Modulation der Erregungsfrequenzen erreicht (Derfler und Goldberg, 1978).

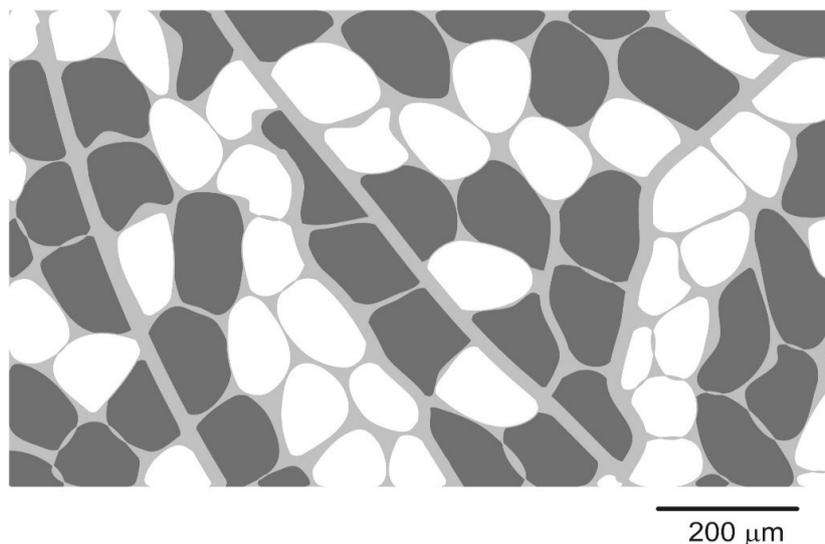


Abbildung 2: Typisches Mosaikmuster des Biceps brachii (dunkle und helle Bereiche) (Stålberg E., Eriksson P.-O. et al., 1986)

Theoretischer Hintergrund

Die funktionell kleinste Einheit der Muskulatur, die für die Kontraktion des Muskels aktiviert wird, stellt die motorische Einheit dar (motor unit, MU). Eine MU wird dabei aus einem Motoneuron und der davon innervierten Anzahl von Muskelfasern gebildet (Konrad, 2005).

Im Gegensatz zur Extremitätenmuskulatur versorgt eine MU der Kaumuskulatur zumeist mehrere Muskelfasern, die räumlich zwischen komplex angeordneten Sehenspiegeln aufgespannt sind und nur geringe Anteile des Gesamtmuskelquerschnittes einnehmen (siehe Abbildung 3).

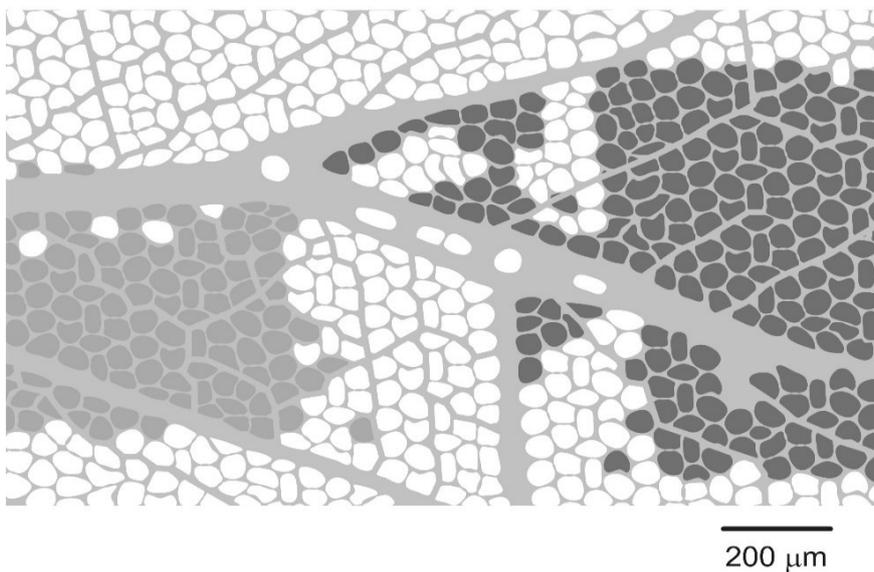


Abbildung 3: Muskelzellen eines Fasertyps in Faszikeln gruppiert (dunkle und helle Bereiche) (Stålberg E., Eriksson P.-O. et al., 1986)

In diesem komplexen übergeordneten Muskelgefüge bilden sich näherungsweise kleine „Müskelchen“. Diese kleinen Untereinheiten können, im Kontext einer differenzierten Aktivierbarkeit, innerhalb des Muskels sehr differenzierte Kraftvektoren entstehen lassen. Jeder Kaumuskel ist damit mit einer hohen feinmotorischen Kompetenz ausgestattet. Ein zusätzlicher motorischer Kontrollmechanismus (heterogene Aktivierbarkeit) erlaubt es der Kaumuskulatur an jedem Punkt des Kauschlages, einen sich laufend verändernden optimal wirksamen Kraftvektor zu generieren (Blanksma und van Eijden, 1995).

Der grundlegende Mechanismus, der die Kraftentwicklung der Kaumusculatur reguliert, umfasst die Rekrutierung und De - Rekrutierung von motorischen Einheiten. In der Skelettmuskulatur erfolgt eine Rekrutierung zur Kraftentwicklung nach dem sogenannten Henneman`s size principle. Da die Motoneurone mit ihren zugeordneten motorischen Einheiten ihrer Größe entsprechend unterschiedliche Reizschwellen aufweisen, werden diese bei zunehmendem Kraftbedarf von klein nach groß aktiviert. Spezifische motorische Aufgaben erfordern unterschiedliche intramuskuläre Aktivierungszustände. Diese sogenannten „Rekrutierungsmuster“ finden sich auf Ebene der motorischen Einheiten. Dieser feinjustierten Generierung funktioneller Kraftvektoren auf Ebene der motorischen Einheiten in der Kaumusculatur übergeordnet ist die intermuskuläre Steuerung. Unter „Rekrutierungsmusterveränderung“ versteht man in diesem Zusammenhang die Reorganisation der intramuskulären Aktivierungszustände als Folge einer Veränderung der motorischen Aufgabe im Sinne einer differenzierten Aktivierbarkeit, die durch Motoneuronen orientierte, aufgabenspezifische Aktivierung gekennzeichnet ist (Hellmann et al., 2011).

1.4.2 Allgemeine Anatomie der Kaumuskeln

Die primären Muskeln des Kauens sind die bilateral angelegten Muskeln M. temporalis, M. pterygoideus medialis, M. pterygoideus lateralis und M. masseter. Die vier Hauptmuskeln der Mastikation sind an den Rami des Unterkiefers befestigt und haben als Funktion die Beweglichkeit des Unterkiefers zu gewährleisten. Die Unterkieferbewegungen der Mastikation sind Elevation, Depression, Protrusion, Retrusion und Seit-zu-Seit-Bewegung. Um den Prozess des Kauens zu unterstützen, bewegen die Kaumuskeln den Unterkiefer in einer Seit-zu-Seit-Bewegung, um beim Zermahlen von Lebensmitteln zu helfen. Die Kaumuskeln dienen auch dazu, die Zähne näher zusammenzubringen oder den Mund zu schließen (Basit et al., 2020).

Die arterielle Versorgung der Kaumuskeln erfolgt über die Oberkieferarterie, einen Ast der äußeren Halsschlagader (Basit et al., 2020).

Theoretischer Hintergrund

Die vier Hauptmuskeln der Mastikation werden alle durch den vorderen Abschnitt des Unterkiefernerfs, des Nervus mandibularis, einem Ast des Nervus trigeminus (Hirnnerv V) innerviert. Der Nervus mandibularis wird auch als V3 abgekürzt und ist die größte Teilung des Trigeminiernervs (CN V) (Basit et al., 2020). Der Trigeminiernerv verlässt den Schädel über das Foramen Ovale in direkter Nachbarschaft zum größeren Flügel des Sphenoidknochens. Der Unterkiefernerf enthält sowohl sensorische als auch motorische Fasern und teilt sich weiter auf, da er die vier Hauptmuskeln der Mastikation innerviert. Der M. temporalis erhält seine Innervation durch tiefe seitliche Zweige des Unterkiefernerfs (Basit et al., 2020). Der mediale Pterygoideusmuskel erhält seine Innervation durch den medialen Pterygoidnerf, eine Teilung des Unterkiefernerfs. Der laterale Pterygoidmuskel erhält seine Nervenzufuhr vom seitlichen Nervus pterygoideus, der eine weitere Teilung des Unterkiefernerfs darstellt. Der Massetermuskel erhält seine Innervation vom Nervus massetericus, einer ebenfalls eine Teilung des Unterkiefernerfs bildet (Basit et al., 2020).

Die Primär- und Begleitmuskulatur der Mastikation arbeitet in koordinierter Weise, um die Unterkieferbewegung für das Kauen von Lebensmitteln zu generieren. Die Begleitmuskeln der Mastikation sind der M. buccinator und die suprahyoidale Muskulatur (Digastricus, Mylohyoideus und Geniohyoideus) sowie die infrahyoidalen Muskeln (Sternohyoideus, Thyrohyoideus und Omohyoideus) (Basit et al., 2020).

Im Folgenden wird eine kurze Beschreibung der Haupt- und Begleitmuskeln gegeben.

1.4.3 Musculus temporalis

Der M. temporalis ist ein fächerförmiger Muskel mit vorderen Fasern, die eine vertikale Ausrichtung haben, die mittleren Fasern haben eine schräge Ausrichtung und die hinteren Fasern haben eine eher horizontale Ausrichtung. Der Ursprung des Temporalis-Muskels reicht von der temporalen Fossa bis zur unteren temporalen Linie des lateralen Schädels (Basit et al., 2020). Die temporalis

Muskelfasern konvergieren nach inferior und bilden eine Sehne, die die temporale Fossa verlässt und unter dem zygomatischen Bogen durchläuft, um letztendlich am Kronenfortsatz des Unterkiefers einzumünden. Die Funktion der vorderen und mittleren Fasern des Temporalismuskels ist es, den Unterkiefer anzuheben, und damit den Kiefer zu schließen. Die hinteren Fasern des M. temporalis dienen dazu, den Unterkiefer zurückzuziehen (Basit et al., 2020).

1.4.4 Musculus pterygoideus medialis

Der mediale Pterygoidmuskel ist ein dicker rechteckiger Muskel mit einem oberflächlichen und einem tiefen Kopf. Der oberflächliche Kopf des Pterygoideus medialis hat als Ursprung den Oberkieferhöcker der unteren Kieferhöhle. Der tiefe Kopf des medialen Pterygoids ist größer als der oberflächliche Kopf. Der tiefe Kopf stammt von der medialen Oberfläche der seitlichen pterygoiden Platte des Sphenoidknochens (Basit et al., 2020). Die medialen pterygoiden Muskelfasern konvergieren nach inferior und bilden eine Sehne, welche sich am medialen Ramus einfügt in die hintere Mandibula sowie unterhalb der mylohoidalen Vertiefung der Mandibula einstrahlt. Die medialen pterygoiden Sehnenfasern fügen sich am Winkel des Unterkiefers ein. Der mediale Pterygoidmuskel dient zum Anheben und Verschieben des Unterkiefers. Er unterstützt auch lateralen Pterygoidmuskel mit Seit-zu-Seit-Unterkieferbewegungen beim Zermahlen von Lebensmitteln (Basit et al., 2020).

1.4.5 Musculus pterygoideus lateralis

Der laterale Pterygoidmuskel ist der Primärmuskel der unteren temporalen Fossa. Er besteht aus zwei Teilen: einem oberen und einem unteren Muskelkopf. Der Ursprung des oberen Muskelkopfes des lateralen Pterygoidmuskels ist die untere temporale Oberfläche des größeren Flügels des Sphenoidknochens. Der untere Kopf stammt aus dem seitlichen Aspekt der pterygoiden Platte des Sphenoidknochens. Die Fasern des oberen Muskelkopfes strahlen me-

dial an der Gelenkkapsel des Kiefergelenks in den Discus articularis ein. Die Sehne des unteren Kopfes inseriert am Processus condylaris der Mandibula, genauer in der sogenannten Fovea pterygoidea. Der laterale pterygoide Muskel ist an der Protrusion und Kieferöffnung beteiligt (Basit et al., 2020).

1.4.6 Musculus masseter

Der Masseter ist ein rechteckiger Muskel mit drei Schichten (oberflächlich, mittel und tief). Der Ursprung des Massetermuskels sind die vorderen zwei Drittel des Jochbogens sowie Anteile des hinteren Jochbeins. Die Funktion des Massetermuskels besteht darin, den Unterkiefer anzuheben und die Zähne anzunähern. Er ist der Hauptmuskel des Kieferschlusses. Zusätzlich haben die mittleren und tiefen Anteile der Muskelfasern des Masseters die Funktion, den Unterkiefer zurückzuziehen; die oberflächlichen Fasern helfen bei der Protrusion des Unterkiefers (Basit et al., 2020).

1.4.7 Begleitmuskeln der Mastikation

Die Begleitmuskeln bestehen aus den suprahyoidalen und den infrahyoidalen Muskeln und befinden sich bilateral an der Seite des Halses. Die Begleitmuskeln dienen in erster Linie dazu, den Hyoidknochen und Kehlkopf anzuheben und zu deprimieren. Sie helfen auch bei einer Depression des Unterkiefers beim Öffnen des Mundes gegen eine entgegengesetzte Kraft. Der Buccinator ist ein Gesichtsausdrucksmuskel, der bei der Mastikation hilft, indem er die Nahrung in der Mundhöhle zurückhält und zwischen den Zahnreihen platziert (Basit et al., 2020).

1.5 Der Kauvorgang

Die Kaubewegung ist durch eine Kombination von Protrusion, Retraktion, Lateralbewegungen, Öffnung und Schließung gekennzeichnet, welche einem rhythmischen Bewegungsmuster folgt. Das Aktivierungsmuster der Muskeln wird von absteigenden kortikalen Bahnen des ZMG sowie von der Rückkopplung peripherer neuraler Rezeptoren geregelt (Olsson et al., 1986). Die vom ZMG eingestellte Kaufrequenz ist ein individuelles Merkmal jedes Menschen (Po et al., 2011; Gallo et al., 2019).

Der Kauzyklus wird in eine Öffnungsphase, eine initiale schnelle und eine darauffolgend langsame Schließphase (engl.: Power Stroke) unterteilt (Gallo et al., 2019). Zum Ende der vertikalen Öffnung bewegt sich der Unterkiefer in Richtung Bolusseite, woraufhin die schnelle Schließphase beginnt, die mit dem Spüren des Widerstandes der Nahrung endet (Gallo et al., 2019). Die Aktivierungssequenzen der einzelnen Schließmuskeln variieren, während der Schließphase, wobei die Summe der von jedem Muskel entwickelten Kraftvektoren die aktuelle Bewegungsrichtung des Unterkiefers bestimmt (Hugger et al., 2008). Bei Öffnung des Unterkiefers nach lateral bewegt der ipsilaterale M. temporalis die Mandibula nach lateral und posterior. Im selben Moment kommt es zur Kontraktion der kontralateralen Mm. pterygoideus lateralis, pterygoideus medialis und M. Masseter, welche den Unterkiefer nach vorn ziehen und zur Arbeitsseite drehen (Hugger et al., 2008). Während der langsamen Schließphase (Power Stroke) kommt es zur maximalen Aktivierung der Schließmuskeln (M. temporalis, M. masseter, M. pterygoideus medialis), womit die Nahrung zerkleinert wird, und welche dann abrupt abbricht (Hugger et al., 2008; Gallo et al., 2019). Im Anschluss bleibt die Mandibula ca. 100 ms in dieser okklusionsnahen Position (Hugger et al., 2008).

1.6 Messbare Parameter beim Kauen

1.6.1 EMG und Kaukraft

Die ersten Messungen zur Beziehung zwischen EMG und dem Kauvorgang wurden von Møller und Ahlgren durchgeführt. Hierbei wurden unter anderem die Rekrutierungsmuster der Kaumuskulatur während des Kauvorganges erstmalig beschrieben (Møller, 1966; Ahlgren, 1966). In einer weiteren Studie von Ahlgren und Owall (Ahlgren, 1970) sowie in einer Studie von Hagberg et al. (Hagberg et al., 1985), die sich mit der Beziehung zwischen EMG und Beißkraft beschäftigten, ließ sich ein linearer Zusammenhang zwischen Muskelaktivität und Beißkraft feststellen. Diese lineare Beziehung konnte aber nur für die statische Beißkraft festgestellt werden und ließ sich nicht auf den dynamischen Kauvorgang übertragen (Pröschel et al., 1994).

Die ersten Aufzeichnungen mittels EMG zu dynamischen Kaubewegungen beim Zerspanen von Testnahrung stammen von Boyar und Kilcast (Boyar, 1986 a, b). Beim Verzehr von Erdnüssen und Konfitüre zeigten sich im EMG typische Verläufe der Muskelaktivität, die sich aber in Größe, Dauer und Frequenz voneinander abgrenzen ließen. Umso härter die verzehrte Nahrung, umso höher und länger die elektrische Aktivität.

In einigen späteren Untersuchungen war eine Korrelation zwischen elektromyographischen Daten und den zuvor sensorisch und instrumentell ermittelten Daten der Kauguttextur und deren Änderung während des Kauvorgangs zu finden (Sakamoto et al., 1989).

Jack et al. fanden allerdings signifikante Unterschiede der elektromyographischen Aktivität der Kaumuskulatur zwischen einzelnen Probanden, die größer waren als die für verschiedenartige Lebensmittel gemessenen Unterschiede (Jack et al., 1993).

Diese Unterschiede legen nahe, dass einzelne Individuen unterschiedliche Strategien anwenden, um Nahrungsmittel zu zerspanen. Bei Untersuchungen von Brown et al. ließen sich Probanden in fünf unterschiedliche Gruppen einteilen. Diese Gruppen unterschieden sich in der sensorischen Beurteilung verschie-

dener Modelllebensmittel. Die Autoren stellten die Vermutung auf, dass individuell unterschiedliche Kauverhaltensmuster dazu führen, gleiche Textureigenschaften unterschiedlich wahrzunehmen (Brown et al., 1994 a, b).

1.6.2 Unterkieferkinematik

Viele Studien haben sich bereits mit der Kinematik des Unterkiefers beschäftigt. Lange Zeit wurde der Aufzeichnung der Unterkieferbewegung in der zahnmedizinischen Forschung große Bedeutung geschenkt, da man dies als wichtigen Parameter zur Auffindung von Funktionsstörungen im Zahn-,Mund- und Kieferbereich ansah (Heners, 1980).

Der Kauvorgang lässt sich prinzipiell in drei Phasen einteilen: Schließ-, Okklusal- und Öffnungsphase. Zur Unterscheidung spielen Geschwindigkeit und Richtung der Unterkieferbewegung sowie Anzahl der Kauzyklen eine wichtige Rolle.

Anzahl und Länge eines Kauzyklus nehmen mit Größe und Härte der Lebensmittelprobe messbar zu und die Frequenz nimmt ab (Horio, 1989). Die längere Kauzykluszeit für harte Lebensmittel resultierte hierbei vor allem aus einer längeren Öffnungs- und Okklusalphase (Peyron et al., 1997).

Um die individuell sehr unterschiedliche Kaueffektivität, die sich in der pro Kauschlag gewonnenen Bruchstückgröße widerspiegelt, auszuklammern, wurde jeder Proband angewiesen 12-15 Kauzyklen zu absolvieren.

1.7 Wissenschaftliche Fragestellung

Die vorliegende Studie ist der erste Teil eines Studienkomplexes, der mit Hilfe der in der vorliegenden Studie klinisch experimentell erarbeiteten funktionellen Daten (EMG, Kinematik, Kau- und Beißkraft) die Belastungen des FE Modells mit realistischen Kräften, wie sie bei einer kinetischen Bolusdurchdringung oder bei Parafunktionen zu erwarten sind, modelliert werden sollen. Die Entwicklung

Theoretischer Hintergrund

eines Teilmodells, das vereinfachend angenommene viskoelastische Verformungen des Speisebolus okklusionsnah abbilden kann, soll das zur Simulation verwendete Gesamtmodell vervollständigen.

Die Gesamtstudie gliedert sich in drei Teile, von denen nur der erste Teil (klinisch experimentelle Studien) als Teil der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurde:

I. Klinisch experimentelle Untersuchungen zu realistischen Kauzyklen mit Ableitung der Kaukräfte, elektrischer Aktivität (EMG) aller Kaumuskeln und Kinematik des Unterkiefers zur okklusionsnahen sequentiellen Analyse der Kraftübertragung unter kinetischen Bedingungen.

II. Individuelle Adjustierung des bereits vorhandenen FE Modells hinsichtlich aller wesentlichen Strukturen des Kausystems und Entwicklung eines Nahrungsbolus variabler viskoelastischer Eigenschaften. Simulation okklusionsnaher Mikrobewegungen der antagonistischen Zähne unter realitätsnahen Belastungen des Kausystems bei Bolusdurchdringung im Rahmen eines Bereichs wie er durch die vertikalen Distanzen (vD) zwischen Zahnhöckerspitzen und Tiefe der Zahnfossae (vD ca. 3mm) vorgegeben ist.

III. Simulation okklusionsnaher Mikrobewegungen antagonistischer Seitenzähne unter realitätsnahen Belastungen des Kausystems bei exzentrischen Parafunktionen (Knirschen unter angenommener Eckzahnführung von ca. 60°) im Rahmen eines Bereichs, wie er durch eine vD von ca. 3mm vorgegeben ist.

Die vorliegende Studie hat zum Ziel, Muskelaktivität mittels EMG-Ableitung an allen Kaumuskeln während eines unilateralen, kraftkontrollierten Kauschlags zu erfassen. Zusätzlich erfolgte eine Erfassung der zeitlichen Relation zwischen Muskelaktivität und daraus resultierender Kraftgenerierung unter räumlicher Aufzeichnung der Unterkiefer-Kinematik.

Es soll erstmals die Koaktivierung der Kauseite und Nicht-Kauseite unter kraftkontrollierten Bedingungen untersucht werden.

Methodik

1.8 Studiendesign

Klinische experimentelle, explorative Untersuchung.

1.9 Studienteilnehmer

Die Studienteilnehmer wurden aus dem Bereich der Studierenden der medizinischen Fakultät der Julius-Maximilians-Universität in Würzburg mittels Aushang und mündlich rekrutiert. Vor Beginn der Studie lag von allen Studienteilnehmern eine Einverständniserklärung vor. Jeder Teilnehmer erhielt eine Aufwandsentschädigung von 300€, die am Ende der Studie ausgezahlt wurde.

Die Studienteilnehmer wurden nach den folgenden Ein- und Ausschlusskriterien evaluiert:

1.9.1 Einschlusskriterien

- Volljährig und geschäftsfähig
- Blutstatus zum Ausschluss erhöhter Blutungsneigung
- Natürliche Vollbezahnung
- Keine akute Parodontalerkrankung mit Sondierungstiefen > 4 mm

1.9.2 Ausschlusskriterien

- Schwangerschaft, Stillzeit
- Fehlende antagonistische Abstützung auf natürlichen Zähnen
- Bekannte Allergie gegen Pflaster

1.10 Zielparameter

1.10.1 Hauptzielkriterien

In einem klinisch-experimentellen Modell wurden bei den Probanden folgende Parameter erfasst:

elektromyografische Ableitung der Kaumusculatur, Kinematik, Kau- und Beißkraft. Hierzu wurden:

- a) mit intraoralen Kraftmessvorrichtungen unter Feedback-Kontrolle gezielt Kraftvektoren erzeugt, wie sie bei statischen und dynamischen Belastungen des Kausystems auftreten und
- b) das EMG-Kontraktionsverhalten der Kaumusculatur unter diesen Bedingungen an einem breiten asymptotischen Probandengut untersucht (die hierbei gewonnenen Daten dienen der Entwicklung eines FE - Modells und dessen Validierung, um so die Okklusion der artifiziiellen Kauflächen optimieren zu können).

1.10.2 Nebenzielkriterien

Das bilaterale Kokontraktionsverhalten der Kaumusculatur bei dynamischer Funktion des Kausystems wurde ebenfalls erfasst.

1.11 Ablauf der Studie

Im Rahmen der Probandenrekrutierung in der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik wurden intraorale Befunde, Patientendaten und Anamnese erhoben. Die Einschluss- und Ausschlusskriterien wurden anschließend überprüft. Die Probanden wurden über die Studie aufgeklärt. Ebenfalls wurden Einverständnis- und Aufklärungsbogen ausgehändigt.

Methodik

Nach dem Vorliegen der Unterschrift für die Einwilligung über die Studienteilnahme wurden die Probanden zahnärztlich untersucht und relevante Befunde, wie sie auch außerhalb einer Studie erhoben werden, dokumentiert:

1. klinische Untersuchung (extraoral und intraoral)
2. klinische Untersuchung anhand der Research Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders (DC/TMD). Die untersuchenden Studienärzte waren bezüglich dieser Untersuchung kalibriert.

In derselben Sitzung wurden Oberkiefer- und Unterkieferabformungen genommen. Dies war notwendig, um die Kraft- und Bewegungsmessinstrumente individuell anpassen zu können.

3. Anschließend wurden MRT - Aufnahmen angefertigt. Dies war notwendig, um die Lokalisation der abzuleitenden Muskeln und Festlegung der Applikationsstellen für die Oberflächenelektroden sowie die Ermittlung der Stichtiefe und Stichrichtung für die Injektionsnadeln, mit denen die Drahtelektroden in die tief liegenden Muskeln platziert wurden, zu ermitteln.

4. Die Probanden trainierten den Bewegungsablauf und den Umgang mit den Kraftsensoren.

5. Anschließend erfolgte die elektromyographische Untersuchung. Hierfür wurden die Elektroden platziert und die elektrische Aktivität aufgezeichnet. Dies geschah unter statischen und dynamischen (während des Kauens und des Zähneknirschens) Bedingungen.

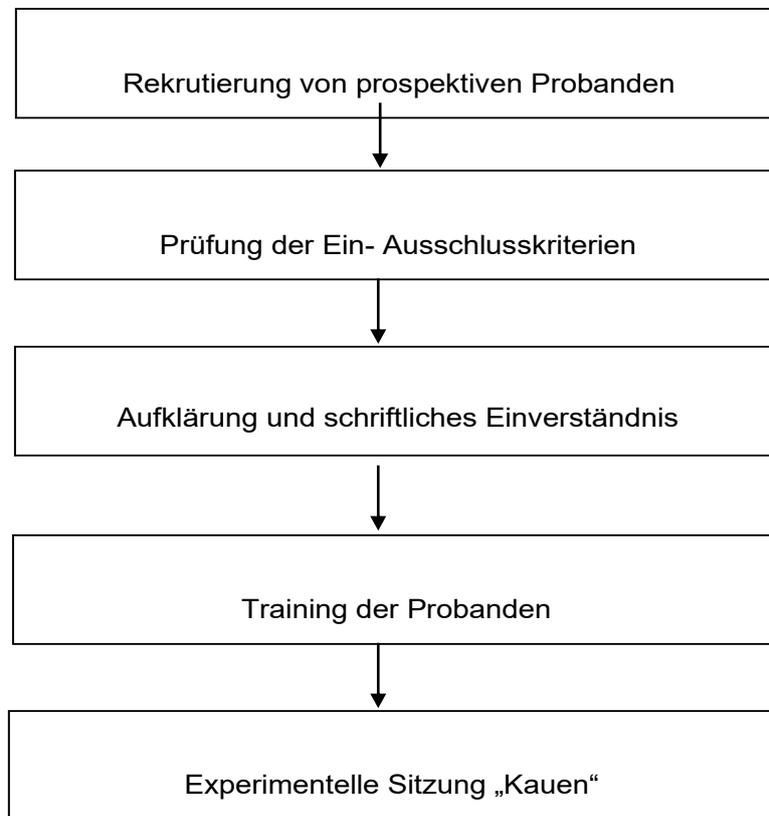
Der geplante Zeitrahmen der verschiedenen Untersuchungen war wie folgt:

- Elektromyographische Untersuchung der Probanden (ca. 2 Stunden)
- Kinematische Aufzeichnung der Kieferbewegung (ca. 2 Stunden)
- Anfertigung von Kiefergelenk-MRTs (ca. 1 Stunde in separater Sitzung)
- Kaukraftmessung mittels intraoraler Kraftaufnehmer (ca. 2 Stunden)

Die Untersuchungen 1, 2 und 4 wurden parallel in der gleichen Sitzung durchgeführt.

Eine schematische Darstellung des Probandenflusses ist dargestellt in (Abbildung 4).

Abbildung 4: Schematische Darstellung des Probandenflusses



1.12 Versuchsanordnung

1.12.1 Vorbereitung

1.12.1.1 MRT Aufnahmen

Vor Beginn der Hauptmessungen wurden MRTs von allen Probanden in der radiologischen Abteilung des Universitätsklinikums Würzburg angefertigt. Dabei kam das MRT – Gerät Prisma fit der Firma Siemens zum Einsatz. Es wurden dabei für jeden Probanden folgende Sequenzen verwendet:

- MPRage transversal, sagittal u. koronar
- T2Space sagittal jeweils mit und ohne Sperrung.

