

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
Westdeutsche Kieferklinik
Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Direktor: Univ.-Professor Dr. U. Stüttgen

**Reproduzierbarkeit von Kaufunktionsdaten
in einer klinischen Studie**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin

Der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine Universität
Düsseldorf

vorgelegt von

Alexandra Kravchenko

2010

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.: Univ.-Professor Dr. med. Joachim Windolf
Dekan

Referent: Prof. Dr. Alfons Hugger

Korreferent: Prof. Dr. Dr. Thomas Beikler

Meiner Mutter, meiner Großmutter und Sebastian in Dankbarkeit gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Physiologie des Kauens	1
1.2 Kaumuskulatur und deren Besonderheiten	5
1.3 Registrierverfahren zur Aufzeichnung von Unterkieferbewegungen.....	8
1.4 Oberflächen-Elektromyographie	12
2 Problemstellung	15
3 Material und Methode	16
3.1 Probandengruppe und verwendete Geräte/Materialien	16
3.2 Durchführung der Untersuchung	18
3.3 Datenverarbeitung	19
3.4 Statistische Analyse	20
4 Ergebnisse	23
4.1 Unterkiefergrenzbewegungen	23
4.2 Kauseitenpräferenz	25
4.3 Muskelarbeit	27
4.4 Maximale voluntäre Kontraktion (MVC)	47
4.5 Asymmetrieindex (AI)	51
4.6 Angewiesener seitenbezogener Kauindex (DCI).....	65
4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse	69

5 Diskussion	71
5.1 Diskussion der Methode und der verwendeten Materialien	71
5.2 Studien zur bevorzugten Kauseite.....	72
5.3 Studien zur maximalen voluntären Kontraktion (MVC).....	74
5.4 Studien zur Muskelarbeit der Unterkieferelevatoren.....	78
5.5 Studien zum Asymmetrieindex (AI) und zum angewiesenen seitenbezogenen Kauindex (DCI).....	84
5.6 Studien zur Muskelkraftabschätzung aus dem Elektromyogramm.....	87
5.7 Studien zu Einflussfaktoren auf die Muskelaktivität beim Kauen.....	88
6 Zusammenfassung.....	91
7 Literaturverzeichnis	93
8 Danksagung.....	100
9 Abstract.....	101

1 Einleitung

1.1 Physiologie des Kauens

Aufnahme von Nahrung ist ein alltäglicher und physiologischer Prozess des Menschen. Die zugeführte Nahrung unterliegt im Verdauungsprozess zahlreichen mechanischen und chemischen Vorgängen. Diese dienen dazu die Speisepartikel in absorbierbare Bestandteile zu überführen, die anschließend ins Blut bzw. in die Lymphe aufgenommen werden (Vaupel 2005). Der Kauvorgang stellt einen wichtigen und komplexen Vorgang zu Beginn des Verdauungsweges dar, der primär der Nahrungszerkleinerung dient. Strukturen, die am Kauvorgang beteiligt sind, umfassen den Ober- und Unterkiefer mit den Zähnen und dem dazugehörigen Parodont, die Kiefergelenke, die Kaumuskulatur, die Zunge, die Wangen, die Lippen, den Gaumen und die Speicheldrüsen (Vaupel 2005).

Die Mundhöhle stellt die erste Station des Verdauungsweges dar. Nach dem willkürlichen Abbeißen eines Bissens mit den Frontzähnen, bzw. Einbringen der Nahrung in die Mundhöhle setzt automatisch der meist reflektorisch ablaufende Prozess der Nahrungszerkleinerung ein, welcher auch als Mastikation bezeichnet wird. Das Kaugut wird nach distal, zu den Molaren und Prämolaren transportiert. Darauf folgt die Reduktion der Partikelgröße, welche in den Vorgängen der Selektion und Reduktion vollzogen wird. Im Rahmen der Selektion wird mit Hilfe der Zunge und der Wangen die Nahrung zwischen den Kauflächen platziert. Dieser Prozess ist abhängig von einer ganzen Reihe unterschiedlicher Faktoren: Zungen- und Wangenaktivität, Zahnform, Kaufläche, interokklusaler Abstand der Seitenzähne sowie Größe und Anzahl der Nahrungspartikel (Schindler und Hugger 2006). Durch rhythmische, dreidimensionale Bewegungen des Unterkiefers wird die Nahrung anschließend zwischen den Kauflächen zermahlen. Der Zerkleinerungsprozess „wird im Wesentlichen durch die Zahnkonfiguration, die Größe und Koordination der Muskelkraft, die Bruchcharakteristik der Nahrungsstruktur, die Partikelgröße, -form und -anzahl der Nahrungsmittel bestimmt“ (Schindler und Hugger 2006, S.114). Infolge der Nahrungszerkleinerung wird aufgrund der Oberflächenvergrößerung der enzymatische Aufschluss in der Mundhöhle, im Magen und im Darm erheblich verbessert.

Die Speisen werden bis zu einer bestimmten Partikelgröße zerkleinert und mit Speichel durchsetzt. Ein gleitfähiger Bolus wird geformt und mit dem Schluckakt in die Speiseröhre und von dort aus in die weiteren Abschnitte des Magen-Darm-Traktes befördert. In einer Studie von Mishellany et al. (2006) wurde die Partikelgröße eines schluckfertigen Bolus bei mehreren gesunden jungen Probanden untersucht. Die Ergebnisse dieser Studie zeigten, dass die Verteilung der Partikelgröße in einem Bolus von der Art des Nahrungsmittels abhängig ist und nur geringfügige interindividuelle Unterschiede aufweist.

Gewöhnlich befindet sich die Mandibula vor Beginn einer Kaubewegung entweder in der habituellen Interkuspitationslage - dabei weisen die Zähne des Ober- und Unterkiefers zumeist einen maximalen Vielpunktkontakt auf - oder in der Ruhelage - in der unbewussten Abstandshaltung zwischen den Zahnreihen des Ober- und Unterkiefers. Die Kaubewegung wird durch das Platzieren des Kauguts zwischen den Kauflächen der Arbeitsseite eingeleitet. Darauf folgt die Nahrungszerkleinerung in mehreren Kauzyklen. Unter einem Kauzyklus versteht man „das Intervall zwischen den beiden Wendepunkten von Öffnungs- und Schließbewegung“ (Schindler und Hugger 2006, S. 118), welches im Durchschnitt je nach Textur und Härte der Nahrung etwa 0,5 bis 0,7 Sekunden dauert. Der Kauzyklus ist eine rhythmische Bewegungseinheit und wird in drei Phasen untergliedert: die Öffnungsphase, die schnelle Schließphase und die langsame Schließphase. Die letzte Phase beinhaltet oft eine kurze, etwa 190 ms dauernde okklusale Haltephase vor dem nächsten Öffnen (Schindler und Hugger 2006). Zu Beginn eines Kauzyklus führt der Unterkiefer zunächst eine Öffnungsbewegung durch und gleitet dabei nach unten und vorne. Anschließend folgt die frühe Schließphase. In dieser Phase bewegt sich der Inzisalpunkt nach lateral, der Kondylus der Arbeitsseite wandert ca. 0,3 mm nach hinten oben in der Fossa mandibularis. Währenddessen gleitet der Gelenkkopf der Balanceseite nach vorne, unten und innen. Im Verlauf der weiteren Schließbewegung bewegt sich der Inzisalpunkt auf einer inkursiven Bahnkurve zurück in den Bereich der habituellen Interkuspitation. Dabei wird er durch den zurückgleitenden Kondylus der Balanceseite geführt. Der Kondylus der Arbeitsseite wandert ebenfalls durch eine geringfügige Bewegung nach vorne unten in seine ursprüngliche Startposition zurück. Erst in der langsamen Schließphase, welche auch als Phase des sogenannten „power stroke“ bezeichnet wird, kommt es zur

Durchdringung des Nahrungsmittels mit den Zähnen. Hierbei kommt es zu Kräfteübertragung zwischen den Zähnen und dem Kaugut. Je nach Kaugut werden unterschiedlich hohe Kaukräfte generiert. Sie können bei harter Nahrung bis auf 250 N im Bereich der Molaren ansteigen (Schindler und Hugger 2006).

Eine Vielzahl von Kauzyklen bilden eine Kausequenz. Diese erstreckt sich vom ersten Kauen bis zum finalen Schluckakt. Die Kausequenz wird in drei aufeinander folgende Perioden unterteilt. Während der ersten Periode, die Transportperiode genannt wird, findet die Beförderung der Nahrung zu den Seitenzähnen statt. Danach folgt die Zerkleinerungsperiode, deren Dauer von der Beschaffenheit der Nahrung abhängt und die in 80% aller Kausequenzen vom intermediären Schlucken unterbrochen wird. Schließlich folgt eine Periode, die der Reinigung der Mundhöhle und der Bolusformation vor dem finalen Schluckakt dient. Diese Periode ist durch irreguläre Kieferbewegungen gekennzeichnet (Schindler und Hugger 2006).

Der Kauakt wird vom zentralen Nervensystem gesteuert und hat einen rhythmischen Charakter. Das Grundmuster wird von dem sogenannten „zentralen Mustergenerator“ erzeugt, welcher sich im Bereich des Hirnstamms befindet (Schindler und Hugger 2006). Durch das periphere Feedback parodontaler, Muskel- und Gelenkrezeptoren wird das Kaumuster moduliert und den sich in der Mundhöhle ständig ändernden Anforderungen angepasst (Lund 1991, Schindler und Hugger 2006).

Physikalische Eigenschaften sowie die Größe des zugeführten Bissens beeinflussen wesentlich die Kauparameter. So erfordert beispielsweise der Aufschluss harter und trockener Nahrung bis zur Formation eines schluckfertigen Bolus eine höhere Anzahl von Kauzyklen, die Sequenzdauer nimmt insgesamt zu (van der Bilt et al. 2006). Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Kauparameter deutliche interindividuelle Unterschiede aufweisen. Die Anzahl der Kauzyklen, die für die Zerkleinerung einer bestimmten Nahrungssorte benötigt wird, zeigt außerordentliche Schwankungen zwischen den Individuen (van der Bilt et al. 2006). Die Kaumuskelaktivität und die Unterkieferbewegungen variieren ebenfalls von Individuum zu Individuum (Mioche et al. 2004). Mioche et al. (2004) stellten ferner fest, dass sich das individuelle Kauverhalten - im Gegensatz zu starken interindividuellen Schwankungen der Kauparameter - durch eine konstante Gleichmäßigkeit auszeichnet.

Woda et al. (2006) untersuchten in einer Studie den Einfluss extrinsischer und intrinsischer Faktoren auf die Unterkieferbewegungen und die Kaumuskelaktivität. Sie stellten fest, dass sowohl die intrinsischen Eigenschaften des Individuums (Geschlecht, Alter, Zahnstatus), als auch die extrinsischen Faktoren des Kauguts (Nahrungsgröße, Härte, physikalische Eigenschaften) den Kauvorgang modulieren. So wurden zum Beispiel deutliche Unterschiede der Kauparameter zwischen Männern und Frauen ermittelt. Männer zeichneten sich durch kürzere Kauzyklendauer, höhere vertikale Amplitude der Kaubewegungen und höhere EMG-Aktivität pro Zyklus und Kausequenz aus.

Mioche et al. (2004) beschäftigten sich in einer Studie mit dem Einfluss des Alterns auf die Mastikation. Sie stellten fest, dass das gewöhnliche Altern bei gesunden, vollbezahnten Personen moderate Veränderungen des Kauverhaltens induziert. Beeinträchtigungen der neuromuskulären Aktivität, wie zum Beispiel die verminderte Kaukraft, werden zum Teil durch modifiziertes Kauverhalten kompensiert, welches sich durch eine verlängerte Mastikationsdauer auszeichnet. Große Abweichungen des Kauverhaltens zeigten sich hingegen bei Personen mit reduziertem Zahnbestand und beeinträchtigtem Gesundheitszustand. So wurde bei diesen Personen eine dramatische Reduktion der Kaueffektivität beobachtet, die oft mit allerlei Magen-Darm-Erkrankungen korrelierte. Trotz einer verlängerten Kausequenzdauer wiesen die schluckfertigen Boli dieser Personen eine größere Partikelgröße im Vergleich zu jungen Personen mit vergleichbarem Zahnstatus auf. Außerdem konnte bei älteren Personen eine langsamere und geringere Adaptation der Kaukräfte an die Nahrungstextur nachgewiesen werden. Woda kam in seiner Studie ebenfalls zu ähnlichen Ergebnissen. Er beobachtete eine mit dem Alter ansteigende Anzahl der Kauzyklen pro Sequenz sowie eine verminderte Kauleistung und eine beeinträchtigte Kaufunktion bei Personen mit vermindertem Zahnbestand (Woda et al. 2006).

Um die Kaufunktion bewerten zu können, wurden die Begriffe Kauleistung („masticatory performance“), Kaueffektivität („masticatory efficiency“) und Kaueffizienz eingeführt. Kauleistung beschreibt die „Partikelgrößenverteilung nach einer vorgegebenen Anzahl von Kauzyklen“ (Schindler und Hugger 2006, S.120). Die Kauleistung ist stark von der Anzahl der okkludierenden Zähne abhängig und zeigt entsprechend starke Einbußen bei Personen mit reduziertem Zahnbestand oder bei

Totalprothesenträgern. Die Kaueffektivität wird durch die „Anzahl der Kauzyklen, die notwendig sind, um die Nahrung bis zu einer bestimmten Partikelgröße zu reduzieren“ (Schindler und Hugger 2006, S.120), definiert. Unter Kaeffizienz wird der pro Kauzyklus erreichte Zerkleinerungsgrad der Nahrung verstanden. Diese Kenngrößen erlauben jedoch im physikalischen Sinne keine Aussage über die tatsächlich vom Kausystem geleistete Arbeit (Schindler und Hugger 2006). In einer Studie von Paphangkorakit et al. (2008) wurde nachgewiesen, dass Personen mit einer guten Kauleistung nicht zwangsläufig „effiziente“ bzw. „effektive“ Kauer sind. Testpersonen mit einer guten Kauleistung neigten dazu, mehr Muskelkraft während des Kauens einzusetzen.

Zur Bewertung der Kauleistung, Kaueffektivität und -effizienz wird häufig die sogenannte Siebmethode eingesetzt. Dabei wird das Kaugut durch eine Reihe von Sieben gefiltert. Die Menge der Partikel in jedem Sieb wird getrocknet und anschließend gewogen. Die mittlere Partikelgröße des Kauguts wird ermittelt (van der Bilt et al. 2006; Paphangkorakit et al 2008). Diese Methode ist jedoch sehr zeitaufwendig (Escudeiro Santos et al. 2006). Eine weitere Messmethode zur Beurteilung der Kaufunktion stellt die kolorimetrische Auswertung dar. Dabei kommt ein standardisiertes und mehrfarbiges Kaugut zum Einsatz, dessen Durchmischungsgrad nach dem Kauvorgang digital erfasst wird (Escudeiro Santos et al. 2006).

1.2 Kaumuskulatur und deren Besonderheiten

Kaumuskeln stellen die wichtigsten Strukturen des Kauapparates dar, die für den Kauvorgang essentiell sind. Die Fähigkeit zur Kontraktion erlaubt ihnen vielfältige, dreidimensionale Unterkieferbewegungen zu steuern und Kräfte zu erzeugen, die für die Zerkleinerung unterschiedlicher Nahrungsarten notwendig sind. Ihr komplexer Aufbau und die daraus resultierenden vielfältigen Kontraktionseigenschaften machen die Kaumuskeln zu kräftigsten und einzigartigen Muskeln im menschlichen Körper (Grünheid et al. 2009).

Die Unterkieferbewegungen werden von sieben Muskelpaaren ausgeführt, die alle ihren Ansatz an der beweglichen Mandibula haben. Dies sind beidseits: M.

temporalis, M. masseter, M. pterygoideus medialis und M. pterygoideus lateralis sowie die suprahyoidale Muskulatur mit M. digastricus venter anterior, M. mylohyoideus und M. geniohyoideus. Die ersten drei sind die größten Kaumuskeln und dementsprechend dazu befähigt, die größten Kräfte zu entwickeln. Sie werden als Kieferschließmuskeln bezeichnet, deren Hauptaufgabe in der Hebung des Unterkiefers gegen die Schädelbasis liegt.

Kaumuskeln gehören zur Gruppe der quergestreiften Muskulatur und haben eine komplex organisierte, hierarchisch aufgebaute innere Struktur. Sie unterscheiden sich dennoch in einigen funktionellen, histochemischen und mikromorphologischen Aspekten wesentlich von der quergestreiften Muskulatur der Extremitäten und des Rumpfes (Schindler und Türp 2008). Ein Kaumuskel setzt sich aus zahlreichen lang gestreckten Muskelzellen zusammen, die als Muskelfasern bezeichnet werden und mehrere randständige Zellkerne enthalten. Kaumuskelefasern sind im Vergleich zu den Fasern der Extremitätenmuskulatur deutlich dünner, ihr Durchmesser beträgt im Durchschnitt 10-50 μm (Schindler und Türp 2008). Jede Muskelfaser ist aus einer Vielzahl von Myofibrillen aufgebaut, welche parallel zur Muskellängsachse verlaufen und aus Sarkomeren bestehen. Das Sarkomer repräsentiert die kleinste funktionelle Einheit der Muskelzelle und setzt sich aus zahlreichen dicken und dünnen Myofilamenten zusammen. Die dicken Filamente enthalten vorwiegend Myosin, während Aktin den Hauptbestandteil der dünnen Filamente darstellt. Die Myofilamente bilden den kontraktilem Apparat, der für die aktive Kraftentwicklung zuständig ist (Schindler und Türp 2006; Grünheid et al. 2009). In der menschlichen Kaumuskulatur wurden mindestens vier Myosin-Arten mit unterschiedlicher Zusammensetzung der schweren Myosinkette gefunden. Diese sogenannten Myosin-Isoforme werden in einer großen Anzahl von Kaumuskelefasern gleichzeitig exprimiert, sie sorgen für eine breite Spanne von Kontraktionsgeschwindigkeiten der Kaumuskulatur. Aufgrund des komplexen Aufbaus können die Kaumuskeln bei einer relativ geringen Bewegungskapazität ein beträchtliches Kraftpotential entwickeln (Schindler und Türp 2006).

Beim Menschen werden grundsätzlich zwei Muskelfasertypen unterschieden: die langsam kontrahierenden Typ-I-Fasern und die schnell kontrahierenden Typ-II-Fasern. Histochemische Untersuchungen der Kaumuskulatur haben gezeigt, dass

die Muskelfasern in drei große Kategorien unterteilt werden können: Typ-I, Typ-II, welcher sich noch in drei weitere Subgruppen A-C untergliedern lässt, und einen intermediären Typ IM. Diese Einteilung wurde entsprechend des Fasergehalts an mitochondrialem Enzym oder Myosin-ATPase festgelegt. Die ATPase-Aktivität ist für das Kontraktionsverhalten eines Muskels entscheidend. So enthalten die schnellen Typ-II-Fasern eine hohe, die Typ-IM-Fasern eine mittlere und die die Typ-I-Fasern eine niedrige Konzentration dieses Enzyms. Die Verteilung der Fasertypen variiert sowohl zwischen den Muskeln als auch innerhalb eines einzelnen Muskels. In den Kaumuskeln wurden im Gegensatz zu Extremitätenmuskulatur, für die ein Mosaikmuster charakteristisch ist, ganze Areale dicht gepackter Fasern desselben histochemischen Fasertyps gefunden. Jeder Muskel weist eine individuelle Verteilung der unterschiedlichen Fasertypen, die nach Alter, Geschlecht und Muskelfunktion variieren (Schindler und Türp 2006).