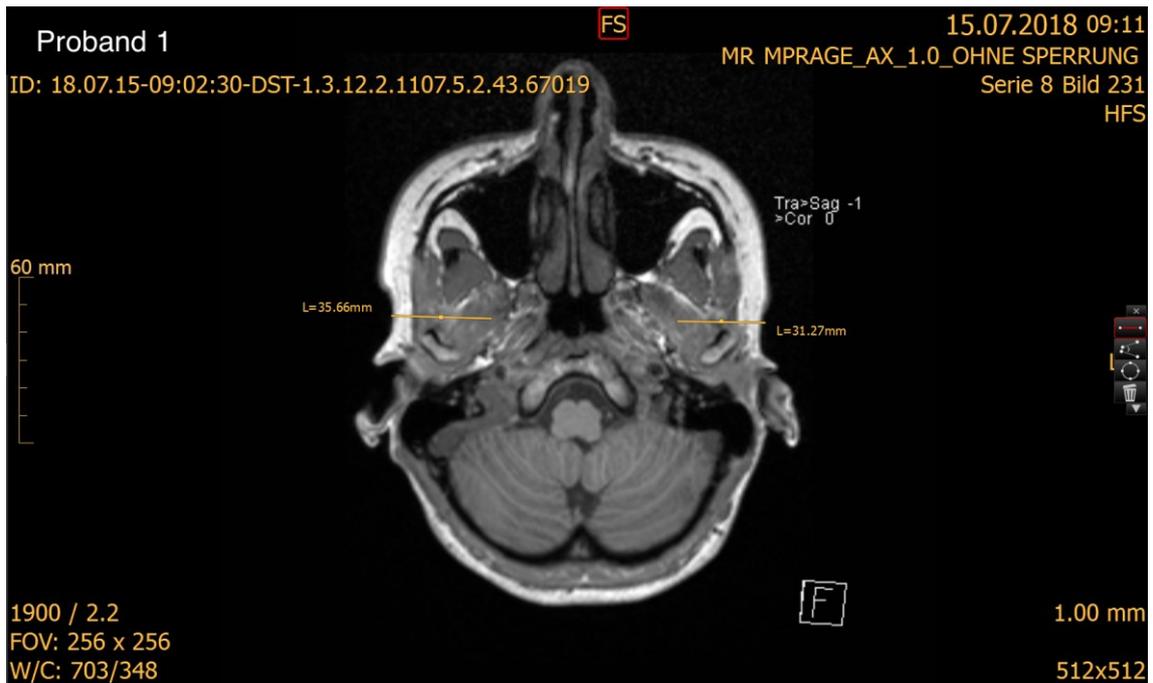


Abbildung 5: axiales MRT ohne Sperrung. Beide axialen Sequenzen dienen der Lagebestimmung des M. pterygoideus lateralis links und rechts.

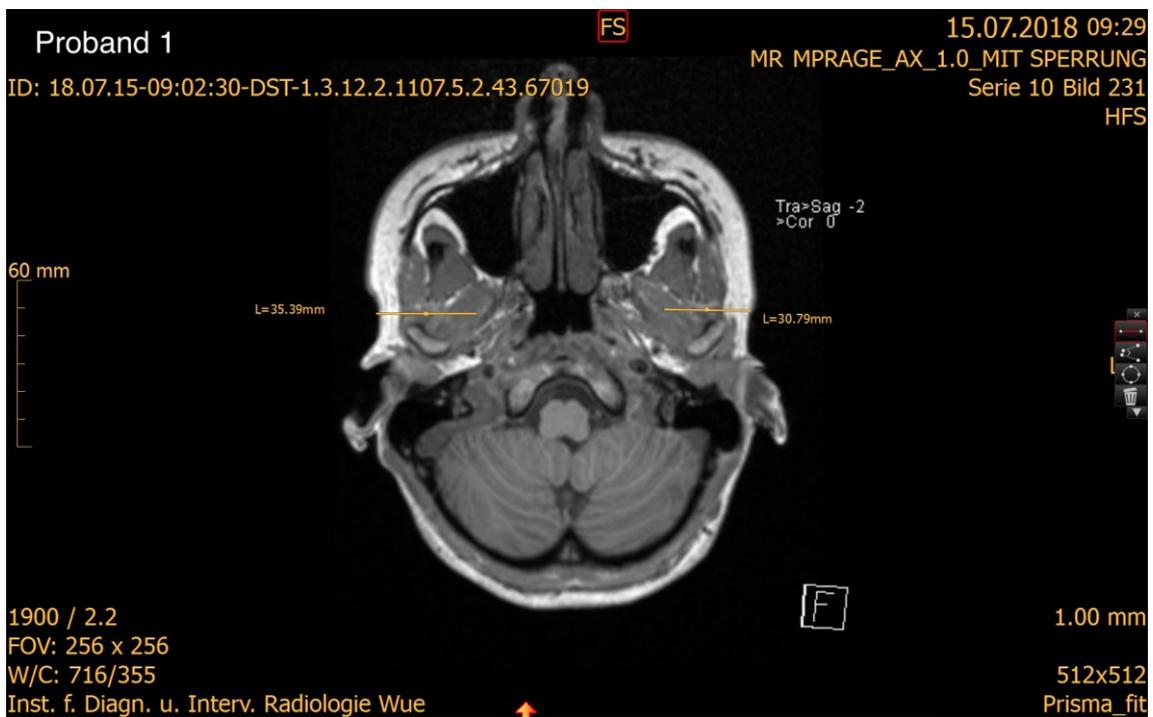


Abbildung 6: axiales MRT mit Sperrung. In dieser Sequenz mit Sperrung soll die angestrebte Lage der Feindrahtelektroden auch bei simulierter Öffnung überprüft werden.

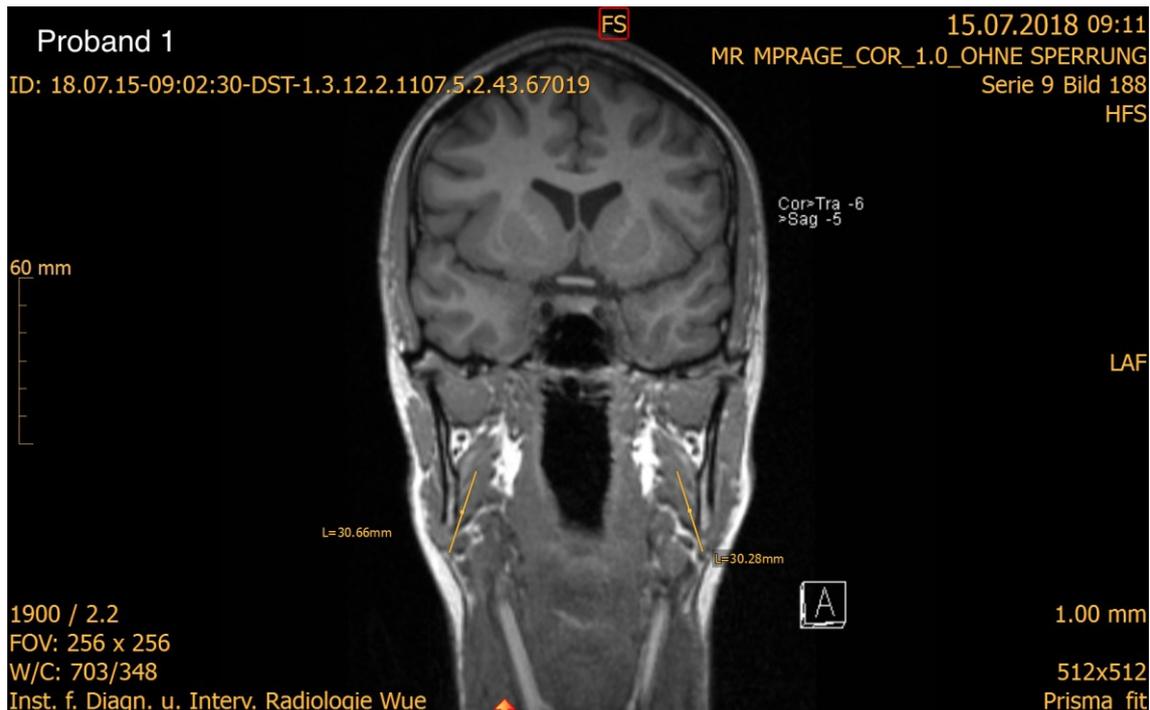


Abbildung 7: coronares MRT ohne Sperrung. Diese Sequenz dient der Lagebestimmung vom M. pterygoideus medialis links und rechts.

Die MRT – Aufnahmen dienten zur genauen Lagebestimmung der oberflächlich nicht ableitbaren Kaumuskeln M. pterygoideus lateralis und medialis beidseits. So konnte für jeden Probanden die individuell erforderliche Stechtiefe und Stechrichtung exakt ermittelt werden. Nur auf dieser Grundlage ließ sich gewährleisten, die intramuskulären EMG – Feindrahtelektroden sicher in den beiden schwer zugängigen Muskeln zu platzieren.

1.12.1.2 Kauseitenbestimmung

Zusätzlich zur Messung der Kinematik und der Muskelaktivität wurde bei der Eingangsuntersuchung die bevorzugte Kauseite der Probanden ermittelt. Hierzu wurde den Probanden ein Stück Fruchtgummi (Goldbären, HARIBO GmbH & Co. KG, Bonn, Deutschland) gereicht, mit der Aufgabe dieses zu zerkauen und zu schlucken. Durch den Untersucher wurde die Seite notiert, auf der die Testnahrung zerkaut wurde. Dieses Prozedere wurde jeweils noch zwei weitere Ma-

le wiederholt. Die Seite, auf der die Nahrung mindestens zwei von drei Mal zerkaut wurde, wurde als bevorzugte Kauseite definiert. Zum nächsten Untersuchungszeitpunkt wurden die Probanden des Weiteren nach ihrer subjektiv bevorzugten Kauseite befragt sowie die Händigkeit erfasst. Der Hintergrund für das Kauexperiment und die Befragung wurde den Probanden nicht näher erläutert, um einen möglichen Einfluss auf die Ergebnisse zu verhindern.

1.12.1.3 Herstellung der okklusalen Trägerschiene

Modellherstellung

Die Herstellung der okklusalen Schienen, welche als Träger für die Messvorrichtungen dienten, wurde anhand von Gipsmodellen des Ober- und Unterkiefers durchgeführt. Dazu wurden beide Kiefer der Probanden mit Rimlock-Löffeln abgeformt, welche passend zu den Kiefergrößen ausgesucht und mit Polyätheradhäsiv (3M-ESPE, Neuss, Deutschland) bestrichen wurden. Bei dem zur Abformung verwendeten Material handelte es sich um Impregum Pentasoft (3M-ESPE, Neuss, Deutschland). Die Abformung wurde gemäß Herstellerangaben nach 6 Minuten Abbindezeit aus dem Mund entfernt und in das Desinfektionsbad getaucht.

Nach der eingehaltenen Rückstellzeit von einer Stunde wurden die Abformungen mit Superhartgips Klasse IV (GC Fujirock EP, GC, Bad Homburg, Deutschland), wie vom Hersteller vorgeschrieben, ausgegossen und mit Hilfe eines Splitcast-Sockelformers mit einer Basis versehen. Nach 60 Minuten wurden die Modelle entformt und getrimmt.

Schienenherstellung

Bei der Herstellung der okklusalen Schienen im Ober- und Unterkiefer wurden 3mm dicke klare Erkodur (Erkodent, Pfalzgrafenweiler, Deutschland) Tiefziehschienen (PETG Polyethylenterephthalat-Glycolmodifiziert-Ethylen-1,4-cyclohexylen-dimethylenterephthalat-copolymer) nach Herstellerangaben über die Modelle tiefgezogen und ausgearbeitet. Zur Befestigung der Pads wurden 1 mm dicke Edelstahldrähte (Remanium Dentaurum, Ispringen, Deutschland) so

Methodik

gebogen und an die Schienen anpolymerisiert, dass sie im Bereich der 4er und 6er von bukkal und im Bereich der 5er von palatinal/lingual sowohl im Oberkiefer das Kaugut-Säckchen als auch im Unterkiefer den Drucksensor auf der Kaufläche fixieren konnten. Um die Verletzungsgefahr zu reduzieren, wurden alle scharfen bzw. spitzen Kanten geglättet und poliert. Mit Hilfe dieser Vorrichtung gelang es die Padhalter (Funktion der Pads und Kraftmessung wird später beschrieben) so einzusetzen, dass sie im Seitenzahnbereich auf den ersten Prämolaren bis zu den ersten Molaren platziert werden konnten. Die Pads waren über einen Plastikschiach mit dem Druckmessgerät verbunden.

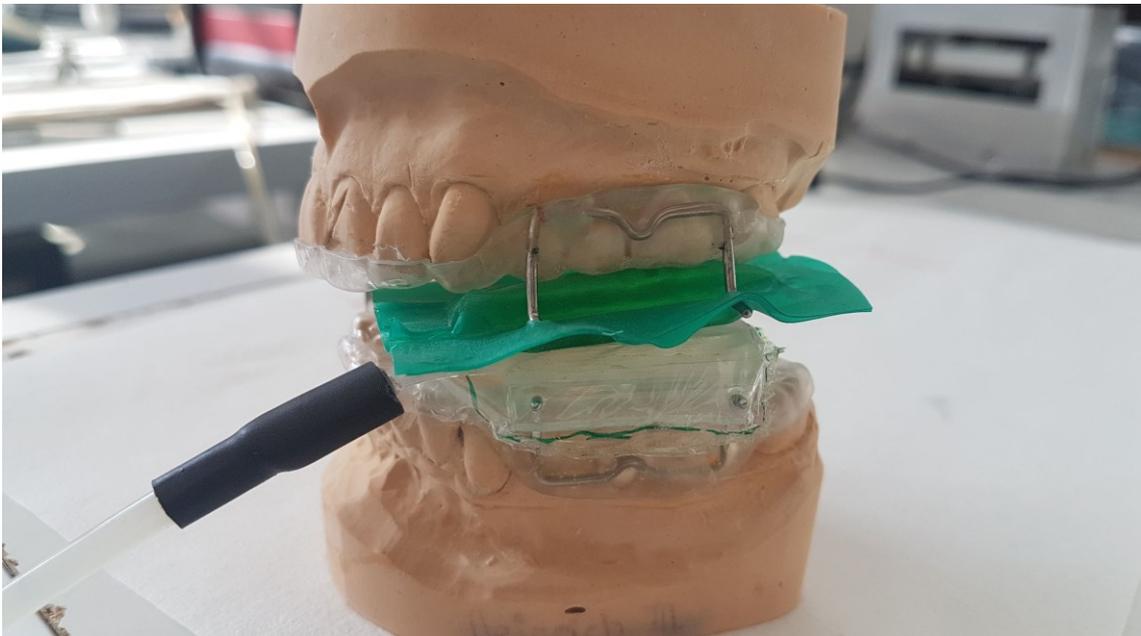


Abbildung 8: Trägerschienen im Oberkiefer und Unterkiefer. Die beiden Schienen weisen jeweils auf beiden Seiten drei Metalldorne zur Aufnahme von Drucksensor und Kaugut auf. Am Oberkiefer ist das Kaugut-Säckchen befestigt (hier Fruchtgummi) und am Unterkiefer das hydrostatische Pad zur Messung des beim Kauen generierten Druckes. Vor der Messung wurden die Metalldorne auf der Nicht-Kauseite entfernt.

Methodik

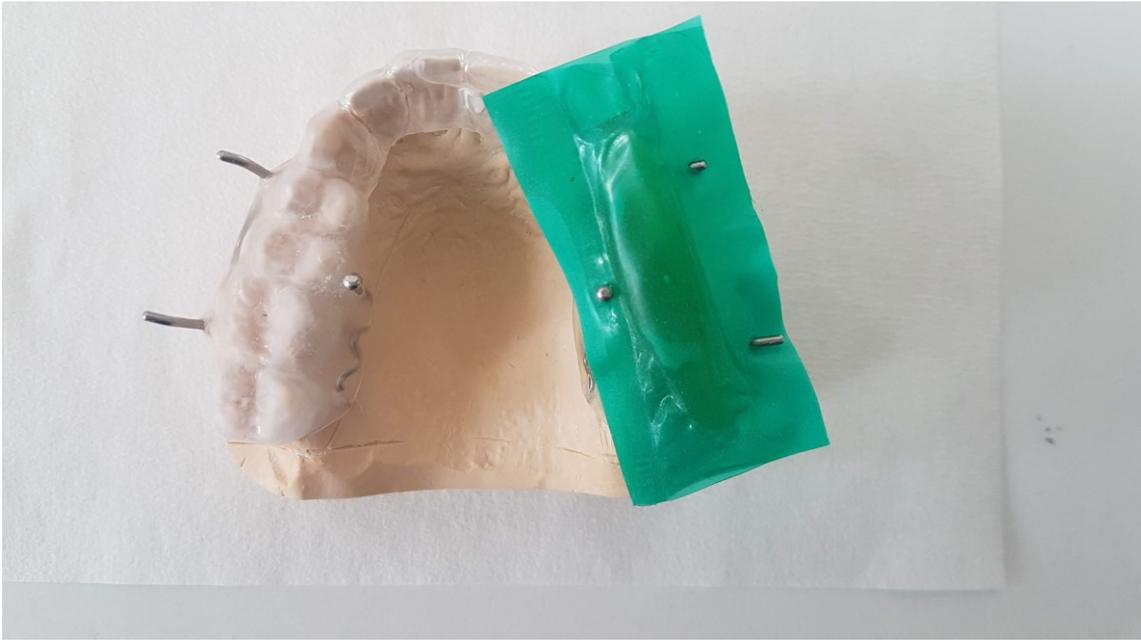


Abbildung 9: Oberkiefermodell mit okklusaler Trägerschiene, Haltedornen und fixiertem Kaugut.



Abbildung 10: Unterkiefermodell mit okklusaler Trägerschiene, Haltedornen und fixiertem Drucksensor zur Messung der beim Kauen generierten Kaukraft.

1.12.1.4 Vorbereitung der Elektroden

Intramuskuläre Elektroden

Die intramuskulären Elektroden wurden durch das Schneiden von teflonbeschichteten Edelstahldrähten (California Fine Wire Company, Grover Beach, California, USA, Durchmesser 0,08 mm) in 130 mm lange Stücke hergestellt. Dazu wurden diese in handelsübliche Einweg-Infiltrationskanülen (0,4 mm x 52 mm) eingebracht und die Teflonbeschichtung am Ende über 1 mm mit Hilfe der Flamme eines Gasbrenners entfernt. Dieser Vorgang wurde für das stumpfe Ende über 5 mm wiederholt. Zwei Feindrähte wurden in eine Kanüle eingebracht. Das vordere Ende wurde abgeknickt (s. Abbildung 11), damit die Feindrahtelektroden beim Rückziehen der Kanüle in die Endposition bleiben. Um die individuell pro Seite bestimmte Tiefe des Eindringens der Kanülen zu gewährleisten, wurde ein Applikationsstop auf die Kanüle aufgesetzt (Abbildung 11). Dieser Applikationsstop orientierte sich in seiner Länge an der individuell erforderlichen Applikationstiefe.

Anschließend wurden die Drahtelektroden bei 134°C sterilisiert. Hierzu diente ein Dampfsterilisator Vacuklav 31B+ von Melag (MELAG Medizintechnik GmbH & Co.KG, Berlin, Deutschland).

Abbildung 11: Feindrahtelektrode mit Applikationsstop



Die Lage der intramuskulären Elektroden wurde anhand eines vorher angefertigten Magnetresonanztomogramm (MRT) individuell für jeden Probanden und jeden Muskel festgelegt (Stechtiefe und Richtung) und der Applikationsstop der

Methodik

Feindrahtelektrode dementsprechend angepasst. In der Frontalebene wurde die Lage der Elektroden im M. pterygoideus medialis beidseitig bestimmt. In der Transversalebene wurde die Lage im M. pterygoideus lateralis beidseitig bestimmt.

Oberflächenelektroden

Die EMG-Aktivität wurde mit Hilfe von bipolaren Ag/AgCl Oberflächenelektroden bestimmt (Durchmesser 14 mm, Noraxon, Köln, Deutschland). Die Elektroden wurden auf die folgenden Muskeln aufgeklebt:

- M. temporalis posterior auf der Kauseite TP+
- M. temporalis anterior auf der Kauseite TA+
- M. masseter auf der Kauseite MA+
- M. digastricus auf der Kauseite DI+
- M. temporalis posterior kontralateral (auf der Nicht-Kauseite) TP-
- M. temporalis anterior kontralateral TA-
- M. masseter kontralateral MA-
- M. digastricus kontralateral DI-

Nach dem Applizieren der Elektroden wurde die korrekte Lage der Elektroden in einer EMG-Aufnahme überprüft. Dies erfolgte durch Öffnen, Protrusion, Laterotrusion nach rechts, Laterotrusion nach links, und Retrusion des Unterkiefers. Bei korrekter Lage der Elektroden sollten sich folgende Aktivierungsmuster zeigen:

Methodik

- Beim Öffnen: Aktivitätsanstieg in den Mm. pterygoidei laterales und Mm. digastrici beidseits.
- Bei Protrusion: Aktivitätsanstieg in Mm. masseter, Mm. pterygoidei mediales und laterales beidseits.
- Bei Laterotrusion: Aktivitätsanstieg im ipsilateralen M. masseter und M. temporalis sowie dem kontralateralen M. pterygoideus lateralis und medialis.
- Bei Retrusion: Aktivitätsanstieg in den Mm. temporales und digastrici beidseits

1.12.1.5 Vorbereitung der Testnahrung

Zur Vorbereitung der Testnahrung wurden Karotte und Fruchtgummi in jeweils zwei Säckchen, welche aus Kofferdam (Hygenic Dental Dam, Coltene, Altstätten, Schweiz) verklebt waren, verpackt, um das Kaugut beim Zerspanen interokklusal zu halten.

Die Säckchen sowohl für Fruchtgummi als auch für Karotte hatten die selben Volumina. Das Volumen der geschnittenen Karotte orientierte sich dabei an dem vom Hersteller gewählten Volumen der Fruchtgummisorte:

Maße der Testnahrung: 35mm x 12mm x 10mm

Volumen: $4200\text{mm}^3 = 4,2\text{cm}^3$

Beim Zuschneiden der Karotte wurde darauf geachtet, ein möglichst homogenes Teilstück der Karotte zu wählen.

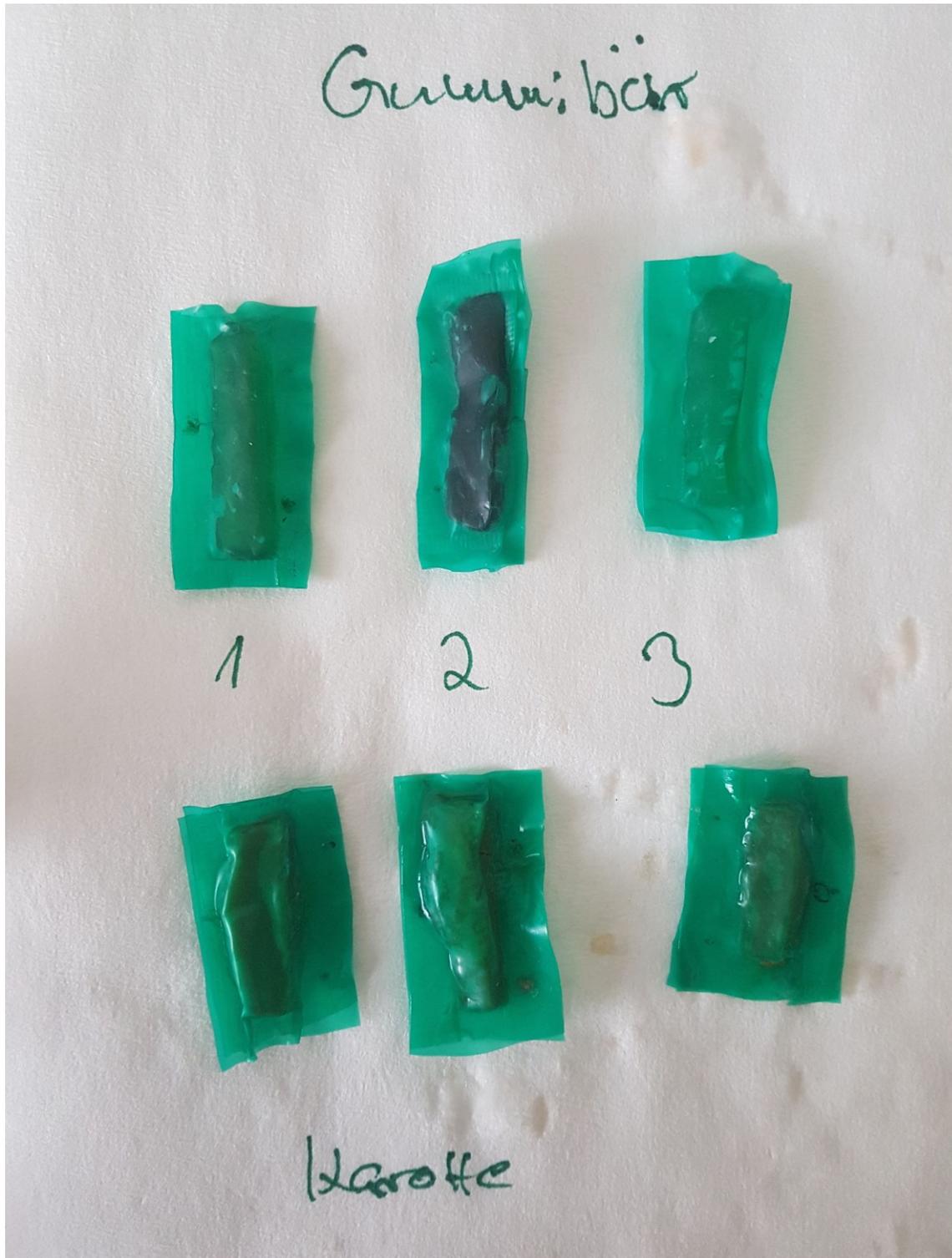


Abbildung 12: Kaugut verpackt in verklebtem Kofferdam. Die oberen drei Säckchen enthalten Fruchtgummi und die unteren drei geschnittene Karotte.

Der Auswahl dieser beiden in die Studie einbezogenen Lebensmittel lag folgende Überlegung zu Grunde:

Methodik

Die Textur der verwendeten Lebensmittel sollte sich möglichst umfassend mit primären Texturparametern beschreiben lassen. Nur diesen primären, sensorisch erfassbaren Parametern der Textur lassen sich klare physikalische Eigenschaften zuordnen.

Die beiden in der Studie untersuchten sensorischen Eigenschaften Härte und Elastizität sind wesentliche Texturmerkmale. Ihnen kommt eine große Bedeutung im strukturellen Aufbau vieler Lebensmittel zu.

Eigenschaften der gewählten Testnahrung:

Karotte :

sensorisch hart ; Wasser = 88 g/100g; Fett = 0,2g/100g

strukturell: pflanzliche Zellen

Lagerung der Karotten bei 5°C und rel. Feuchte von 95%

Fruchtgummi:

sensorisch zähelastisch; Wasser = 14 g/100g; Fett = 0,1g / 100g

strukturell: Gel

1.12.1.6 Vorbereitung der Probanden

Für den Versuch wurden die Probanden in einem speziell eingerichteten Behandlungsraum vorbereitet. Männliche Probanden sollten rasiert sein. Vor dem Kleben der Oberflächenelektroden wurden beide Gesichtshälften gereinigt und mit einem mit 70% Ethanol befeuchteten Tuch desinfiziert. Dies diente zur Entfettung der Gesichtshaut in dem erforderlichen Messbereich. Dieses Vorgehen hatte das Ziel, die Haut-Impedanz zu reduzieren und eine gute Klebung der Elektroden auf der Haut zu gewährleisten.

Die vier intramuskulären Elektroden wurden für jeden Probanden individuell nach MRT in M. pterygoideus lateralis und medialis gestochen. Jeweils in der Nähe der Einstichstellen wurden daraufhin Klemmen, welche die Messgeräte

Methodik

mit den intramuskulären Elektroden verbinden sollten, mittels Leukoplast (BSN Medical GmbH, Hamburg, Germany) fixiert.

Anschließend wurden die Elektroden über die Klemmen mit den Messgeräten verbunden. Die Funktion der intramuskulären Elektroden wurde durch gezielte spezifische Bewegungen überprüft. Die Oberflächenelektroden wurden jeweils auf die Muskelbäuche aller übrigen Kaumuskeln (größte kontrahierende Muskelmasse) in Faserrichtung aufgeklebt und ebenfalls durch gezielte spezifische Bewegungen überprüft. Anschließend wurden die paraokklusalen Trägerschienen anprobiert und überprüft, ob eine störungsfreie statische und dynamische Okklusion stattfinden kann. Den Probanden wurden weiterhin die Aufgaben, die während des Versuches zu absolvieren waren, erklärt.

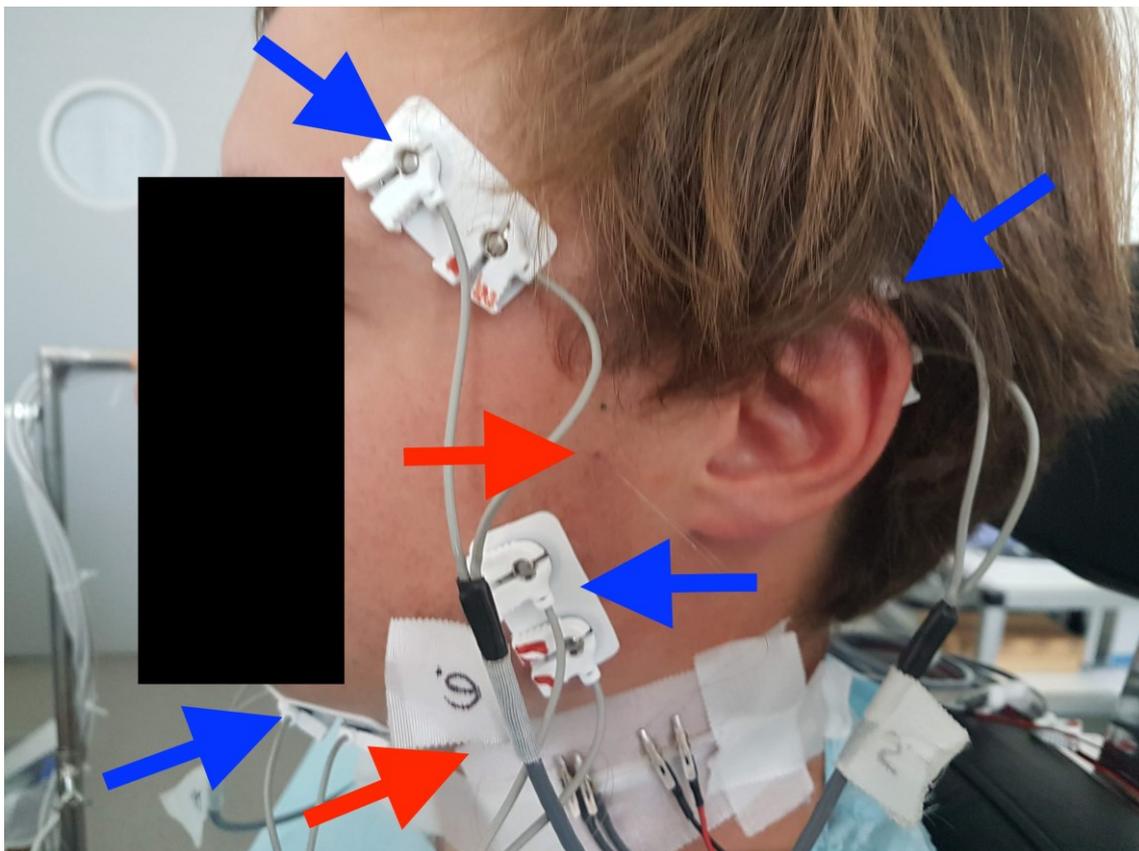


Abbildung 13: Proband mit intramuskulären Feindrahtelektroden (rote Pfeile, oben: aus M. pterygoideus lateralis, unten: aus M. pterygoideus medialis) und aufgeklebten Oberflächenelektroden (blaue Pfeile, oben links: M. temporalis anterior, oben rechts: M. temporalis posterior, mittig: M. masseter und unten links: M. digastricus)

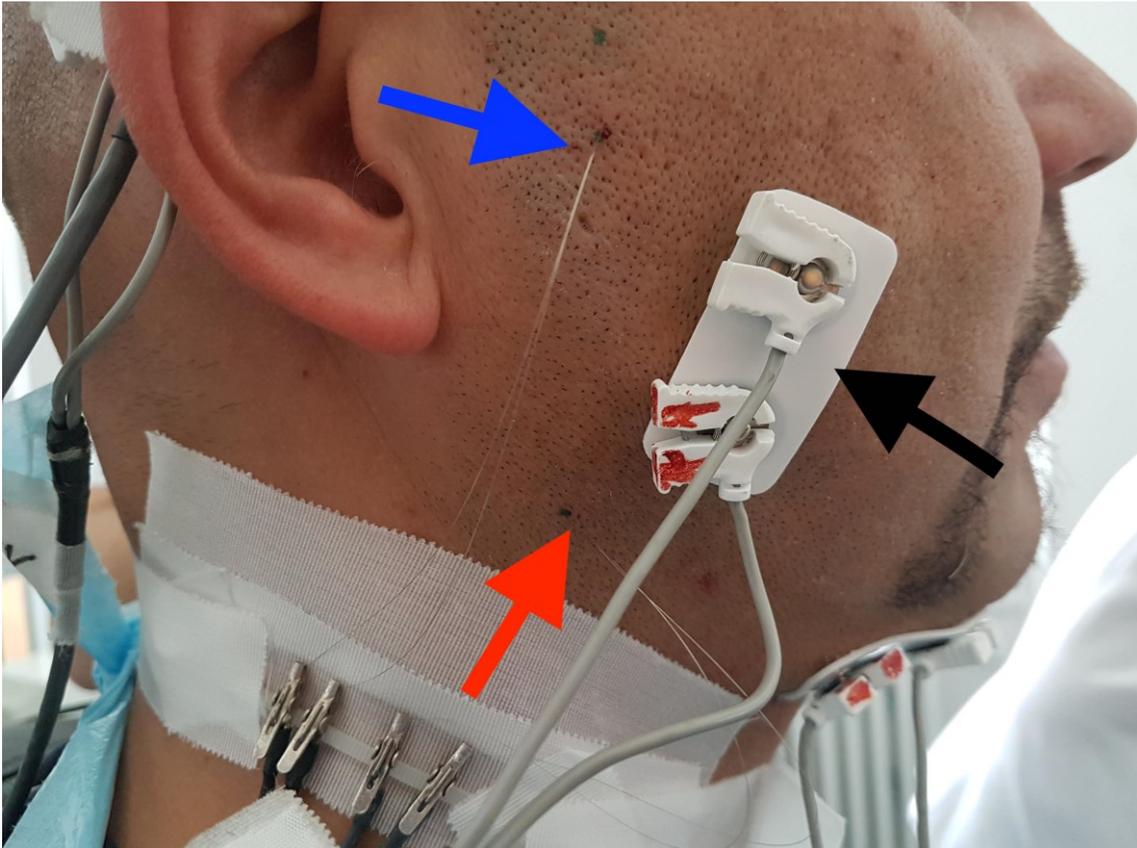


Abbildung 14: Detailaufnahme eines Probanden nach Applikation der EMG – Elektroden (blauer Pfeil: intramuskuläre Elektrode aus M. pterygoideus lateralis, roter Pfeil: intramuskuläre Elektrode aus M. pterygoideus medialis, schwarzer Pfeil: Oberflächenelektrode auf Muskelbauch des M. masseter in Faserverlauf aufgeklebt)

1.12.2 Messungen

1.12.2.1 EMG Ableitung der Kaumuskulatur

Die EMG – Messungen der Kaumuskeln erfolgte mit Hilfe von Oberflächenelektroden und intramuskulär platzierter Feindrahtelektroden. Die elektromyographischen Signale wurden mit dem Biopac System (MP 100 Biopac, Santa Barbara/CA, USA; Netz- und Batteriebetrieb möglich) und der dazugehörigen Software Acquire (AcqKnowledge 3.9.1. Software, Biopac Systems Inc., Santa Barbara, CA, USA) registriert und digitalisiert. Dabei wurde eine Abtastrate von 1000 Hz verwendet.

EMG - Messung als Normierungsgrundlage:

Um alle folgenden EMG - Messungen in Relation setzen zu können und als Referenz zur Normierung der beim Kauen generierten Aktivitäten wurde MVC (maximale voluntäre Kontraktion), also die maximal generierbare Muskelkraft des Individuums, bestimmt. Dazu mussten die Probanden mit maximaler Muskelkraft auf zwei Watterollen, bilateral im Prämolaren-Molaren Bereich gesetzt, beißen. Dieser Wert diente der Normierung der individuellen EMG Daten, um verlässliche Vergleiche zwischen Probanden zu ermöglichen:

Diese und die folgenden EMG - Messungen wurden mittels Acquire durchgeführt und für die spätere Analyse und Normierung als .csv Dateien exportiert und in MatLab importiert.

1.12.2.2 Kinematik

Zur Erfassung der Unterkieferbewegungen wurde das elektronische Registrierungssystem K7, eine elektromagnetische raumorientierte 3D-Messung (SinfoMed K7 v12.0) verwendet. Hierbei handelt es sich um ein Messsystem, das die Kieferbewegungen mittels eines statischen Magnetfeldes aufzeichnet. Die Messeinheit besteht aus einem Gesichtsbogen, der am Schädel des Probanden befestigt wird. Vestibulär, an den Frontzähnen des Unterkiefers wird ein kleiner Magnet befestigt, der bei Bewegungen des Unterkiefers im primären Magnetfeld der Messeinheit registrierbare Veränderungen in der Magnetfeldstärke erzeugt. Diese zeitlichen und räumlichen Veränderungen im primären Magnetfeld der Messeinheit werden anschließend in eine dynamische Aufzeichnung am K7 umgesetzt. Damit kann eine berührungslose Erfassung der Bewegungen des Unterkiefers stattfinden.

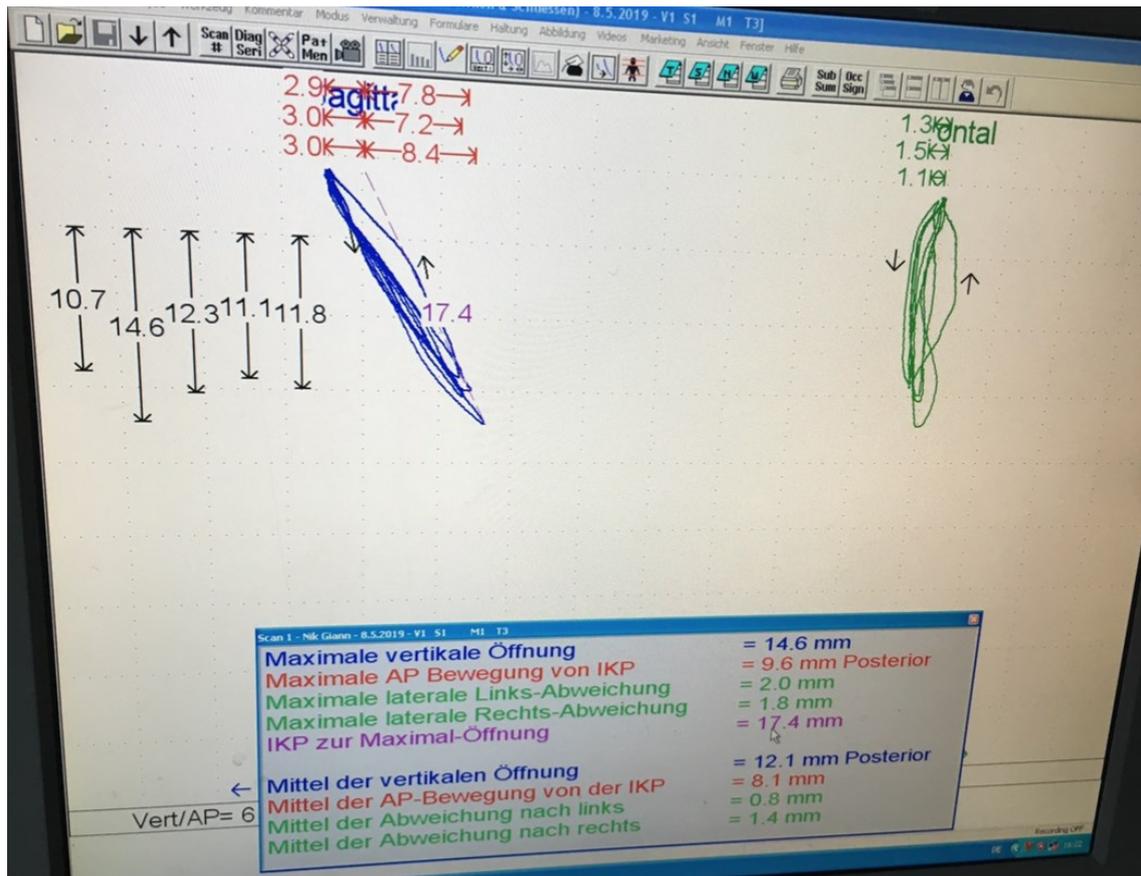


Abbildung 15: aufgezeichnete kinematische Daten eines Probanden. Zu sehen ist die räumliche Bewegungsspur des Inzisalpunktes des Unterkiefers für eine natürliche Kaubewegung in der Sagittal- und Frontalebene.

1.12.2.3 Kaukraft

Die okklusal getragenen Schienen dienen zur Aufnahme des Drucksensors und des Kauguts. Diese aus Tiefziehfolien hergestellten Sensorträger wurden über den Zähnen des Unter- und Oberkiefers getragen und besaßen einpolymerisierte Haltedorne aus Metall.



Abbildung 16: Unterkiefermodell mit Trägerschiene und okklusal fixiertem „Pad“.

Um die beim Kauen auftretende Kraft in Form von erzeugtem Druck messen zu können, wurden selbst entwickelte kleine mit Flüssigkeit gefüllte Kunststoffkissen (Aqualizer, Bausch KG, Köln, Deutschland), im Folgenden als „Pads“ bezeichnet, verwendet. Diese dienen unilateral, auf die Okklusion aufgebracht, als ein geschlossenes hydraulisches System mit integriertem Druckmesser (SG-TG-12E/AKKU-010-Z0162, ALTHEN GmbH Meß- und Sensortechnik, Kelkheim, Deutschland). Der Druck (Kaukraft) wurde in Acquire nach Normierung in Newton (N) aufgezeichnet.



Abbildung 17: Druckmesser der Firma Althen

1.12.2.4 Beißkraft

Die Beißkraft, definiert als der zwischen Oberkiefer- und Unterkieferzähnen generierte Druck und damit der Kraft pro Fläche, wurde in N kalibriert und aufgezeichnet.

1.12.2.5 Hauptmessung

Es wurden jeweils drei Wiederholungen mit jeweils 10 Kauschlägen gemessen. Dabei erfolgte die gleichzeitige Registrierung der EMG-Ableitungen (MP100, AcqKnowledge 3.9.1. software; Biopac, Santa Barbara, CA, USA) von allen Kaumuskeln, die erzeugte Kaukraft (durch Drucksensor, mittels hydrostatischen Systems vom KIT entwickelt) auf das Kaugut und die Unterkiefer Bewegungen (mittels K7 - elektromagnetische raumorientierte 3D-Messung – SinfoMed K7 Version 12.0).

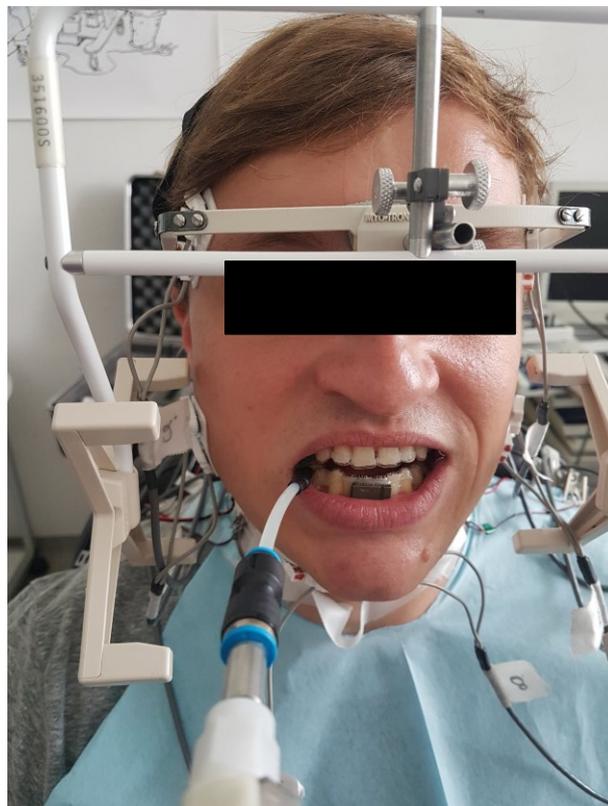


Abbildung 18: Proband während Hauptmessung mit allen Messvorrichtungen.

Methodik

Die Daten wurden bei unilateralem Kauen (auf der bevorzugten Kauseite) aufgenommen, dreimal mit spröder Testnahrung (Karotte) und dreimal mit zähelastischer Nahrung (Fruchtgummi).

Folgende Muskeln wurden oberflächlich abgeleitet:

- M. temporalis posterior der Kauseite → TP+
- M. temporalis anterior der Kauseite → TA+
- M. masseter der Kauseite → MA+
- M. digastricus der Kauseite → DI+
- M. temporalis posterior kontralateral (auf der Nicht-Kauseite) → TP-
- M. temporalis anterior kontralateral → TA-
- M. masseter kontralateral → MA-
- M. digastricus kontralateral → DI-

Folgende Muskeln wurden intramuskulär abgeleitet:

- M. pterygoideus lateralis der Kauseite → PL+
- M. pterygoideus medialis der Kauseite → PM-
- M. pterygoideus lateralis kontralateral → PL-
- M. pterygoideus medialis kontralateral → PM-

Die Registrierung der EMGs wurde bei allen 14 Probanden sowohl mit Karotte, als auch mit Fruchtgummi vorgenommen.

1.12.2.6 Auswertung

Jeder Proband vollführte drei Wiederholungen a 10 Kauschläge. Die dabei generierten Rohdaten der zeitlichen synchron aufgezeichneten Parameter (EMG-Aktivität aller Kaumuskeln, generierter Druck/Kaukraft und Kinematik) wurden in Acquire auf Plausibilität überprüft und anschließend in ein selbstentwickeltes MatLab-Programm übertragen.

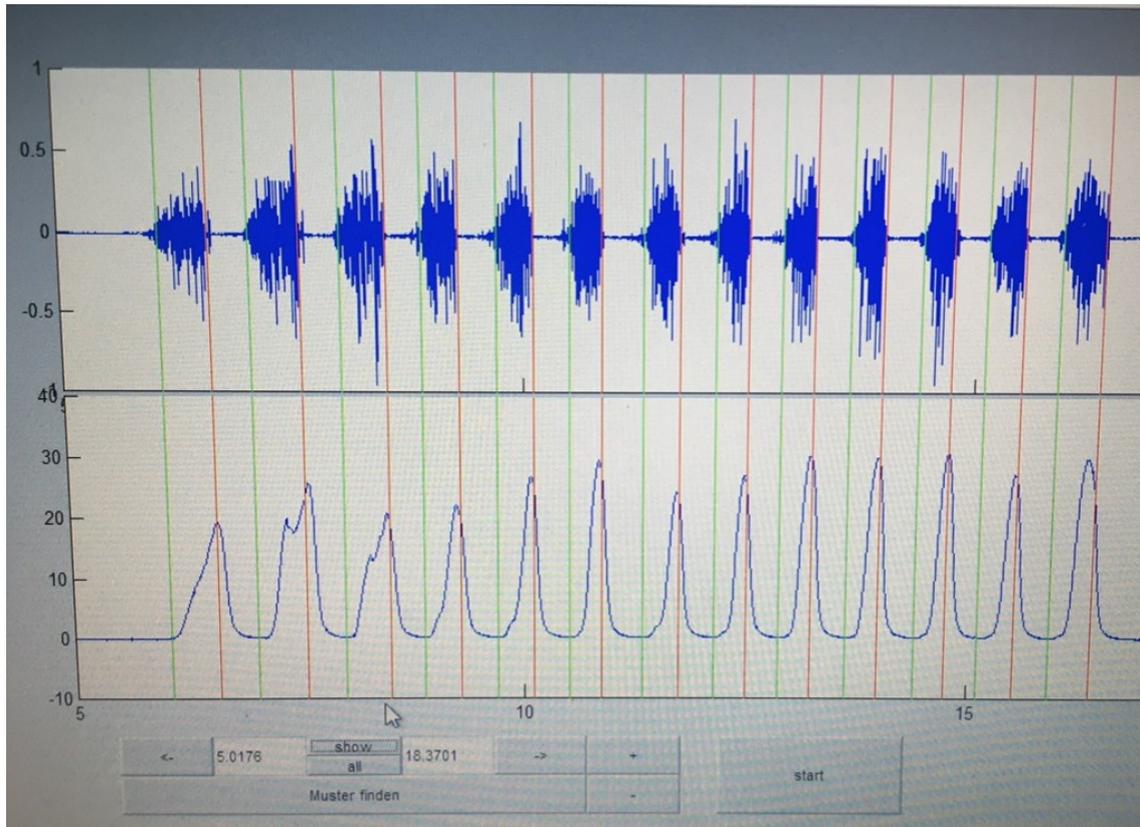


Abbildung 21: Rohdaten in MatLab (oben: Rohsignal eines einzelnen Muskels, unten: Druckverlauf zeitsynchron)

Jeder Kauschlag wurde dann mit dem dafür entwickelten MatLab-Algorithmus in jeweils 10 zeitlich gleich lange Teilstücke unterteilt.

MatLab bildete dann für jeden Teilbereich des Kauschlags einen Root-Mean-Square (RMS) zur Glättung des Signals und normierte anschließend die Daten. Normierungsgrundlage bildete eine zuvor erfolgte Messung der maximalen Beißkraft (MVC) eines jeden Probanden. So konnten die anschließend in Excel exportierten Datensätze als %MVC interindividuell verglichen und statistisch ausgewertet werden.

Nach Mittelwertbildung über die drei Wiederholungen des Kauens, ergaben sich für jeden Probanden 100 Einzelaktivitäten für das jeweilige Kaugut (10 Kauschläge in jeweils 10 Phasen unterteilt).

Methodik

Jeder Kauschlag lässt sich in 10 Phasen verfolgen:

Die ersten 5 Phasen pro Kauschlag stellen die Durchdringung des Speisebolus dar (EMG Aktivität hauptsächlich in den Kieferschließern):

1. Wert: EMG der Kieferschließer zeigt erste Muskelaktivität
2. Wert: Anstieg der Aktivität
3. Wert: Maximum der Aktivität in den Kieferschließern
4. Wert: Abnahme der Aktivität
5. Wert: EMG der Kieferschließer erreicht Minimum

Die letzten 5 Phasen pro Kauschlag bilden zusammen die Öffnungsphase (EMG Aktivität hauptsächlich in den Kieferöffnern):

6. Wert: EMG der Kieferöffner beginnt zu steigen
7. Wert: Phase des stärksten EMG-Anstiegs (Steigung maximal)
8. Wert: Maximum der Aktivität in den Kieferöffnern
9. Wert: Abnahme der Aktivität
10. Wert: EMG der Kieferöffner erreicht Minimum

1.13 Unerwünschte Wirkungen und Risiken

Für die elektromyographischen Ableitungen sind potentielle allergische Reaktionen gegen die Klebestreifen der EMG-Oberflächenelektroden bekannt. Beim Applizieren der intramuskulären Drahtelektroden sind Punctionen von Gefäßen mit möglicher Hämatombildung als unerwünschte Wirkungen bekannt. Alle Studienteilnehmer wurden dahingehend aufgeklärt.

1.14 Abbruchkriterien der Studie

3.7.1 Individuelle Abbruchkriterien

Ein Patienten-bezogenes individuelles Abbruchkriterium lag vor, wenn das Einverständnis der Patientin/ des Patienten mit oder ohne Angaben von Gründen zurückgezogen wurde. In diesem Fall wurden bereits erhobene Daten von der Auswertung ausgeschlossen.

3.7.2 Abbruchkriterien für die gesamte Studie

Ein Studien-bezogenes Abbruchkriterium lag vor, wenn neue Erkenntnisse anderer Studien, die die Durchführung der Studie entbehrlich machten, identifiziert wurden.

1.15 Rechtliche und ethische Aspekte

Die Untersuchung wurde in Übereinstimmung mit der ärztlichen Berufsordnung und der Deklaration von Helsinki in der Fassung von 2013 sowie dem Bundesdatenschutzgesetz (BDSG) durchgeführt.

Die Teilnahme der Patientinnen und Patienten an der Studie war freiwillig; die Zustimmung konnte jederzeit, ohne Angabe von Gründen und ohne Nachteile für die weitere medizinische Versorgung zurückgezogen werden.

1.15.1 Votum der Ethikkommission

Der Studienplan wurde vor Studienbeginn von der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät Würzburg begutachtet. Das schriftliche, zustimmende Votum der Ethikkommission wurde am 11.07.2016 erteilt. Aktenzeichen: 132/16_z-mk

1.15.2 Patienten-/Probandeninformation/Einwilligungserklärung

Die Patientinnen und Patienten wurden vor Studienbeginn schriftlich und mündlich über Wesen und Tragweite der geplanten Untersuchung, insbesondere über den möglichen Nutzen für Ihre Gesundheit und eventuelle Risiken, aufgeklärt. Ihre Zustimmung wurde durch Unterschrift auf der Einwilligungserklärung dokumentiert. Bei Rücktritt von der Studie wurde bereits gewonnenes Material vernichtet oder beim Patienten angefragt, ob er mit der Auswertung des Materials einverstanden ist.

1.16 Datenanalyse

Basierend auf logistischen Überlegungen sollten 22 Studienteilnehmer untersucht werden. Zwei innerhalb einer Pilotphase und 20 in der Hauptphase. In der vorliegenden Studie sollten Parameter erfasst werden, welche die computerbasierte Simulation ermöglichen. Explorative Statistiken und/oder Gruppenvergleiche o. ä. war nicht geplant. Somit war eine statistische Fallzahlplanung einerseits nicht notwendig und andererseits aufgrund des experimentellen Charakters und der unzureichenden Datenlage in der Literatur auch nicht möglich.

Die Ergebnisse der klinisch-experimentellen, explorativen Studie wurden mit für verbundene Stichproben relevanten Tests untersucht. Mittelwerte und Standardabweichungen wurden gesamt und für spezifische Belastungen angegeben. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt durch Liniengraphiken.

Ergebnisse

1.17 Charakteristika der Studienteilnehmer

Von den 20 für die Studie rekrutierten Probanden mussten die Daten von 6 Probanden gelöscht werden: Bei zwei Probanden mussten die Messreihen während der Hauptmessung auf Grund von Unwohlsein abgebrochen werden und vier weitere Probanden sind zu den vereinbarten Messterminen nicht erschienen. Von den verbliebenen 14 Probanden konnten sämtliche erhobenen Daten ausgewertet und in die Analyse eingeschlossen werden. Die Altersspanne der Teilnehmer reichte von 22 – 42 Jahre, die Hälfte der Probanden war weiblich, und die Mehrzahl der Probanden hatte die bevorzugte Kauseite auf der rechten Seite (Tabelle 2).

Tabelle 2: Probandencharakteristika

Parameter	
Alter (Jahre), Spanne; MW±SA	22-42; 26,7
Geschlecht M/W (n)	7/7
Kauseite rechts/links (n)	9/5

M: männlich; MW: Mittelwert; SA: Standardabweichung; W: weiblich

1.18 EMG-Aktivität

1.18.1 Fruchtgummi

1.18.1.1 Gesamtaktivität

Die mittlere Gesamt EMG-Aktivität (in %MVC, wobei 1=100%) der gemessenen Kaumuskeln über die 10 Kauschläge zeigte, dass besonders die Kieferschliesser Aktivität aufwiesen. In den ersten fünf Phasen des Anstieges der Muskelaktivität der Kieferschließer zeigte Pterygoideus medialis die höchste Muskelakti-

Ergebnisse

vität, gefolgt von Masseter und den beiden Musculi temporales (Tabelle 3, Abbildung 22).

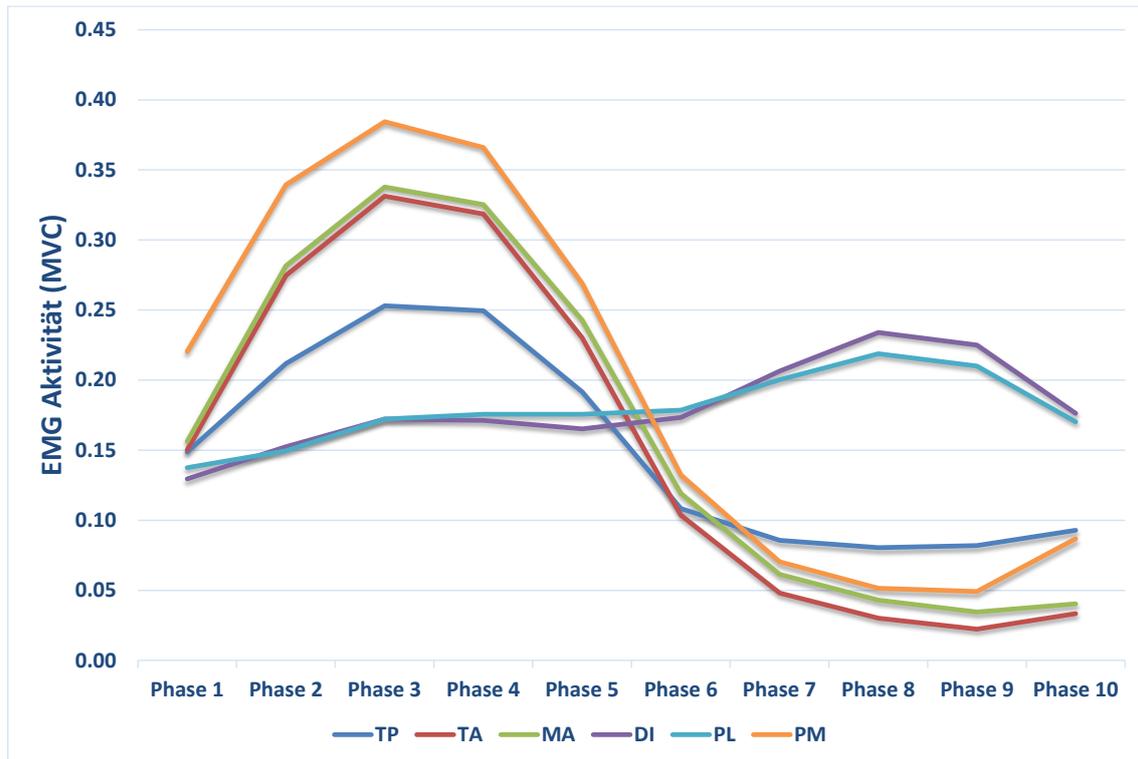
Die EMG-Aktivität der Kieferöffner (Digastricus und Pterygoideus lateralis) stieg in den letzten fünf Phasen leicht an, und war in etwa gleich bei beiden Muskeln, jedoch deutlich unter der EMG-Aktivität der Kieferschließer (Tabelle 3, Abbildung 22).