Sensorische und motorische Nerven versorgen über mehrere Äste die Kaumuskulatur. Der Verbund aus Motoneuron und den von ihm versorgten Muskelfasern wird als „motorische Einheit“ bezeichnet. Je mehr motorische Einheiten einen Muskel innervieren, desto feiner ist seine Kraftabstufung. Im Gegensatz zur Skelettmuskulatur, bei der häufig eine große Anzahl von Fasern von einem einzigen Motoneuron innerviert werden, begrenzt sich der Versorgungsbereich eines Motoneurons in der Kaumuskulatur auf eher kleinere, begrenzte Kompartimente (Grünheid et al. 2009). Diese feine Partionierung erlaubt eine differenzierte Aktivierung von einzelnen Muskelregionen (Schindler und Türp 2006). Je nach Herausforderung werden unterschiedliche Muskelareale aktiviert (Blanksma et al. 1997).

Die Kaumuskulatur unterliegt stets verschiedenen lokalen und systemischen Stimuli, an die sie ihr Verhalten und ihre Eigenschaften anpassen soll. Sie ist in der Lage, eine Reihe von Eigenschaften in diesem Rahmen zu verändern, dabei folgt sie den gleichen Prinzipien wie die anderen quergestreiften Muskeln. Diese Fähigkeit wird als Muskeladaptation bezeichnet. So ist die Muskulatur in der Lage, sich der gesteigerten mechanischen Beanspruchung durch Zunahme der Muskelmasse und des Muskelquerschnittes anzupassen. Dies erfolgt durch das Dickenwachstum der Muskelfasern, das als Muskelhypertrophie bezeichnet wird. Demgegenüber kommt

es bei Immobilisation oder verminderter Stimulation der Muskelfasern zu einer Muskelverkleinerung oder Atrophie. Diese Veränderungen sind vollständig reversibel. Einzelne Muskelfasern können ihren Fasertyp ändern und so ihre Kontraktionseigenschaften und ihren Energieverbrauch den veränderten Bedingungen anpassen (Grünheid et al. 2009). Die Faserzusammensetzung kann sich ebenfalls verändern.

Mit dem Alter treten systemische Veränderungen im menschlichen Körper auf, die einen bedeutenden Einfluss auf die gesamte Muskulatur haben. So kommt es zu strukturellen und funktionellen Veränderungen in der Kaumuskulatur, die in der Kaukraftreduktion resultieren (Bakke et al. 1990). Die Muskeldicke und die Dichte der Fasern nehmen ab (Schindler und Türp 2006). Ferner wird vermutet, dass es zu einer Verminderung der Kontraktionsgeschwindigkeit von Muskelfasern kommt, die auf einer reduzierten Anzahl von motorischen Einheiten beruhen soll (Chan et al. 2001). Zahnlosigkeit verstärkt diese Veränderungen. Geringere Funktionseinbußen zeigen sich bei bezahnten Personen und bei Prothesenträgern (Mioche et al. 2004).

1.3 Registrierverfahren zur Aufzeichnung von Unterkieferbewegungen

Bereits Ende des 19. Jahrhunderts wurden die ersten Methoden und Techniken zur Aufzeichnung von Unterkieferbewegungen entwickelt (Hugger 2000). Basierend auf unterschiedlichen Ideen und Ansätzen wurden vielfältige Aufzeichnungsmethoden entworfen, von denen manche im Laufe der Zeit ständig weiterentwickelt wurden und auch heutzutage in der Zahnarztpraxis eingesetzt werden. Zu Beginn bediente man sich noch der einfachen visuellen Beobachtung der Unterkieferbewegungen, später kamen die mechanisch-graphischen Verfahren zum Einsatz, die sich aufgrund der einfachen Anwendung und Durchführbarkeit am meisten behauptet haben (Hugger und Schindler 2006). Es folgten optische Verfahren, wie die photographische Aufnahme, sowie die kinematographische Aufzeichnung, welche durch den Einsatz von Filmkameras ermöglicht wurden. Ferner kamen Registrierverfahren unter Benutzung ionisierender Strahlen, elektronische Messmethoden und eine Reihe weiterer Verfahren zum Einsatz (Hugger 2000). Mit Hilfe dieser Registrierverfahren

konnten einerseits bestimmte Unterkieferpositionen festgehalten werden, andererseits dienten sie der Aufzeichnung der Unterkieferbewegungen.

Die Messsysteme können anhand verschiedener Kriterien klassifiziert werden. So unterscheidet man einerseits zwischen extraoral und intraoral aufzeichnenden Messsystemen, andererseits zwischen berührungslosen bzw. unter Berührung messenden Geräten. Ferner wird nach dem Messort bezüglich des Kiefergelenks zwischen gelenknah und gelenkfern registrierenden Systemen differenziert. Das Ausmaß der Freiheitsgraderfassung von Unterkieferbewegungen stellt ebenfalls ein Klassifizierungskriterium dar (Schindler und Hugger 2006).

Nicht alle der oben genannten Verfahren eigneten sich zur Aufzeichnung der Kaubewegungen. Zu den ersten Messsystemen, welche die Registrierung von Kaubewegungen ermöglichten, gehören der Mandibular-Kinesiograph nach Jankelson, der im Jahre 1975 entwickelt wurde, und der Sirognathograph (Abb. 1) aus dem Jahr 1972. Beide Messsysteme wurden in zahlreichen Studien zur Kaubewegungsanalyse eingesetzt (Hugger 2000). Die Datengewinnung dieser Registriersysteme beruhte auf der Messung der Magnetfeldänderung. Mit Hilfe von Sensoren wurde die Bewegung eines kleinen Magneten aufgezeichnet, der an den Unterkieferschneidezähnen fixiert war. Der Vorteil dieser Systeme lag in der nichtinvasiven und relativ einfachen sowie schnell durchführbaren Messung. Das orale Empfinden war während des Messvorgangs wenig beeinträchtigt (Stüttgen 1988). Jedoch ermöglichten die beiden Messsysteme nur die Aufzeichnung der Inzisalpunktbeugung, eine Übertragung oder Umrechnung auf andere Raumpunkte des Unterkiefers war nicht gegeben (Schindler und Hugger 2006; Schönwälder 2002).

Heutzutage werden zunehmend andere, berührungslose und leistungsstärkere Messsysteme verwendet. Moderne elektronische Geräte sind in der Lage, Unterkieferbewegungen in allen sechs Freiheitsgraden zu erfassen und bieten somit die Möglichkeit einer vollständigen Registrierung der Mandibulabewegung. Zudem werden zeitgleich die Bahnen beliebiger Mandibulapunkte automatisch und projektionsfehlerkorrigiert berechnet (Schindler und Hugger 2006; Schönwälder 2002). Die Datenerfassung mit Hilfe eines handelsüblichen Personalcomputers bietet

die zusätzliche Möglichkeit einer verhältnismäßig einfachen Analyse und Auswertung von Kaufunktionsdaten. So finden die Messsysteme zunehmend Verwendung zur Artikulatorprogrammierung für restaurative Zwecke sowie für die kondylären Bewegungsaufzeichnungen im Rahmen der Funktionsdiagnostik.

Zu modernen handelsüblichen elektronischen Messsystemen, die vorwiegend in der Zahnarztpraxis eingesetzt werden, gehören beispielsweise ARCUSdigma (Abb. 2) der Firma KaVo, Jaw Motion Analyzer (JMA) der Firma Zebris sowie String Condylcomp LR3 der Firma Dentron und Freecorder BlueFox (Abb. 3). Die beiden erstgenannten Messsysteme arbeiten berührungslos und beruhen auf dem Prinzip der Laufzeitmessung von Ultraschallimpulsen. Condylcomp LR3 gehört zu den optoelektronischen Messsystemen, welches nach dem Lichtreflexionsprinzip funktioniert, und ist in der Lage, gelenknah und berührungslos Unterkieferbewegungen aufzuzeichnen. Freecorder BlueFox ist ein kürzlich entwickeltes Registriergerät; es misst berührungslos mit Hilfe des Mustertracking-Verfahrens.

Der Einsatz moderner elektronischer Verfahren zeichnet sich gegenüber älteren Methoden durch eine relativ unkomplizierte und zeitsparende Anwendung aus. Eine dreidimensionale kontinuierliche und zeitaufgelöste Erfassung der Bewegungsbahnen mit der Darstellung in der Projektion auf Sagittal-, Frontal- und Horizontalebene stellt einen Vorteil der elektronischen Registriergeräte dar. Einige der modernen elektronischen Geräte verfügen über die Kombinationsmöglichkeit mit weiteren diagnostischen Verfahren, wie z.B. mit einer EMG-Aufzeichnung, einer Geräuschaufzeichnung oder einer Kraftmessung (Kordass 2002).

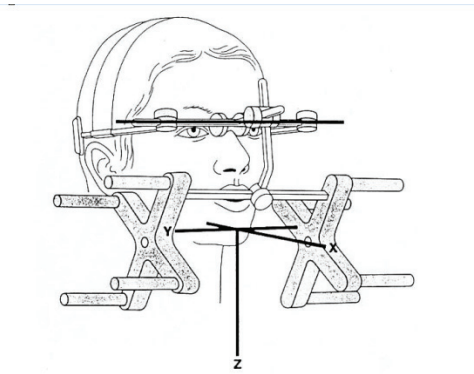


Abbildung 1: Sirognathograph (Quelle: Lewin 1985).



Abbildung 2: ARCUSdigma
(Quelle: www.kavo.com).



Abbildung 3: Freecorder BlueFox
(Quelle: www.dentron.com).



Abbildung 4: CADIAX compact 2
(Quelle: <http://shop.whipmix.com>).

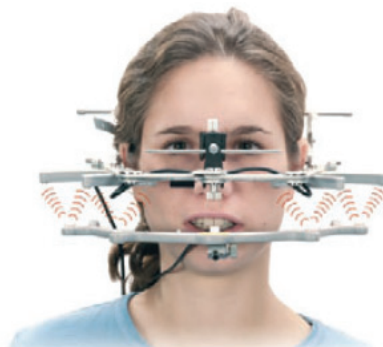


Abbildung 5: AXIOQUICK Recorder
(Quelle: www.sam-dental.de).

Art der Aufzeichnung	Name des Messsystems
extraoral, gelenknah, unter Berührung	CADIAX, CADIAX compact
extraoral, gelenknah, berührungslos	Freecorder BlueFox
extraoral, berührungslos	AxioQuick Recorder
extraoral, gelenkfern, berührungslos	Zebris-JMA, ARCUSdigma
gelenkfern, berührungslos	Mandibular-Kinesiograph, Bio-EGN
intraoral	IPR-, DIR-System

Abbildung 6: *Marktgängige elektronische Messsysteme.*

1.4 Oberflächen-Elektromyographie

Elektromyographie (EMG) ist ein biomechanisches Messverfahren, welches den Vorgang der elektrischen Erregung eines oder mehrerer Muskeln erfasst (Freiwald et al. 2007). Das mittels Elektromyographie abgeleitete Signal entsteht durch Potentialänderungen an der Muskelfaseroberfläche, die durch sogenannte De- und Repolarisationsvorgänge verursacht werden. Im Prozess der elektromechanischen Kopplung werden Muskelzellen durch die elektrischen Impulse der Nervenzellen aktiviert. Folglich kommt es zur Entstehung von Aktionspotentialen an der Muskelfasermembran, die sich entlang der Membran ausbreiten und mit Hilfe von EMG-Elektroden registriert werden können (Freiwald et al. 2007). Im klinischen Bereich findet dieses Verfahren vorwiegend in der Neurologie Verwendung, wo es als Hilfsmittel zur Diagnostik verschiedener Muskel- und Nervenerkrankungen eingesetzt wird (Linke und Pfitzer 2007). Auch in der Zahnmedizin gewinnt diese elektrophysiologische Untersuchung zunehmend an Bedeutung. Unter Berücksichtigung bestimmter methodischer Empfehlungen ermöglicht die Elektromyographie die Ermittlung valider und reliabler quantitativer Daten zum Funktionsstatus der Kaumusculatur (Hugger et al. 2008).

Oberflächen-Elektromyographie (SEMG) ist eine nichtinvasive und schmerzfreie Methode, mit deren Hilfe Informationen zur Muskelaktivität mittels an der Hautoberfläche platzierter Elektroden übermittelt werden. Aufgrund einfacher und

risikofreier Anwendung ist dieses Verfahren sowohl im klinischen Bereich als auch im Bereich der Forschung in der Zahnmedizin gut anwendbar (Castroflorio et al. 2008). Neben dem Vorteil der einfachen Handhabung haben die Oberflächenableitungen den Nachteil, dass nur Signale von den oberflächlichen Muskeln registriert werden (M. masseter, M. temporalis, suprahyoidale Muskulatur) (Ferrario et al. 2000). Für die Erfassung tiefer gelegener Muskeln oder Muskelpartien (wie z.B. M. pterygoideus lateralis) kommen Nadel- bzw. Fadenelektroden zum Einsatz, die in den Muskel eingestochen werden (Konrad 2005).

Die Oberflächen-Elektromyographie-Messungen können entweder bipolar, mit Einsatz von zwei Elektroden, oder monopolar, also unter Verwendung nur einer Elektrode, durchgeführt werden (Freiwald et al. 2007). Ableitung der Muskelaktivität mittels mehrerer monopolarer Elektroden wird als „mapping“ bezeichnet; sie wird z.B. zur Ableitung ganzer Muskelregionen verwendet. Die bipolare Aufzeichnung ist die häufigste Methode für die Registrierung der Kaumuskelaktivität. Hierbei werden Spannungsunterschiede zwischen zwei Elektroden gegen eine gemeinsame Referenzelektrode gemessen und durch einen Differenzverstärker potenziert. Aufgrund geringer Amplituden der EMG-Signale auf der Hautoberfläche ist eine Amplifizierung notwendig (Hugger et al. 2008). Als Hautelektroden werden am häufigsten kreisförmige (Castroflorio et al. 2008) Silber/Silberchlorid-basierte Einmalelektroden verwendet, die als Nassgel- oder als Adhäsiv-Gel-Elektroden hergestellt werden (Konrad 2005). Der Durchmesser der aktiven Leitfläche liegt in der Regel bei ca. 1 cm (Hugger et al. 2008). Der Interelektrodenabstand spielt ebenfalls eine entscheidende Rolle. Am häufigsten wird ein Abstand von 20 mm verwendet. Bei Ableitungen einzelner motorischer Einheiten wird ein kleinerer Interelektrodenabstand empfohlen (Castroflorio et al. 2008). Auch die Orientierung der Elektroden an der Hautoberfläche ist von Bedeutung. Eine Anordnung in Richtung des Muskelverlaufs im zentralen Bereich des inserierenden Muskelbauchs wird empfohlen (Hugger et al. 2008). Die Referenzelektrode sollte an einer elektrisch inaktiven Stelle befestigt werden (z.B. Processus mastoideus). Gute Reproduzierbarkeit der Elektrodenposition wird durch Anfertigung einer individuellen Schablone erreicht. Eine gründliche Hautvorbereitung vor einer Messung ist zwingend erforderlich. Dazu sollten die Haare in dem entsprechenden Areal entfernt und die Haut mit abrasiven Pasten oder mit Alkohol entfettet werden, um einen

geringen Hautwiderstand zu erreichen und die Entstehung von Artefakten zu vermeiden (Hugger et al. 2008).

Die Oberflächen-Elektromyographie liefert Informationen zu Ruheaktivität, maximaler Muskelaktivierung, Frequenzspektrum bei anhaltender Belastung sowie Symmetrie des Kontraktionsverhaltens beider Seiten und macht die Beurteilung der Funktionsfähigkeit von Restaurationen beim Kauvorgang aus der neuromuskulären Perspektive möglich. Der Einfluss von Schmerzen auf das neuromuskuläre System sowie die individuelle Wirkung funktionstherapeutischer Maßnahmen können erfasst und verlaufsbezogen dokumentiert werden (Castroflorio et al. 2008; Hugger et al. 2008). Studien belegen deutliche interindividuelle Unterschiede in den EMG-Aufzeichnungen zwischen den untersuchten Probanden. Dies ist teilweise auf die physiologischen, anatomischen und technischen Gegebenheiten zurückzuführen. Die Messungen einzelner Personen zeigten jedoch eine gewisse Konstanz der Parameterwerte - nicht nur innerhalb einer Untersuchung, sondern auch an verschiedenen Untersuchungsterminen bei gleichem Kaugut (Hugger et al. 2008). Bei Probanden mit kranio-mandibulären Dysfunktionen wurde gegenüber gesunden Vergleichspersonen eine erhöhte Ruheaktivität der Kaumuskelatur festgestellt (Bodéré et al. 2005; Glaros et al. 1997; Chandu et al. 2004).

2 Problemstellung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Reproduzierbarkeit der beim Kauvorgang erzeugten Muskelaktivität des M. masseter bei einer Gruppe von funktionsgesunden Probanden zu untersuchen. Insbesondere sollte geklärt werden, wie reproduzierbar individuelle Werte zur Muskelarbeit – auch vor dem Hintergrund der Aktivitätsverhältnisse von Arbeitsseite zu Balanceseite – unter Verwendung eines standardisierten Kauguts in verschiedenen Messsituationen sind und welche interindividuelle Unterschiede festgestellt werden können.

3 Material und Methode

3.1 Probandengruppe und verwendete Geräte/Materialien

Achtzehn vollbezahnte und funktionsgesunde Personen (davon 9 männlich und 9 weiblich), im Alter zwischen 21 und 28 Jahren (Durchschnittsalter 23,5 Jahre) nahmen freiwillig an der Studie teil. Zu den Einschlusskriterien zählten: a) Erwachsenenalter (>18 Jahre); b) schmerzfreie aktive Mundöffnung größer 30 mm (ausgenommen Overbite), Protrusions- und Laterotrusionsbewegung größer 7 mm; c) Bereitschaft an der Studie teilzunehmen. Folgende klinische Befunde/Zustände galten als Ausschlusskriterien: a) orofazialer Schmerz und/oder Myoarthropathien des Kausystems (mit Ausnahme des schmerzfreien Gelenkknackens im Sinne einer Diskusverlagerung mit Reposition); b) jegliche chronische Schmerzzustände (>3 Monate); c) parodontale Erkrankungen; d) herausnehmbarer Zahnersatz; e) neurologische und/oder Bewegungserkrankungen; f) Medikamenteneinnahme mit dem Einfluss auf das zentrale Nervensystem. Die Probanden wurden gebeten, ihre bevorzugte Kauseite zu benennen. Nach einer ausführlichen mündlichen Aufklärung über das Ziel der Untersuchung und die Art der eingesetzten Untersuchungsmittel wurde von den Probanden eine schriftliche Einverständniserklärung über die Teilnahme an der Studie, welche in Übereinstimmung mit der Deklaration von Helsinki durchgeführt wurde, eingeholt.

Die elektrische Muskelaktivität beider Masseteren wurde mit Hilfe selbstklebender, gelbeschichteter bipolarer Ag/AgCl-Einwegelektroden (Durchmesser: 14 mm, Zwischenelektrodenabstand: 20 mm; Dual Electrodes, Fa. Noraxon, Scottsdale, Arizona, USA) erfasst. Die Oberflächenelektroden wurden auf den Muskelbäuchen, die während der maximalen voluntären Kontraktion (MVC) palpiert wurden, parallel zur Faserverlaufsrichtung platziert. Eine Referenzelektrode wurde am rechten Processus mastoideus angebracht. In der ersten Untersuchungssitzung wurden die Mittelpunkte der Elektroden markiert und auf eine transparente Folie aus PVC übertragen. Die Folie wurde auf beiden Gesichtshälften parallel zur Tragus-Canthus-Linie, welche als Referenzlinie gewählt wurde, ausgerichtet. In der zweiten und dritten Sitzung wurde die Folie entsprechend der Referenzlinie angelegt und die

markierten Punkte als Messpunkte für die identische Elektrodenpositionierung auf die Haut übertragen. Um den Hautwiderstand für die Messungen herabzusetzen, wurde vor der Elektrodenapplikation die Haut über den Mm. masseteri und dem Processus mastoideus mit einer 70%-Ethanollösung gereinigt und mit handelsüblichen Peeling-Wattepads gründlich abgerieben. Männliche Probanden wurden gebeten, sich im Wangenbereich zu rasieren.