Tabelle 3: Durchschnittliche EMG-Aktivität der Kaumuskulatur

Mus- kel	EMG-Aktivität der Kieferschließer (%MVC)					EMG-Aktivität der Kieferöffner (%MVC)				
	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Phase 6	Phase 7	Phase 8	Phase 9	Phase 10
TP	0,15	0,21	0,25	0,25	0,19	0,11	0,09	0,08	0,08	0,09
TA	0,15	0,27	0,33	0,32	0,23	0,10	0,05	0,03	0,02	0,03
MA	0,16	0,28	0,34	0,33	0,24	0,12	0,06	0,04	0,03	0,04
DI	0,13	0,15	0,17	0,17	0,17	0,17	0,21	0,23	0,23	0,18
PL	0,14	0,15	0,17	0,18	0,18	0,18	0,20	0,22	0,21	0,17
PM	0,22	0,34	0,38	0,37	0,27	0,13	0,07	0,05	0,05	0,09

DI: Digastricus; MA: Masseter; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; PL: Pterygoideus lateralis; PM: Pterygoideus medialis; TA: Temporalis anterior; TP: Temporalis posterior

Abbildung 22: Ko-Kontraktionsmuster der Kaumuskulatur



DI: Digastricus; MA: Masseter; %MVC: Maximum Voluntary Contraction (1=100%); PL: Pterygoideus lateralis; PM: Pterygoideus medialis; TA: Temporalis anterior; TP: Temporalis posterior

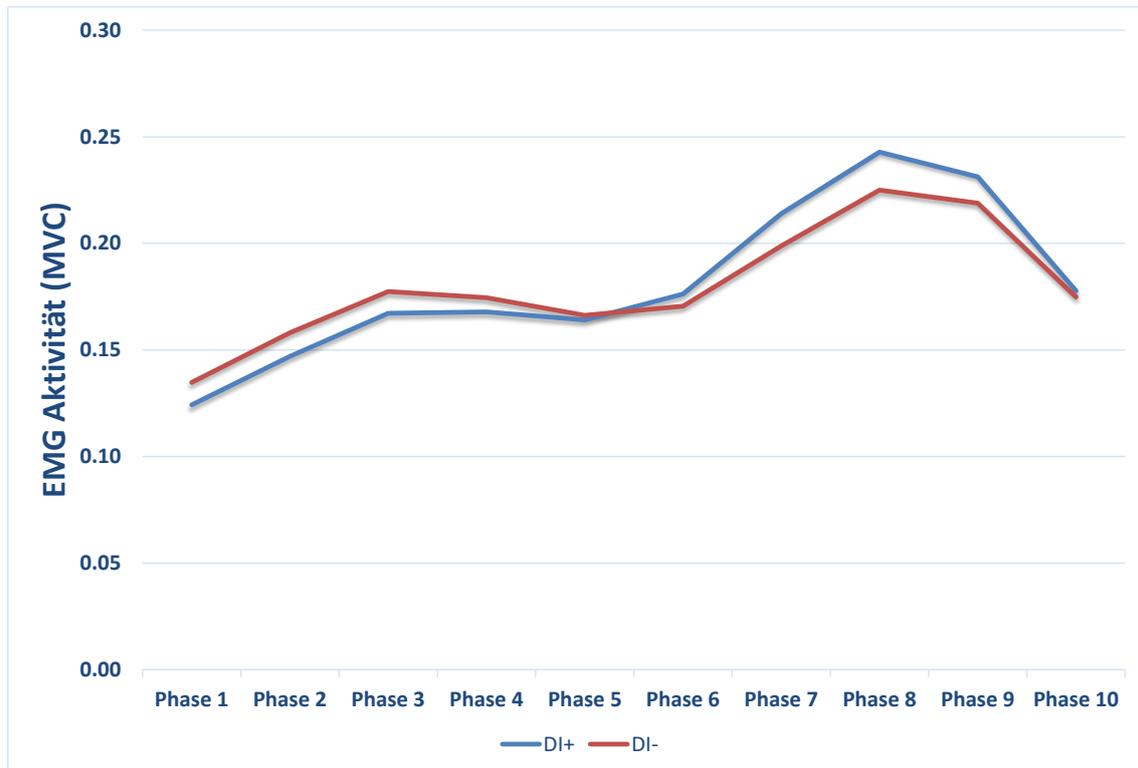
1.18.1.2 In Abhängigkeit von der bevorzugten Kauseite

Bei den Muskelaktivitäten der Kieferöffner wurde sowohl bei der bevorzugten Kauseite als auch bei der nichtbevorzugten Kauseite ein zwischen den Gruppen statistisch nicht-signifikanter Anstieg der EMG-Aktivität ab Phase 6 beobachtet ($p=0,711$), obgleich im Trend die Aktivität des Digastricus der bevorzugten Kauseite etwas höher lag (Abbildung 23).

Ein ähnliches Muster konnte ebenso für den Pterygoideus lateralis beobachtet werden (t-test, $p=0,499$) (Abbildung 24).

Ergebnisse

Abbildung 23: Durchschnittliche EMG Aktivität des M. digastricus, bevorzugte Kauseite vs. nicht bevorzugte Seite



DI: Digastricus; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; +: bevorzugte Kauseite; -: nicht-bevorzugte Kauseite

Ergebnisse

Abbildung 24: Durchschnittliche EMG Aktivität des Pterygoideus lateralis, bevorzugte Kauseite vs. nicht bevorzugte Seite

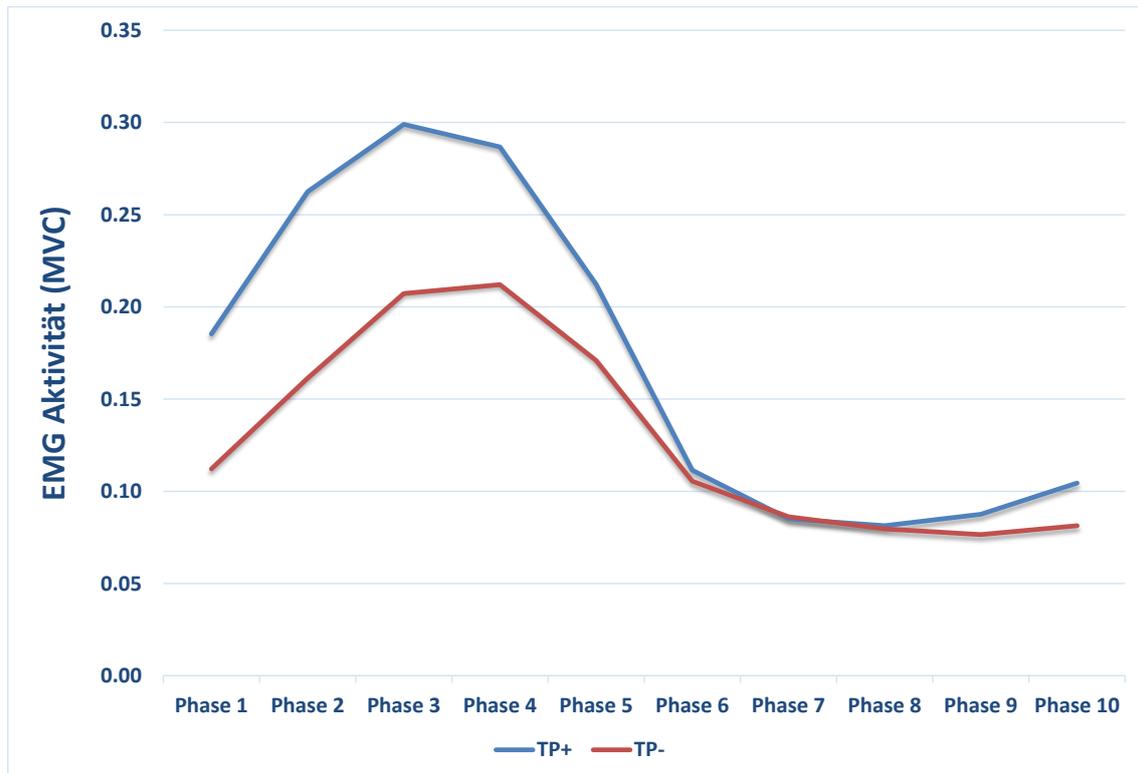


PL: Pterygoideus lateralis; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; +: bevorzugte Kauseite; -: nicht-bevorzugte Kauseite

Bei den Muskelaktivitäten der Kiefereschließer war bei beiden Temporalis Muskeln die EMG-Aktivität der bevorzugten Kauseite bis Phase 5 statistisch signifikant höher als die der nicht-bevorzugten Kauseite (Temporalis posterior: $p=0,008$; Temporalis anterior $p=0,01$) (Abbildung 25 und Abbildung 26).

Ergebnisse

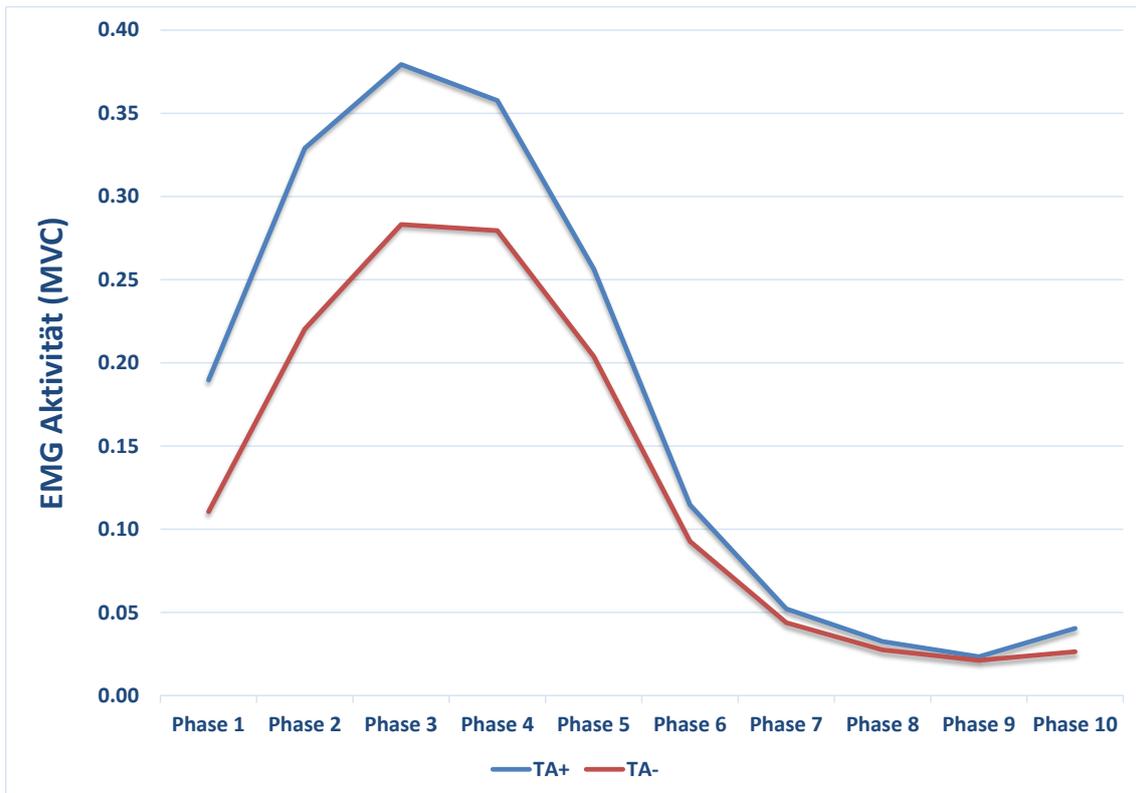
Abbildung 25: Durchschnittliche EMG Aktivität des Temporalis posterior, bevorzugte Kauseite vs. nicht bevorzugte Seite



TP: Temporalis posterior; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; +: bevorzugte Kauseite; -: nicht-bevorzugte Kauseite

Ergebnisse

Abbildung 26: Durchschnittliche EMG Aktivität des Temporalis anterior, bevorzugte Kauseite vs. nicht bevorzugte Seite

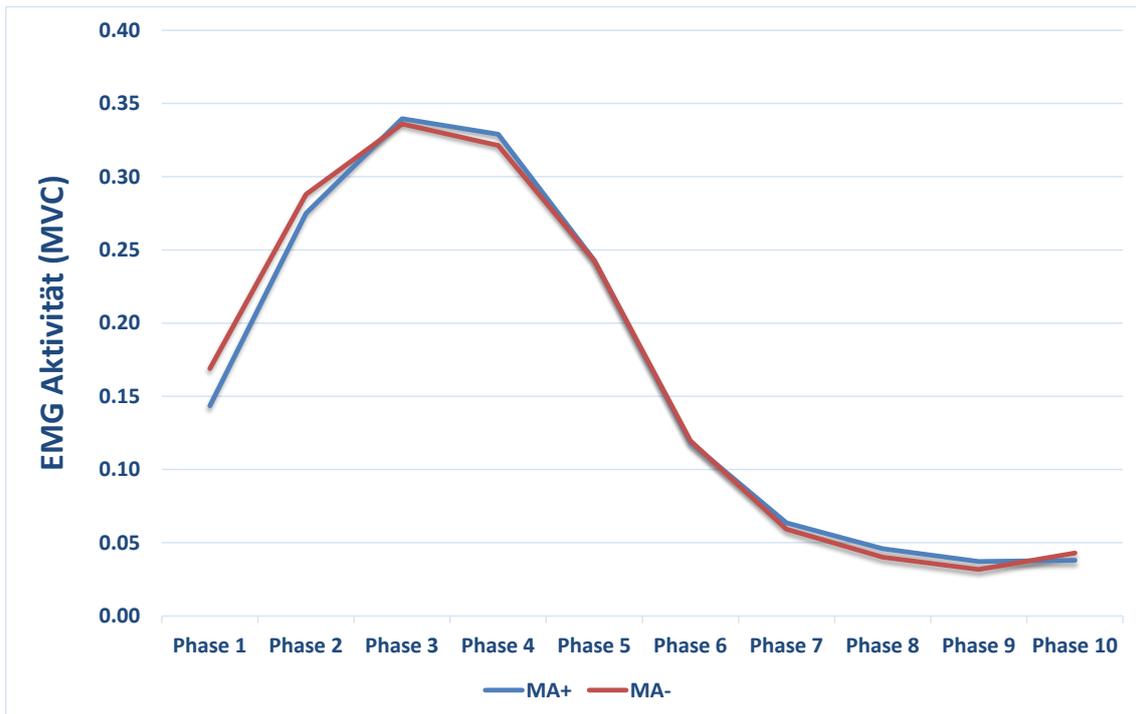


TA: Temporalis anterior; MVC: Maximum Voluntary Contraction; +: bevorzugte Kauseite; -: nicht-bevorzugte Kauseite

Beim Masseter war die Muskelaktivität während der Kieferschließung auf beiden Kauseiten gleich hoch ($p=0,610$) (Abbildung 27).

Ergebnisse

Abbildung 27: Durchschnittliche EMG Aktivität des M. masseter, bevorzugte Kauseite vs. nicht bevorzugte Seite

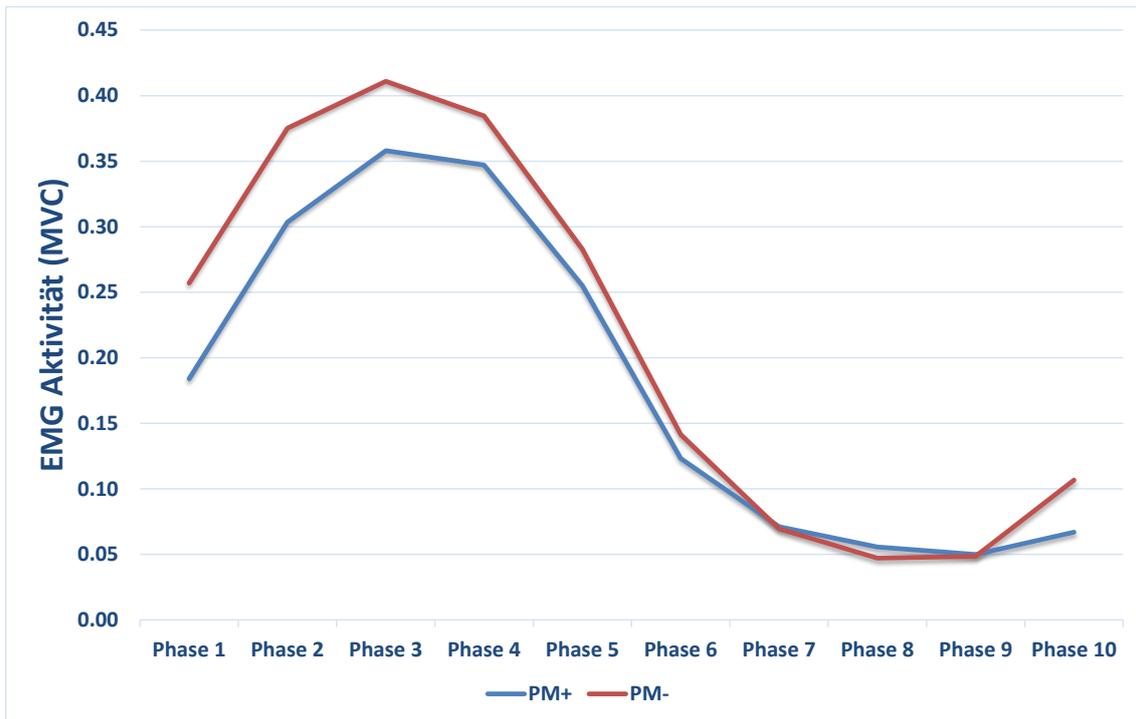


MA: Masseter; MVC: Maximum Voluntary Contraction; +: bevorzugte Kauseite; -: nicht-bevorzugte Kauseite

Im Gegensatz dazu war die Aktivität des Pterygoideus medialis auf der nicht bevorzugten Kauseite statistisch signifikant höher als auf der bevorzugten Kauseite ($p=0,009$) (Abbildung 28).

Ergebnisse

Abbildung 28: Durchschnittliche EMG Aktivität des Pterygoideus medialis, bevorzugte Kauseite vs. nicht bevorzugte Seite



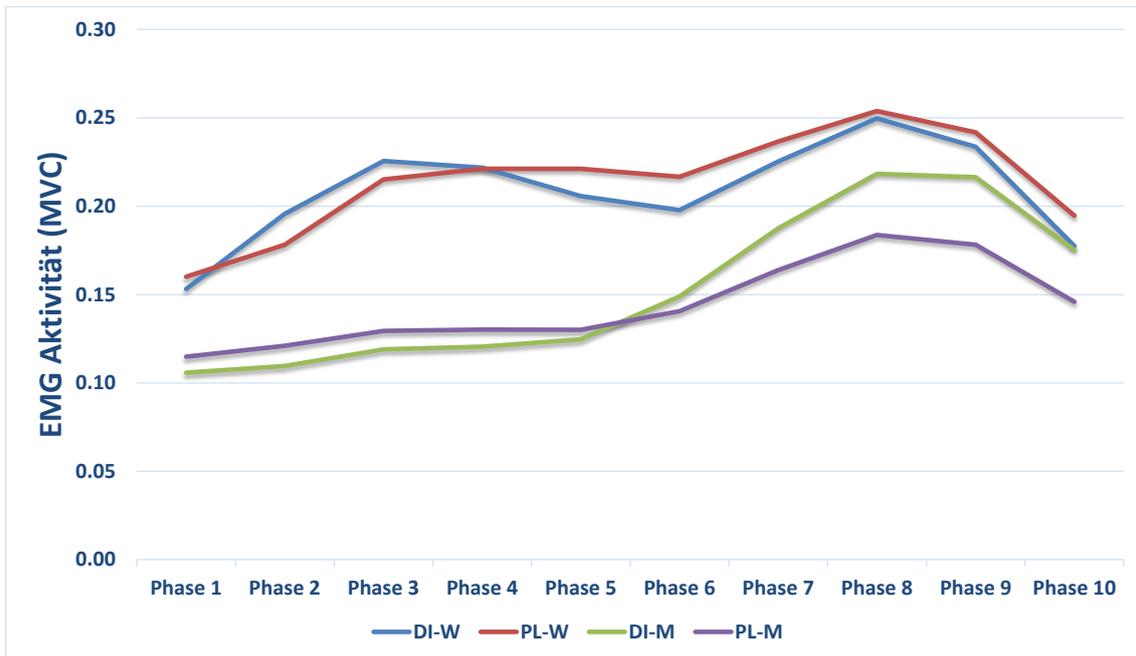
PM: Pterygoideus medialis; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; +: bevorzugte Kauseite; -: nicht-bevorzugte Kauseite

1.18.1.3 In Abhängigkeit vom Geschlecht

Bei den Muskelaktivitäten der Kieferöffner waren sowohl beim Digastricus als auch beim Pterygoideus lateralis die mittleren EMG-Aktivitäten der weiblichen Probanden statistisch signifikant höher als die der männlichen ($p < 0,0001$) (Abbildung 29)

Ergebnisse

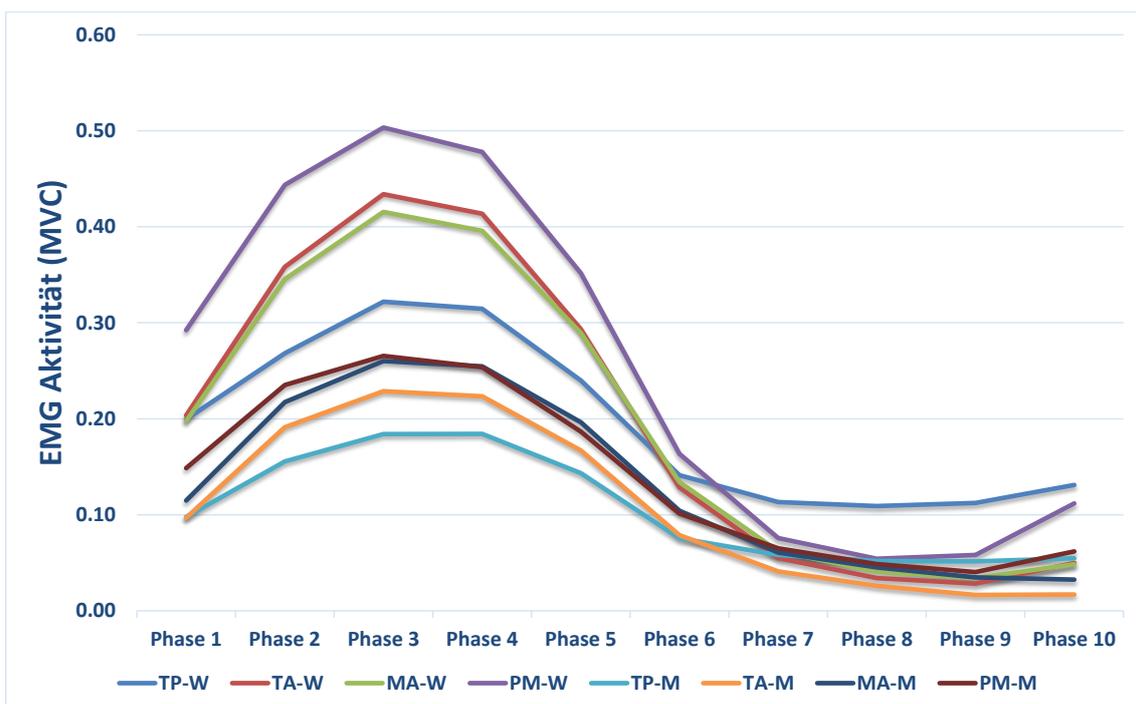
Abbildung 29: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität der Kieferöffner, weibliche vs. männliche Probanden



DI: Digastricus; PL: Pterygoideus lateralis; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; M: männlich; W: weiblich

Derselbe Trend konnte auch für sämtliche Kieferschließer beobachtet werden ($p < 0,0001$) (Abbildung 30).

Abbildung 30: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität der Kieferschließer, weibliche vs. männliche Probanden



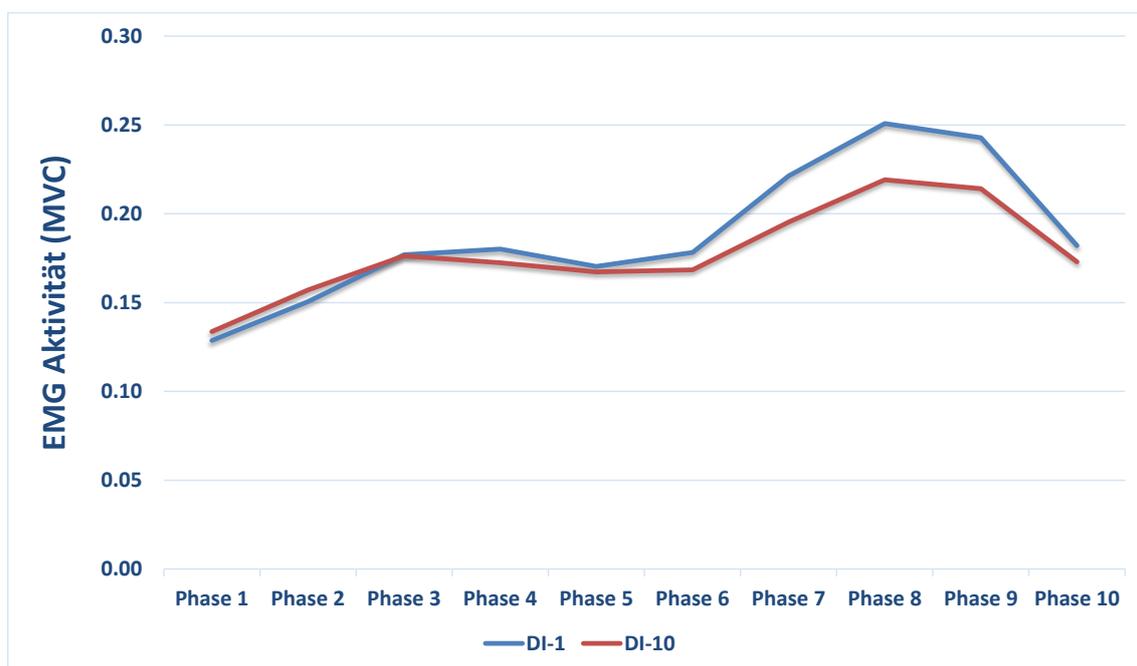
Ergebnisse

MA: Masseter; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; PM: Pterygoideus medialis; TA: Temporalis anterior; TP: Temporalis posterior; M: männlich; W: weiblich

1.18.1.4 In Abhängigkeit vom Kauschlag

Bei den Muskelaktivitäten der Kieferöffner waren beim Digastricus die mittleren EMG-Aktivitäten beim ersten Kauschlag statistisch signifikant höher als beim letzten gemessenen Kauschlag ($p=0,039$) (Abbildung 31).

Abbildung 31: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität des M. digastricus, erster Kauschlag vs. letzter Kauschlag

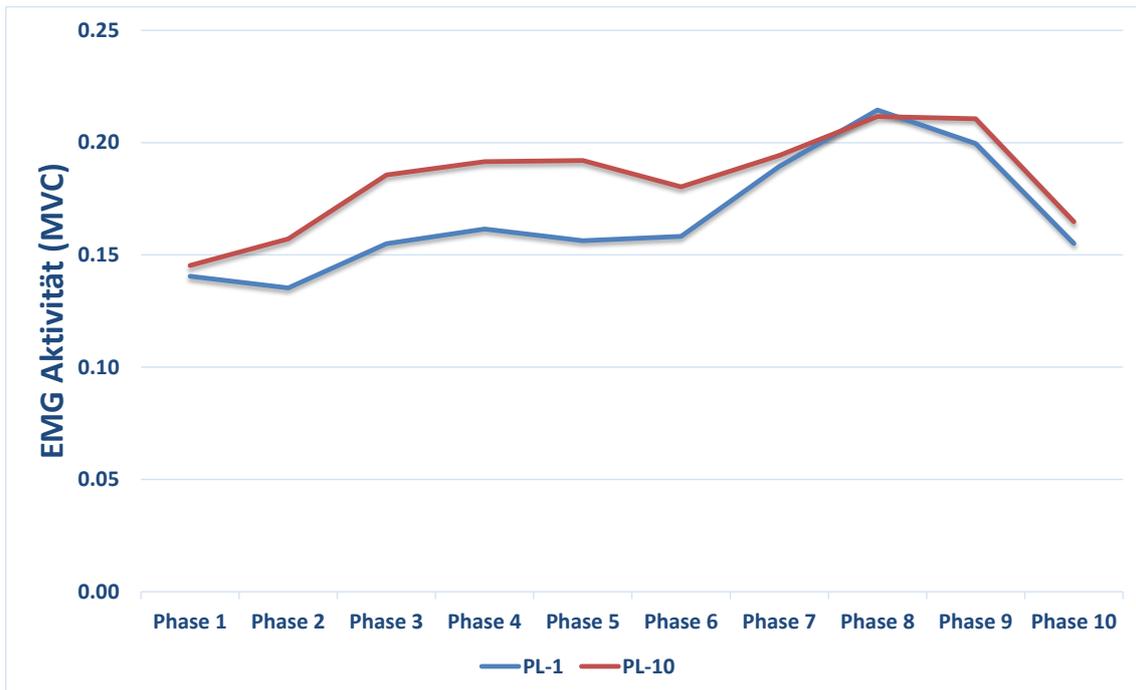


DI: Digastricus; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; DI-1: Gesamt-EMG Aktivität des M. digastricus beim ersten Kauschlag; DI-10: Gesamt-EMG Aktivität des M. digastricus beim zehnten (letzter) Kauschlag

Im Gegensatz dazu waren die Muskelaktivitäten des Pterygoideus lateralis beim letzten Kauschlag statistisch signifikant höher als beim ersten ($p=0,003$) (Abbildung 32)

Ergebnisse

Abbildung 32: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität des Pterygoideus lateralis, erster Kauschlag vs. letzter Kauschlag

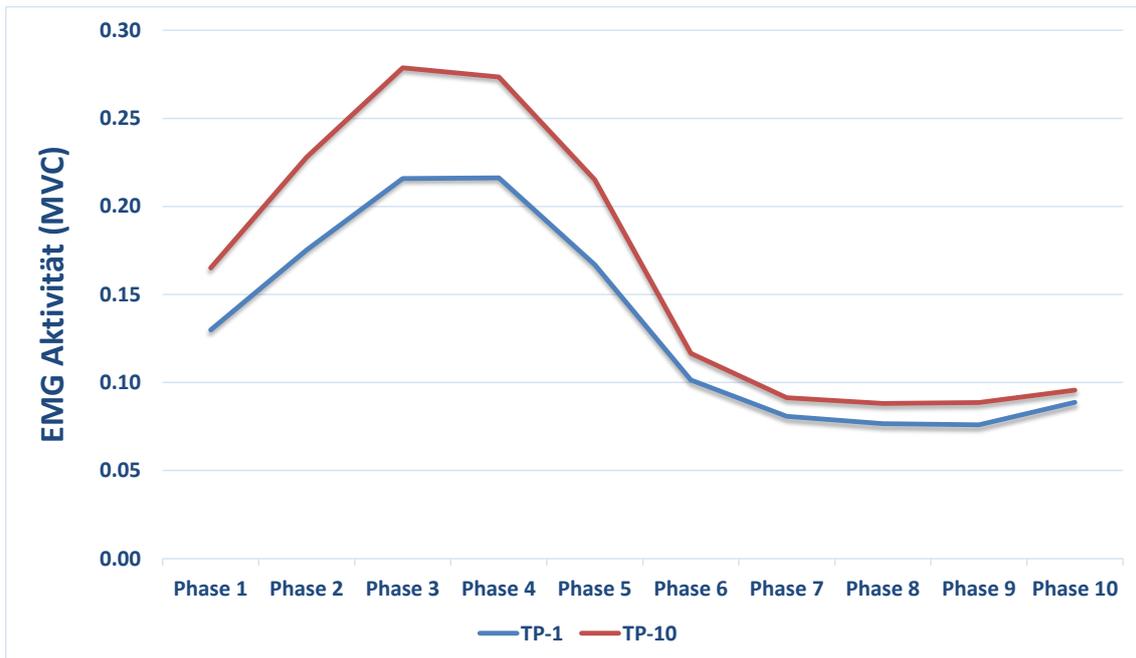


PL: Pterygoideus lateralis; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; PL-1: erster Kauschlag; PL-10: zehnter (letzter) Kauschlag

Die Muskelaktivitäten der Kieferschließer zeigten ausnahmslos eine verstärkte Aktivität beim letzten gemessenen Kauschlag, wobei bei allen Muskeln außer dem Pterygoideus medialis statistisch signifikante Unterschiede aufgezeigt werden konnten (Temporalis posterior: $p=0,004$; Temporalis anterior $p=0,032$; Masseter: $p=0,022$; Pterygoideus medialis: $p=0,287$) (Abbildung 33 bis Abbildung 36).

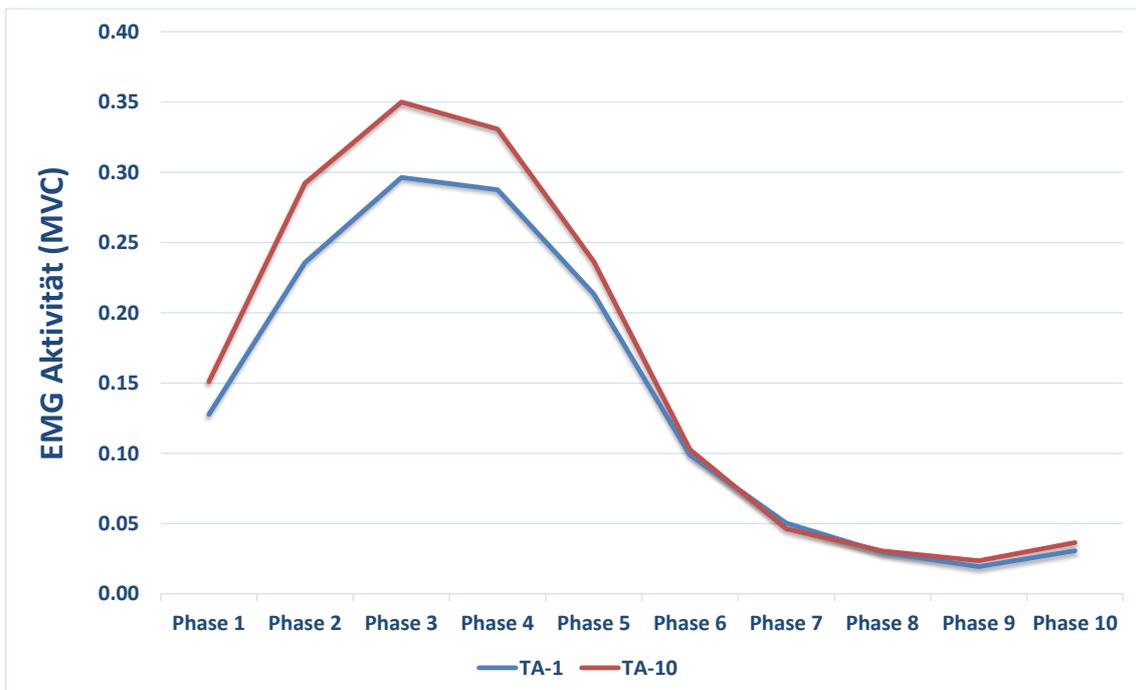
Ergebnisse

Abbildung 33: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität des Temporalis posterior, erster Kauschlag vs. letzter Kauschlag



TP: Temporalis posterior; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; TP-1: erster Kauschlag; TP-10: zehnter (letzter) Kauschlag

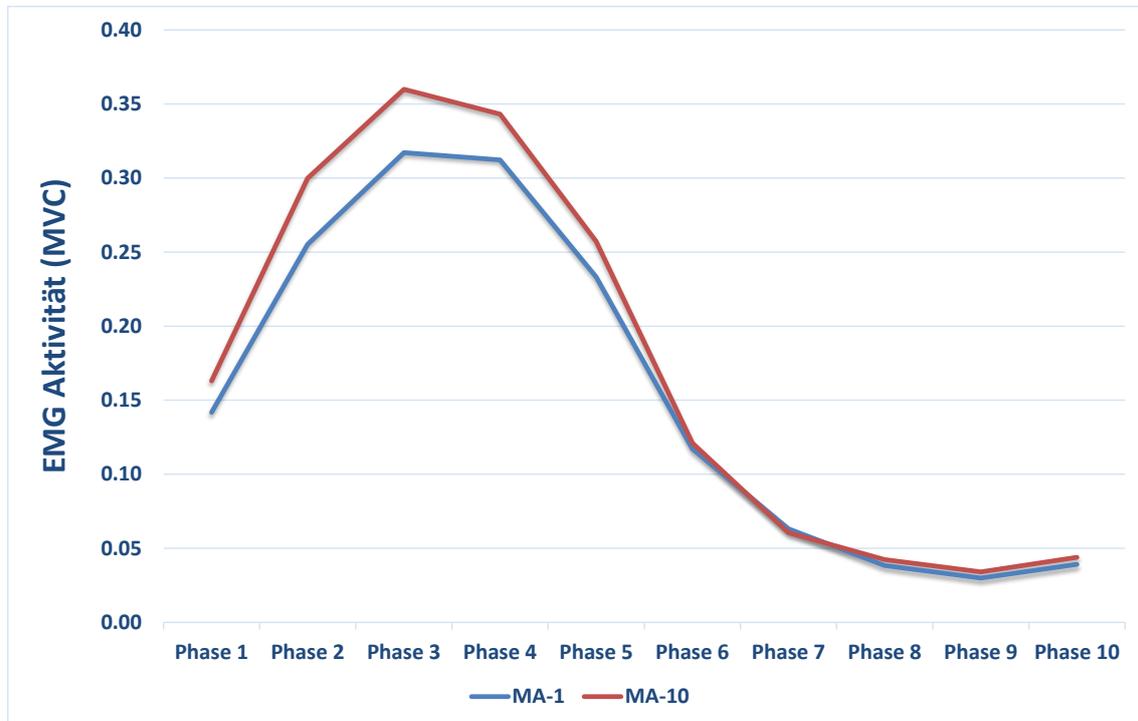
Abbildung 34: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität des Temporalis anterior, erster Kauschlag vs. letzter Kauschlag



Ergebnisse

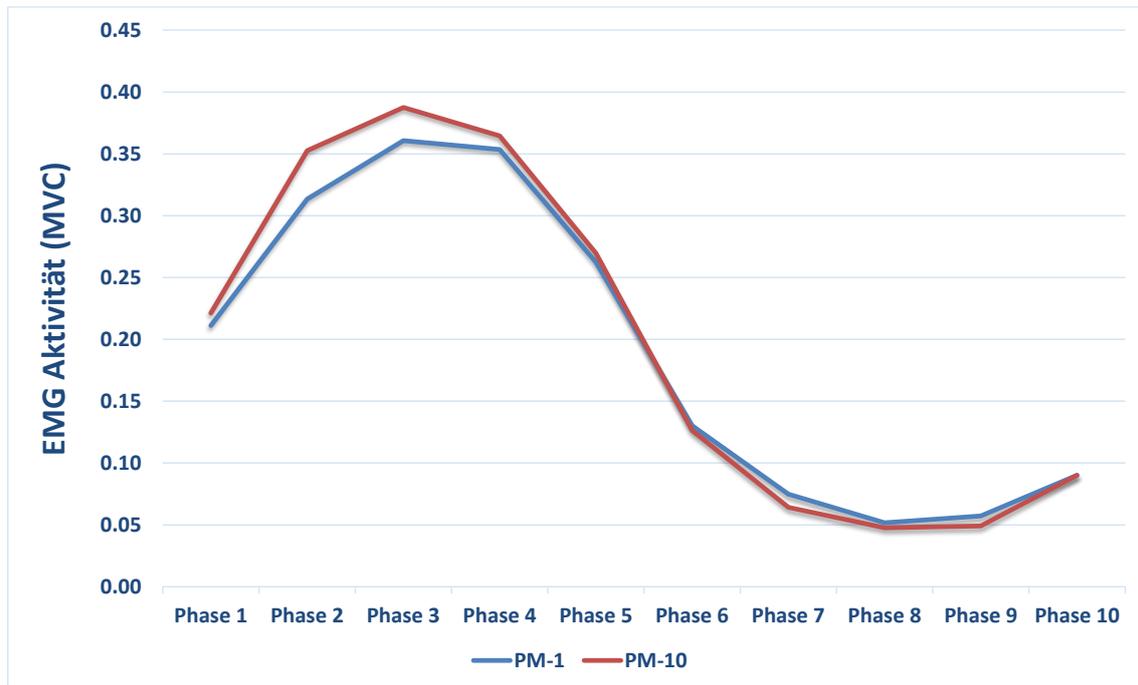
TA: Temporalis anterior; MVC: Maximum Voluntary Contraction; TA-1: erster Kauschlag; TA-10: zehnter (letzter) Kauschlag

Abbildung 35: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität des M. masseter, erster Kauschlag vs. letzter Kauschlag



MA: Masseter; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; MA-1: erster Kauschlag; MA-10: zehnter (letzter) Kauschlag

Abbildung 36: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität des Pterygoideus medialis, erster Kauschlag vs. letzter Kauschlag



PM: Pterygoideus medialis; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; PM-1: erster Kauschlag; PM-10: zehnter (letzter) Kauschlag

1.18.2 Karotte

1.18.2.1 Gesamtaktivität

Die mittlere Gesamt-EMG-Aktivität der gemessenen Kaumuskel über die 10 Kauschläge zeigte in den ersten fünf Phasen des Anstieges der Muskelaktivität der Kieferschließer, dass Pterygoideus medialis die höchste Muskelaktivität aufwies, gefolgt von Temporalis anterior, Masseter und Temporalis posterior (Tabelle 4, Abbildung 37).

Die durchschnittliche EMG-Aktivität der Kieferöffner (Digastricus und Pterygoideus lateralis) stieg in den letzten fünf Phasen leicht an, und war in etwa gleich bei beiden Muskeln, jedoch deutlich unter der EMG-Aktivität der Kieferschließer (Tabelle 4, Abbildung 37).

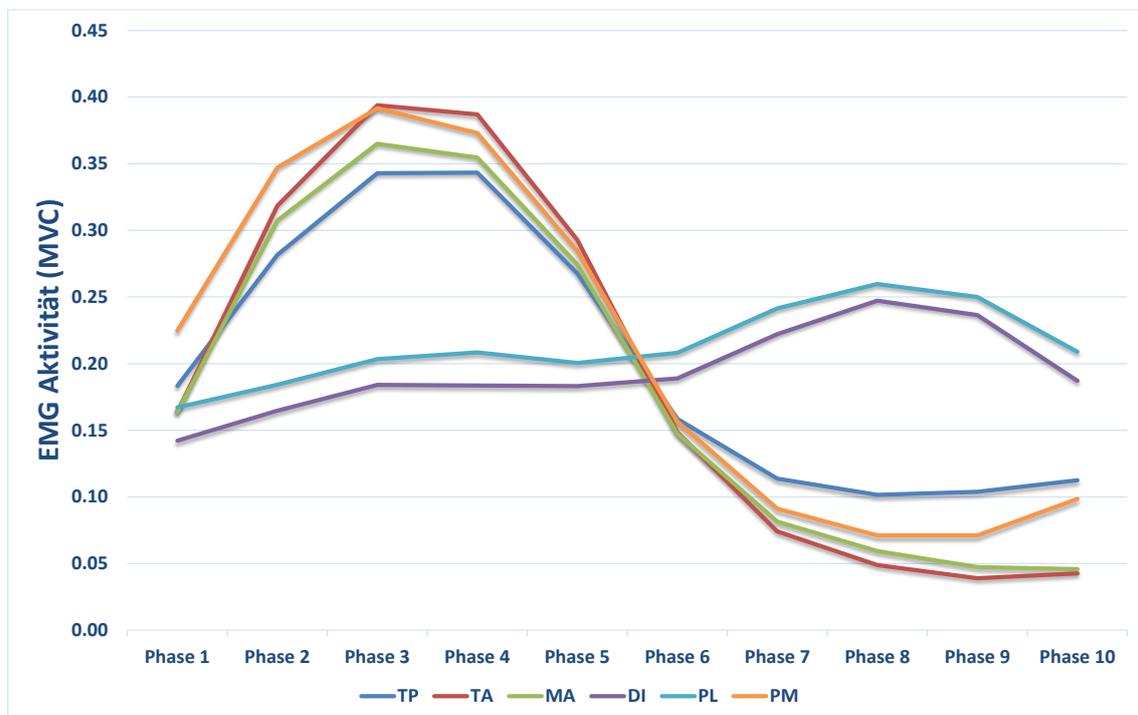
Ergebnisse

Tabelle 4: Durchschnittliche EMG-Aktivität der Kaumuskulatur

Mus- kel	EMG-Aktivität der Kieferschließer (%MVC)					EMG-Aktivität der Kieferöffner (%MVC)				
	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5	Phase 6	Phase 7	Phase 8	Phase 9	Phase 10
TP	0,18	0,28	0,34	0,34	0,27	0,16	0,11	0,10	0,10	0,11
TA	0,16	0,32	0,39	0,39	0,29	0,15	0,07	0,05	0,04	0,04
MA	0,16	0,31	0,36	0,35	0,27	0,15	0,08	0,06	0,05	0,05
DI	0,14	0,16	0,18	0,18	0,18	0,19	0,22	0,25	0,24	0,19
PL	0,17	0,18	0,20	0,21	0,20	0,21	0,24	0,26	0,25	0,21
PM	0,22	0,35	0,39	0,37	0,28	0,16	0,09	0,07	0,07	0,10

DI: Digastricus; MA: Masseter; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; PL: Pterygoideus lateralis; PM: Pterygoideus medialis; TA: Temporalis anterior; TP: Temporalis posterior

Abbildung 37: Ko-kontraktionsmuster der Kaumuskulatur



DI: Digastricus; MA: Masseter; %MVC: Maximum Voluntary Contraction (1=100%); PL: Pterygoideus lateralis; PM: Pterygoideus medialis; TA: Temporalis anterior; TP: Temporalis posterior

1.18.2.2 In Abhängigkeit von der bevorzugten Kauseite

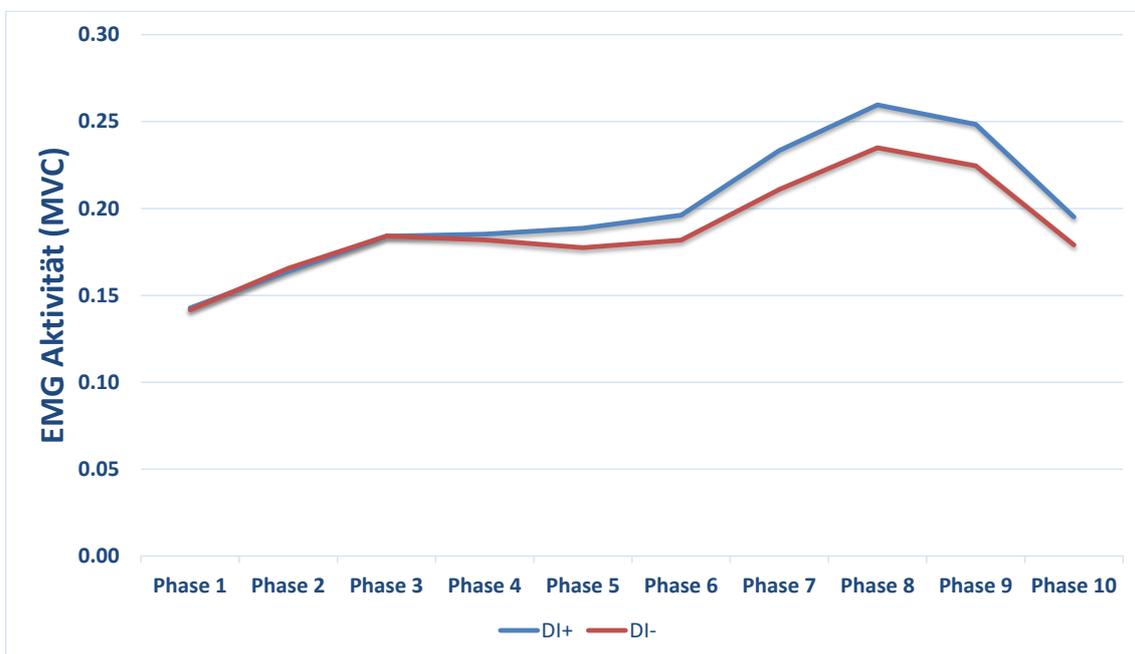
Bei den Muskelaktivitäten der Kieferöffner wurde sowohl bei der bevorzugten Kauseite als auch bei der nicht bevorzugten Kauseite ein zwischen den Gruppen

Ergebnisse

statistisch signifikanter Anstieg der durchschnittlichen EMG-Aktivität ab Phase 6 beobachtet ($p=0,006$), wobei die Aktivität des Digastricus der bevorzugten Kau-
seite etwas höher lag (Abbildung 38).

Für den Pterygoideus lateralis konnte eine statistisch signifikant höhere durchschnittliche EMG-Aktivität der nicht bevorzugten Kauseite beobachtet werden ($p<0,001$) (Abbildung 39).

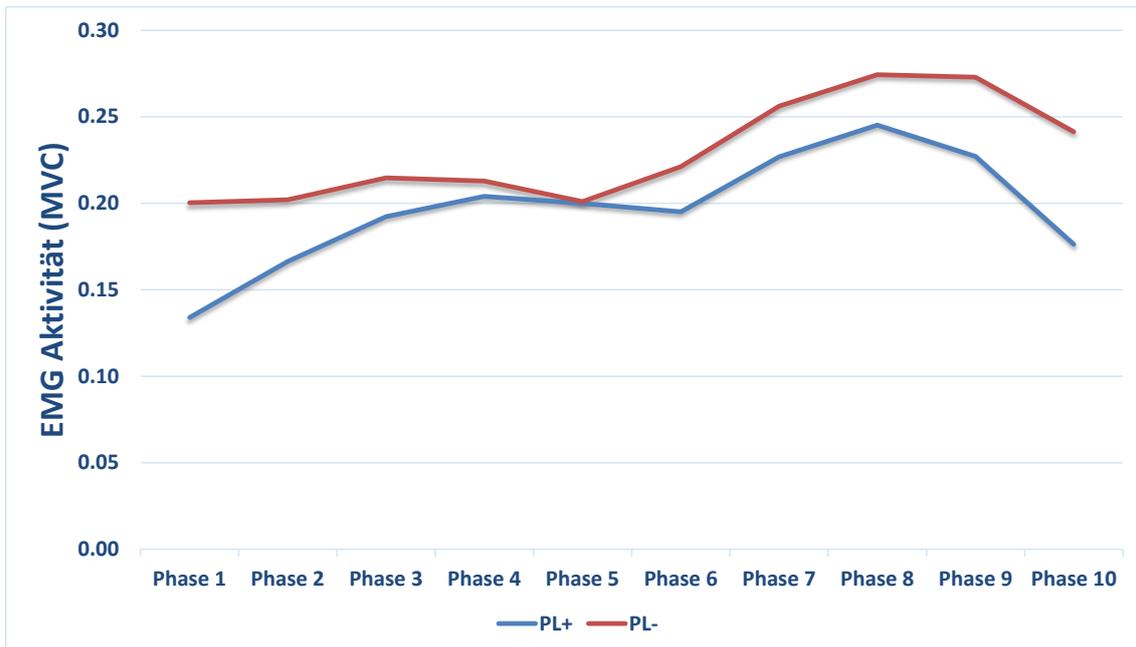
Abbildung 38: Durchschnittliche EMG Aktivität des M. digastricus, bevorzugte Kauseite vs. nicht bevorzugte Seite



DI: Digastricus; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; +: bevorzugte Kauseite; -: nicht-bevorzugte Kauseite

Ergebnisse

Abbildung 39: Durchschnittliche EMG Aktivität des Pterygoideus lateralis, bevorzugte Kauseite vs. nicht bevorzugte Seite

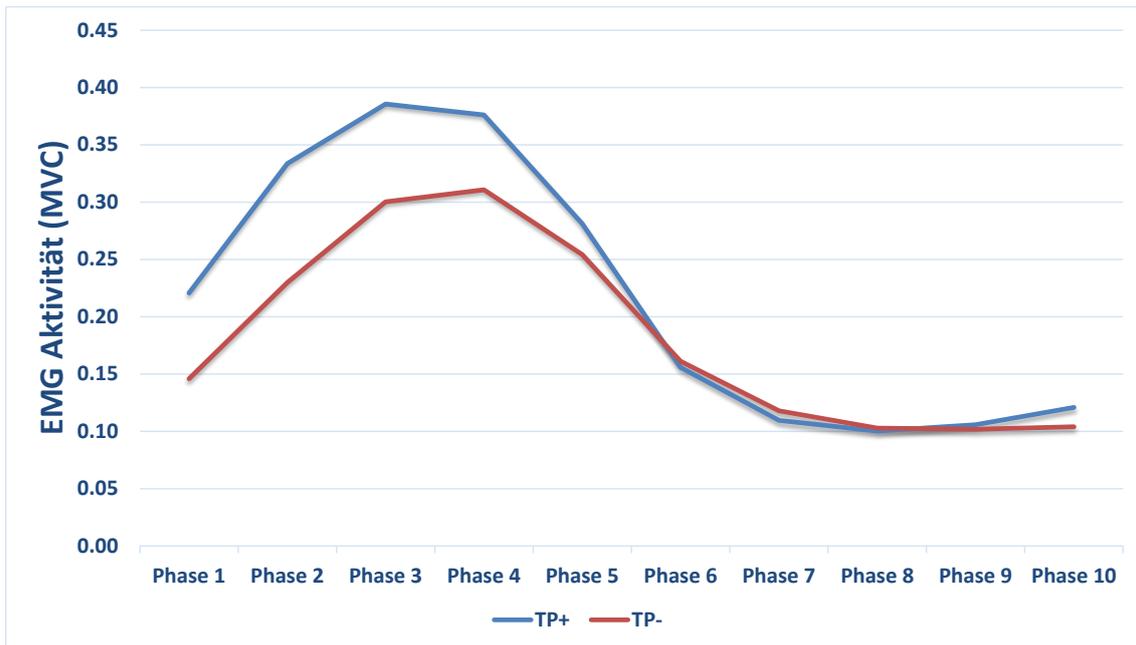


PL: Pterygoideus lateralis; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; +: bevorzugte Kauseite; -: nicht-bevorzugte Kauseite

Bei den Muskelaktivitäten der Kieferschließer war bei beiden Temporalis Muskeln die EMG-Aktivität der bevorzugten Kauseite bis Phase 5 statistisch signifikant höher als bei der nicht bevorzugten Kauseite (Temporalis posterior: $p=0,024$; Temporalis anterior $p=0,007$) (Abbildung 40 und Abbildung 41).

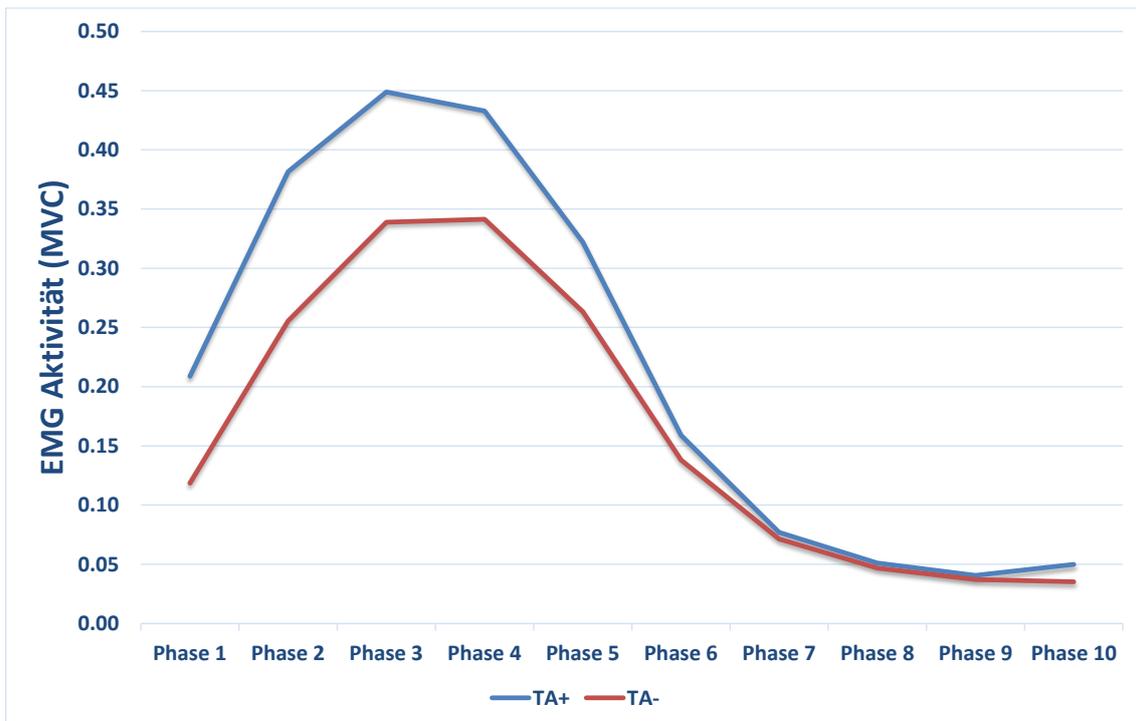
Ergebnisse

Abbildung 40: Durchschnittliche EMG Aktivität des Temporalis posterior, bevorzugte Kauseite vs. nicht bevorzugte Seite



TP: Temporalis posterior; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; +: bevorzugte Kauseite; -: nicht-bevorzugte Kauseite

Abbildung 41: Durchschnittliche EMG Aktivität des Temporalis anterior, bevorzugte Kauseite vs. nicht bevorzugte Seite

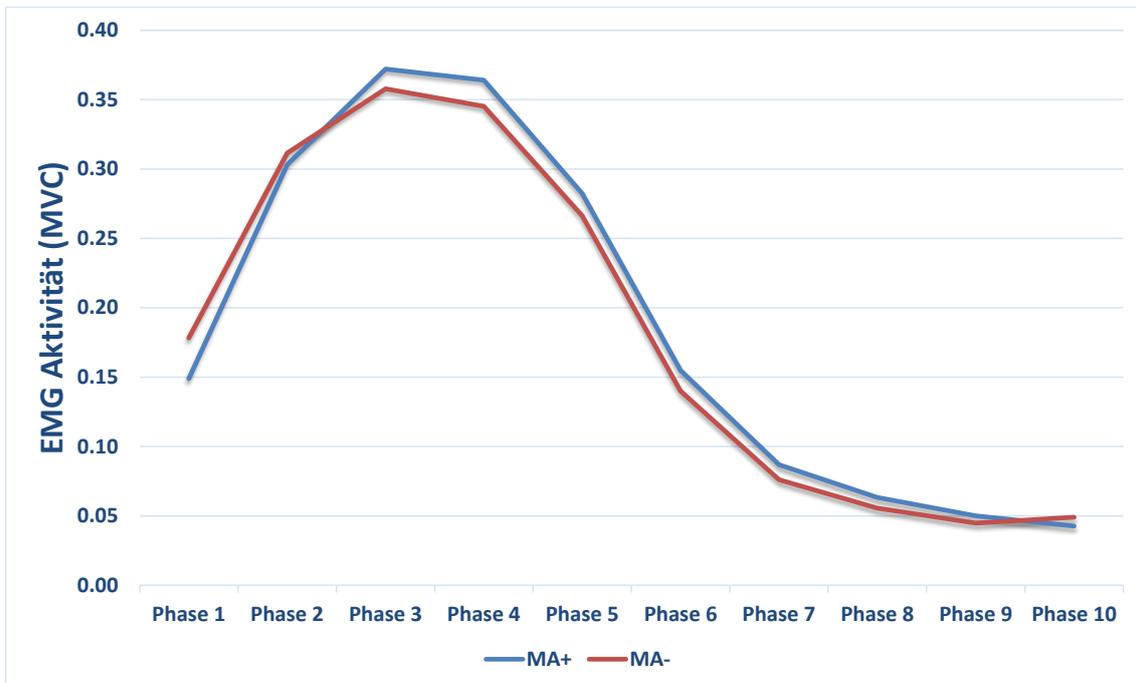


TA: Temporalis anterior; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; +: bevorzugte Kauseite; -: nicht-bevorzugte Kauseite

Ergebnisse

Beim Masseter war die Muskelaktivität während der Kieferschließung auf beiden Kauseiten gleich hoch ($p=0,374$) (Abbildung 42).