Die EMG-Signale wurden unter Verwendung eines EDV-gestützten Messsystems (EMG8, Fa. Zebris Medical, Isny, Germany) registriert. Die analogen EMG-Signale wurden mittels eines Differenzialverstärkers (Eingangsimpedanz: 10 G Ω , Eingangsruschen: 1,5 μ V, CMRR: 120 dB) verstärkt (Spannungsverstärkung: 1000, Bandweite: 10 bis 1000 Hz) und digital erfasst (Auflösung: 12 bit, Messfrequenz: 900 Hz). Zeitgleich wurden die kinematischen Daten der Unterkieferbewegungen mit dem Ultraschall-Laufzeit-Messsystem Jaw Motion Analyzer (JMA, Fa. Zebris Medical) aufgezeichnet (Messfrequenz: 80 Hz).

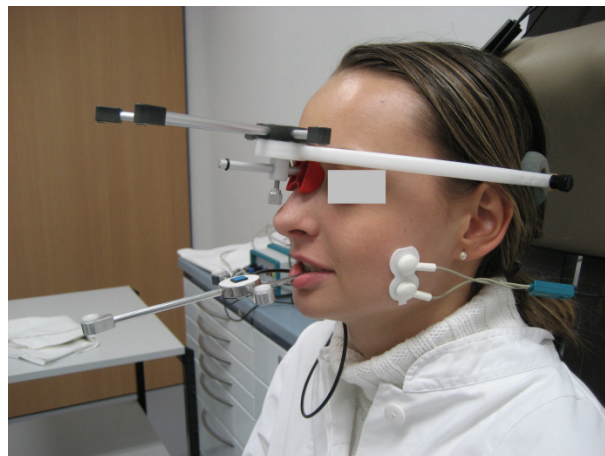


Abbildung. 7: Messapparatur.

Der Unterkiefer-Messbogen des JMA-Systems wurde mit Hilfe eines individuell adaptierten paraokklusalen Behelfs an den Vestibulärflächen der Unterkieferfrontzähne mit Hilfe von Akrylatkleber reversibel fixiert. Besonderes Augenmerk wurde darauf gerichtet, dass die statische und dynamische Okklusion des jeweiligen Probanden nicht behindert wurde. Als Bezugspunkt für eine Referenzebene für die kinematische Bewegungsaufzeichnung wurden

herangezogen: rechter und linker posteriorer arbiträrer Achsenpunkt (12 mm anterior auf der Verbindungslinie oberer Rand Tragus zu lateralem Augenwinkel und 3 mm senkrecht dazu kaudal) sowie als anteriorer Punkt der tiefste Punkt des unteren Randes der linken knöchernen Orbita.

Kauübungen wie freies Kauen (FC), angewiesenes Rechtskauen (RC) und angewiesenes Linkskauen (LC) wurden unter Zuhilfenahme eines standardisierten Kauguts (Weingummi/Goldbären, Fa. Haribo, Bonn, Germany) durchgeführt.

3.2 Durchführung der Untersuchung

Bei allen achtzehn Probanden wurden jeweils drei Untersuchungssitzungen unternommen, wobei kinematische und elektromyographische Daten gleichzeitig erhoben wurden. Es wurde angestrebt, die drei Sitzungen an aufeinander folgenden Tagen durchzuführen.

Zu Beginn einer jeden Sitzung wurde die maximale voluntäre Kontraktion (MVC) durch den Aufbiss auf angefeuchtete Watterollen, die im Seitenzahnbereich okklusal platziert wurden, erfasst. Der Proband wurde aufgefordert, für die Dauer von zwei Sekunden auf die Watterollen maximal aufzubeißen. Die Messung wurde anschließend einmal wiederholt. Darauffolgend wurden die Grenzbewegungen des Unterkiefers aufgezeichnet: maximale Öffnung, maximaler Vorschub, maximaler Seitschub sowie die Kombination dieser Bewegungen als sagittales und frontales Posseltdiagramm. Auch hier wurde jede Bewegungsform zweimal aufgezeichnet. Danach wurden die eigentlichen Kaubewegungen registriert. Dazu wurde das Kaugut vor Beginn jeder Kauübung auf der Zunge des Probanden platziert und jeweils zweimal nacheinander zunächst das freie Kauen, anschließend das angewiesene Rechtskauen und schließlich das angewiesene Linkskauen aufgezeichnet. Die Kaubewegungen wurden über die gesamte Dauer bis zum finalen Schluckakt aufgezeichnet.

Bei den Messungen nahm der Proband eine aufrechte Sitzposition mit Abstützung am Hinterkopf ein. Der Proband wurde instruiert, während der

Bewegungsaufzeichnung seine Körper- und Kopfposition nicht zu verändern. Die Messungen wurden in einem ruhigen Raum durchgeführt.

3.3 Datenverarbeitung

Die Auswertungen der kinematischen Daten wurden mit Hilfe der Software WinJaw (Version 10.5.42, Fa. Zebris Medical, Isny, Germany) durchgeführt. Mit Hilfe der graphischen Darstellung der Unterkieferbewegungen im Bereich des Inzisalpunktes wurden die maximale Mundöffnung, maximaler Vorschub, maximaler Seitschub nach rechts und nach links für jede Sitzung ermittelt.

Die Auswertung der mit der Unterkieferkinematik verbundenen EMG-bezogenen Daten erfolgte über eine Analysesoftware, die vom Institut für Informatik, Bereich Algorithmen und Datenstrukturen (Prof. Dr. E. Wanke), erstellt wurde. Die elektromyographischen Werte wurden geglättet durch die Berechnung des „Root Mean Square (RMS)“ über ein gleitendes Zeitfenster von 50 ms. Das Signalrauschen wurde für beide EMG-Kanäle (rechter und linker Masseter) getrennt bestimmt, wobei der kleinste Mittelwert über alle geglätteten EMG-Werte bei gleitendem Zeitfenster von 100 ms über alle Messdaten herangezogen wurde. Der maximale voluntäre Kontraktionswert (MVC) wurde für den rechten und den linken Masseter-Kanal getrennt bestimmt; der ermittelte MVC-Wert ist der größte Mittelwert aus allen geglätteten EMG-Werten in einem gleitenden Zeitfenster von 500 ms über alle vorhandenen Messungen zur maximalen Kontraktion. Die Einheit ist μV .

Zur Bestimmung der für den Kauvorgang relevanten Muskelaktivität wurden Zeitabschnitte automatisiert ermittelt, innerhalb derer die geglätteten EMG-Werte (je Messkanal) abzüglich des Signalrauschens oberhalb eines Schwellenwertes von 3% des korrespondierenden MVC-Wertes lagen.

Die Muskelarbeit wurde definiert als der Durchschnitt aller geglätteten EMG-Werte, multipliziert mit der Summe aller oben definierten Zeitabschnitte der Muskelaktivität. Die Muskelarbeit entspricht damit der Fläche, bzw. dem Integral über den geglätteten EMG-Messwertkurven, die abzüglich des Rauschens oberhalb des Schwellenwertes

von 3% der MVC-Werte lagen. Sie wurde für jeden Kanal separat berechnet. Die Einheit ist $\mu V \cdot s$.

Bei der Berechnung der Muskelarbeit wurden nur Zeitabschnitte berücksichtigt, in denen die EMG-Aktivität tatsächlich aus dem Kauen resultiert, und nicht aus Umbewegungen des Kauguts. Dies sind die Zeitabschnitte, in denen die Schließphasen der Kauzyklen enden. Die Schließphase ist definiert durch ein stetiges Verringern der Kieferöffnung von über 10% bis unter 3% der maximalen Öffnung.

Zur Berechnung des Asymmetrieindex (Asymmetry Index, AI) wurden für jede Kauübung die Werte der Muskelarbeit (muscle work, mw) für den rechten und den linken Masseter nach folgender Formel verarbeitet: $(mw_{RMass} - mw_{LMass}) / (mw_{RMass} + mw_{LMass})$. Der Asymmetrieindex liegt somit immer zwischen -1 und 1, bzw. zwischen -100% und +100%; er vergleicht die Muskelarbeit des rechten Masseter mit der Muskelarbeit des linken Masseter. Wenn der Asymmetrieindex den Wert 0 einnimmt, liegt die Muskelarbeit beider Masseteren balanciert vor. Wenn der AI den Wert 33% (1/3) einnimmt, so ist die Muskelarbeit des rechten Masseter doppelt so groß wie die des linken Masseter. Wenn der AI den Wert -50% (-1/2) einnimmt, so ist die Muskelarbeit des linken Masseter dreimal so groß wie die des rechten Masseter.

Zur Berechnung des seitenbezogenen angewiesenen Kauindex (Deliberate Chewing Index, DCI) wurden die Werte der Muskelarbeit (muscle work, mw) einer Körperseite bei angewiesenem Rechtskauen und angewiesenem Linkskauen nach folgender Formel verarbeitet: $(mw_{RC} - mw_{LC}) / (mw_{RC} + mw_{LC})$. Der DCI kann wie der AI Werte zwischen -100% und +100% einnehmen; er vergleicht die Muskelarbeit des Masseter einer Körperseite bei angewiesenem Rechtskauen mit der Muskelarbeit bei angewiesenem Linkskauen.

3.4 Statistische Analyse

Für die statistische Auswertung des Asymmetrieindex und des angewiesenen Kauindex wurde eine mehrfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung herangezogen. Ferner wurde der Intraclass Correlation Coefficient (ICC) bestimmt.

„Der ICC ist ein Zusammenhangsmaß mit Werten zwischen -1 und $+1$. Er ist als Korrelationskoeffizient dann zu verwenden, wenn die Übereinstimmung von zwei Merkmalen nicht nur bezüglich ihrer Richtung („je größer die eine, desto größer die andere“) gemessen werden soll, sondern auch bezüglich des mittleren Niveaus der beiden Merkmale. Mit dem ICC versucht man die beiden Aspekte „Korrelation und Unterschiede“ im mittleren Niveau der Werte in einer Maßzahl zu vereinen. Diese Maßzahl hat die Bedeutung und den Wertebereich eines Korrelationskoeffizienten. Sie erreicht aber nur dann hohe Werte (nahe $+1$ oder nahe -1), wenn neben der Richtung auch das Niveau der beteiligten Merkmale übereinstimmt“ (Krentz 2008, Band 2, S.128).

Die statistischen Berechnungen wurden mit der PASW 17 Software (Fa. SPSS, Chicago, IL, USA) durchgeführt. Die Signifikanz wurde für einen p -Wert $< 0,05$ festgelegt.

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse wurden die Daten häufig in Form von Boxplotdiagrammen dargestellt. Das Boxplotdiagramm bietet die Möglichkeit einer graphischen Darstellung der Lage und der Verteilung der Werte eines Datensatzes. Der Boxplot besteht aus einer Box, innerhalb welcher die mittleren 50% der Daten liegen. Die Box ist von dem 25. und dem 75. Perzentil begrenzt. Die innere Linie der Box repräsentiert den Medianwert, welcher den mittleren Wert der Daten angibt. Bei einer ungeraden Anzahl von Werten ist der Median der mittlere Wert. Ist die Anzahl der Datensätze gerade, so wird der Mittelwert der beiden mittleren Werte als Median genommen. Im Gegensatz zum Mittelwert ist der Medianwert stabil gegenüber Ausreißern. Durch die „Whisker“ (auch Schnurhaare oder Antennen genannt) werden der kleinste und der größte Wert gekennzeichnet, sofern diese keine Ausreißer sind. Als Ausreißer werden die Werte bezeichnet, die mehr als 1,5 Boxlängen von dem 25. bzw. dem 75. Perzentil entfernt liegen. Werte, welche mehr als 3 Boxlängen vom 25. bzw. 75. Perzentil entfernt liegen, werden Extremwerte genannt. In der Graphik sind die Ausreißer durch kleine Kreise und die Extremwerte durch Sternchen gekennzeichnet. Mit Hilfe der Boxplotdarstellung kann schnell ein Überblick über die Streuung eines Datensatzes gewonnen werden (Krentz 2008).

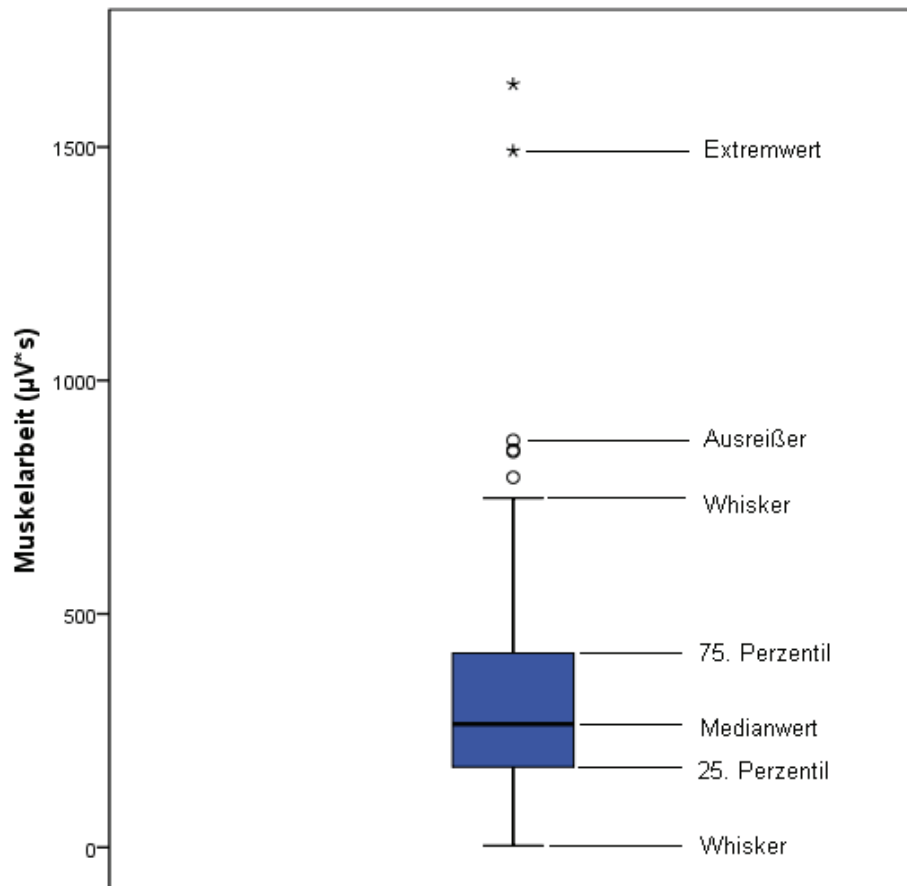


Abbildung 8: Schema eines Boxplots (nach Krentz 2008).

4 Ergebnisse

4.1 Unterkiefergrenzbewegungen

Das Probandenkollektiv bestand aus 9 weiblichen und 9 männlichen vollbezahnten Personen. Zur Charakterisierung des Funktionszustandes der Unterkieferbewegungen einzelner Probanden sind nachfolgend in Tabelle 1 die Werte für maximale Mundöffnung, maximalen Vorschub, maximale Lateralbewegung nach rechts und links, bezogen auf die einzelnen Sitzungen dargestellt. Im Mittel ergeben sich für die maximale Mundöffnung $46,5 \pm 6,7$ mm, für den maximalen Vorschub $10,1 \pm 1,7$ mm, für die maximale Lateralbewegung nach rechts $11,8 \pm 1,8$ mm und für die maximale Lateralbewegung nach links $11,6 \pm 2,1$ mm. Anhand der Werte kann festgestellt werden, dass die Probanden keine Einschränkungen bei der Unterkiefermobilität aufwiesen (siehe Tabelle 1).

Proband	Sitzung	Max. MÖ (mm)	Max. Vorschub (mm)	Max. LR (mm)	Max. LL (mm)
1	a	49,6	8,1	9,9	7,7
1	b	54,4	8,3	10,1	8,8
1	c	48,9	9,5	8,4	10,3
2	a	51,6	7,6	10,4	11
2	b	49,5	7,2	13,4	11,5
2	c	47,5	7,2	12,5	11,4
3	a	46,4	9,5	12,5	11
3	b	47,7	9,7	12	13,3
3	c	46,3	9,7	12,5	13,2
4	a	44	13,5	12,4	13,1
4	b	52	13,5	13,4	12,9
4	c	51,8	14,9	14,5	14,4

Proband	Sitzung	Max. MÖ (mm)	Max. Vorschub (mm)	Max. LR (mm)	Max. LL (mm)
5	a	40,8	11,8	10,6	11,4
5	b	45,3	12,4	9,2	10,5
5	c	45,7	11,5	8,4	9,2
6	a	52,7	13	12,8	13,9
6	b	55,5	12	12,7	15,4
6	c	57,7	11,9	12,4	14,7
7	a	39,2	9	13	7,4
7	b	41,3	9,9	13,2	10,7
7	c	42,4	8,1	12,5	11,4
8	a	30,4	8,1	11,5	10,3
8	b	30	8,7	10,6	10,5
8	c	30,1	8,9	10,7	10,3
9	a	46,7	11,3	13,3	13,7
9	b	47,2	11,9	12,9	13,1
9	c	46,2	11,3	13,6	13,1
10	a	51	9,1	11,7	12,6
10	b	53	9,2	12,7	11,9
10	c	55,5	9,1	11,9	11,3
11	a	41,5	9,5	14,6	16,6
11	b	39,4	9,3	12,1	13,2
11	c	40,5	9,6	11,7	11,8
12	a	40,1	11,3	13,4	12,2
12	b	40,1	11,1	14,2	11,4
12	c	45	12,1	13,5	11,1
13	a	54,2	10,1	11,5	9,6
13	b	55,4	10,7	9,9	9,1
13	c	58	10,3	6,6	8,8

Proband	Sitzung	Max. MÖ (mm)	Max. Vorschub (mm)	Max. LR (mm)	Max. LL (mm)
14	a	49	8,8	9,2	11,2
14	b	47,4	8,3	8,7	10,4
14	c	48,3	8,5	9,2	10,1
15	a	56,1	9,9	11,3	15,1
15	b	53,1	10,1	12,2	14,5
15	c	50,7	9,7	10,9	16,1
16	a	46,3	9,2	10,8	8,9
16	b	38,8	8,7	10,2	8,4
16	c	44,4	8,3	11,2	8,8
17	a	42	10	11,6	10,8
17	b	39,5	10	11,4	10,4
17	c	40,5	10,1	12,7	10,8
18	a	46,7	11	14,2	12,2
18	b	45,2	10,6	14,2	12,5
18	c	43,4	10,8	14,4	12,6

Durchschnittswert	46,5	10,1	11,8	11,6
Standardabweichung	± 6,7	± 1,7	± 1,8	± 2,1

Tabelle 1: Übersicht über das Ausmaß der bei den einzelnen Probanden ermittelten Werte bezüglich der maximalen Kieferöffnung (max. MÖ), des maximalen Vorschubs und des maximalen Seitenschubs (max. LR, max. LL) gemessen im Bereich des Unterkiefer-Inzisalpunktes (a= erste Sitzung, b= zweite Sitzung, c= dritte Sitzung).

4.2 Kauseitenpräferenz

Die Tabellen 2 und 3 stellen die Angaben zur bevorzugten Kauseite dar. Aus beiden Tabellen wird ersichtlich, dass 94,5 % aller Probanden eine bevorzugte Kauseite angegeben haben. Die rechte Seite wurde mit 66,7% deutlich häufiger bevorzugt als die linke Seite (27,8%).

		Bevorzugte Kauseite		Keine bev. Kauseite
Proband	Geschlecht	rechts	Links	
1	m	x		
2	w		x	
3	w	x		
4	m	x		
5	m		x	
6	w	x		
7	w	x		
8	w	x		
9	w	x		
10	m	x		
11	m	x		
12	m			x
13	m	x		
14	w		x	
15	m		x	
16	w		x	
17	w	x		
18	m	x		
Gesamt		12	5	1
≈ %		66,7	27,8	5,5

Tabelle 2: Übersicht über die Angaben zur bevorzugten Kauseite aller Probanden.