Abbildung 42: Durchschnittliche EMG Aktivität des M. masseter, bevorzugte Kauseite vs. nicht bevorzugte Seite

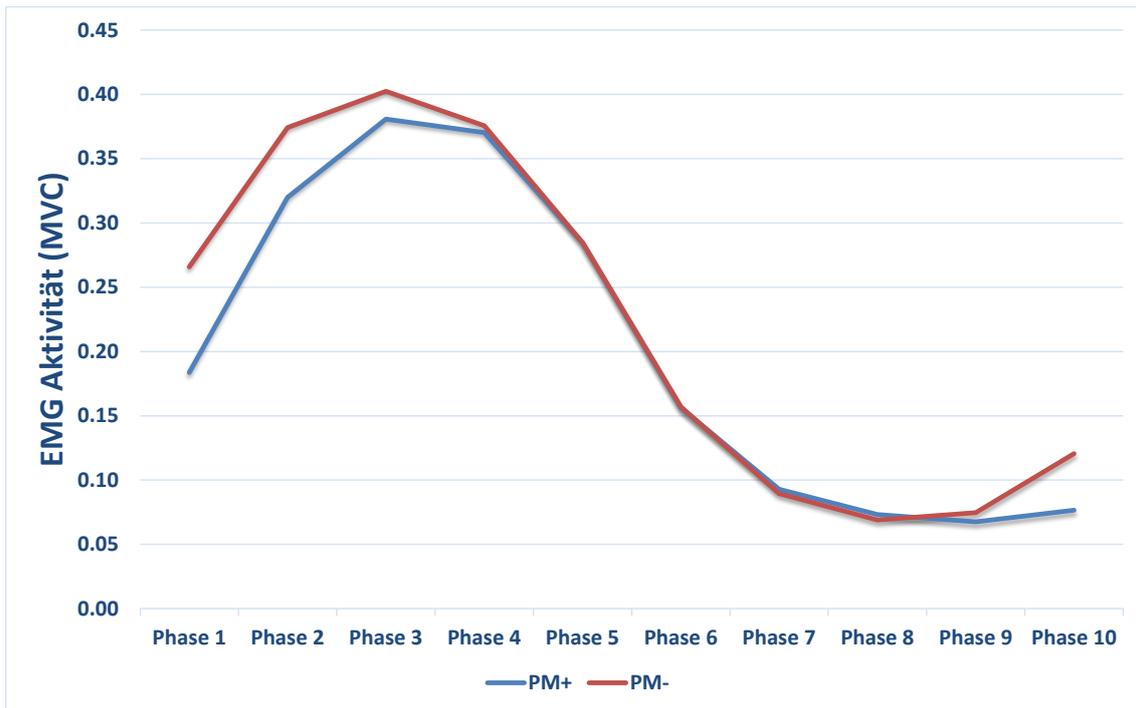


MA: Masseter; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; +: bevorzugte Kauseite; -: nicht-bevorzugte Kauseite

Im Gegensatz dazu war die Aktivität des Pterygoideus medialis auf der nicht bevorzugten Kauseite nicht-signifikant leicht höher als auf der bevorzugten Kauseite ($p=0,056$) (Abbildung 43).

Ergebnisse

Abbildung 43: Durchschnittliche EMG Aktivität des Pterygoideus medialis, bevorzugte Kauseite vs. nicht bevorzugte Seite



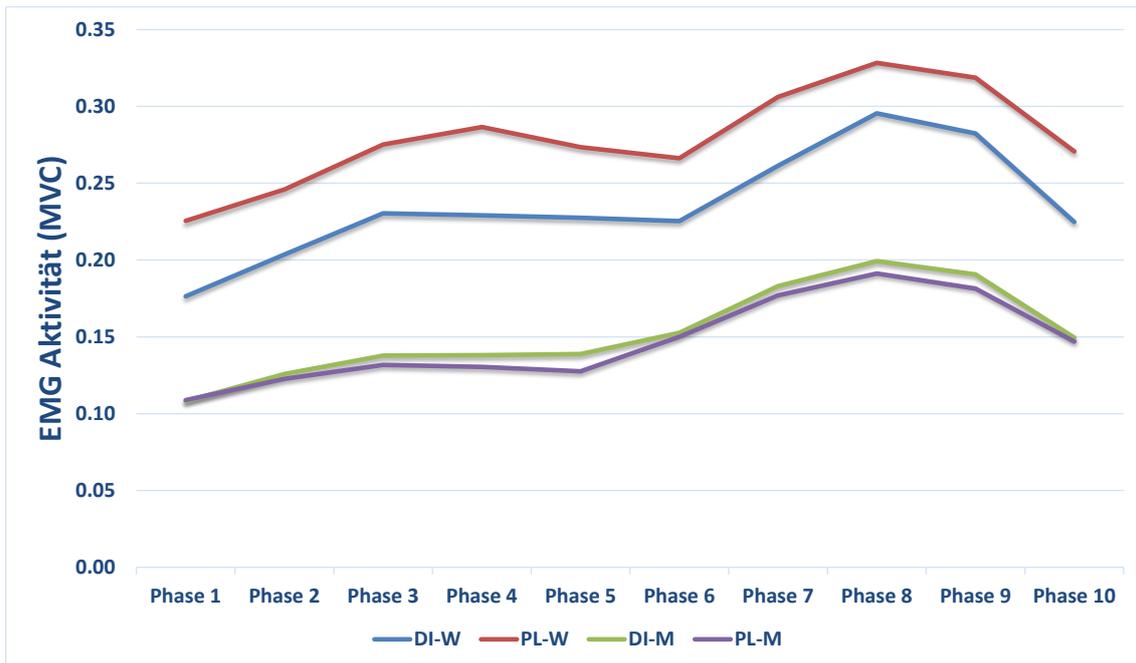
PM: Pterygoideus medialis; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; +: bevorzugte Kauseite; -: nicht-bevorzugte Kauseite

1.18.2.3 In Abhängigkeit vom Geschlecht

Bei den Muskelaktivitäten der Kieferöffner waren sowohl beim Digastricus als auch beim Pterygoideus lateralis die mittleren EMG-Aktivitäten der weiblichen Probanden statistisch signifikant höher als die der männlichen ($p < 0,001$) (Abbildung 44)

Ergebnisse

Abbildung 44: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität der Kieferöffner, weibliche vs. männliche Probanden

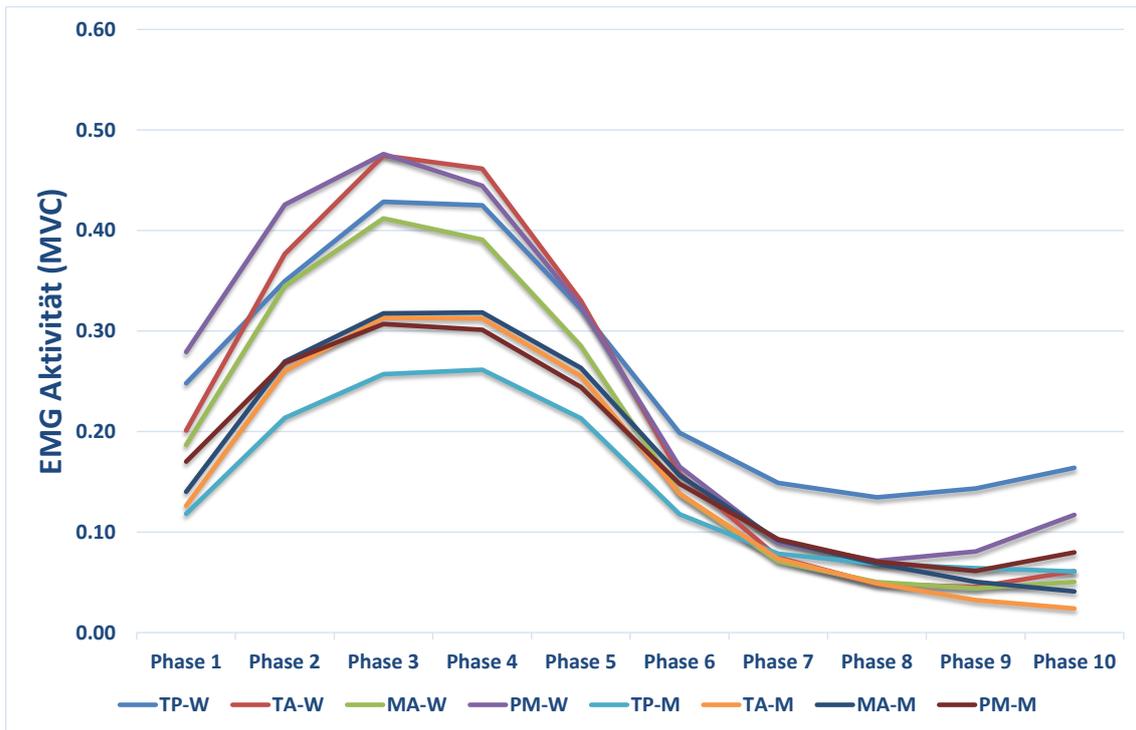


DI: Digastricus; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; PL: Pterygoideus lateralis; M: männlich; W: weiblich

Derselbe Trend konnte auch für sämtliche Kieferschließer beobachtet werden ($p < 0,001$) (Abbildung 45).

Ergebnisse

Abbildung 45: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität der Kieferschließer, weibliche vs. männliche Probanden



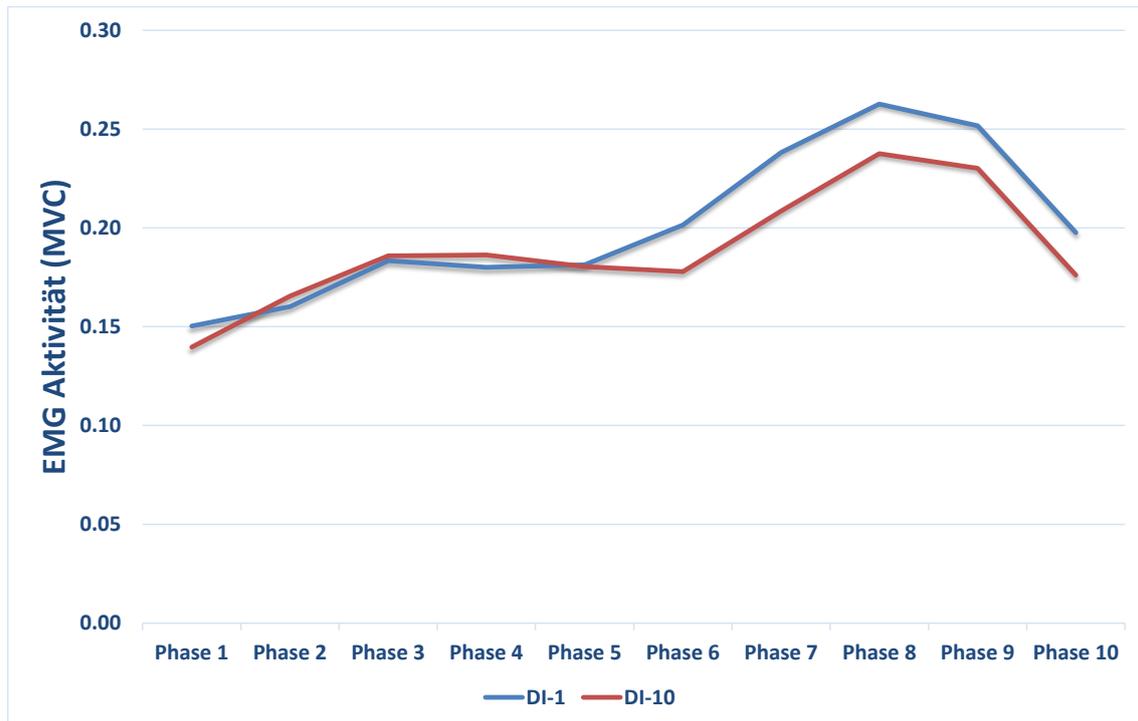
MA: Masseter; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; PM: Pterygoideus medialis; TA: Temporalis anterior; TP: Temporalis posterior; M: männlich; W: weiblich

1.18.2.4 In Abhängigkeit vom Kauschlag

Bei den Muskelaktivitäten der Kieferöffner waren beim Digastricus die mittleren EMG-Aktivitäten beim ersten Kauschlag statistisch signifikant höher als beim letzten gemessenen Kauschlag ($p=0,025$) (Abbildung 46)

Ergebnisse

Abbildung 46: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität des M. digastricus, erster Kauschlag vs. letzter Kauschlag

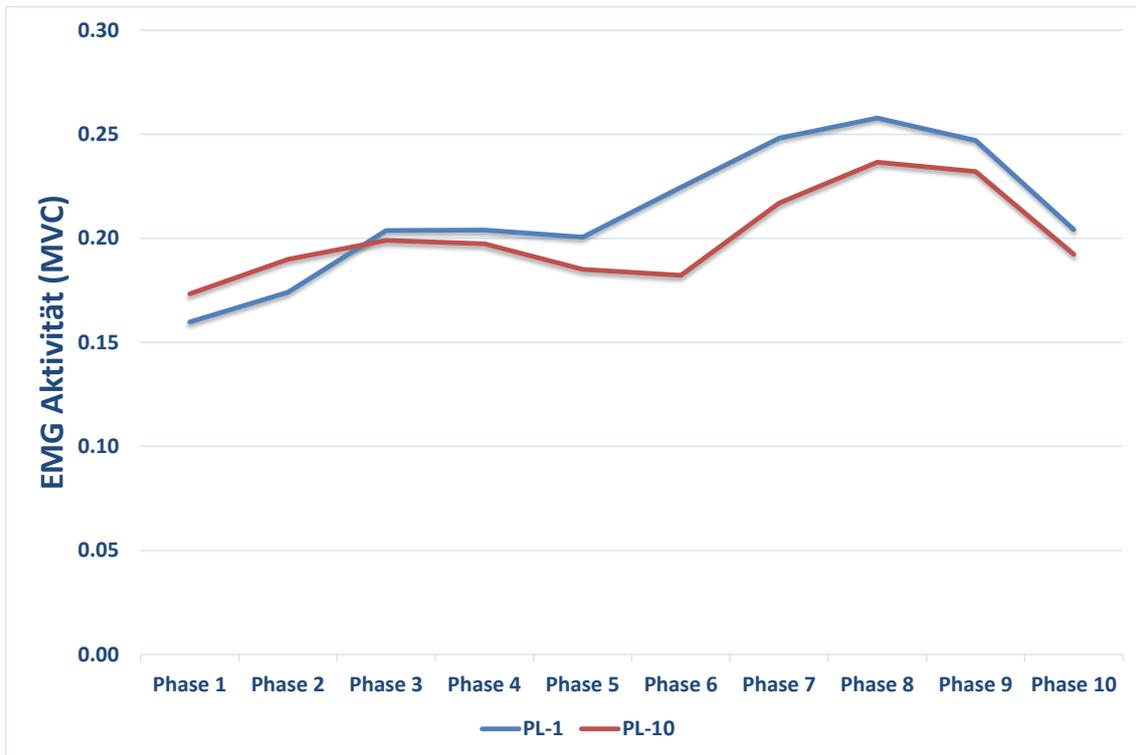


DI: Digastricus; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; DI-1: erster Kauschlag; DI-10: zehnter (letzter) Kauschlag

Dieser Trend war auch beim Pterygoideus lateralis beobachtbar, war jedoch nicht statistisch signifikant ($p=0,065$) (Abbildung 47)

Ergebnisse

Abbildung 47: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität des Pterygoideus lateralis, erster Kauschlag vs. letzter Kauschlag

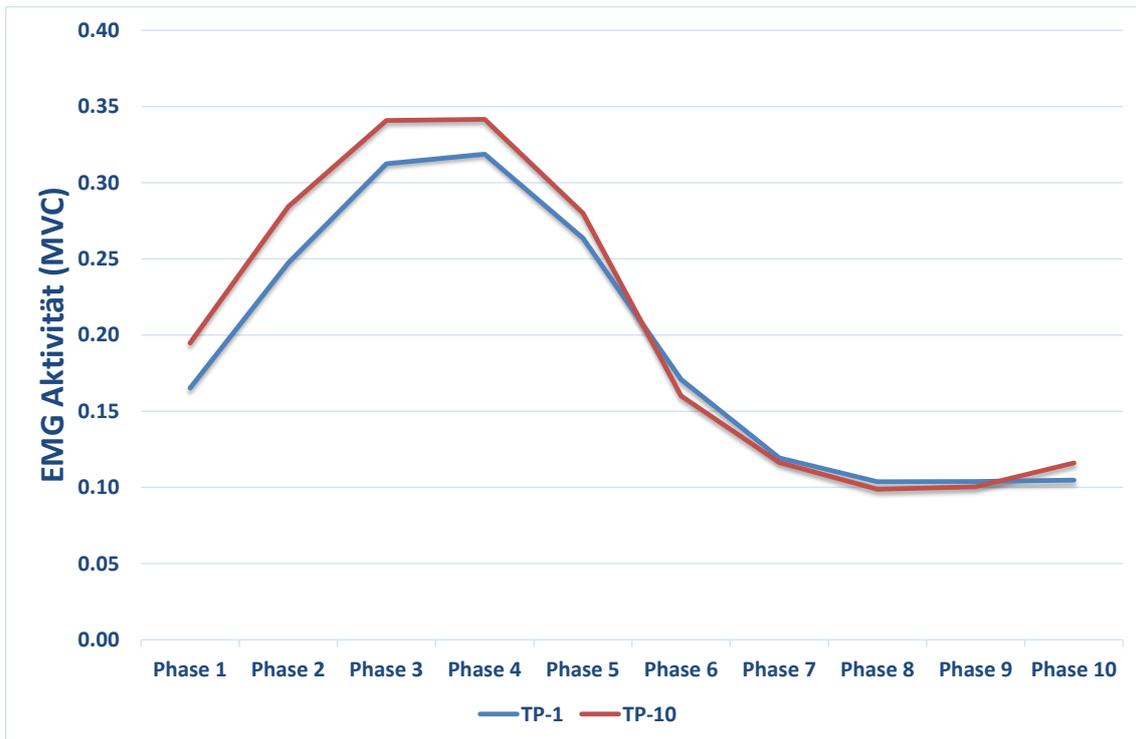


PL: Pterygoideus lateralis; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; 1: erster Kauschlag; 10: zehnter (letzter) Kauschlag

Die Muskelaktivitäten der Kieferschließer zeigten bei Temporalis posterior ($p=0,048$) und anterior ($p=0,097$) eine leicht höhere durchschnittliche EMG-Aktivität beim letzten gemessenen Kauschlag (Abbildung 48 und Abbildung 49).

Ergebnisse

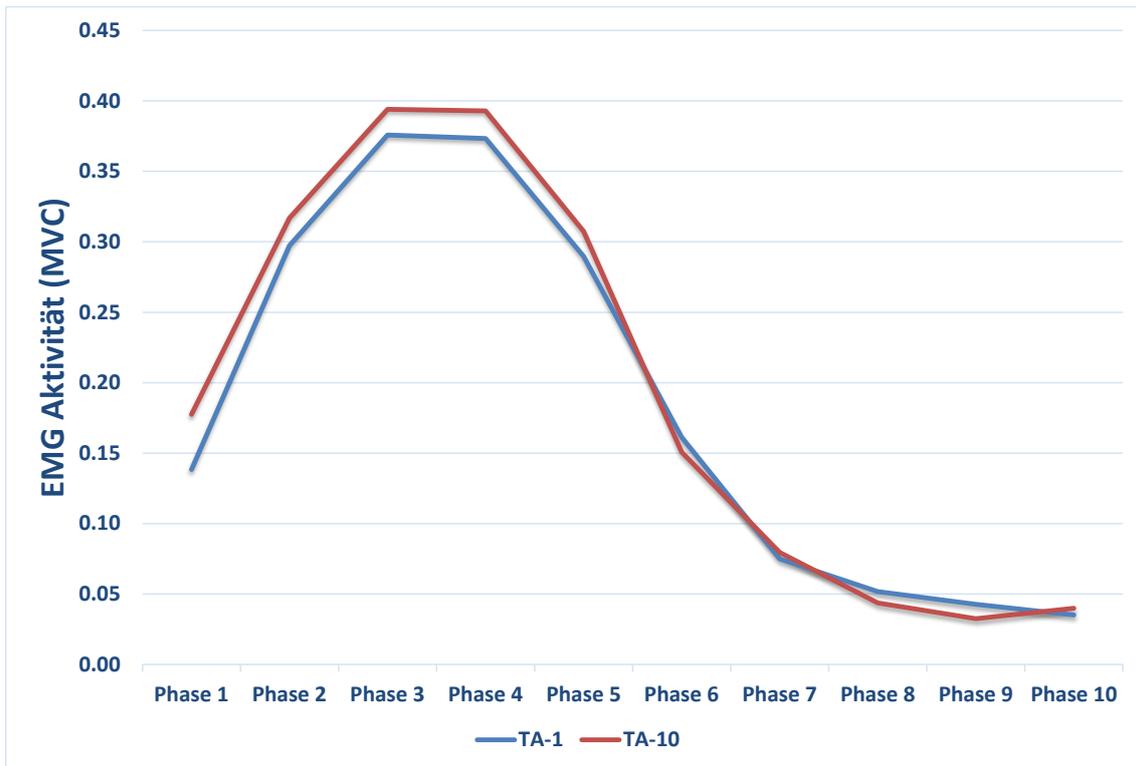
Abbildung 48: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität des Temporalis posterior, erster Kauschlag vs. letzter Kauschlag



TP: Temporalis posterior; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; 1: erster Kauschlag; 10: zehnter (letzter) Kauschlag

Ergebnisse

Abbildung 49: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität des Temporalis anterior, erster Kauschlag vs. letzter Kauschlag

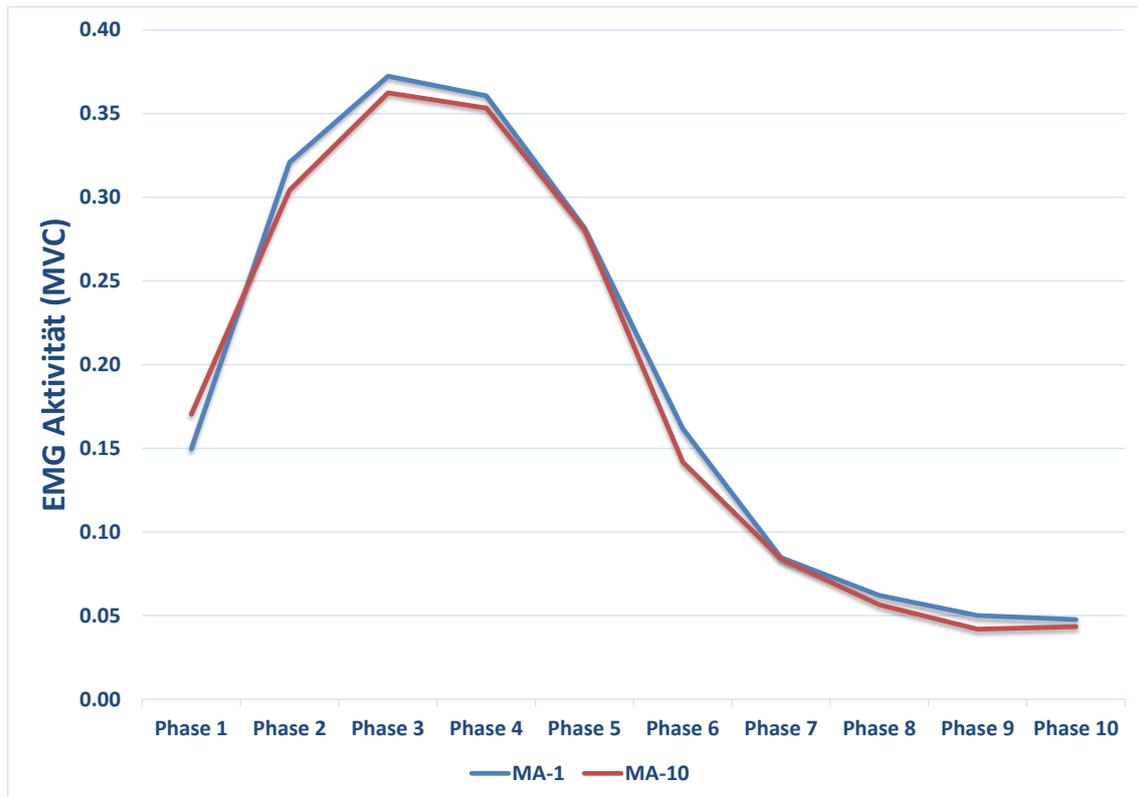


TA: Temporalis anterior; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; 1: erster Kauschlag; 10: zehnter (letzter) Kauschlag

Im Gegensatz dazu waren die gemessenen durchschnittlichen EMG-Aktivitäten für Masseter ($p=0,164$) und Pterygoideus medialis ($p=0,130$) in etwa gleich (Abbildung 50 und Abbildung 51).

Ergebnisse

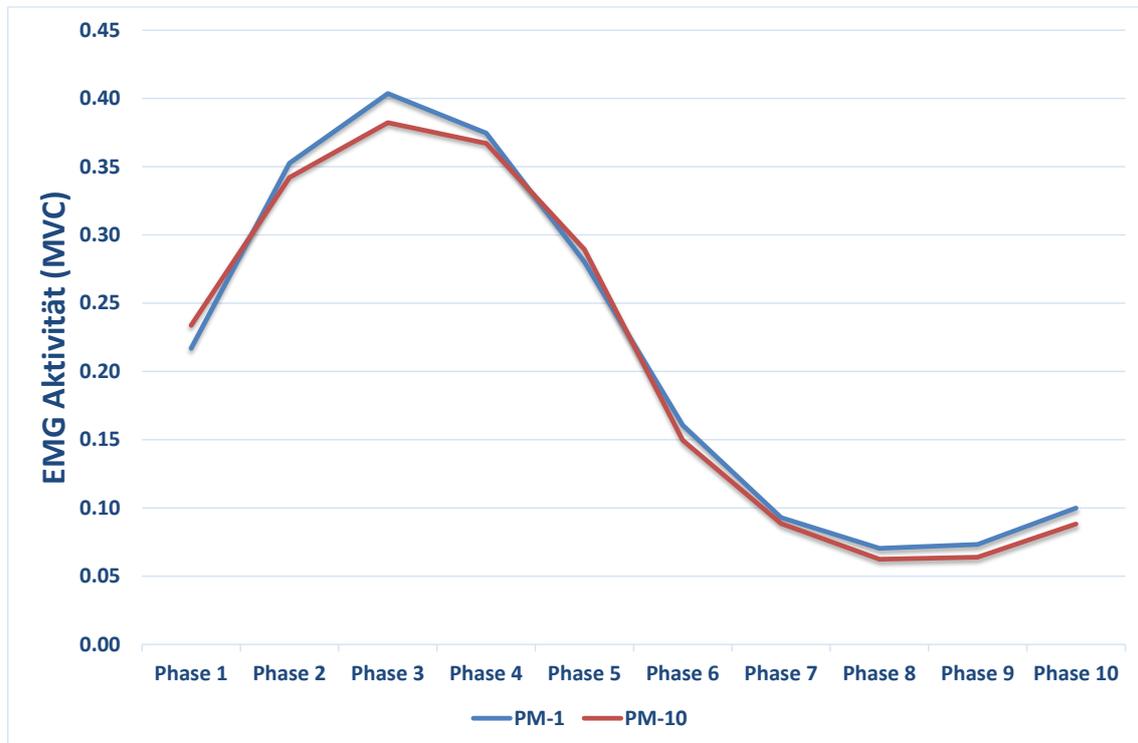
Abbildung 50: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität des M. masseter, erster Kauschlag vs. letzter Kauschlag



MA: Masseter; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; 1: erster Kauschlag; 10: zehnter (letzter) Kauschlag

Ergebnisse

Abbildung 51: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität des Pterygoideus medialis, erster Kauschlag vs. letzter Kauschlag



PM: Pterygoideus medialis; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; 1: erster Kauschlag; 10: zehnter (letzter) Kauschlag

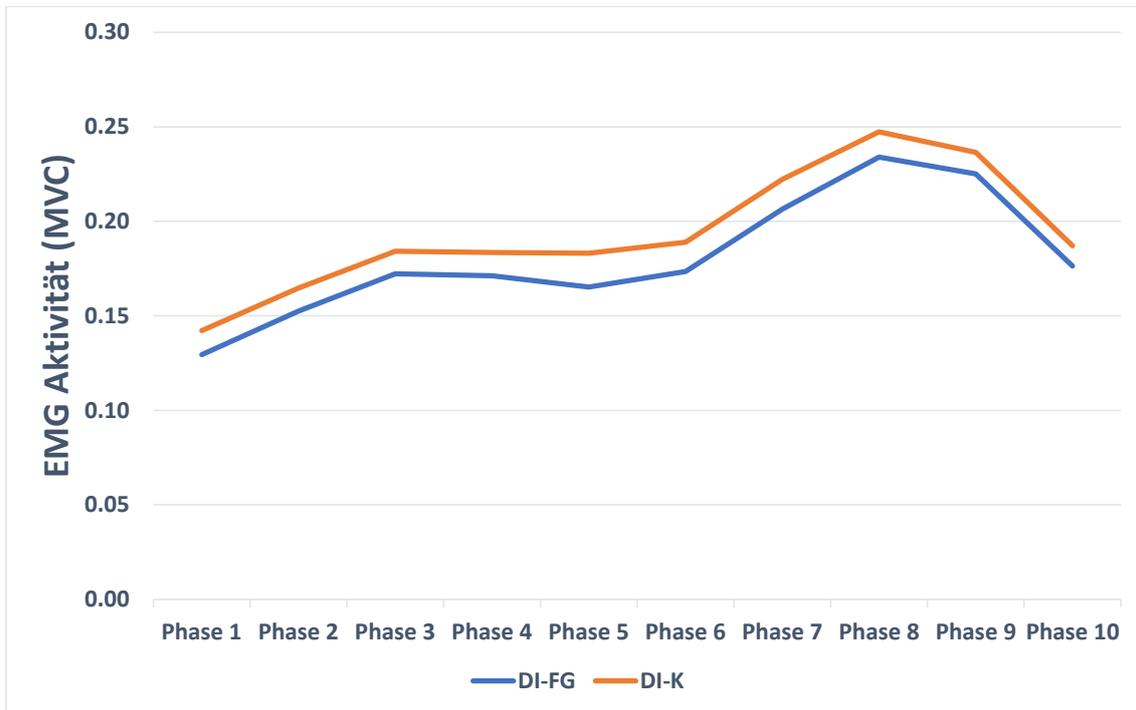
1.18.3 Vergleich Karotte vs. Fruchtgummi

Beim Vergleich der durchschnittlichen Muskelaktivitäten der Kieferöffner wurde eine leicht höhere EMG-Aktivität beim Kauen der Karotte als beim Kauen von Fruchtgummi für den Digastricus beobachtet ($p < 0,001$) (Abbildung 52).

Ein ähnliches Muster konnte ebenso für den Pterygoideus lateralis beobachtet werden, wobei jedoch hier die EMG-Aktivität beim Karotte-Kauen deutlich erhöht war ($p < 0,001$) (Abbildung 53).