Geschlecht	Bevorzugte Kauseite				Keine bevorzugte Kauseite	
	rechts		links			
	n	≈ %	n	≈ %	n	≈ %
Weiblich	6	66,7	3	33,3	0	0
Männlich	6	66,7	2	22,2	1	11,1

Tabelle 3: Prävalenz einer bevorzugten Kauseite.

4.3 Muskelarbeit

In Abbildung 9 ist die Verteilung der Werte der Muskelarbeit des rechten Masseter bei 18 Probanden während unterschiedlicher Kauübungen (freies Kauen, angewiesenes Rechts- und Linkskauen) in den drei Sitzungen dargestellt. Die Grafik zeigt getrennt die Werteverteilung für weibliche und männliche Probandengruppe. In der männlichen Probandengruppe ist eine größere Streuung der Werte, insbesondere in der dritten Sitzung, zu beobachten. Ausreißer und Extremwerte, welche durch die kleinen Kreise bzw. die Sternchen gekennzeichnet sind, sind nur in der weiblichen Probandengruppe zu sehen.

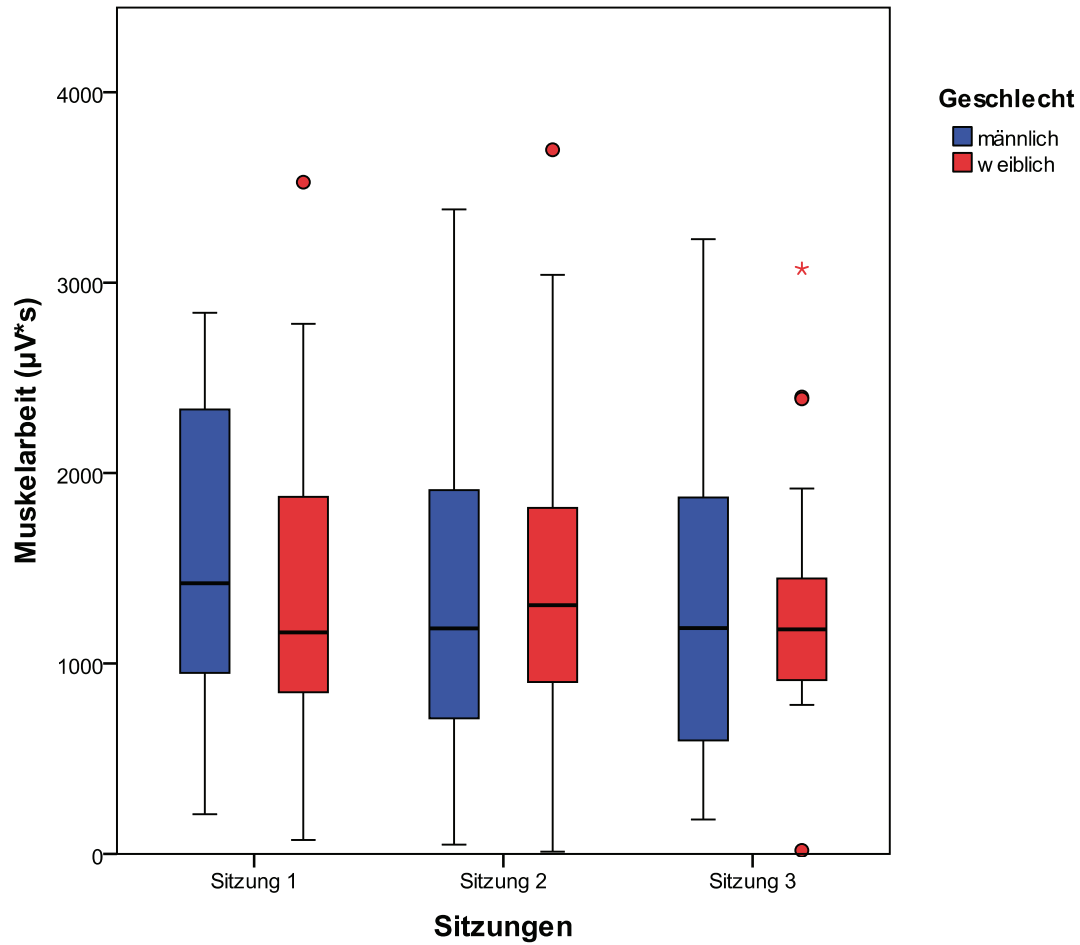


Abbildung 9: Muskelarbeit des rechten *M. masseter* während unterschiedlicher Kauübungen (μV -bezogene Werte).

Die einzelnen μV -bezogenen Werte der Muskelarbeit des rechten *M. masseter* während unterschiedlicher Kauübungen können der Tabelle 4 entnommen werden.

Proband	rm_fk_a	rm_rk_a	rm_lk_a	rm_fk_b	rm_rk_b	rm_lk_b	rm_fk_c	rm_rk_c	rm_lk_c
1	1064,5	1165,5	715,5	1012	1161	730,5	634,5	891,5	419,5
2	579,5	977	537	932	1328	801,5	836,5	1051,5	782,5
3	2140	1943	842,5	1822	1999	1033	1179,5	1445	1068,5
4	1982,5	2181	933	920,5	1169,5	581,5	578	720	180,5
5	236	418	208,5	288,5	425	306	418	691	439,5
6	1678,5	1552,5	1163	1290,5	1813	1345,5	1102	1719,5	1160
7	1110,5	1970,5	956	1306	1883,5	749,5	1919	2399	1142,5
8	2205,5	2061	73,5	2049	2129,5	11,5	1544	1448,5	18,5
9	2784	3527,5	1202,5	3040,5	3697,5	1215,5	2389,5	3072,5	1221
10	2727,5	2435	1421,5	1711,5	2090,5	1188,5	1998,5	2369	1292
11	288	1032	348,5	679	1770	781,5	754	1751,5	535
12	1944,5	2823	967,5	2644	2381,5	693,5	2041,5	2223,5	588,5
13	2764	2462,5	1159	1184,5	1461,5	49	1981	1427,5	603
14	1728,5	1807,5	1704,5	1550	1702,5	1475	1265	1410,5	1422,5
15	1526	2233	1334,5	1228	2051,5	1415,5	1244,5	1762	1186
16	710,5	1046,5	704,5	664	1118,5	701,5	878,5	1245,5	855,5
17	1026,5	818,5	854,5	1242,5	874	869	947	815	859,5
18	2438	2841,5	1724	2419	3385	2207	2464	3228,5	1717,5

Tabelle 4: μ V-bezogene Werte der Muskelarbeit des rechten Masseter (rm= rechter Masseter, fk= freies Kauen, rk= angewiesenes Rechtskauen, lk= angewiesenes Linkskauen, a= erste Sitzung, b= zweite Sitzung, c= dritte Sitzung).

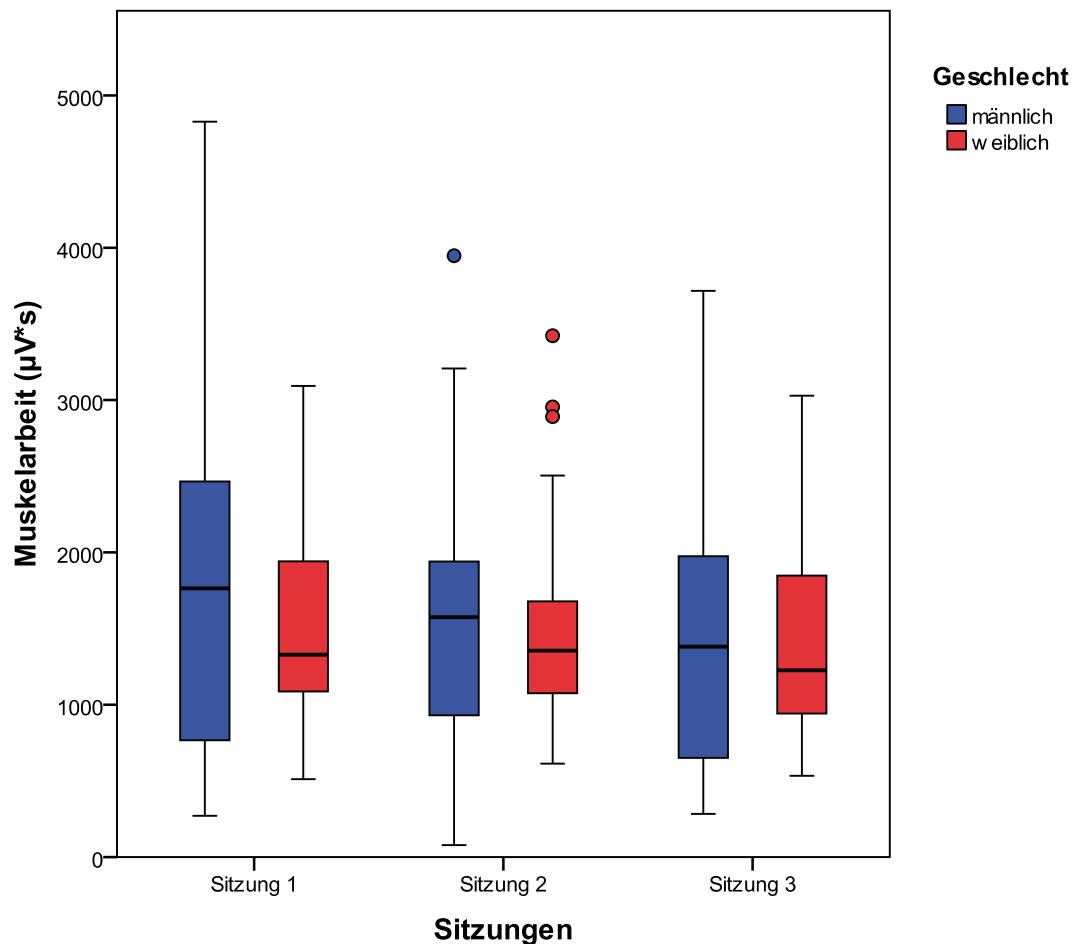


Abbildung 10: Muskelarbeit des linken M. masseter während unterschiedlicher Kauübungen (μV -bezogene Werte).

In der Abbildung 10 ist analog zu Abbildung 9 die Verteilung der Werte der Muskelarbeit des linken Masseters geschlechtsspezifisch dargestellt. Auch in dieser Grafik ist eine größere Streuung der Werte bei den männlichen Probanden in allen Sitzungen zu beobachten. Der Medianwert der männlichen Probandengruppe liegt in jeder Sitzung deutlich oberhalb des Medianwertes der weiblichen Probandengruppe.

Die einzelnen μV -bezogenen Werte der Muskelarbeit des linken Masseter während unterschiedlicher Kauübungen können der Tabelle 5 entnommen werden.

Proband	lm_fk_a	lm_rk_a	lm_lk_a	Lm_fk_b	lm_rk_b	lm_lk_b	lm_fk_c	lm_rk_c	lm_lk_c
1	822,5	631,5	769	917	1025,5	916	686,5	642,5	803,5
2	1096,5	646	1212,5	1108	723	1373	743,5	533,5	1226
3	1120	1046	1557,5	824	877,5	1355	849	690	953,5
4	1764	1664,5	2251	986	944	1575	641	556,5	877,5
5	566,5	462	764	563	542	1008	599,5	660	1024
6	1883,5	977,5	2493,5	1554,5	1137,5	2954,5	1289,5	863	2122
7	1328,5	1348,5	1783,5	1202,5	1161,5	1516,5	2565	2079	2240,5
8	1288	1134,5	2605	1207,5	1142,5	2891,5	1261,5	1206	3029
9	2010	1379,5	3093	2504,5	1463,5	3422,5	1836,5	1100	2893,5
10	1273,5	1201	2028,5	1912	1385	2169	1951,5	1382	2333,5
11	2605	271,5	1966,5	1623,5	346	1962	2268,5	367	1828,5
12	3792	2583,5	4827,5	2239	2162,5	3947,5	2279	1955	3716,5
13	418	373	3070,5	79	180	1074,5	360	284	2319,5
14	2714,5	2000,5	2710	1953	1420,5	1819,5	1474,5	1099,5	1859,5
15	2900,5	2055	2644,5	1873	1655	2035,5	1995,5	1338,5	1799
16	883,5	511,5	1077,5	613	651,5	1027,5	990	764,5	1478
17	1335	863,5	1252,5	1771	1044	1586	1083,5	930,5	1265
18	2023,5	1477,5	2347	1919	1747	3207	1836,5	1632,5	2559

Tabelle 5: μ V-bezogene Werte der Muskelarbeit des linken Masseter (lm= linker Masseter, fk= freies Kauen, rk= angewiesenes Rechtskauen, lk= angewiesenes Linkskauen, a= erste Sitzung, b= zweite Sitzung, c= dritte Sitzung).

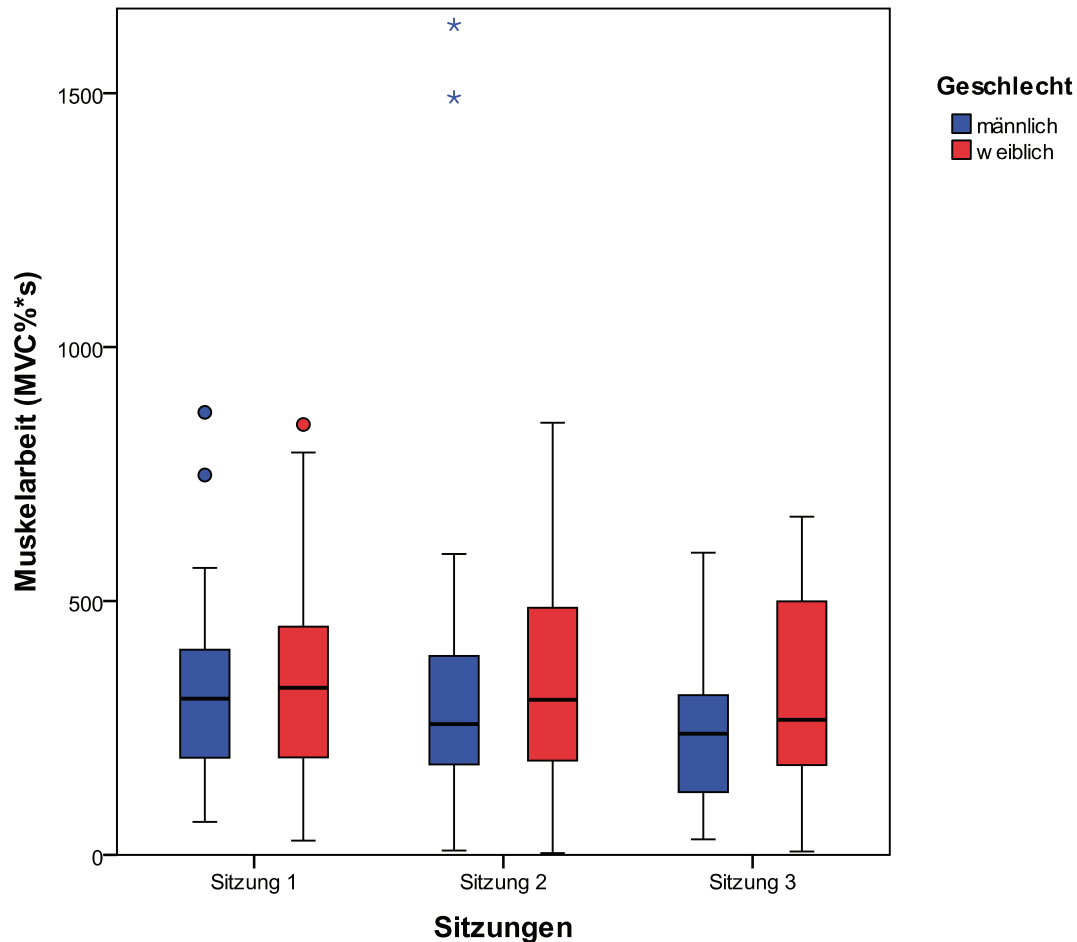


Abbildung 11: Muskelarbeit des rechten M. masseter während unterschiedlicher Kauübungen (MVC-basierte Werte).

Die Abbildung 11 stellt die Verteilung der MVC-basierten Muskelarbeitwerte des rechten M. masseter bei allen Probanden in den drei Sitzungen dar. Im Gegensatz zu der μ V-basierten Wertedarstellung in Abb. 9 zeigt dieses Diagramm eine größere Streuung der Werte in der weiblichen Probandengruppe. Die Medianwerte der Muskelarbeit liegen in der weiblichen Probandengruppe in jeder Sitzung oberhalb der Medianwerte der männlichen Probandengruppe.

Die einzelnen MVC-basierten Werte der Muskelarbeit des rechten M. masseter während unterschiedlicher Kauübungen sind in der Tabelle 6 dargestellt.

Proband	rm_fk_a	rm_rk_a	rm_lk_a	rm_fk_b	rm_rk_b	rm_lk_b	rm_fk_c	rm_rk_c	rm_lk_c
1	168	184	113	172	197	124,5	89	124,5	59
2	96	161,5	89	135	192	115,5	137,5	172,5	128,5
3	468	424,5	184,5	599,5	658	340,5	539,5	660,5	488,5
4	307,5	338	144,5	145,5	184	91,5	98	122,5	30,5
5	235,5	416	207,5	272	400,5	288,5	249	411,5	262
6	506	468	350,5	397,5	558,5	414,5	350	546	263,5
7	243	431	209	179,5	259	103	266	332,5	158,5
8	847,5	792,5	28	604,5	628	3,5	543,5	510	6,5
9	496,5	629	214	700	851	280	518	666	265
10	392	350	204,5	245,5	300	170,5	264	312,5	170,5
11	65	233,5	78,5	227,5	592,5	261,5	193	449	137,5
12	230	334,5	114,5	461,5	415,5	121	233	254	67
13	472,5	421	198,5	208,5	257,5	8,5	398	287	121,5
14	352	367,5	347	321	352,5	305,5	401	447,5	451,5
15	386,5	565	338	229	383	264,5	238,5	337,5	227
16	135,5	199,5	134,5	149,5	252	158	127,5	181	124,5
17	329	262,5	274	333	234	233	250	215,5	227,5
18	748	871,5	529	1634,5	2287,5	1491,5	454	595	316,5

Tabelle 6: MVC-bezogene Werte der Muskelarbeit des rechten *M. masseter* während unterschiedlicher Kauübungen (*rm*= rechter *Masseter*, *fk*= freies Kauen, *rk*= angewiesenes Rechtskauen, *lk*= angewiesenes Linkskauen, *a*= erste Sitzung, *b*= zweite Sitzung, *c*= dritte Sitzung).

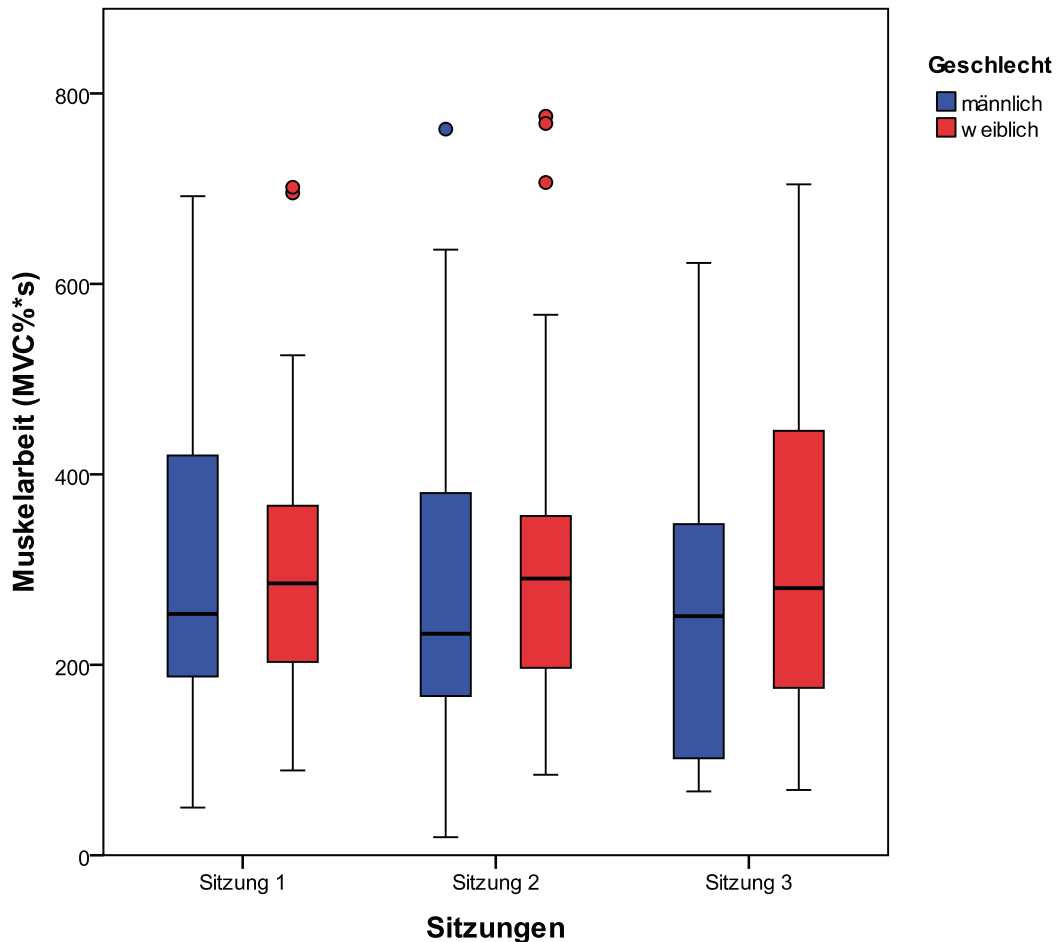


Abbildung 12: Muskelarbeit des linken M. masseter während unterschiedlicher Kauübungen (MVC-basierte Werte).

Die Abbildung 12 zeigt analog zu Abb. 11 die Verteilung der MVC-basierten Werte der Muskelarbeit für den linken M. masseter in den einzelnen Sitzungen. Die Werteverteilung in dieser Grafik ähnelt der Werteverteilung in der μ V-basierten Darstellung (Abb. 10). Lediglich der Boxplot der weiblichen Probandengruppe in der 3. Sitzung weist eine größere Streuung im Vergleich zu Abb. 10 auf.

Die einzelnen MVC-basierten Werte der Muskelarbeit des linken Masseter während unterschiedlicher Kauübungen sind in der Tabelle 7 aufgelistet.

Proband	lm_fk_a	lm_rk_a	lm_lk_a	lm_fk_b	lm_rk_b	lm_lk_b	lm_fk_c	lm_rk_c	lm_lk_c
1	156,5	120	146,5	157,5	176,5	158	94	88	109,5
2	165	97	182	129,5	84,5	160	95,5	68,5	157
3	332	310	461,5	345	367,5	567,5	564,5	459	633,5
4	219,5	207	280	140	134	223	85	74	116,5
5	233,5	190,5	315	199	192	357	189	208	323
6	525	273	695,5	408	298,5	776	446	298,5	512
7	257	260,5	345	230,5	222,5	290,5	302,5	245	264
8	347	305,5	701,5	295	279	706,5	293,5	280,5	704,5
9	317,5	218	488,5	562,5	328,5	768,5	445,5	267	702
10	218	205,5	347	246,5	178,5	280	251	178	300,5
11	478,5	50	361	526,5	112	636	443,5	72	357,5
12	507,5	345,5	646	432,5	417,5	762,5	381,5	327	622
13	77,5	69,5	572,5	19	44	263	85	67	546,5
14	388	285,5	387	313	227,5	291,5	332	248	418,5
15	692	490	631	371,5	328,5	403,5	375	251,5	338
16	154	89	188	86	91	143,5	128,5	99	191,5
17	273	177	256	289,5	171	259,5	162	139,5	189,5
18	253,5	185	294	232,5	212	389	262,5	234	366

Tabelle 7: MVC-bezogene Werte der Muskelarbeit des linken M. masseter während unterschiedlicher Kauübungen (lm= linker Masseter, fk= freies Kauen, rk= angewiesenes Rechtskauen, lk= angewiesenes Linkskauen, a= erste Sitzung, b= zweite Sitzung, c= dritte Sitzung).

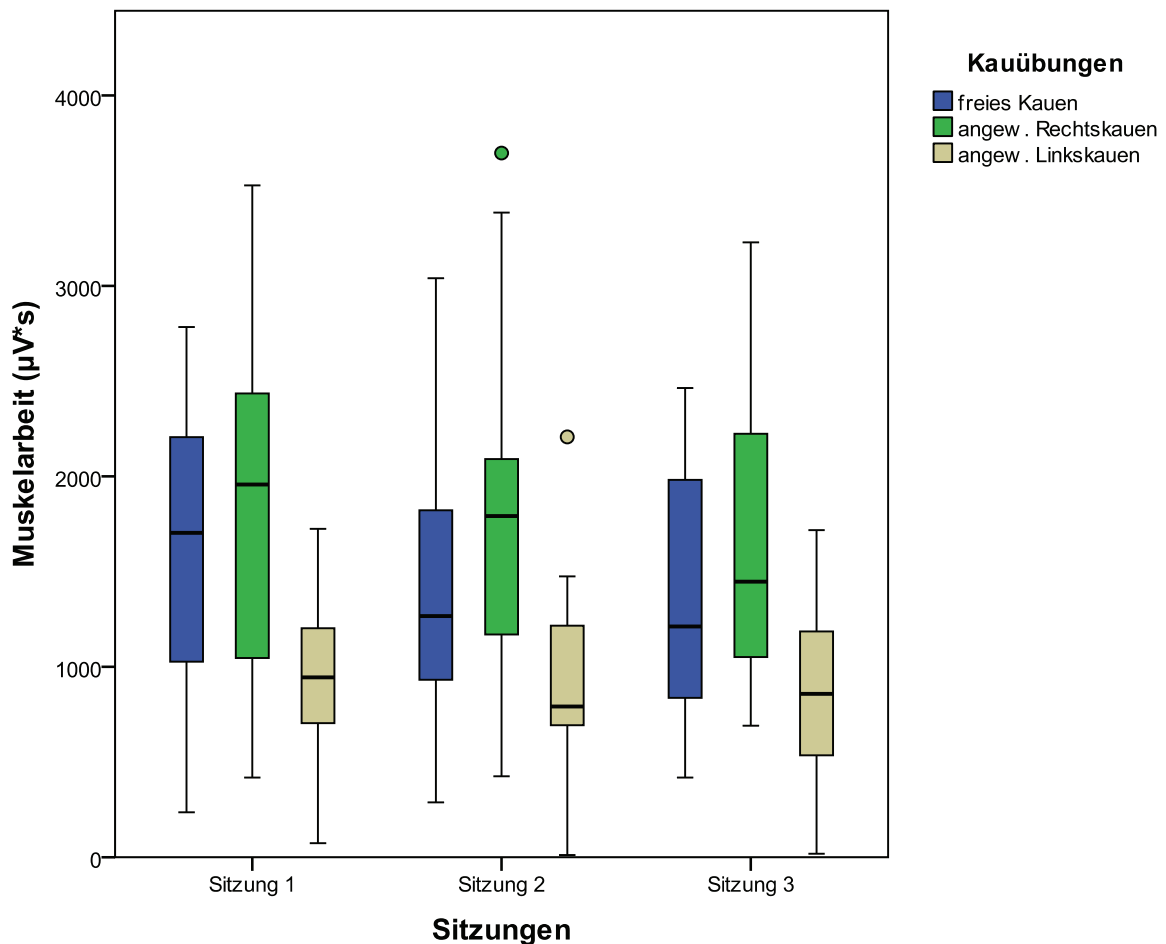


Abbildung 13: Muskelarbeit des rechten M. masseter (geschlechtsunspezifisch, $\mu\text{V}\cdot\text{s}$ -basiert).

In Abbildung 13 ist die Verteilung der Werte der Muskelarbeit (μV -basiert) des rechten M. masseter bei allen Probanden geschlechtsunspezifisch für die einzelnen Kauübungen dargestellt. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die Werte bei angewiesenem Rechtskauen am größten sind. Bei freiem Kauen sind die Werte geringer. Die niedrigsten Werte werden bei angewiesenem Linkskauen verzeichnet. Das gleiche Ergebnis zeigt sich in der MVC-bezogenen Darstellung der Werte der Muskelarbeit in Abb. 14. Es lässt sich feststellen, dass der rechte M. masseter bei angewiesenem Rechtskauen am aktivsten ist. Bei freiem Kauen leistet der Muskel etwas weniger Arbeit und bei angewiesenem Linkskauen wird von dem rechten M. masseter die geringste Arbeit erbracht.

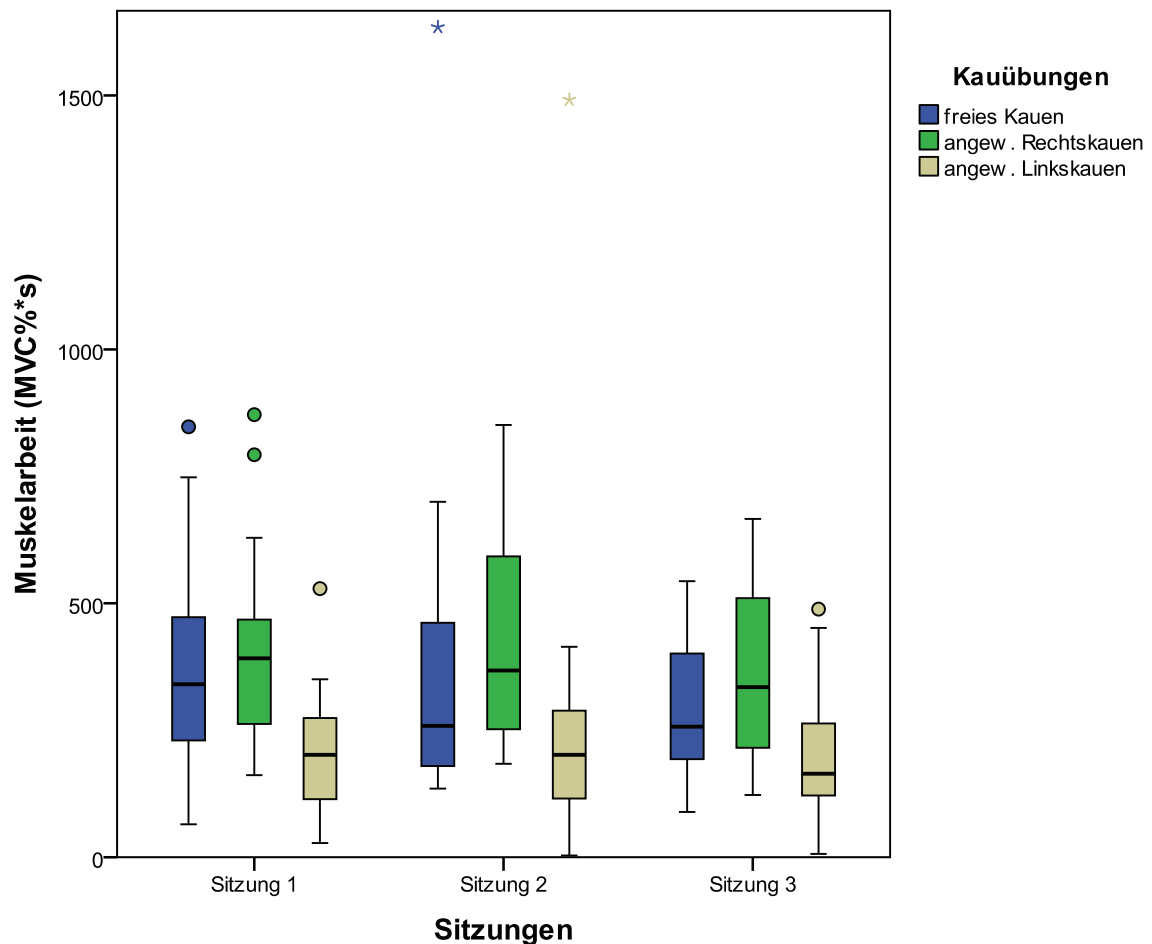


Abbildung 14: Muskelarbeit des rechten M. masseter (geschlechtsunspezifisch, MVC-basiert).

Die Tabellen 8 bis 10 zeigen den Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für die Muskelarbeit des rechten M. masseter während des freien, des angewiesenen Rechts- und Linkskauen in den drei Sitzungen.

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,741	0,533	0,883

Tabelle 8: Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für die Werte der Muskelarbeit des rechten Masseter bei freiem Kauen in den drei Sitzungen (μ V-basierte Werte).

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,833	0,680	0,928

Tabelle 9: Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für die Werte der Muskelarbeit des rechten Masseter bei angewiesenem Rechtskauen in den drei Sitzungen (μ V-basierte Werte).

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,809	0,640	0,916

Tabelle 10: Intraclass Correlation Coefficient (ICC)) für die Werte der Muskelarbeit des rechten Masseter bei angewiesenem Linkskauen in den drei Sitzungen (μ V-basierte Werte).

Die Tabellen 11 bis 13 zeigen die ICC-Werte für die MVC-bezogenen Werte der Muskelarbeit des rechten M. masseter bei unterschiedlichen Kauübungen in den drei Sitzungen auf. Die ICC-Werte der MVC-basierten Werte der Muskelarbeit liegen deutlich unterhalb der ICC-Werte der μ V-basierten Werte der Muskelarbeit des rechten M. masseter. Der ICC-Wert für die Muskelarbeit während des freien Kauens liegt hier oberhalb der ICC-Werte für die Muskelarbeit bei angewiesenem Kauen.

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,565	0,295	0,787

Tabelle 11: Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für die Werte der Muskelarbeit des rechten Masseter bei freiem Kauen in den drei Sitzungen (MVC-basierte Werte).

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,478	0,195	0,733

Tabelle 12: Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für die Werte der Muskelarbeit des rechten Masseter bei angewiesenem Rechtskauen in den drei Sitzungen (MVC-basierte Werte).

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,448	0,163	0,713

Tabelle 13: Intraclass Correlation Coefficient (ICC)) für die Werte der Muskelarbeit des rechten Masseter bei angewiesenem Linkskauen in den drei Sitzungen (MVC-basierte Werte).

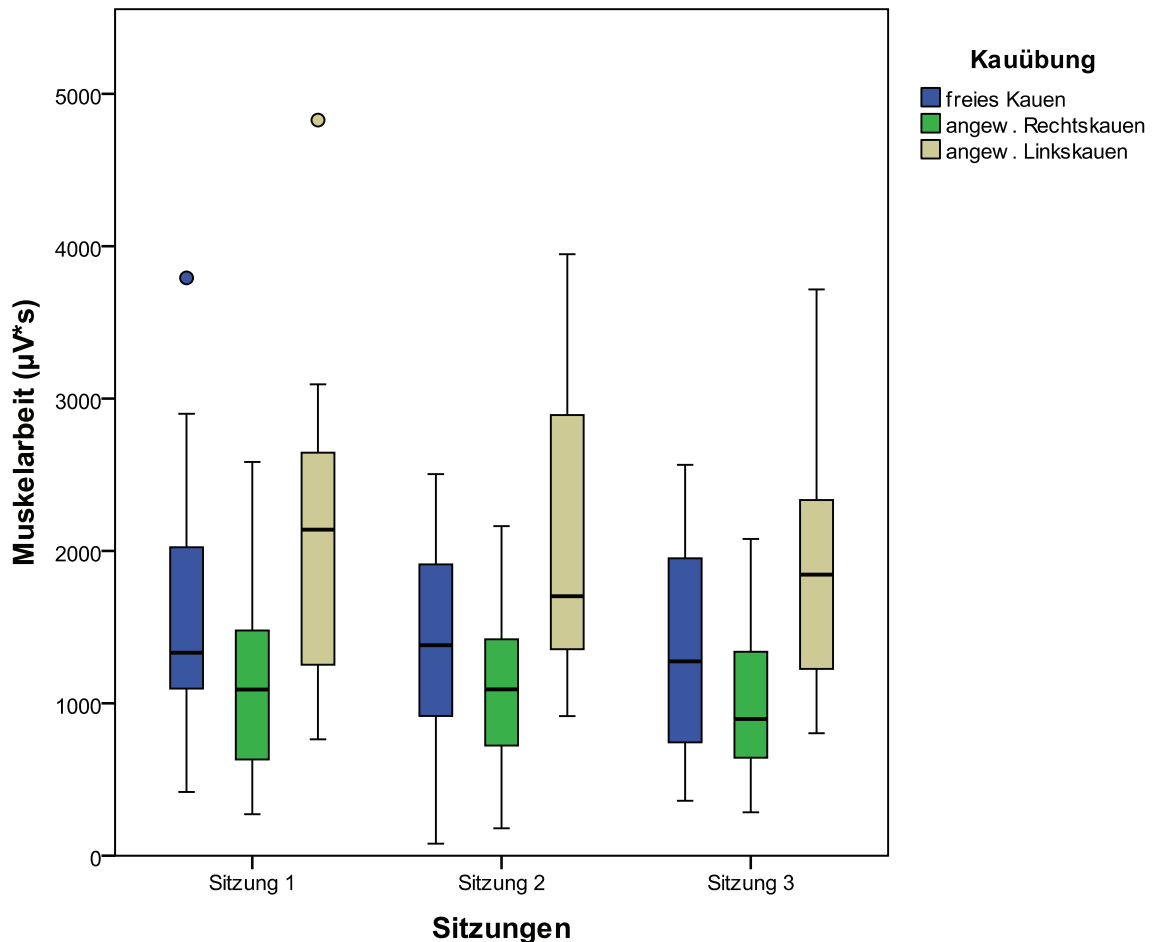


Abbildung 15: Muskelarbeit des linken M. masseter (μV -basiert).

In Abbildung 15 ist die Verteilung der Werte der Muskelarbeit (μV -basiert) des linken M. masseter bei allen Probanden geschlechtsunspezifisch für die einzelnen Kauübungen dargestellt. Es zeigt sich, dass die Werte der Muskelarbeit des linken Masseter bei angewiesenem Linkskauen am größten sind. Bei freiem Kauen sind die Werte geringer. Die niedrigsten Werte werden bei angewiesenem Rechtskauen verzeichnet. Ähnliches Ergebnis zeigt die MVC-bezogene Darstellung der Werte in Abb. 16. Es lässt sich feststellen, dass der linke M. masseter bei angewiesenem Linkskauen am aktivsten ist. Bei freiem Kauen leistet der Muskel etwas weniger Arbeit und bei angewiesenem Rechtskauen wird von dem linken M. masseter die geringste Arbeit erbracht.