Ergebnisse

Abbildung 52: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität des M. digastricus



DI: Digastricus; FG: Fruchtgummi; K: Karotte; %MVC: Maximum Voluntary Contraction

Abbildung 53: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität des Pterygoideus lateralis

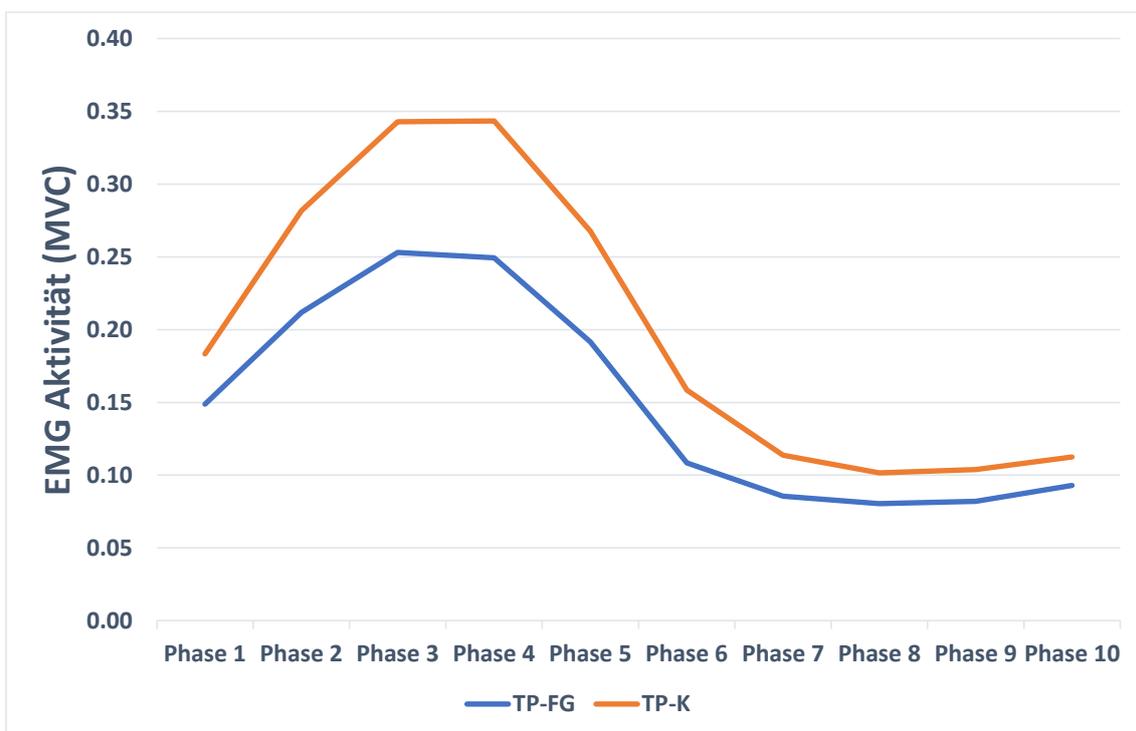


Ergebnisse

PL: Pterygoideus lateralis; FG: Fruchtgummi; K: Karotte; %MVC: Maximum Voluntary Contraction

Bei den Muskelaktivitäten der Kieferschließer war bei beiden Temporalis Muskeln die EMG-Aktivität beim Karotte-Kauen ebenfalls größer als beim Kauen des Fruchtgummi ($p < 0,001$) (Abbildung 54 und Abbildung 55).

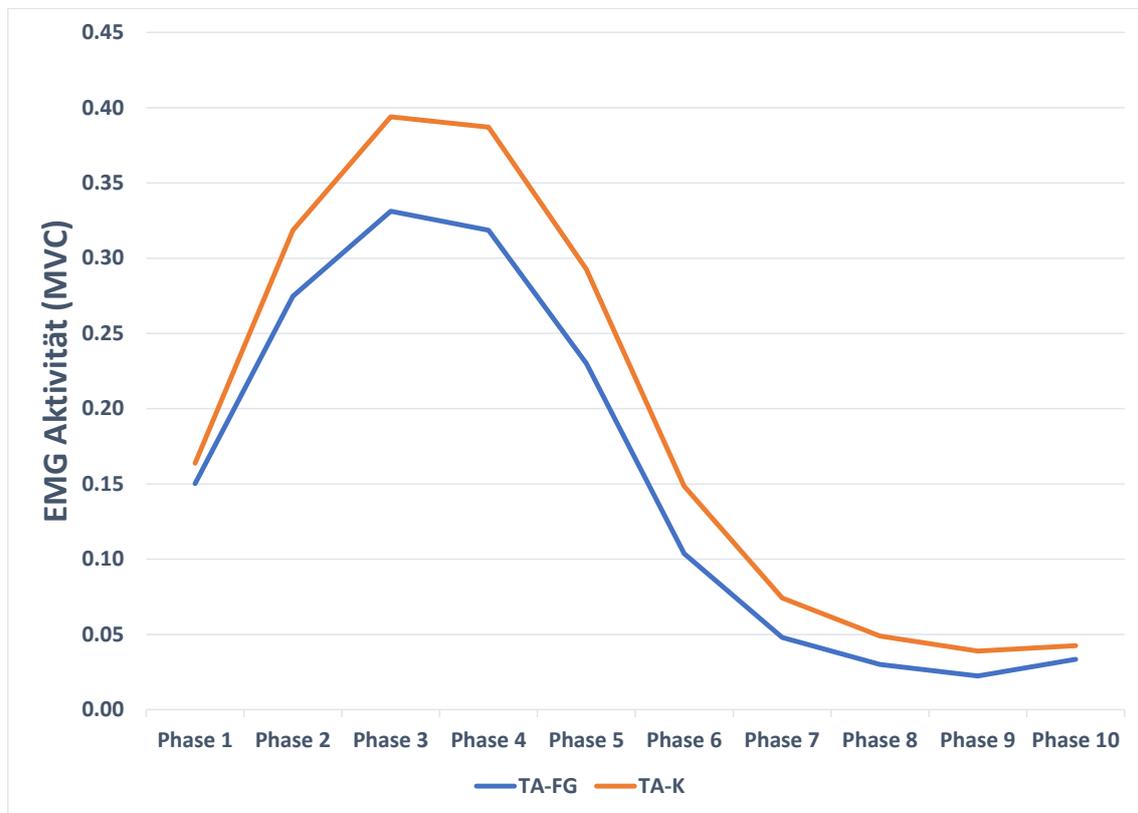
Abbildung 54: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität des Temporalis posterior



TP: Temporalis posterior; FG: Fruchtgummi; K: Karotte; %MVC: Maximum Voluntary Contraction

Ergebnisse

Abbildung 55: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität des Temporalis anterior

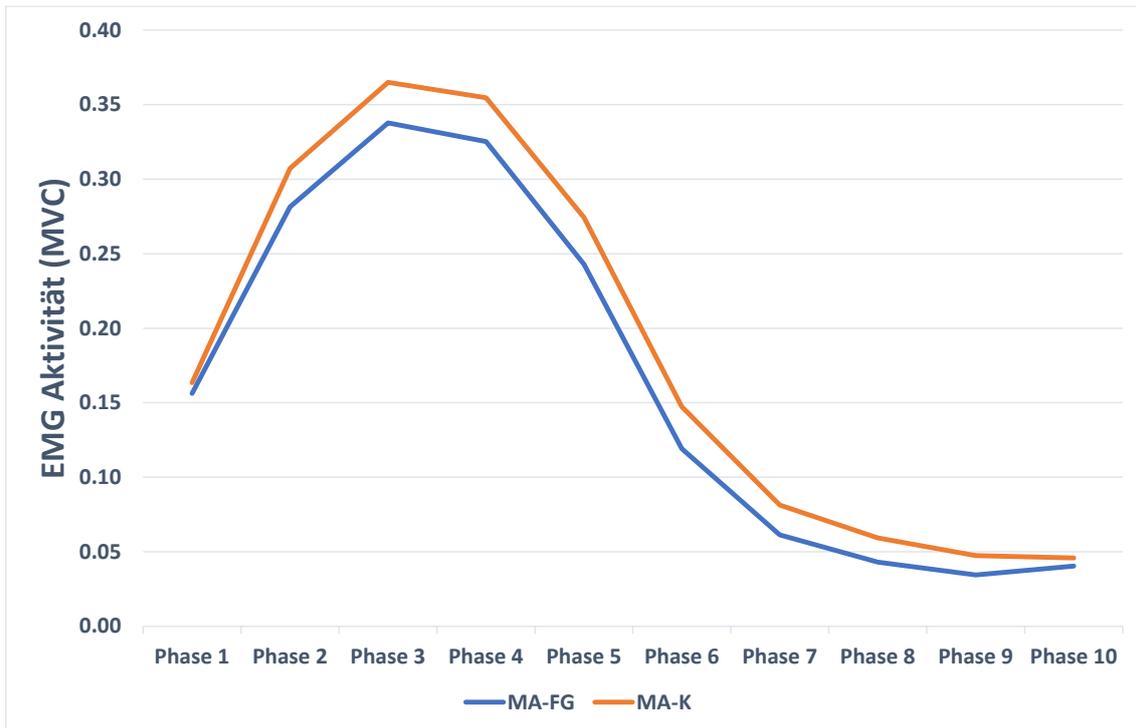


TA: Temporalis anterior; FG: Fruchtgummi; K: Karotte; %MVC: Maximum Voluntary Contraction

Beim Masseter war die Muskelaktivität während der Kieferschließung ebenfalls beim Kauen von Karotte minimal, jedoch statistisch signifikant erhöht ($p < 0,001$) (Abbildung 56).

Ergebnisse

Abbildung 56: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität des M. masseter

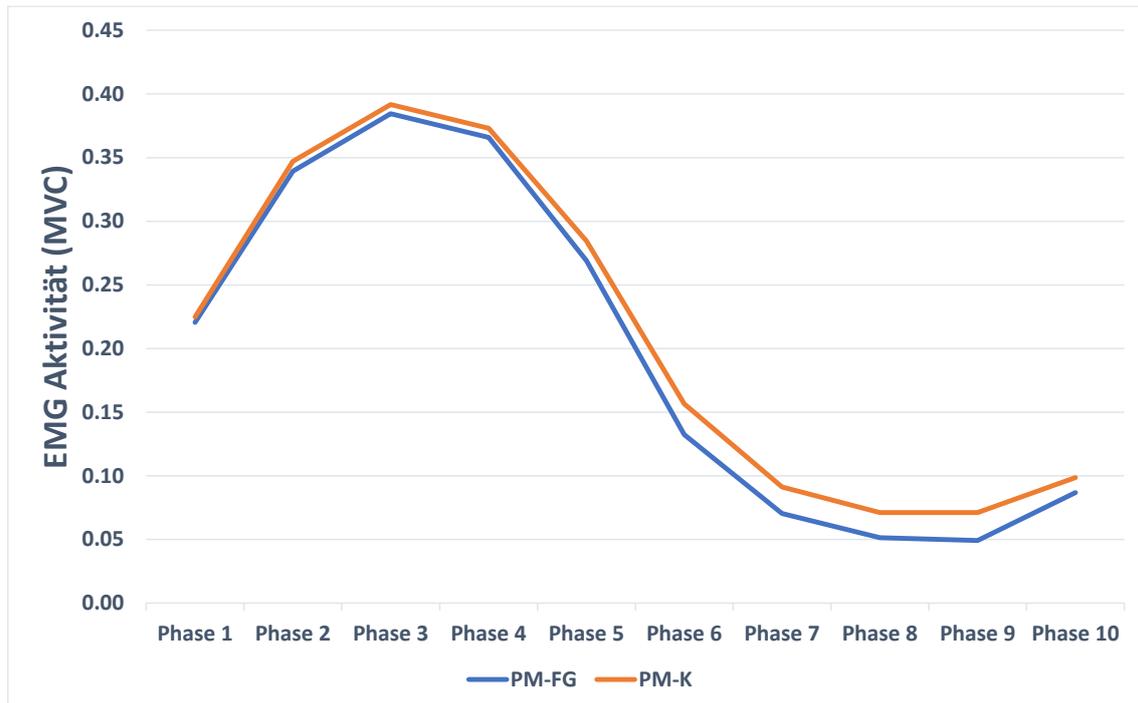


MA: Masseter; FG: Fruchtgummi; K: Karotte; %MVC: Maximum Voluntary Contraction

Ähnliches konnte für die Aktivität des Pterygoideus medialis beim Vergleich des Kauens von Karotte und Fruchtgummi beobachtet werden ($p < 0,001$) (Abbildung 57).

Ergebnisse

Abbildung 57: Durchschnittliche Gesamt-EMG Aktivität des Pterygoideus medialis



PM: Pterygoideus medialis; FG: Fruchtgummi; K: Karotte; %MVC: Maximum Voluntary Contraction

1.19 Kaukraft

Die mittlere Kaukraft aller Probanden über 10 Kauschläge und drei Wiederholungen bewegte sich zwischen 17,88 kg und 19,99 kg beim Kauen von Fruchtgummi und zwischen 20,60 kg und 21,70 kg beim Kauen von Karotte. Die Unterschiede zwischen den Kaukräften für Karotte und Fruchtgummi waren statistisch signifikant ($p < 0,0001$), wobei die aufgewendete Kaukraft für Karotte höher war als für Fruchtgummi (Tabelle 5, Abbildung 58).

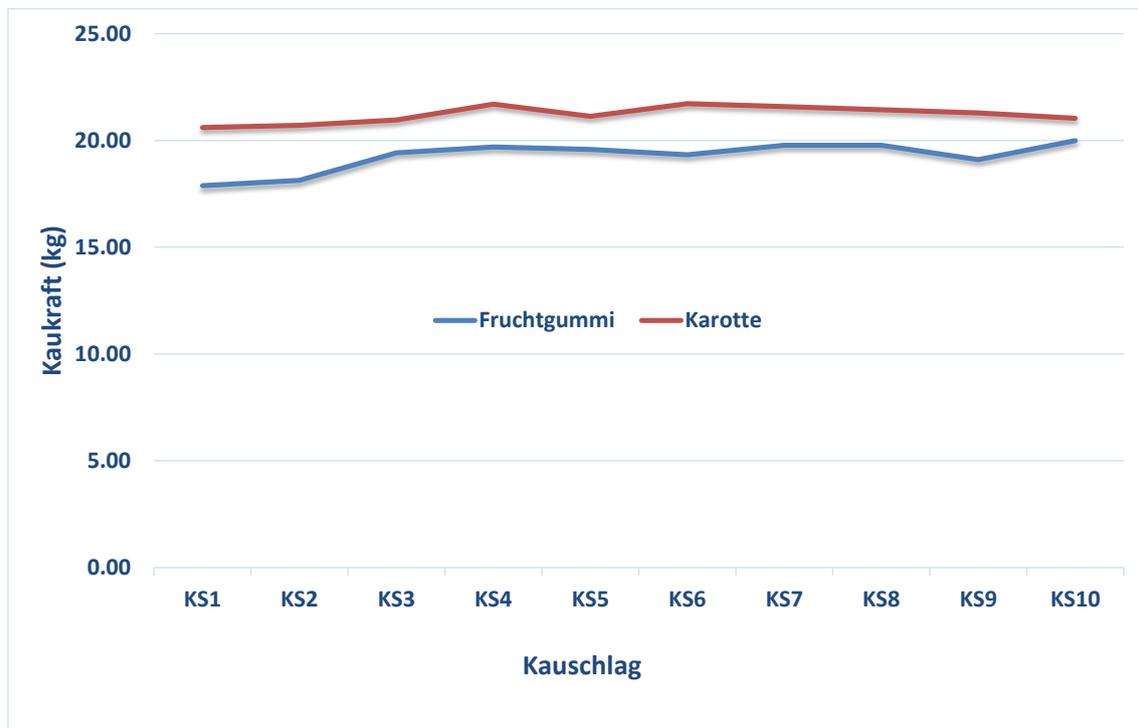
Tabelle 5: Mittlere Kaukraft über 10 Kauschläge, Karotte vs. Fruchtgummi

	KS1	KS2	KS3	KS4	KS5	KS6	KS7	KS8	KS9	KS10
FG (kg)	17,9	18,1	19,4	19,7	19,6	19,3	19,8	19,8	19,1	20,0
K (kg)	20,6	20,7	21,0	21,7	21,1	21,7	21,6	21,4	21,3	21,0

FG: Fruchtgummi; K: Karotte; KS: Kauschlag

Ergebnisse

Abbildung 58: Mittlere Kaukraft über 10 Kauschläge, Karotte vs. Fruchtgummi



KS: Kauschlag

1.20 Unterkieferbewegung

Die Bewegung des Unterkiefers während des vertikalen Kauschlages wurde bei jeder Person gemessen. Dabei wurde die maximale vertikale Ausdehnung des Kauzyklus ausgewertet. Im Durchschnitt bewegte sich der Unterkiefer beim Kauen von Karotte um 12,9 mm, während er sich beim Kauen von Fruchtgummi um 12,1 mm bewegte. Die Unterschiede zwischen beiden Gruppen waren statistisch nicht signifikant ($p=0,142$) (Tabelle 6).

Tabelle 6: Vertikale Bewegung während des Kauschlages

	Karotte (mm)	Fruchtgummi (mm)
P1	16,8	18,8
P2	14,2	16,0
P3	13,6	13,3
P4	10,6	9,9
P5	10,6	8,3

Ergebnisse

P6	12,5	12,4
P7	11,6	8,8
P8	13,7	13,1
P9	13,8	12,0
P10	13,1	7,5
P11	14,3	15,4
P12	10,6	9,0
P13	13,9	14,4
P14	11,3	10,1
MW	12,9	12,1

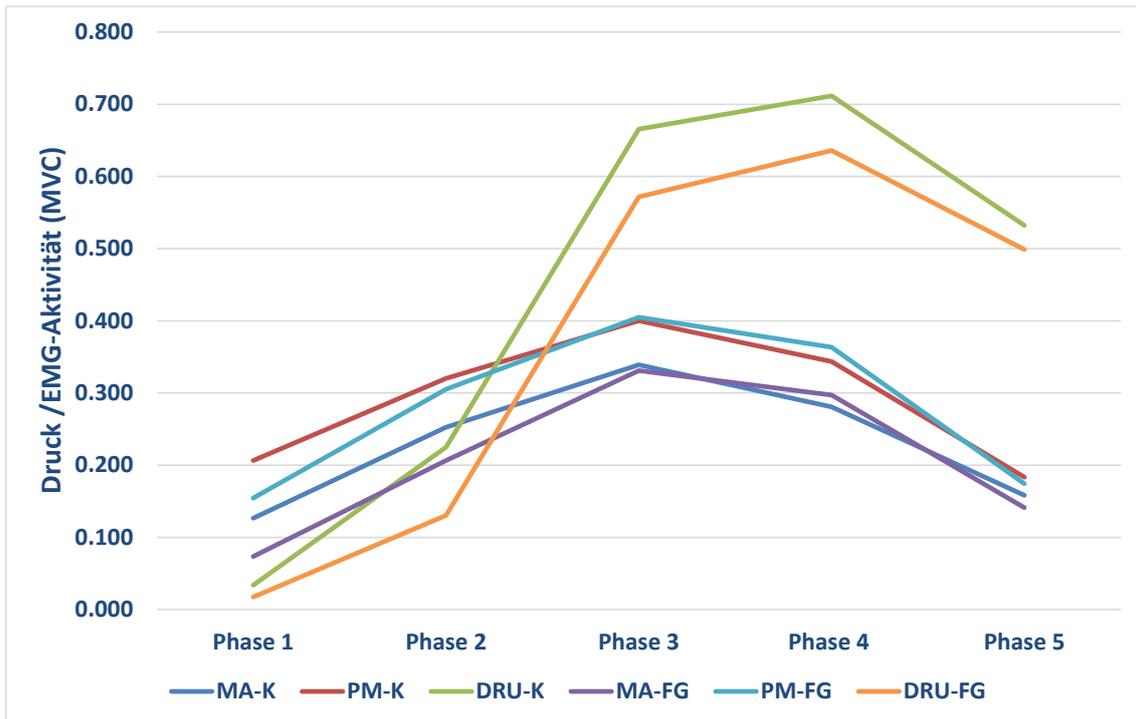
MW: Mittelwert; P: Proband

1.21 Druck in Relation zur Muskelaktivität

Betrachtet man die Kaukraft in Relation zur Muskelaktivität von Masseter und Pterygoideus medialis, ist ersichtlich, dass beim Kauen von Karotte und Fruchtkaugummi der zeitliche Anstieg des Druckes im Vergleich zum Anstieg der EMG-Aktivität bei beiden Muskeln leicht verzögert ist. Während die EMG-Aktivität der Muskeln in Phase 4 schon wieder abfällt, erreicht der Druck hier seinen Höhepunkt (Abbildung 59).

Ergebnisse

Abbildung 59: Kaukraft (Druck) in Relation zur Muskelaktivität



DRU: Druck; EMG: Elektromyogramm; FG: Fruchtgummi; K: Karotte; MA: Masseter; %MVC: Maximum Voluntary Contraction; PM: Pterygoideus medialis

Diskussion

Das Ziel der vorliegenden Studie war es, klinisch experimentelle Untersuchungen realistischer Kauzyklen unter Ableitung der Kaukräfte, elektrischer Aktivität (EMG) aller Kaumuskeln und der Kinematik des Unterkiefers durchzuführen. Auf diese Weise sollten okklusionsnahe, sequenzielle Analysen der Kraftübertragung unter kinetischen Bedingungen für biomechanische Simulationen (FEM) erarbeitet werden.

Zum ersten Mal ist es mit diesem experimentellen Ansatz gelungen, alle wesentlichen Parameter, die den physikalischen Kauprozess bestimmen, synchron aufzuzeichnen und sequenziell darzustellen.

Die Ergebnisse werden im Folgenden gemäß den durchgeführten Untersuchungen diskutiert.

1.22 Ko-Kontraktionsmuster

Im Ergebnis zeigten die Ko-Kontraktionsmuster, dass die mittlere Gesamt EMG-Aktivität der gemessenen Kaumuskeln über die 10 Kauschläge in den ersten fünf Phasen mit einem Anstieg der Muskelaktivität der Kieferschließer assoziiert war, wobei Pterygoideus medialis die höchste Muskelaktivität initial aufwies, gefolgt von Masseter und den beiden Musculi temporales.

Im Gegensatz dazu stieg die EMG-Aktivität der Kieferöffner (Digastricus und Pterygoideus lateralis) in den letzten fünf Phasen leicht an, und war in etwa gleich bei beiden Muskeln, jedoch deutlich unter der EMG-Aktivität der Kieferschließer.

Dieses Muster war sowohl beim Kauen von Fruchtgummi als auch Karotte ähnlich.

Gemäß Hugger et al. (2008) sind die Kaumuskeln außerordentlich differenziert aktivierbar, was mit einer heterogenen Aktivierbarkeit durch eine funktionelle Kompartimentierung in der Kaumuskulatur einhergeht (Schindler et al., 1997).

Diskussion

Damit können aufgabenspezifisch sehr unterschiedliche Muskelfasergruppen aktiviert werden, so dass es zu großen räumlichen Änderungen der Aktivierungsmuster kommt, welche sowohl innerhalb der einzelnen Muskeln stattfinden können, sowie zwischen den am Kauvorgang beteiligten Muskeln (Hugger et al., 2008).

Verschiedene Muskelgruppen sind am Kauvorgang beteiligt, wobei der Kieferöffner Digastricus bereits aktiviert wird, bevor es zu einer Öffnungsbewegung des Unterkiefers kommt, und bei der weiteren Öffnungsbewegung die etwas spätere Aktivierung des M. pterygoideus lateralis erfolgt (Hugger et al., 2008).

Die Resultate der vorliegenden Studie können keine Aussagen über den Zeitfaktor der jeweiligen Muskelaktivierung treffen, jedoch war in Phase 1 des Kauschlages (EMG der Kieferschließer zeigt erste Muskelaktivität) die Aktivitäten beider Muskeln (Digastricus und Pterygoideus lateralis) evident.

Während der Schließphase erfolgt die bilaterale Kontraktion der Mm. temporales (anterior und posterior), gefolgt von der Aktivierung des Masseters, wobei auf beiden Seiten die Mm. pterygoidei mediales aktiver sind als die Mm. masseteres, die erst mit Annäherung an die Interkuspitation ihre maximale Aktivität entfalten (Hugger et al., 2008).

In der vorliegenden Studie konnte für beide Ko-Kontraktionsmuster von Karotte und Fruchtkgummi eine höhere Aktivität der Mm. pterygoidei mediales im Vergleich zum Masseter beobachtet werden, was insgesamt mit den Aussagen von Hugger et al. (2008) übereinstimmt. Die Ergebnisse dieser Studie konnte über die schon bekannten Kenntnisse hinaus ein detailliertes Bild dieser Kontraktionen vorlegen, was für FEM Simulationen von essentieller Bedeutung ist.

1.23 Vergleich Muskelaktivität Kauseite und Nicht-Kauseite

Bei den Muskelaktivitäten der Kieferöffner wurde sowohl bei der bevorzugten Kauseite als auch bei der nichtbevorzugten Kauseite ein zwischen den Gruppen

Diskussion

statistisch nicht-signifikanter (Fruchtgummi) oder statistisch signifikanter (Karotte) ähnlicher Anstieg der EMG-Aktivität ab Phase 6 beobachtet, wobei im Trend die Aktivität des Digastricus der bevorzugten Kauseite etwas höher lag. Für den Pterygoideus lateralis konnte eine höhere durchschnittliche EMG-Aktivität der nicht bevorzugten Kauseite beobachtet werden.

Bei den Muskelaktivitäten der Kieferschließer war sowohl beim Kauen von Karotte als auch Fruchtgummi bei beiden Temporalis - Muskeln die EMG-Aktivität der bevorzugten Kauseite bis Phase 5 statistisch signifikant höher als der nicht-bevorzugten Kauseite.

Beim Masseter war die Muskelaktivität während der Kieferschließung auf beiden Kauseiten während des Kauvorganges mit Karotte und Fruchtgummi gleich hoch. Im Gegensatz dazu war die Aktivität des Pterygoideus medialis auf der nicht bevorzugten Kauseite etwas höher als auf der bevorzugten Kauseite (statistisch signifikant für Fruchtgummi, nicht signifikant für Karotte).

Im Allgemeinen leistet die ipsilaterale Muskulatur von M. masseter, M. temporalis anterior und posterior sowie vom M. pterygoideus medialis mehr Arbeit als die kontralaterale Seite, wobei der Masseter mehr Aktivität aufweist als der Temporalis (Mioche et al., 1999; Miyawaki et al., 2001; Piancino et al., 2007; Hugger et al., 2008) und die Aktivität des Masseters auf der kontralateralen Seite in etwa 35% unter der der Kauseite liegt (Hugger et al., 2008). Beim M. temporalis ist die Aktivität der kontralateralen Seite ca. 15% niedriger als die der Kauseite (Hugger et al., 2008). Die Unterschiede sind vor allem dadurch zu erklären, dass die Muskulatur auf der Balance - Seite vornehmlich den Unterkiefer stabilisiert. Jedoch können in individuellen Einzelfällen Abweichungen von diesen Ergebnissen sein (Ferrario und Sforza, 1996; Hugger et al., 2008).

Ferrario et al. untersuchten die standardisierten EMG - Eigenschaften von M. masseter, M. temporalis, und M. sternocleidomastoideus während maximaler Beißkraft bei gesunden jungen Erwachsenen (Ferrario et al., 2006). Dafür wurden die Symmetrien der Muskelaktivitäten mit Hilfe des „Percentage Overlapping Coefficient (POC)“ bestimmt, welcher aus dem Verhältnis von EMG Daten eines Muskels mit denen des Muskels der kontralateralen Seite berechnet wird

Diskussion

(Ferrario et al., 2006). Das Symmetrieverhalten für Masseter und Temporalis lag zwischen 85% und 88% eines möglichen Wertes von 100%, welcher eine absolute Symmetrie bedeuten würde (Ferrario et al., 2006).

Eine weitere Studie untersuchte die Aktivitätsmuster des Masseters und der Mm. temporales anteriores bei 21 gesunden männlichen Probanden, welche 10, 20, 30, 40 und 50% der maximalen Beißkraft ausübten (Naeije et al., 1989). Bei niedrigen Beißkräften dominierte die Muskelaktivität der Temporales, während mit höheren Kaukräften die Aktivität des Masseter signifikant stärker war (Naeije et al., 1989). Darüber hinaus war bei jeder Kontraktionsstärke die Asymmetrie in den Massetermuskeln statistisch signifikant höher als in den Mm. temporales von beiden Seiten im Vergleich (Naeije et al., 1989).

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie stimmen nur teilweise mit den Ergebnissen in der Literatur überein. Bei den Kieferöffnern zeigte nur der Digastricus eine höhere EMG - Aktivität der bevorzugten Kauseite, während dies für den Pterygoideus lateralis umgekehrt war. Hier war für das Kauen von Karotte und Fruchtgummi die nicht bevorzugte Kauseite stärker in ihrer Aktivität. Diese unterschiedlichen Ergebnisse für den Pterygoideus lateralis sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf ein bis zwei Probanden zurückzuführen, deren EMG-Aktivität der Nichtkauseite um ein Vielfaches höher war als das der Kauseite. Die Mehrheit der Probanden zeigte jedoch das typische Muster einer erhöhten EMG-Aktivität des Pterygoideus lateralis auf der bevorzugten Kauseite.

Für den Masseter gab es sowohl beim Kauen von Karotte als auch Fruchtgummi keine Unterschiede zwischen den Kauseiten. Es konnte keine Studie identifiziert werden, die ebenfalls dieses Ergebnis aufweist. Die wahrscheinlichste Erklärung wäre hier ein Typ II Fehler, der auf eine zu geringe Probandenanzahl zurückzuführen ist. Zukünftige Studien sollten die Messungen mit einer höheren Probandenzahl wiederholen.

Die Aktivität der Mm. temporales war wie zu erwarten auf der Kauseite stärker bei beiden Untersuchungen (Kauen von Karotte und Fruchtgummi).