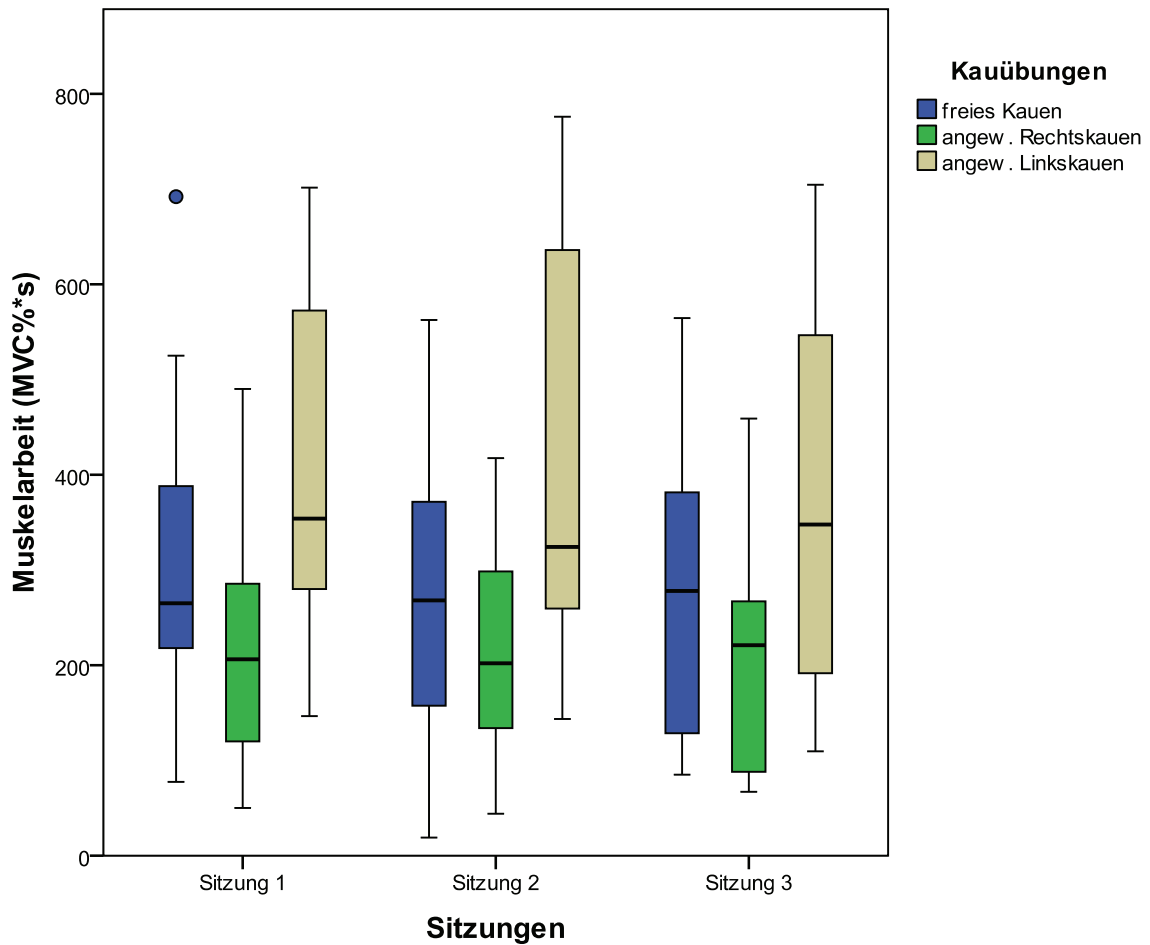


Abbildung 16: Muskelarbeit des linken *M. masseter* (geschlechtsunspezifisch, MVC-basiert).

Tabellen 14 bis 16 zeigen die ICC-Werte für die μ V-basierten Werte der Muskelarbeit des linken *M. masseter* während des freien, des angewiesenen Rechts- und Linkskauen in den drei Sitzungen. Ähnlich wie bei dem rechten *M. masseter* werden bei dem linken *M. masseter* vergleichbar hohe ICC-Werte für die einzelnen Kauübungen erreicht. Der ICC-Wert für das freie Kauen liegt bei dem linken *M. masseter* ebenfalls unterhalb der ICC-Werte für das angewiesene Kauen.

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,681	0,445	0,851

Tabelle 14: Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für die Werte der Muskelarbeit des linken Masseter bei freiem Kauen in den drei Sitzungen (μ V-basierte Werte).

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,783	0,598	0,904

Tabelle 15: Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für die Werte der Muskelarbeit des linken Masseter bei angewiesenem Rechtskauen in den drei Sitzungen (μ V-basierte Werte).

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,792	0,612	0,908

Tabelle 16: Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für die Werte der Muskelarbeit des linken Masseter bei angewiesenem Linkskauen in den drei Sitzungen (μ V-basierte Werte).

In den Tabellen 17 bis 19 sind die ICC-Werte für die MVC-bezogenen Werte der Muskelarbeit des linken M. masseter bei unterschiedlichen Kauübungen in den drei Sitzungen dargestellt. Bei dem linken M. masseter liegen die MVC-basierten ICC-Werte etwas oberhalb der μ V-basierten ICC-Werte. Im Vergleich zu den MVC-basierten ICC-Werten des rechten M. Masseter liegen die MVC-basierten ICC-Werte des linken M. Masseter deutlich höher.

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,771	0,578	0,898

Tabelle 17: Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für die Werte der Muskelarbeit des linken Masseter bei freiem Kauen in den drei Sitzungen (MVC-basierte Werte).

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,827	0,669	0,925

Tabelle 18: Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für die Werte der Muskelarbeit des linken Masseter bei angewiesenem Rechtskauen in den drei Sitzungen (MVC-basierte Werte).

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,794	0,615	0,909

Tabelle 19: Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für die Werte der Muskelarbeit des linken Masseter bei angewiesenem Linkskauen in den drei Sitzungen (MVC-basierte Werte).

Abbildung 17 zeigt die μ V-basierte Werteverteilung der Muskelarbeit beider Masseteren aller Probanden in den einzelnen Sitzungen. Die Werteverteilung bleibt in allen drei Sitzungen annähernd gleich. Das gleiche Ergebnis zeigt sich in der Abbildung 18, in der die MVC-bezogene Werteverteilung dargestellt ist.

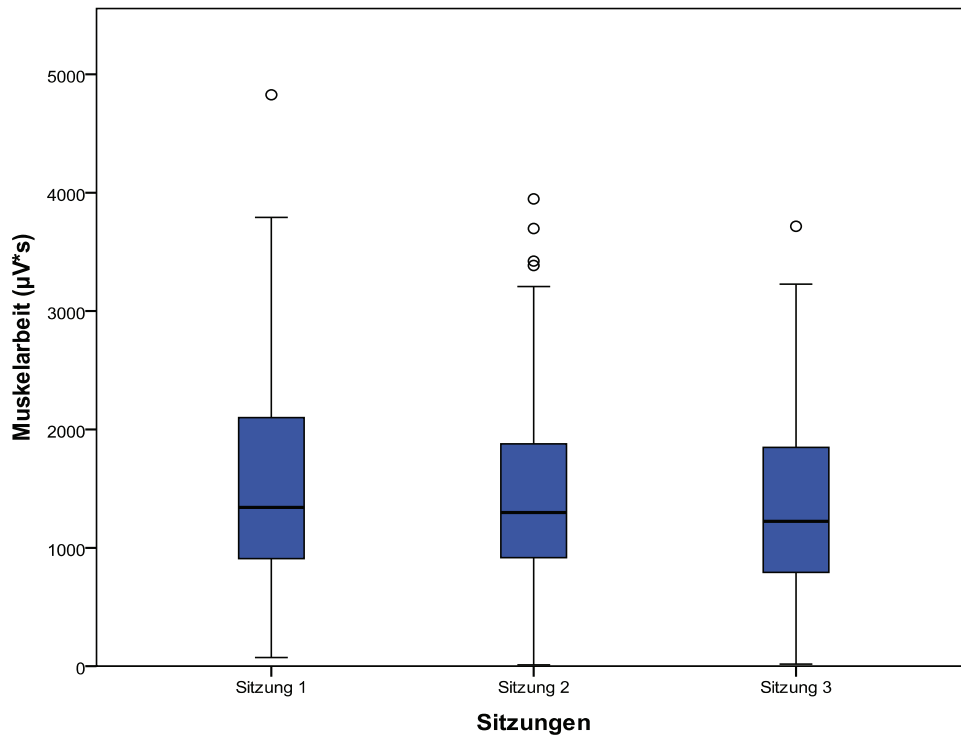


Abbildung 17: Muskelarbeit beider Masseteren (μV -basiert, geschlechtsunspezifisch).

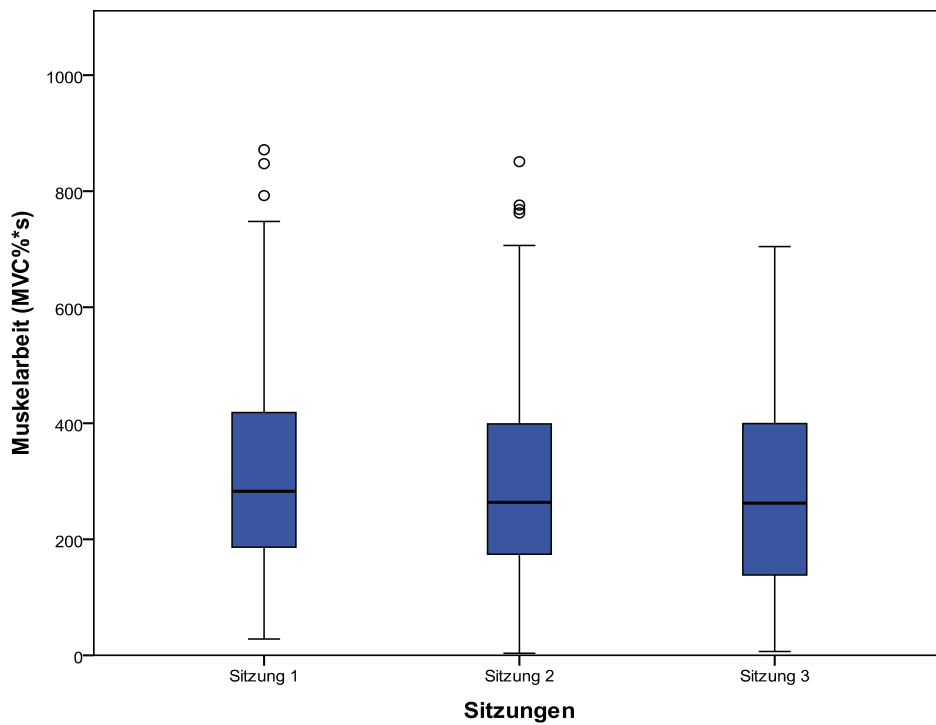


Abbildung 18: Muskelarbeit beider Masseteren (MVC-basiert, geschlechtsunspezifisch).

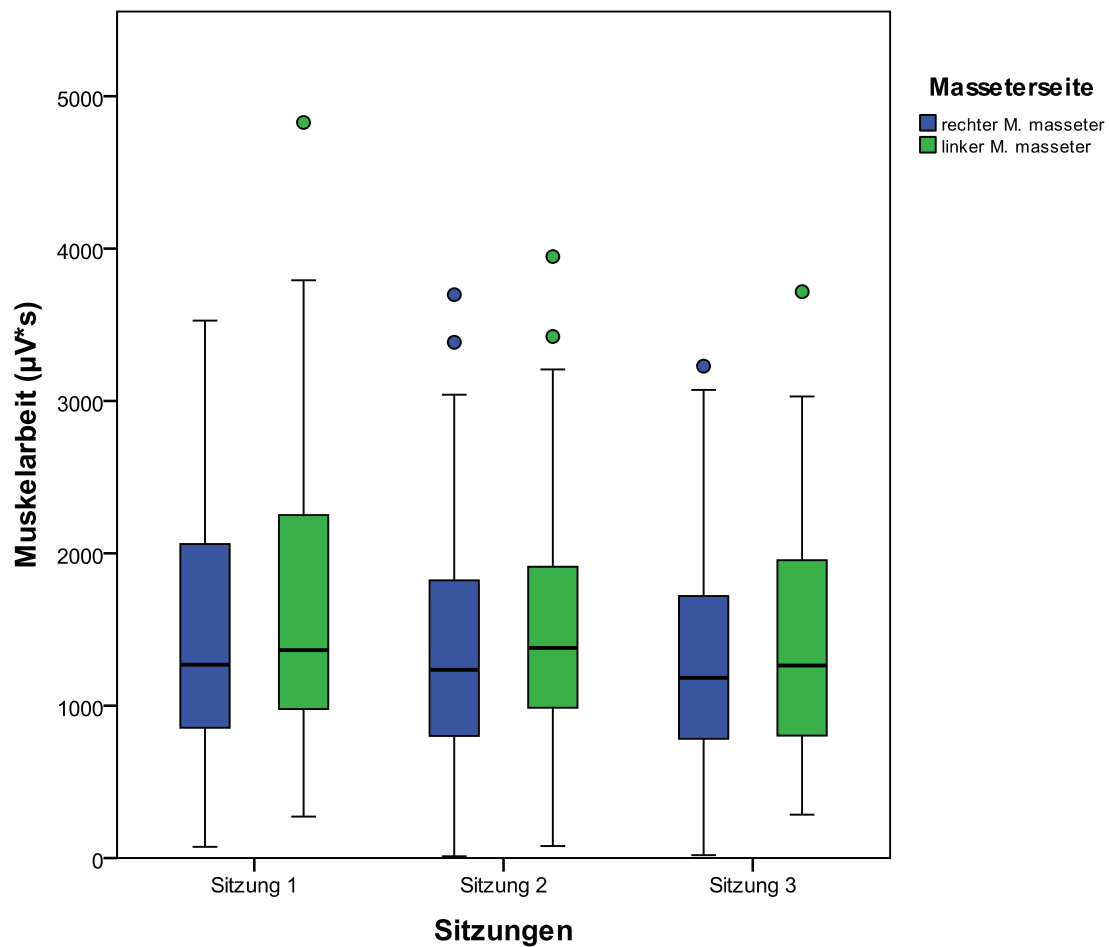


Abbildung 19: Muskelarbeit des rechten und linken Masseter (μV -basiert, geschlechtsunspezifisch).

Abbildungen 19 und 20 zeigen die Werteverteilung der Muskelarbeit jeweils für den rechten und den linken Masseter in den einzelnen Sitzungen. Die Werteverteilung der Muskelarbeit des rechten M. masseter unterscheidet sich nur geringfügig von derjenigen des linken M. masseter. Auch der Vergleich der Werteverteilung in den einzelnen Sitzungen weist ebenfalls nur geringfügige Unterschiede auf.

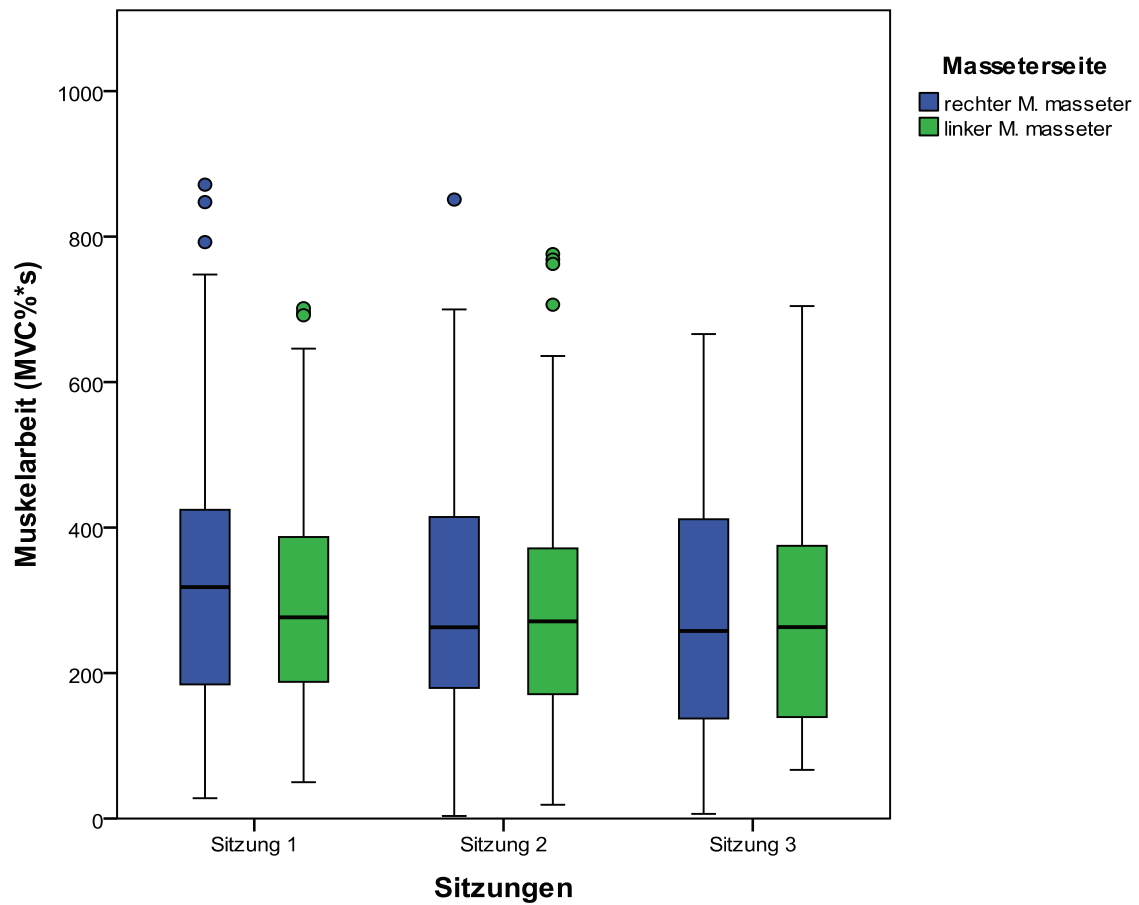


Abbildung 20: Muskelarbeit des rechten und linken Masseter (MVC-basiert, geschlechtsunspezifisch).

4.4 Maximale voluntäre Kontraktion (MVC)

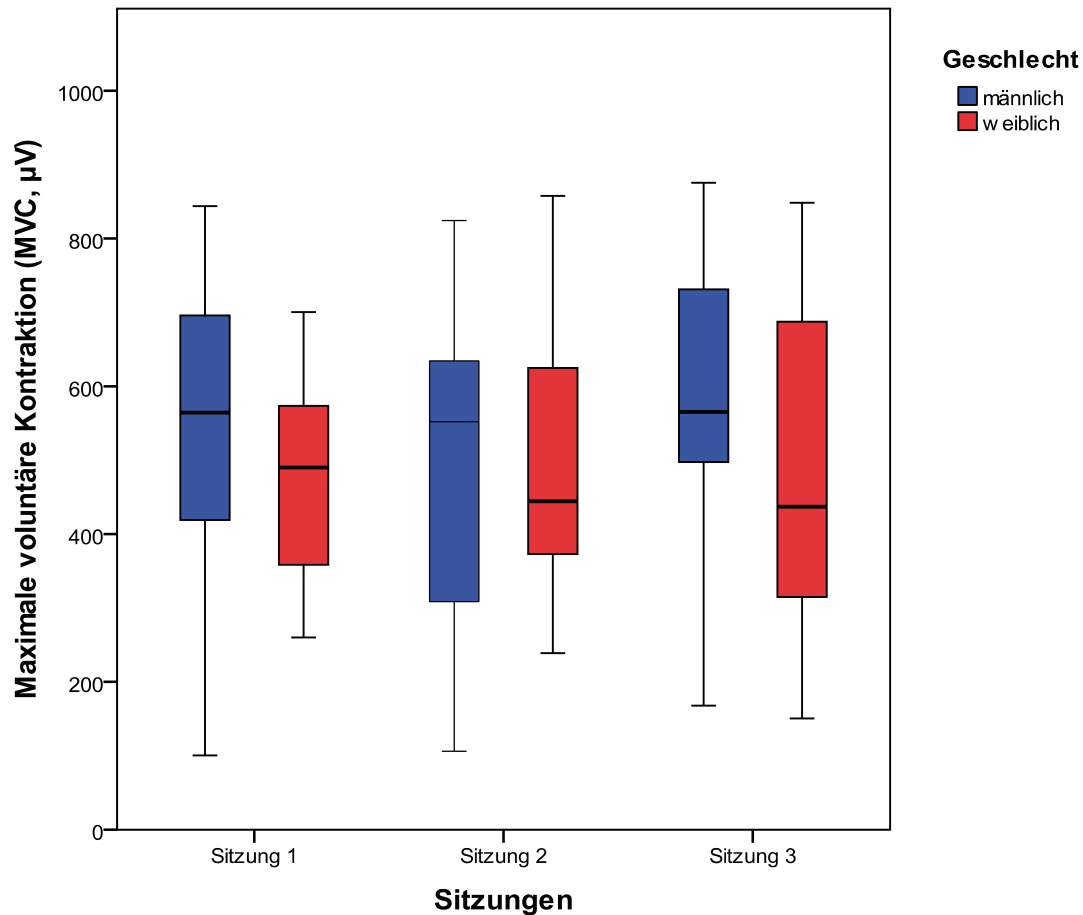


Abbildung 21: Maximale voluntäre Kontraktion (MVC, seitenunspezifische Darstellung).

In Abbildung 21 ist die maximale voluntäre Kontraktion beider Masseteren der weiblichen und männlichen Probandengruppe dargestellt. Es fällt auf, dass der Medianwert in der männlichen Probandengruppe in allen drei Sitzungen oberhalb des Medianwertes der weiblichen Probandengruppe liegt. Es lässt darauf schließen, dass die männlichen Probanden zum Teil deutlich höhere Werte als die weiblichen Probanden bei der maximalen voluntären Kontraktion erzielt haben. Ähnliche Ergebnisse zeigt die Abbildung 22, in der die Verteilung der MVC-Werte des rechten M. masseter dargestellt ist.

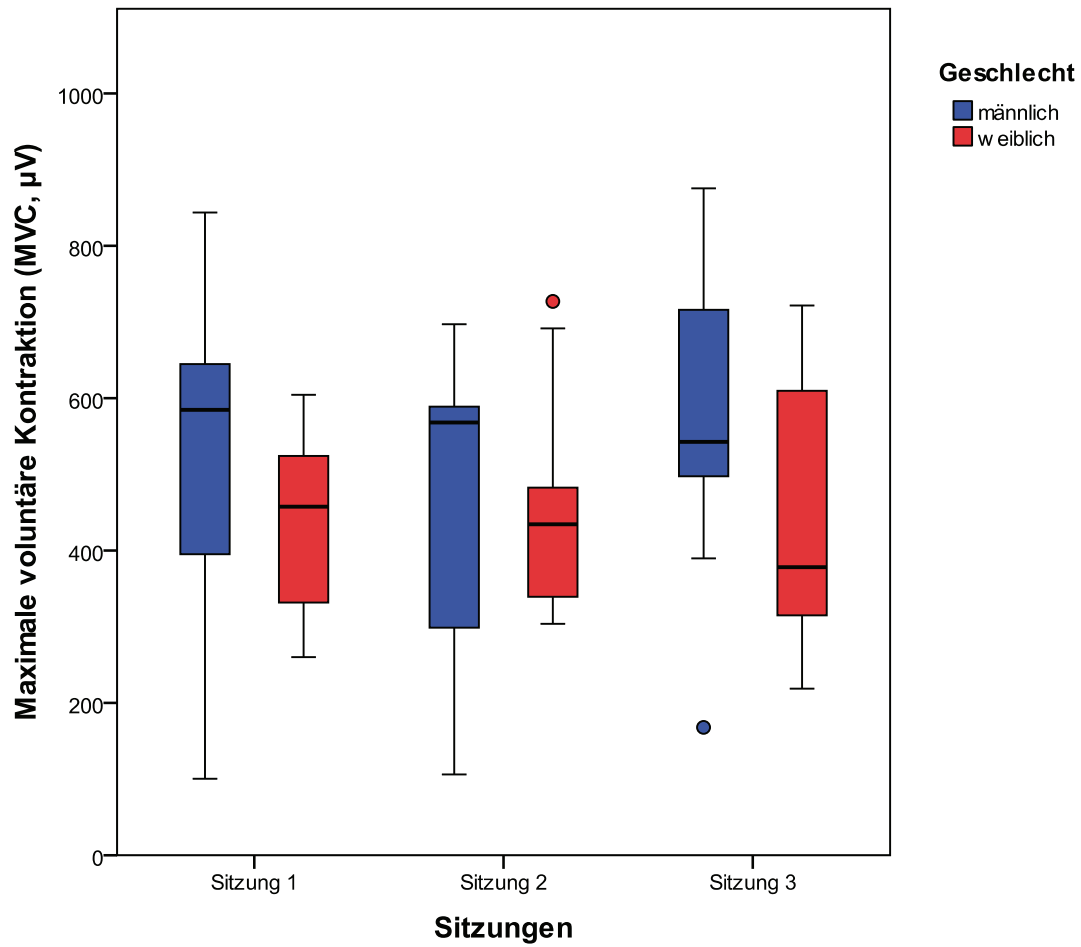


Abbildung 22: Maximale voluntäre Kontraktion (MVC) des rechten *M. masseter*.

Die einzelnen MVC-Werte aller Probanden in den einzelnen Sitzungen können der Tabelle 20 entnommen werden.

Proband	mvc_re_a	mvc_li_a	mvc_re_b	mvc_li_b	mvc_re_c	mvc_li_c
1	633,55	526,33	588,82	581,09	716	731,27
2	604,48	665,97	691,59	857,69	609,71	780,31
3	457,57	337,44	303,72	238,76	218,69	150,42
4	644,8	804,7	634,3	705,32	587,81	751,45
5	100,38	242,53	106,08	282,54	167,85	317,13
6	331,78	358,52	324,69	380,93	314,95	289,14
7	457,12	517,28	727,03	521,93	721,6	848,39
8	260,13	371,3	339,18	409,27	284,07	429,97
9	560,82	632,95	434,41	445,32	461,25	412,3
10	695,83	584,28	697,13	774,59	757,59	777,03
11	442,01	544,52	298,69	308,51	389,71	511,91
12	843,76	747,39	573,12	517,91	875,4	597,46
13	584,69	536,5	568,09	408,45	497,44	424,33
14	491,28	700,48	482,6	624,87	315,19	444,03
15	395,08	419,14	535,91	504,48	521,85	532,6
16	524,04	573,61	443,51	714,71	687,52	771,58
17	312,23	488,91	373,02	611,38	378,14	667,71
18	325,89	798,17	148	824,35	542,72	698,62

Tabelle 20: MVC-Werte (μV) des rechten (mvc_re) und linken (mvc_li) M. masseter in den drei Sitzungen (a= erste Sitzung, b= zweite Sitzung, c= dritte Sitzung).

Tabelle 21 zeigt den ICC-Wert für die maximale voluntäre Kontraktion aller Probanden in den drei Sitzungen. Der ICC-Wert ist relativ hoch, dies spricht für eine gute Reproduzierbarkeit der registrierten MVC-Daten in den drei Sitzungen.

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,747	0,541	0,886

Tabelle 21: Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für die maximale voluntäre Kontraktion (MVC) des rechten Masseter in den drei Sitzungen.

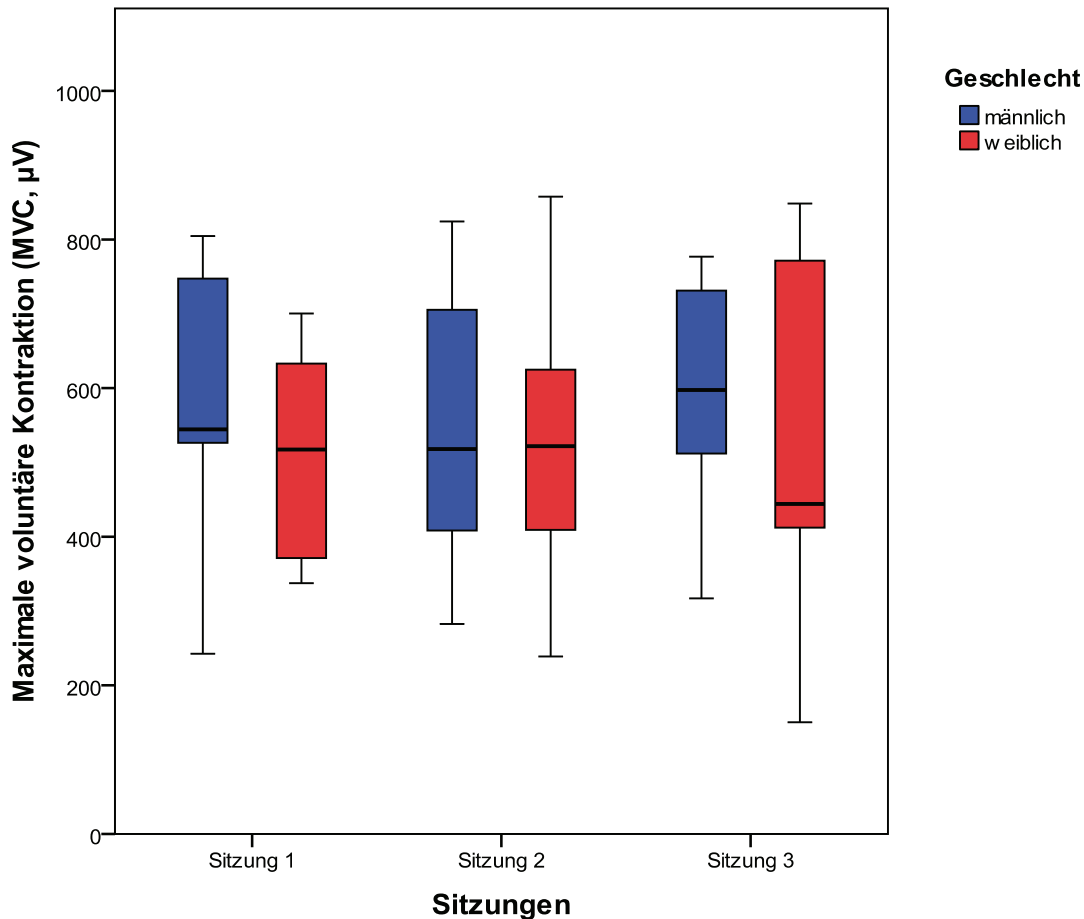


Abbildung 23: Maximale voluntäre Kontraktion (MVC) des linken M. masseter.

Bei der Betrachtung der maximalen voluntären Kontraktion des linken Masseter (Abb. 23) fällt auf, dass der Medianwert in der männlichen Probandengruppe, anders als bei dem rechten M. masseter, in den ersten beiden Sitzungen annähernd dem Medianwert der weiblichen Probandengruppe entspricht. Nur in der dritten Sitzung liegt dieser deutlich oberhalb des Medianwertes der weiblichen Probandengruppe. Insgesamt zeigt sich für den rechten und linken Masseter eine ähnliche Verteilung der MVC-Werte in der weiblichen und männlichen Probandengruppe.

Der ICC-Wert für die MVC des linken M. masseter (siehe Tabelle 22) ist ähnlich groß wie derjenige des rechten M. masseter.

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,706	0,481	0,865

Tabelle 22: Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für die maximale voluntäre Kontraktion (MVC) des linken Masseter in den drei Sitzungen.

4.5 Asymmetrieindex (AI)

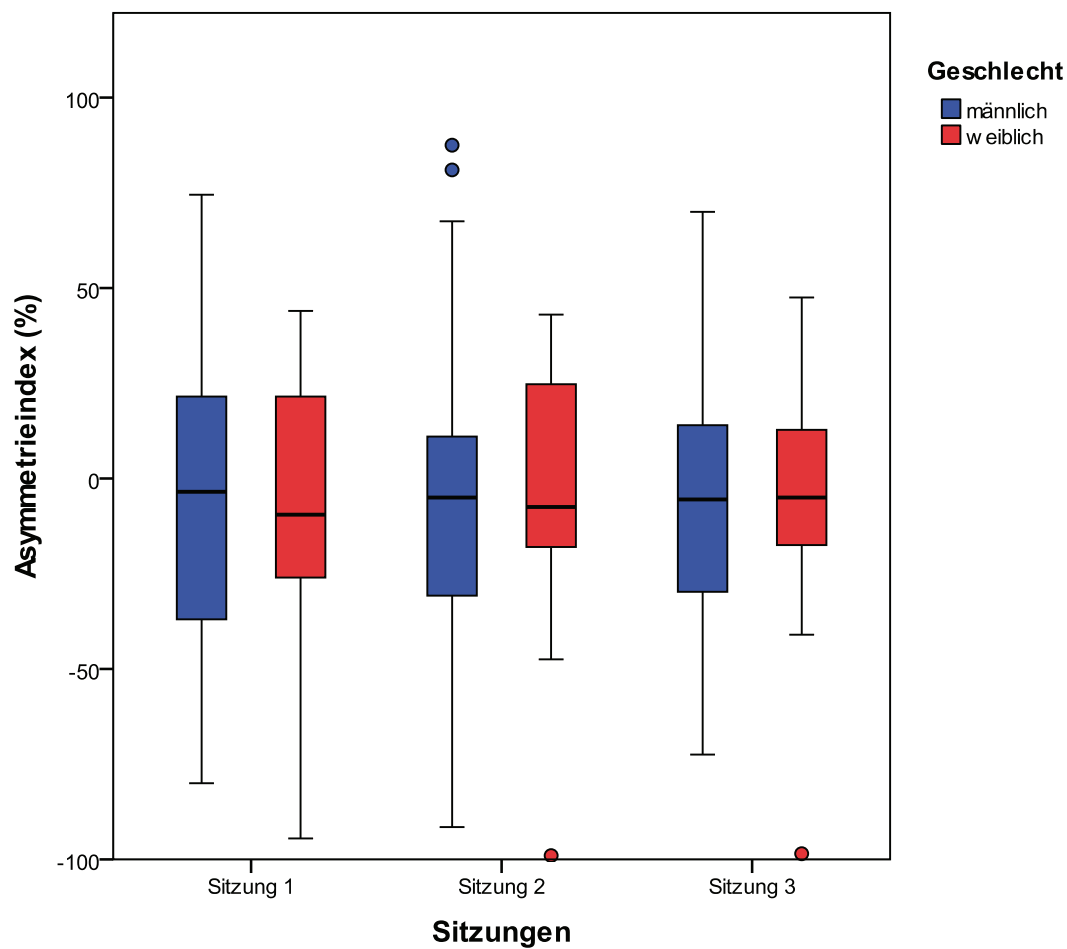


Abbildung 24: Asymmetrieindex (AI, μ V-basiert).

Abbildung 24 stellt die Verteilung der μV -basierten Werte des Asymmetrieindex für die weibliche und männliche Probandengruppe dar. Hierbei handelt es sich um die Darstellung des Asymmetrieindex für alle Kauübungen. Die Medianwerte liegen sowohl in der männlichen als auch in der weiblichen Probandengruppe in jeder Sitzung annähernd bei 0. Ähnliche Werteverteilung zeigt Abbildung 25, in der die MVC-bezogenen Werte des Asymmetrieindex dargestellt sind.

Die einzelnen μV -basierten AI-Werte aller Probanden sind in der Tabelle 23 dargestellt. Die MVC-bezogenen AI-Werte aller Probanden lassen sich der Tabelle 24 entnehmen.

Proband	Al_fk_a	Al_rk_a	Al_lk_a	Al_fk_b	Al_rk_b	Al_lk_b	Al_fk_c	Al_rk_c	Al_lk_c
1	12,5	29,5	-3,5	5	7,5	-11	-4	16	-31
2	-31	20,5	-38,5	-9	29,5	-26	4,5	33	-22,5
3	31,5	30	-29,5	37,5	39	-14	16	36	1,5
4	5,5	13,5	-41,5	-4	11	-50,5	-5,5	13	-66
5	-41	-5	-57,5	-32	-12	-53,5	-16,5	2,5	-40
6	-6	22,5	-36,5	-9	23	-37,5	-8	33	-29
7	-9,5	18,5	-30	0	23,5	-34	-15,5	7,5	-32,5
8	26	29	-94,5	26	30,5	-99	10	9	-98,5
9	16	44	-44	9,5	43	-47,5	13	47,5	-41
10	36	34	-17,5	-5	20,5	-29,5	-1	26,5	-28,5
11	-80	58,5	-69,5	-41	67,5	-43	-50	65,5	-54,5
12	-33	4,5	-66,5	7,5	5	-70	-5,5	6,5	-72,5
13	74,5	73,5	-45	87,5	81	-91,5	69	70	-61,5
14	-22	-5	-22,5	-10,5	9,5	-10,5	-7,5	12,5	-13,5
15	-31,5	4,5	-33	-21	11	-18	-23	13,5	-20,5
16	-9,5	34,5	-21	5,5	26,5	-19	-5	24	-26,5
17	-12,5	-2,5	-19	-17	-7,5	-29	-6,5	-6,5	-19,5
18	9	32	-15,5	11	32	-18,5	14,5	33	-19,5

Tabelle 23: μ V-basiert Asymmetrieindex-Werte (AI= Asymmetrieindex, fk= freies Kauen, rk= angewiesenes Rechtskauen, lk= angewiesenes Linkskauen, a= erste Sitzung, b= zweite Sitzung, c= dritte Sitzung).

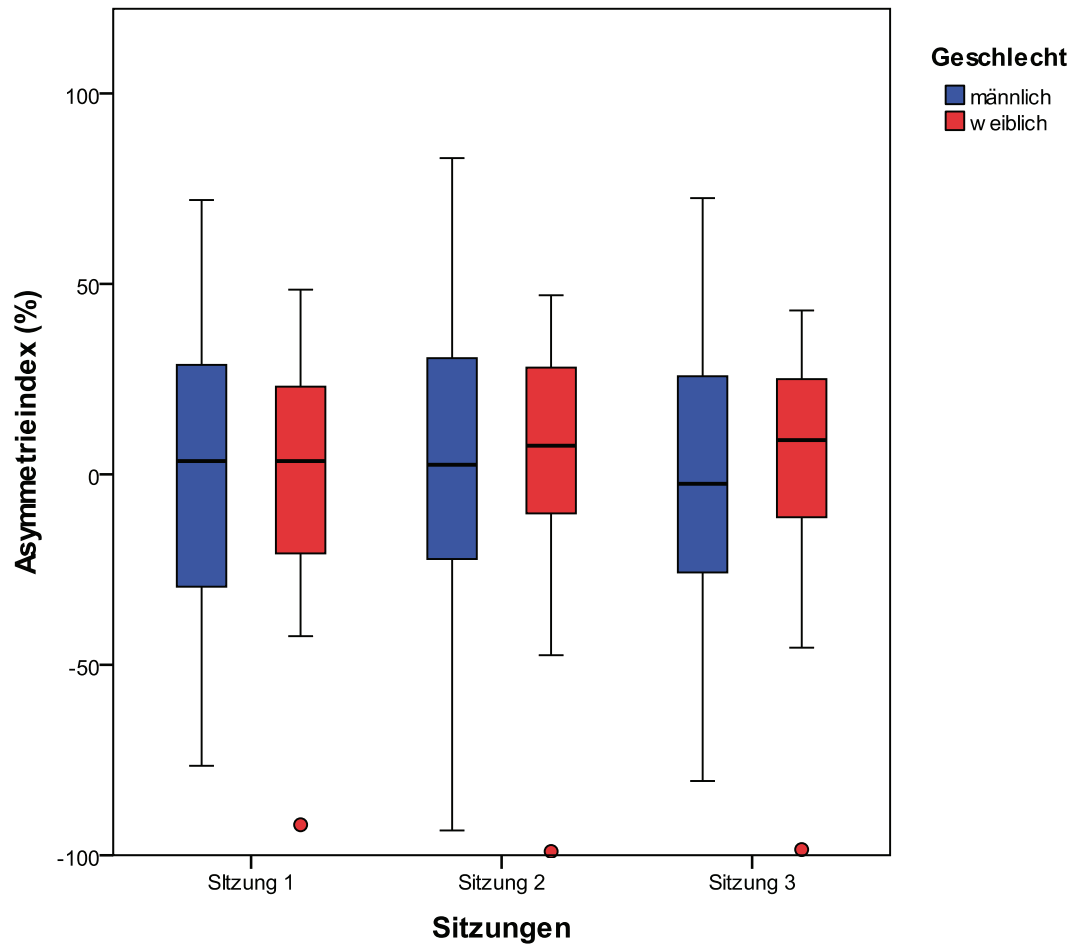


Abbildung 25: Asymmetrieindex (AI, MVC-basiert).