Für den Pterygoideus medialis war die mittlere Aktivität der nicht bevorzugten Kauseite leicht höher als die der bevorzugten Kauseite. Dies war bei allen Pro-

banden der Fall, was auf einen systematischen Fehler hinweisen könnte, z.B. durch das inkorrekte Stechen der intramuskulären Elektroden (siehe auch Einflussfaktoren auf das EMG-Signal in Abschnitt 5.7). Im Gegensatz zu den vorliegenden Daten früherer Studien konnte in dieser Untersuchung jedoch alle Muskeln sequentiell synchron aufgezeichnet werden, was für die Erfassung des dynamischen Kauprozesses und seine artifizielle Modellierung in einem FE Modell unerlässlich ist. Insbesondere das Timing der Ko-kontraktionsmuster ist in diesem Kontext von besonderer Bedeutung.

1.24 Vergleich Muskelaktivität in Abhängigkeit vom Geschlecht

Bei den Muskelaktivitäten der Kieferöffner waren für das Kauen von Karotte und Fruchtgummi sowohl beim Digastricus als auch beim Pterygoideus lateralis die mittleren EMG-Aktivitäten der weiblichen Probanden statistisch signifikant höher als die der männlichen. Derselbe Trend konnte auch für alle Kieferschließer beobachtet werden.

Diese Ergebnisse sind diskrepant zu früheren Studien, wo keine Unterschiede in der EMG-Aktivität beim Zubeißen zwischen den Geschlechtern aufgezeigt wurde (Ferrario et al., 2006; Ferrario et al., 2000). Die Ursache könnte auch hier wieder in einigen wenigen weiblichen Probanden liegen, die ungewöhnlich hohe Werte für Phase 1 (EMG der Kieferschließer zeigt erste Muskelaktivität) aufwiesen, was bei den männlichen Probanden nicht der Fall war. Jedoch waren die Trends der Verläufe zwischen männlichen und weiblichen Probanden in etwa gleich. Somit sind diese Ergebnisse in einer Folgestudie mit einer höheren Anzahl an Probanden zu verifizieren.

1.25 Vergleich Muskelaktivität in Abhängigkeit vom Kauschlag

Bei den Muskelaktivitäten der Kieferöffner waren beim Digastricus die mittleren EMG-Aktivitäten beim ersten Kauschlag statistisch signifikant höher als beim

letzten gemessenen Kauschlag für das Kauen sowohl von Karotte und Fruchtgummi. Im Gegensatz dazu waren die Muskelaktivitäten des Pterygoideus lateralis beim letzten Kauschlag höher als beim ersten.

Die Muskelaktivitäten der Kieferschließer zeigten ausnahmslos eine verstärkte Aktivität beim letzten gemessenen Kauschlag beim Kauen von Fruchtgummi, während beim Kauen von Karotte dies nur bei Temporalis posterior und anterior der Fall war. Hier waren die gemessenen durchschnittlichen EMG-Aktivitäten für Masseter und Pterygoideus medialis beim ersten und letzten Kauschlag in etwa gleich.

Studien, die diesen Aspekt beleuchteten, waren nur schwer zu identifizieren. Hugger et al. (2008) merkt an, dass generell eine signifikante Abnahme der EMG-Aktivität von ca. 30% zwischen dem ersten und elften Kauzyklus beobachtet wurde (Schindler et al., 1997; Hugger et al., 2008).

Kohyama und Mioche (2004) konnten in Untersuchungen von 20 Probanden feststellen, dass die EMG-Amplituden der Muskelaktivitäten während der Schließphase des Mundes, die Dauer der Kontraktion und die vertikale Bewegung des Unterkiefers im Kauprozess abnahmen (Kohyama und Mioche, 2004).

Auch hier sind damit die Ergebnisse der vorliegenden Studie im Vergleich zu den o.g. zitierten Studien diskrepant. Aufgrund des Mangels an Vergleichsstudien sind weitere Forschungen notwendig, um zuverlässige Aussagen treffen zu können.

Ein weiterer möglicher Grund könnte ein Unterschied zwischen Oberflächen-EMG und intramuskulärem EMG sein.

1.26 Vergleich Muskelaktivität Kauen von Karotte und Fruchtgummi

Beim Vergleich der EMG-Aktivität des Kauens von Karotte und Fruchtgummi war bei allen Muskeln ausnahmslos die Muskelaktivität beim Kauen von Karotte statistisch signifikant erhöht.

Diese Ergebnisse sind in einschlägiger Übereinstimmung mit der Literatur, wobei die Muskelaktivität in direkter Beziehung zur Härte des Kaumaterials steht

und mit der Härte der Nahrung pro Kauzyklus und Kausequenz ansteigt (Mioche et al., 1999; Peyron et al., 2002; Foster et al., 2006). Zum Beispiel zeigen Mioche et al. (1999) in ihren Untersuchungen zu den Aktivitätsmustern von Masseter und den Mm. temporales, dass die Gesamtmuskelaktivität mit zunehmender Härte des Kaugutes zunahm (Mioche et al., 1999).

1.27 Vergleich Kaukraft in Relation zur Muskelaktivität

In der vorliegenden Arbeit wurde ein direkter Zusammenhang zwischen elektrischer Muskelaktivität der Kieferschließer Masseter und Pterygoideus medialis und der generierten Kaukraft beobachtet, jedoch erreichte die Kaukraft erst ihren Höhepunkt in Phase 4 (Abnahme der Aktivität der Kieferschließer), während die EMG-Aktivität der Muskeln in dieser Phase schon wieder abfiel.

Diese Ergebnisse stimmen mit den Ergebnissen der Studie von Ahlgren et al. (1970) überein, welche bei drei Probanden mit leichter Malokklusion insgesamt 1400 Kauzyklen untersuchten. Dabei wurde beobachtet, dass die maximale EMG-Aktivität der maximalen Kaukraft um ca. 41 ms vorausgeht (Ahlgren und Owall, 1970).

1.28 Limitationen der Studie

Die vorliegende Studie hat einige Limitationen: Die Probandenanzahl war mit 14 Probanden relativ gering. Dies kann zu Typ II Fehlern führen (falsch negative Ergebnisse). Aus diesem Grund werden die Ergebnisse als explorativ gewertet und dürfen nicht verallgemeinert werden. Zukünftige Studien sollten anhand vorhandener Daten eine konkrete Fallzahlschätzung vornehmen, um die korrekte Anzahl der benötigten Probanden zu bestimmen.

Da die Kauleistung über eine Schiene, welche als Kaugutträger eingesetzt worden ist, gemessen wurde, könnten hier Veränderungen des okklusiven Reliefs der Zähne zu einer möglicherweise reduzierten Kauleistung beigetragen haben.

Diskussion

Zum Beispiel haben Giannakopoulos et al. (2014) bei 20 gesunden Probanden untersucht, ob die Verringerung des Profils der Zähne zu einem Verlust der biomechanischen Wirksamkeit des Kauens führt (Giannakopoulos et al., 2014). Dabei wurden drei experimentelle Bedingungen untersucht: Kauen auf (1) dem natürlichen Gebiss (ND), (2) Schienen mit strukturierten okklusalen Profilen, die das natürliche Gebiss des Patienten simulieren (SS), und (3) Schienen mit einer Oberflächenebene (PS) (Giannakopoulos et al., 2014). Im Ergebnis wurden signifikante Unterschiede zwischen PS und SS und zwischen ND und SS gefunden. Die Autoren schlussfolgerten, dass strukturierte okklusale Oberflächen beim Kauen von spröder Testnahrung eine biomechanische Bedeutung haben (Giannakopoulos et al., 2014).

Des Weiteren trugen die Probanden zeitweilig zwei Schienen während des Experiments; dies könnte zu einem reduzierten positiven Feedback durch die Mechanorezeptoren des Parodontiums und damit zu größeren Kräften beim Kauen führen. Johansson et al. (2006) konnte diesen Effekt bei 11 Probanden mit reduziertem parodontalen Gewebesupport aufzeigen, wobei größere und variablere Kräfte bei diesen Probanden im Vergleich mit den Kontrollpersonen gemessen wurden im Hinblick auf die Haltekräfte zwischen den Zähnen (Johansson et al., 2006).

Darüber hinaus unterliegt das EMG - Signal einer Reihe von Einflussfaktoren, die bei der Messung, Auswertung sowie Interpretation der Daten berücksichtigt werden müssen (Pfeifer et al., 2003). Dazu zählen das Material der Elektroden und die Vorbereitung der Ableitstelle, der Abstand der Elektroden und die Größe der Ableitfläche, die Positionierung der Elektroden in Bezug zum Verlauf der Muskelfasern, die Innervationszone des Muskels und der benachbarten Muskeln (Crosstalk), die Bewegung der Muskulatur unter oder um die Elektrode, die Verschiebung der Elektrode bei Bewegung, die Filterungseigenschaften des Gewebes zwischen Elektrode und Muskel, die Leitgeschwindigkeit der Muskelfasern, und die Muskelfasertypen, der Durchmesser der Muskelfasern, sowie die Durchblutung (Pfeifer et al., 2003). Der Einfluss dieser Faktoren kann sicherlich verringert werden, wenn die EMG - Messung durch eine sehr erfahrene Person durchgeführt wird. Darüber hinaus können zufällige Fehler verringert

Diskussion

werden, wenn nur eine einzige Person die Messungen durchführt, jedoch steigt damit das Risiko für systematische Fehler, die sich über die Messung von allen Probanden erstrecken können und damit gravierend das Ergebnis beeinflussen können.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Ziel dieser Arbeit war die synchrone Aufzeichnung der EMG Aktivität aller Kaumuskeln bilateral beim Kauen von elastischer und spröder Testnahrung.

Mit intraoralen Kraftmessvorrichtungen unter Feedback-Kontrolle konnten gezielt entstehende Kräfte gemessen werden, wie sie bei dynamischen Belastungen des Kausystems auftreten. Das EMG-Kontraktionsverhalten der Kaumuskulatur wurde unter diesen Bedingungen an einem breiten asymptomatischen Probandengut untersucht (die hierbei gewonnenen Daten dienten der Entwicklung eines FE - Modells und dessen Validierung, um so die Okklusion der artifizialen Kauflächen optimieren zu können). Das bilaterale Kokontraktionsverhalten der Kaumuskulatur bei dynamischer Funktion des Kausystems wurde ebenfalls erfasst.

Die EMG-Ko-Kontraktionsmuster konnten für den Kauvorgang von zwei unterschiedlichen Kaugütern erfolgreich aufgezeichnet werden. Die mittlere Gesamt EMG-Aktivität (in %MVC) der gemessenen Kaumuskeln über die 10 Kauschläge zeigte, dass besonders die Kieferschließer Aktivität aufwies. In den ersten fünf Phasen des Anstieges der Muskelaktivität der Kieferschließer zeigte Pterygoideus medialis die höchste Muskelaktivität, gefolgt von Masseter und den beiden Musculi temporales. Die EMG-Aktivität der Kieferöffner (Digastricus und Pterygoideus lateralis) stieg in den letzten fünf Phasen leicht an, und war in etwa gleich bei beiden Muskeln, jedoch deutlich unter der EMG-Aktivität der Kieferschließer. Die Ergebnisse der Teiluntersuchungen hinsichtlich der Unterschiede zwischen den Kauseiten, des Geschlechts und Kauschlags, sowie Härte der Nahrungsmittel stimmen zum großen Teil mit den Erwartungen und der Literatur überein.

Zum ersten Mal wurden jedoch diese experimentellen Ergebnisse konsistent durch eine Studie belegt, die alle wesentlichen Parameter sequentiell synchron evaluiert hat. Erst dieser experimentelle Ansatz ermöglicht es, FEM-Simulationen mit dynamischen Daten des komplexen Kauzyklus zu validieren.

Literaturverzeichnis

- Agrawal KR, Lucas PW, Bruce IC, Prinz JF, Food properties that influence neuromuscular activity during human mastication, *J Dent Res* 1998;77:1931–8,
- Ahlgren, J.; Owall, B. 1970. Muscular activity and chewing force: a polygraphic study of human mandibular movements. *Archs. Oral. Biol.* 15, 271-280
- Anderson DJ, Hector MP, Linden RWA, The possible relation between mastication and parotid secretion in the rabbit, *J Physiol* 1985;364: 19–29,
- Baker, R. und Llinas, R. Electrotonic coupling between neurones in the rat mesencephalic nucleus. *The Journal of physiology* 1971;212, 45-63.
- Basit H, Eovaldi BJ, Siccardi MA, Anatomy, Head and Neck, Mastication Muscles, InStatPearls [Internet] 2020Mar 10, StatPearls Publishing,
- Bellisle F, Guy-Grand B, Le Magnen J, Chewing and swallowing as indices of the stimulation to eat during meals in humans: effects revealed by the edogram method and video recordings, *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2000 Mar 1;24(2):223-8,
- Bellisle F, Lucas F, Amrani R, Le Magnen J, Deprivation, palatability and the micro-structure of meals in human subjects, *Appetite* 1984;5: 85–94
- Blanksma N. G. and van Eijden T. M. Electromyographic heterogeneity in the human temporalis and masseter muscles during static biting, open/close excursions, and chewing. *J Dent Res* 1995;74(6): 1318-1327
- Boyar, M.M.; Kilcast, D. A research note: Electromyography as a novel method for examining food texture. *J. Food Sci.* 1986a;51, 859-860
- Boyar, M.M.; Kilcast, D. Food texture and dental science. *J. Texture Stud.* 1986b;17, 221-252
- Brown, W.E.; Langlely, K.R.; Martin A.; MacFie, H.J.H. Characterisation of patterns of chewing behaviour in human subjects and their influence on texture perception. *J. Texture Studies* 1994a;25, 455-468
- Brown, W.E.; Shearn, M.; MacFie, H.J.H. Method to investigate differences in chewing behaviour in humans: II. Use of electromyography during chewing to assess chewing behaviour. *J. Texture Stud.* 1994b;25; 17-31

- Close, P., Stokes, M., L'Estrange, P. und Rowell, J.. Ultrasonography of masseter muscle size in normal young adults. *Journal of oral rehabilitation* 1995;22, 129-134.
- De Boever, J. Experimental occlusal balancing-contact interference and muscle activity. An electromyographic study with permanently applied electrodes. *Parodontologie* 1969;23, 59-69.
- Derfler B. and Goldberg L. J. Spike train characteristics of single motor units in the human masseter muscle. *Experimental neurology* 1978;61(3): 592-608
- Eberhard, L., Braun, S., Wirth, A., Schindler, H. J., Hellmann, D. und Giannakopoulos, N. N. The effect of experimental balancing interferences on masticatory performance. *J Oral Rehabil* 2014;41, 346-352.
- Dellow PG, Lund JP. Evidence for central timing of rhythmical mastication. *The Journal of physiology*.
- Donga R, Lund JP. Discharge patterns of trigeminal commissural last-order interneurons during fictive mastication in the rabbit. *J Neurophysiol*. 1991; 66:1564–1578
- Engelen L, Fontijn-Tekamp FA, van der Bilt A, The influence of product and oral characteristics on swallowing, *Arch Oral Biol* 2005;50:739–46,
- Eriksson, P. O., Butler-Browne, G. S. und Thornell, L. E. Immunohistochemical characterization of human masseter muscle spindles. *Muscle Nerve* 1994;17, 31-41, doi: 10.1002/mus.880170105.
- Falla D., Farina D. and Graven-Nielsen T. Experimental muscle pain results in reorganization of coordination among trapezius muscle subdivisions during repetitive shoulder flexion. *Experimental Brain Research* 2007;178(3): 385-393
- Feldman, A. G. Once more on the equilibrium-point hypothesis (λ model) for motor control. *J Mot Behav* 1986;18, 17-54.
- Ferrario VF, Sforza C, Colombo A, Ciusa V. An electromyographic investigation of masticatory muscles symmetry in normo-occlusion subjects. *J Oral Rehabil*. 2000;27:33–40.
- Ferrario VF, Sforza C. Coordinated electromyographic activity of the human masseter and temporalis anterior muscles during mastication. *Eur J Oral Sci* 1996;104(5-6): 511-7
- Ferrario, V. F., Tartaglia, G. M., Galletta, A., Grassi, G. P., & Sforza, C. (2006). The influence of occlusion on jaw and neck muscle activity: a surface EMG study in healthy young adults. *Journal of oral rehabilitation*, 33(5), 341-348.

- Flanagan, J. R., Ostry, D. J. und Feldman, A. G. Control of human jaw and multi-joint arm movements. *Advances in Psychology* 1990;70, 29-58.
- Fontijn-Tekamp FA, van der Bilt A, Abbink JH, Bosman F, Swallowing threshold and masticatory performance in dentate adults, *Physiol Behav* 2004;83:431-6,
- Foster KD, Woda A, Peyron MA. Effect of texture of plastic and elastic model foods on the parameters of mastication. *J Neurophysiol* 2006;95(6):3469-79.
- Gallo LM, Colombo V, Maake C. 3 Funktionelle Anatomie. Ettlín D, Gallo LM. Das Kiefergelenk in Funktion und Dysfunktion. Stuttgart: Thieme. 2019 Mar 20;44.
- Gavião MBD, Engelen L, van der Bilt A, Chewing behavior and salivary secretion, *Eur J Oral Sci* 2004;112:19-24
- German RZ, Crompton AW, Thexton AJ, The role of animal models in understanding feeding behavior in infants, *Int J Orofac Myol* 2004;30: 20-30,
- Giannakopoulos NN, Wirth A, Braun S, Eberhard L, Schindler HJ, Hellmann D. Effect of the occlusal profile on the masticatory performance of healthy dentate subjects. *International Journal of Prosthodontics*. 2014 Jul 1;27(4).
- Hagberg, C.; Agerberg, G.; Hagberg, M. Regression analysis of electromyographic activity of masticatory muscles versus bite force. *Scand. J. Dent. Res.* 1985;93, 396-402
- Hannam, A. G., De Cou, R. E., Scott, J. D. und Wood, W. W. The relationship between dental occlusion, muscle activity and associated jaw movement in man. *Arch Oral Biol* 1977;22, 25-32.
- Hellmann, D., Becker, G., Giannakopoulos, N. N., Eberhard, L., Fingerhut, C., Rammelsberg, P. und Schindler, H. J. Precision of jaw-closing movements for different jaw gaps. *European Journal of Oral Sciences* 2014;122, 49-56, doi: 10.1111/eos.12100.
- Heners, M. Elektronische Analyse der Unterkiefergrenzbewegung. *Dtsch. Zahnärztl. Z.* 1980;35: 354-356
- Hiemae KM, Mechanisms of food reduction, transport and deglutition: how the texture of food affects feeding behavior, *J Texture Stud* 2004;35: 171-200,
- Horio T, Kawamura Y, Effects of texture of food on chewing patterns in the human subjects, *J Oral Rehabil* 1989;16:177-83,

- Hugger A, Hugger S, Schindler HJ. Surface electromyography of the masticatory muscles for application in dental practice. Current evidence and future developments. *Int J Comput Dent*. 2008 Jan 1;11(2):81-106.
- Hutchings JB, Lillford PJ, The perception of food texture — the philosophy of the breakdown path, *J Texture Stud* 1988;19:103–15
- Jack, F.R.; Piggot J.R.; Paterson, A. Relationships between electromyography, sensory and instrumental measures of cheddar cheese texture. *J. Food Sci*. 1993; 58, 1313-1317
- Johansson AS, Svensson KG, Trulsson M. Impaired masticatory behavior in subjects with reduced periodontal tissue support. *Journal of periodontology*. 2006 Sep;77(9):1491-7.
- Johansson, R. S. und Olsson, K. Microelectrode recordings from human oral mechanoreceptors. *Brain Research* 1976;118, 307-311, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0006-8993\(76\)90716-2](http://dx.doi.org/10.1016/0006-8993(76)90716-2).
- Johansson, R. S., Trulsson, M., Olsson, K. Å. und Westberg, K. G. Mechanoreceptor activity from the human face and oral mucosa. *Experimental Brain Research* 1988;72, 204-208, doi: 10.1007/BF00248518.
- Karlsson, S., Cho, S. A. und Carlsson, G. E. Changes in mandibular masticatory movements after insertion of nonworking-side interference. *J Craniomandib Disord* 1992;6, 177-183.
- Keynes R. D., Aidley D. J. and Huang C. L.-H. *Nerve and muscle*. Cambridge Univ Press 2001
- Kohyama K, Hatakeyama E, Sasaki T, Dan H, Azuma T, Karita K, Effects of sample hardness on human chewing force: a model study using silicone rubber, *Arch Oral Biol* 2004;49:805–16,
- Kohyama K, Mioche L. Chewing behavior observed at different stages of mastication for six foods, studied by electromyography and jaw kinematics in young and elderly subjects. *Journal of Texture Studies*. 2004 Oct;35(4):395-414.
- Konrad P. *EMG-Fibel: Eine praxisorientierte Einführung in die kinesiologische Elektromyographie, Signalgrundlagen*. 2005; Noraxon, USA
- Koriath, T. Number and location of occlusal contacts in intercuspal position. *The Journal of prosthetic dentistry* 1990;64, 206-210.
- Landgren S, Olsson KA, Westberg KG. Bulbar neurones with axonal projections to the trigeminal motor nucleus in the cat. *Exp Brain Res*. 1986; 65:98–111

- Lavigne G, Kim JS, Valiquette C, Lund JP, Evidence that periodontal pressure-receptors provide positive feedback to jaw closing muscles during mastication, *J Neurophysiol* 1987;58:342–58,
- Lucas PW, Luke DA, Is food particle size a criterion for the initiation of swallowing? *J Oral Rehabil* 1986;13:127–36,
- Lucas PW, Luke DA, Optimum mouthful for food comminution in human mastication, *Arch Oral Biol* 1984;29:205–10
- Lund JP, Kolta A. Generation of the central masticatory pattern and its modification by sensory feedback. *Dysphagia*. 2006 Jul 1;21(3):167-74.
- Lund JP, Mastication and its control by the brain stem, *Crit Rev Oral Biol Med* 1991;2:33–64,
- Mioche L, Bourdiol P, Martin J-F, Noël Y, Variations in human masseter and temporalis muscle activity related to food texture during free and side-imposed mastication, *Arch Oral Biol* 1999;44:1005–12,
- Miyawaki S, Ohkochi N, Kawakami T, Sugimura M. Changes in masticatory muscle activity according to food size in experimental human mastication. *J Oral Rehabil* 2001; 28(8):778-84.
- Møller, E. The chewing apparatus. *Acta Physiol. Scand.* 1966;69, 1-229.
- Morimoto T, Inoue T, Masuda Y, Nagashima T, Sensory components facilitating jaw-closing muscle activities in the rabbit, *Exp Brain Res* 1989;76:424–40,
- Morris T. J., Branden C. A. Maximum shortening velocity and myosin heavy-chain isoform expression in human masseter muscle fibers. *Journal of dental research* 2001;80(9): 1845-1848
- Naeije M, McCarroll RS, Weijs WA. Electromyographic activity of the human masticatory muscles during submaximal clenching in the inter-cuspal position. *Journal of oral rehabilitation*. 1989 Jan;16(1):63-70.
- Nishigawa, K., Nakano, M. und Bando, E. Study of jaw movement and masticatory muscle activity during unilateral chewing with and without balancing side molar contacts. *Journal of oral rehabilitation* 1997;24, 691-696.
- Nozaki S, Iriki A, Nakamura Y. Localization of central rhythm generator involved in cortically induced rhythmical masticatory jaw-opening movement in the guinea pig. *J Neurophysiol.* 1986; 55:806–825
- Olsson KA, Lund JP, Sasamoto K. Modulation of transmission in rostral trigeminal sensory nuclei during chewing. *J Neurophysiol* 1986; 55 (1): 56–75

- Pedersen AM, Bardow A, Jensen SB, Nauntofte B, Saliva and gastrointestinal functions of taste, mastication, swallowing and digestion, *Oral Dis* 2002;8:117–29
- Pereira LJ, Gavião MBD, van der Bilt A, Effects of added fluids on swallowing threshold and chewing process, *J Dent Res* 2006;153,
- Peyron MA, Lassauzay C, Woda A, Effects of increased hardness on jaw movement and muscle activity during chewing of visco-elastic model foods, *Exp Brain Res* 2002;142:41–51,
- Peyron MA, Maskawi K, Woda A, Tanguay R, Lund JP, Effects of food texture and sample thickness on mandibular movement and hardness assessment during biting in man, *J Dent Res* 1997;76:789–95,
- Pfeifer K, Vogt L, Banzer W. *EMG Standards der Sportmedizin*. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin. 2003; 54 (11): 331-332
- Piancino MG, Bracco P, Vallelonga T, Merlo A, Farina D. Effect of bolus hardness on the chewing pattern and activation of masticatory muscles in subjects with normal dental occlusion. *J Electromyogr Kinesiol* 2007. [Epub ahead of print]
- Po JMC, Gallo LM, Kieser JA et al. Time-frequency analysis of chewing activity in the natural environment. *J Dent Res* 2011; 90 (10): 1206– 1210
- Prinz JF, Lucas PW, An optimization model for mastication and swallowing in mammals, *Proc R Soc Lond B* 1997;264:1715–21,
- Prinz JF, Lucas PW, Swallow thresholds in human mastication, *Arch Oral Biol* 1995;40:401–3,
- Pröschel PA, Hofmann M, Frontal chewing patterns of the incisor point and their dependence on resistance of food and type of occlusion, *J Prosthet Dent* 1988;59:617–24,
- Pröschel, P.; Ohkawa S.; Hardtmann G.; Ott R.W. Zur Möglichkeit der Kaukraftabschätzung aus dem Elektromyogramm der Elevatoren. *Dtsch. Zahnärztl. Z.* 1994;49, 37-40.
- Sakamoto, H.; Harada, T.; Matsukubo, T.; Takaesu, Y.; Tazaki, M. Electromyographic measurement of textural changes of foodstuffs during chewing. *Agricultural and Biological Chemistry* 1989;53: 2421-2433.
- Schindler HJ, Stengel E, Spieß WEL. Der Einfluss von Muskel- Parodontal- und Gelenkproriozeptoren auf die Steuerung des Kauforganges. *Dtsch Zahnärztl Z* 1997; 52(9):624-28.

- Scholz, J. P. und Schöner, G. The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task. *Experimental brain research* 1999;126, 289-306.
- Stålberg E., Eriksson P.-O., Antoni L. and Thornell L.-E. Electrophysiological study of size and fibre distribution of motor units in the human masseter and temporal muscles. *Archives of Oral Biology* 1986;31(8): 521-527.
- Stuart D. G., Hamm T. M. and Noven S. V. Partitioning of monosynaptic Ia EPSP connections with motoneurons according to neuromuscular topography: generality and functional implications. *Progress in neurobiology* 1988;30(5): 437- 447.
- Thexton AJ, Mastication and swallowing: an overview, *Br Dent J* 1992;173:197–206,
- Türker, K. S. Reflex control of human jaw muscles. *Crit Rev Oral Biol Med* 2002;13, 85-104.
- Türp J. C. and Schindler H. J. Zum Zusammenhang zwischen Okklusion und Myoarthropathien. *Schweizer Monatsschrift für Zahnmedizin* 2003;113(9): 965-971.
- van der Bilt A, Abbink JH, Mowlana F, Heath MR, A comparison between data analysis methods concerning particle size distributions obtained by mastication in man, *Arch Oral Biol* 1993;38:163–7,
- Van der Bilt A, Engelen L, Pereira LJ, Van der Glas HW, Abbink JH, Oral physiology and mastication, *Physiology & behavior*, 2006 Aug 30;89(1):22-7,
- van der Bilt, A., Tekamp, A., Van Der Glas, H. und Abbink, J. Bite force and electromyography during maximum unilateral and bilateral clenching. *European Journal of Oral Sciences* 2008;116, 217-222, doi: 10.1111/j.1600-0722.2008.00531.x.
- van der Glas HW, Olthoff LW, van der Bilt A, Bosman F, Control of elevator muscle activity during chewing in man, *Soc Neurosci Abstr* 1987;13:11,
- Weinberg, E. The mesencephalic root of the fifth nerve. A comparative anatomical study. *The Journal of Comparative Neurology* 1928;46, 249-405, doi: 10.1002/cne.900460202.
- Yin, C. S., Lee, Y. J. und Lee, Y. J. Neurological influences of the temporomandibular joint. *Journal of Bodywork and Movement Therapies* 2007;11, 285-294, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbmt.2006.11.007>.

Yu F., Stål P., Thornell L.-E. and Larsson L. Human single masseter muscle fibers contain unique combinations of myosin and myosin binding protein C isoforms. *Journal of Muscle Research & Cell Motility* 2002;23(4): 317-326

Zimny, M. L. Mechanoreceptors in articular tissues. *American Journal of Anatomy* 1988;182, 16-32, doi: 10.1002/aja.1001820103.

Danksagung

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. Marc Schmitter für die Möglichkeit, diese Doktorarbeit an der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik des Universitätsklinikums Würzburg anzufertigen.

Mein ausdrücklicher Dank gilt auch Herrn PD Dr. Nikolaos N. Giannakopoulos für die Überlassung des Dissertationsthemas und sein außerordentliches Engagement bei der Gestaltung der Versuchsaufbauten und der Durchführung der komplexen Experimente. Er stand mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite und beantwortete mir meine Fragen stets mit hoher fachlicher Kompetenz.

Meiner ehemaligen Kollegin Frau Dr. Sophia Terebesi danke ich herzlich für ihre Hilfe bei den Versuchsreihen und die wichtigen Vorarbeiten im Labor. Ohne ihren unermüdlichen Einsatz bei der Durchführung der Experimente und die engagierte Vorarbeit hätten sich die komplexen Versuchsaufbauten nicht realisieren lassen.

Ein besonderer Dank geht an meinen Mentor und Motivator Herrn Prof. Dr. Hans Jürgen Schindler für seine außerordentlich engagierte Begleitung und unermüdliche Unterstützung. Seine thematischen und wissenschaftlichen Hinweise waren eine wichtige Inspiration beim Schreiben der Dissertation. Seine motivierende Art und wissenschaftliche Neugierde waren ein wichtiger Motor für die Entstehung dieser Dissertation.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie für die Unterstützung und den unerschütterlichen Glauben an mich bedanken. Ohne den Rückhalt meiner Familie und die Entlastung durch meine Frau Ellen hätte ich diese Zeilen nicht verfassen können.