Proband	Al_fk_a	Al_rk_a	Al_lk_a	Al_fk_b	Al_rk_b	Al_lk_b	Al_fk_c	Al_rk_c	Al_lk_c
1	3,5	21	-13	4	6,5	-12	-2,5	17	-30
2	-27	25	-34,5	2	39	-16	16	43	-10,5
3	17,5	15,5	-42,5	27	28	-25	-2,5	18,5	-16,5
4	16,5	24	-31,5	1,5	16	-46,5	7	25	-58,5
5	0,5	37,5	-20,5	15,5	35,5	-10,5	14,5	32,5	-10,5
6	-2	26,5	-33	-1	30	-30,5	-12	29,5	-31
7	-4	24,5	-24,5	-15,5	7,5	-47,5	-7,5	15,5	-25
8	42	44,5	-92	34	38,5	-99	30	29	-98,5
9	21,5	48,5	-39	11	44	-46,5	7,5	42,5	-45,5
10	29	26	-26	0	25,5	-24,5	0,5	27,5	-27,5
11	-76,5	64,5	-64	-40	68,5	-42	-39	72,5	-44,5
12	-38,5	-2	-70	2,5	0	-72,5	-24	-12,5	-80,5
13	72	71,5	-48,5	83	75	-93,5	65	66	-66
14	-4,5	12,5	-5,5	2	21,5	2,5	9,5	28,5	3,5
15	-28,5	7,5	-30,5	-23,5	8	-21	-22	14,5	-19,5
16	-5,5	38,5	-17	28	47	4,5	0,5	29,5	-21
17	9,5	19,5	3,5	7,5	16,5	-5	21,5	21,5	9
18	49,5	65	28,5	74,5	83	59	26,5	44	-7,5

Tabelle 24: MVC-basierte Asymmetrieindex-Werte (AI= Asymmetrieindex, fk= freies Kauen, rk= angewiesenes Rechtskauen, lk= angewiesenes Linkskauen, a= erste Sitzung, b= zweite Sitzung, c= dritte Sitzung).

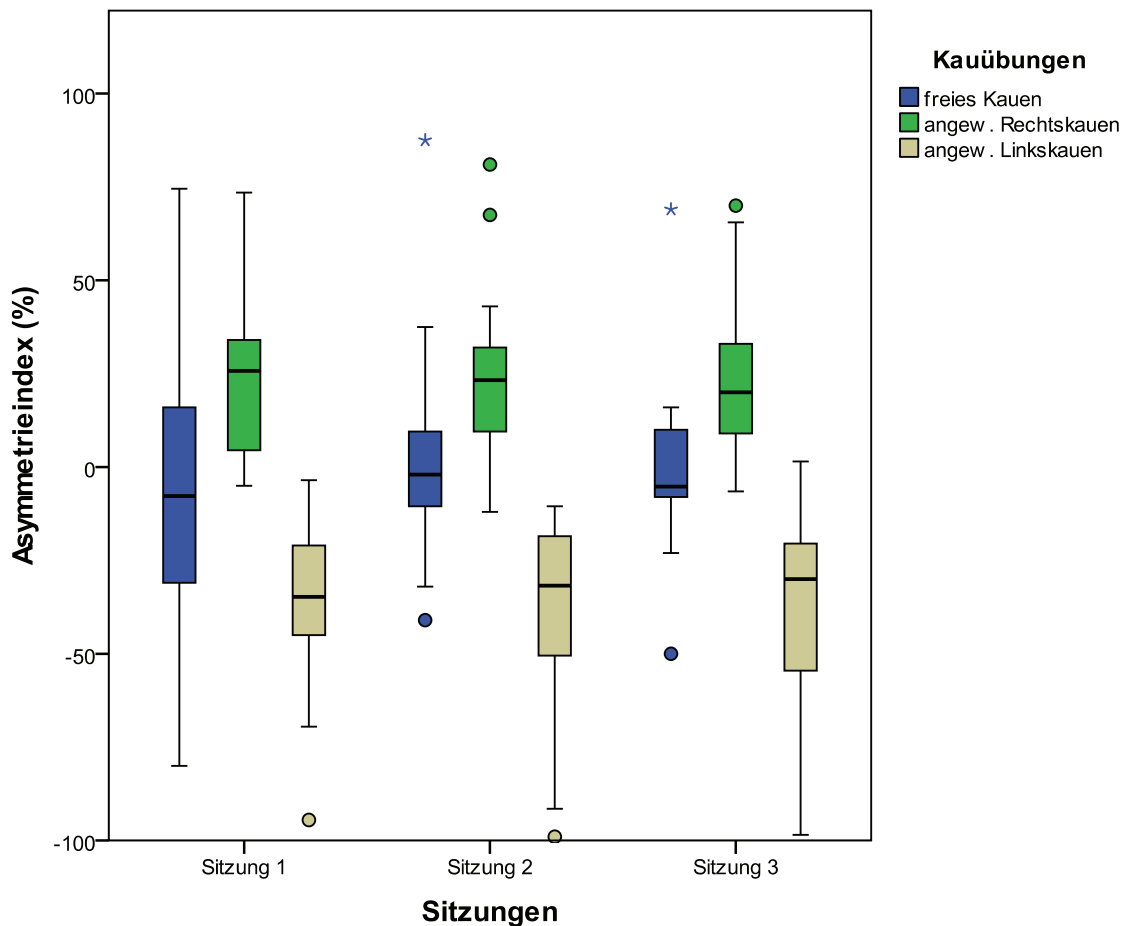


Abbildung 26: Asymmetrieindex (AI, μ V-basiert).

Bei der Darstellung des Asymmetrieindex für die einzelnen Kauübungen in den drei Sitzungen sind signifikante Unterschiede ($p < 0,001$) zwischen den Kauübungen feststellbar (Abb. 26 und 27). Aus den Abbildungen 26-31 lässt sich ableiten, dass die Muskelarbeit des rechten M. masseter bei angewiesenem Rechtskauen bei den meisten Probanden deutlich größer ist als die des linken M. masseter. Bei einzelnen Probanden ist die Muskelarbeit des rechten Masseter bei angewiesenem Rechtskauen mehr als dreimal so groß wie die des linken M. masseter. Das Gleiche gilt auch für den linken M. masseter, der bei den meisten Probanden während des angewiesenen Linkskauens signifikant mehr Arbeit leistet. In den einzelnen Fällen (Proband 8 und 13) liegt der AI-Wert bei angewiesenem Linkskauen bei fast -100%. Dies bedeutet, dass der rechte M. masseter bei diesen Probanden während des angewiesenen Linkskauens annähernd keine Muskelarbeit leistet. Während des freien Kauens liegt die Muskelarbeit beider Masseteren bei den meisten Probanden vorwiegend balanciert vor, Ausnahmen gibt es jedoch auch.

Der ICC für den Asymmetrieindex (μ V-basiert) liegt bei allen Kauübungen relativ hoch (0,838-0,914). Die AI-Werte einzelner Kauübungen weisen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Sitzungen auf und sind somit gut reproduzierbar. Ähnliche Ergebnisse zeigen Tabellen 28 bis 30 mit den MVC-basierten Werten.

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,839	0,689	0,930

Tabelle 25: *Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für den Asymmetrieindex (μ V-basierte Werte) bei freiem Kauen in den drei Sitzungen.*

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,914	0,825	0,964

Tabelle 26: *Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für den Asymmetrieindex (μ V-basierte Werte) bei angewiesenem Rechtskauen in den drei Sitzungen.*

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,838	0,688	0,930

Tabelle 27: *Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für den Asymmetrieindex (μ V-basierte Werte) bei angewiesenem Linkskauen in den drei Sitzungen.*

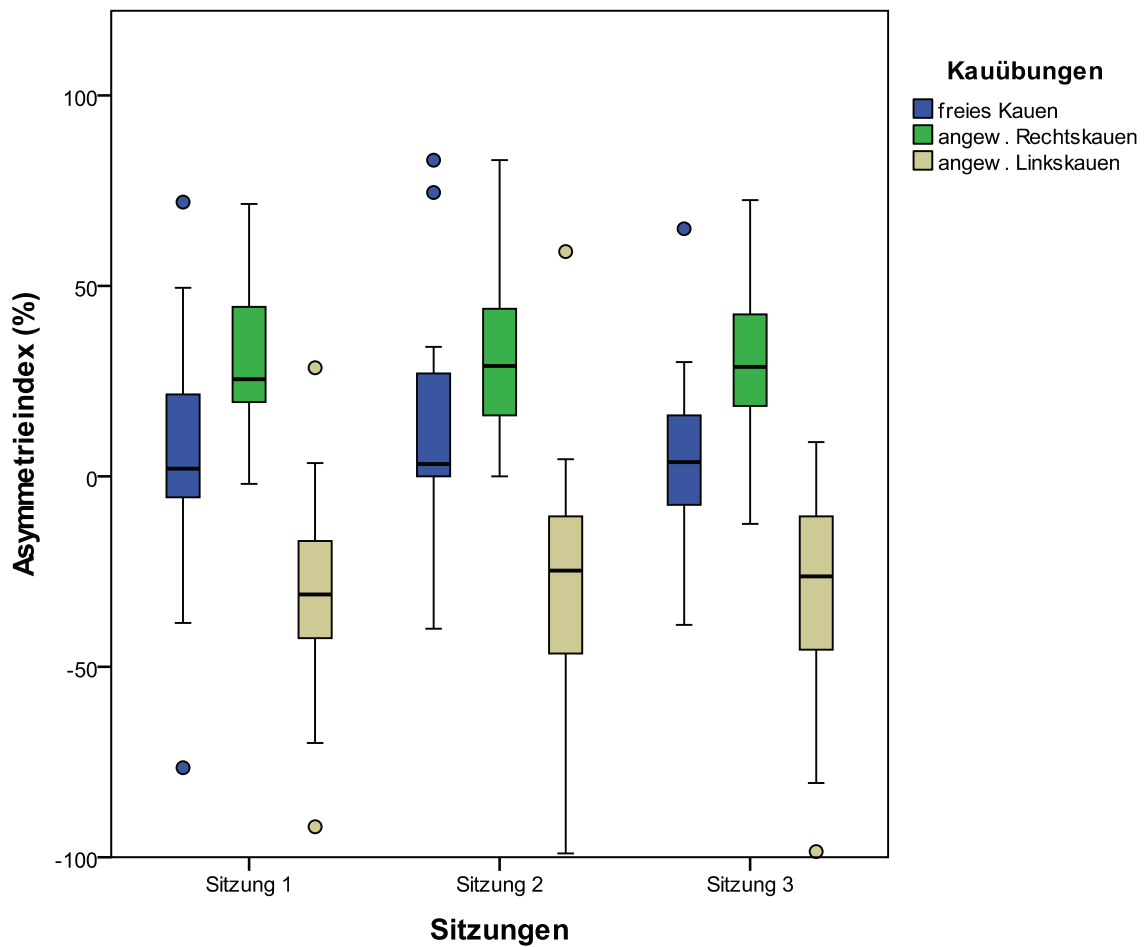


Abbildung 27: Asymmetrieindex (MVC-basiert).

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,794	0,615	0,909

Tabelle 28: Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für den Asymmetrieindex (MVC-basierte Werte) bei freiem Kauen in den drei Sitzungen.

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,879	0,759	0,948

Tabelle 29: Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für den Asymmetrieindex (MVC-basierte Werte) bei angewiesenem Rechtskauen in den drei Sitzungen.

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,833	0,679	0,927

Tabelle 30: Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für den Asymmetrieindex (MVC-basierte Werte) bei angewiesenem Linkskauen in den drei Sitzungen.

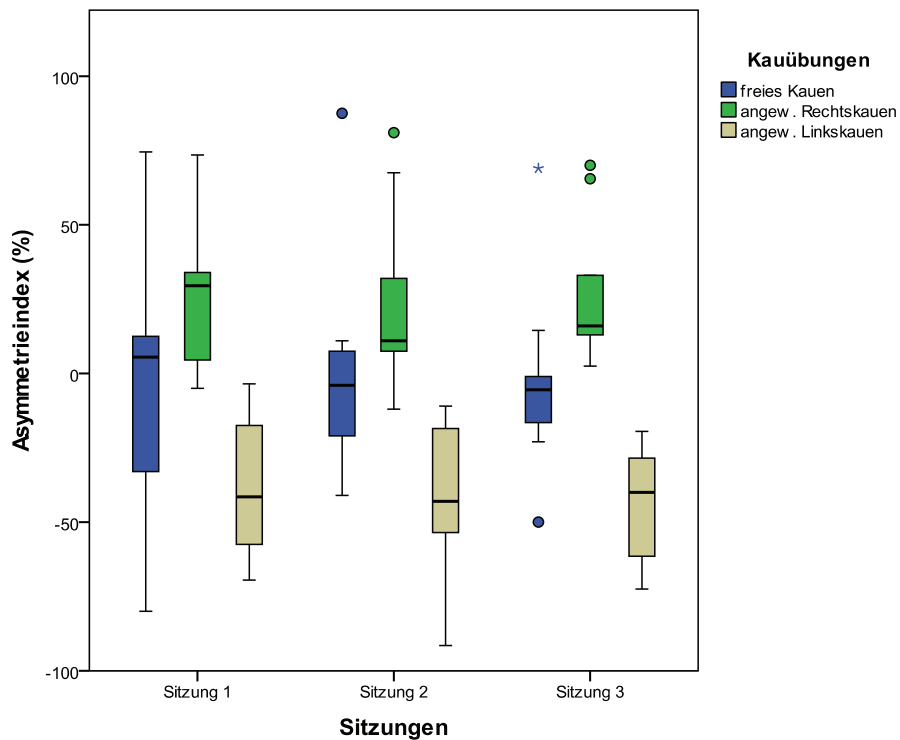


Abbildung 28: Asymmetrieindex (μ V-basiert) der männlichen Probandengruppe.

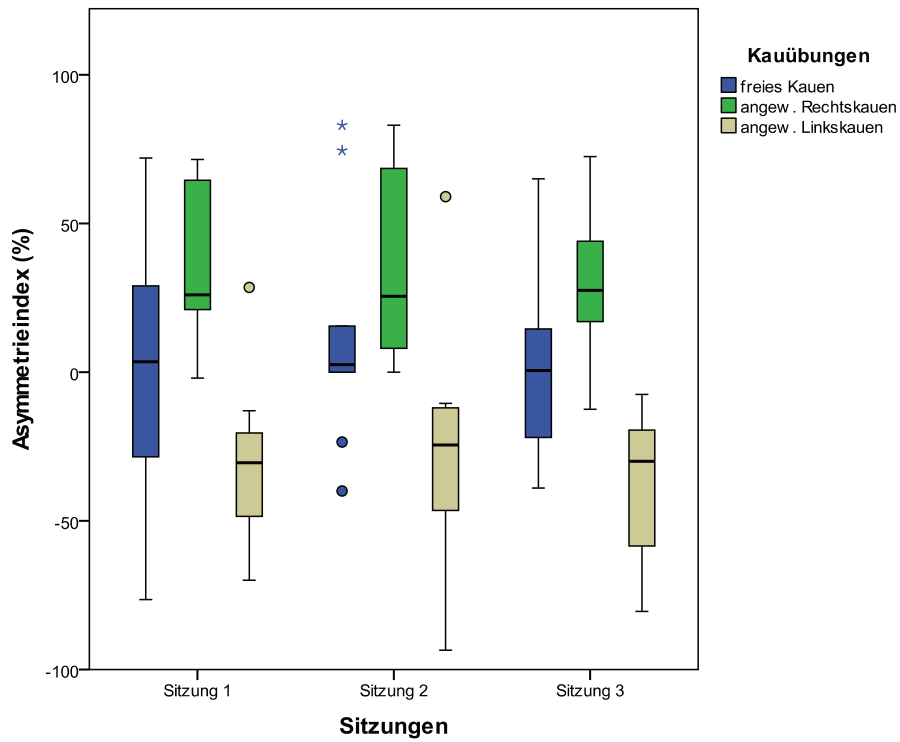


Abbildung 29: Asymmetrieindex (MVC-basiert) der männlichen Probandengruppe.

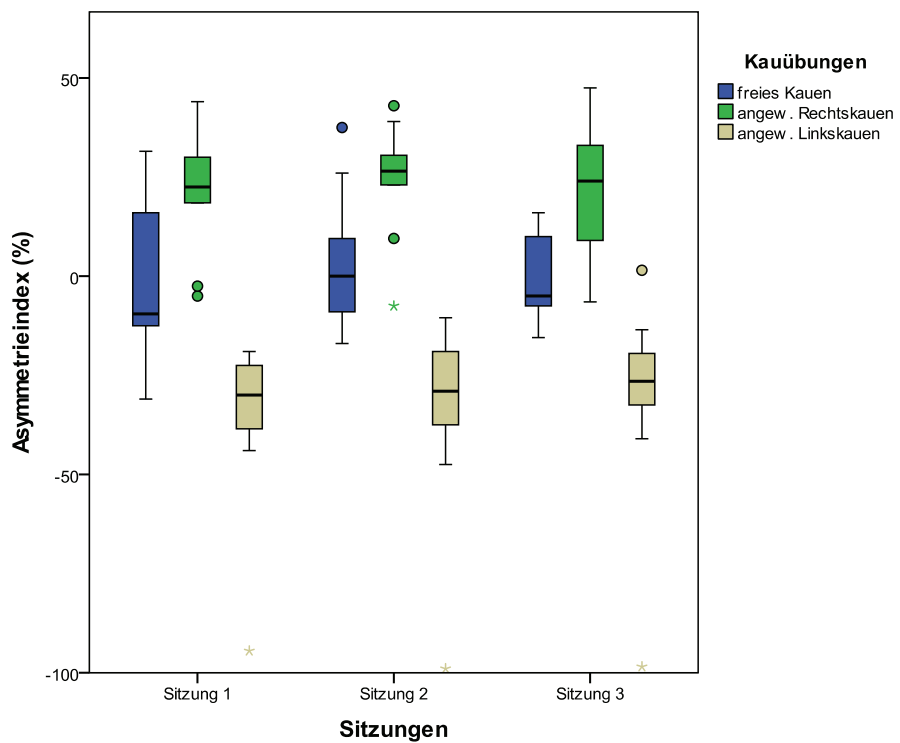


Abbildung 30: Asymmetrieindex (μ V-basiert) der weiblichen Probandengruppe.

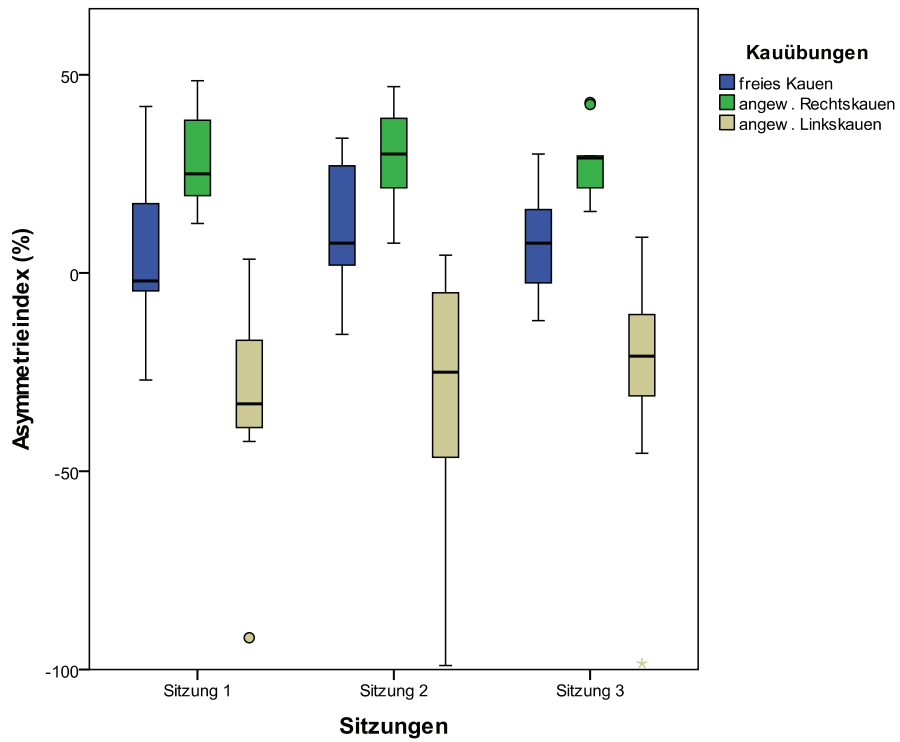


Abbildung 31: Asymmetrieindex (MVC-basiert) der weiblichen Probandengruppe.

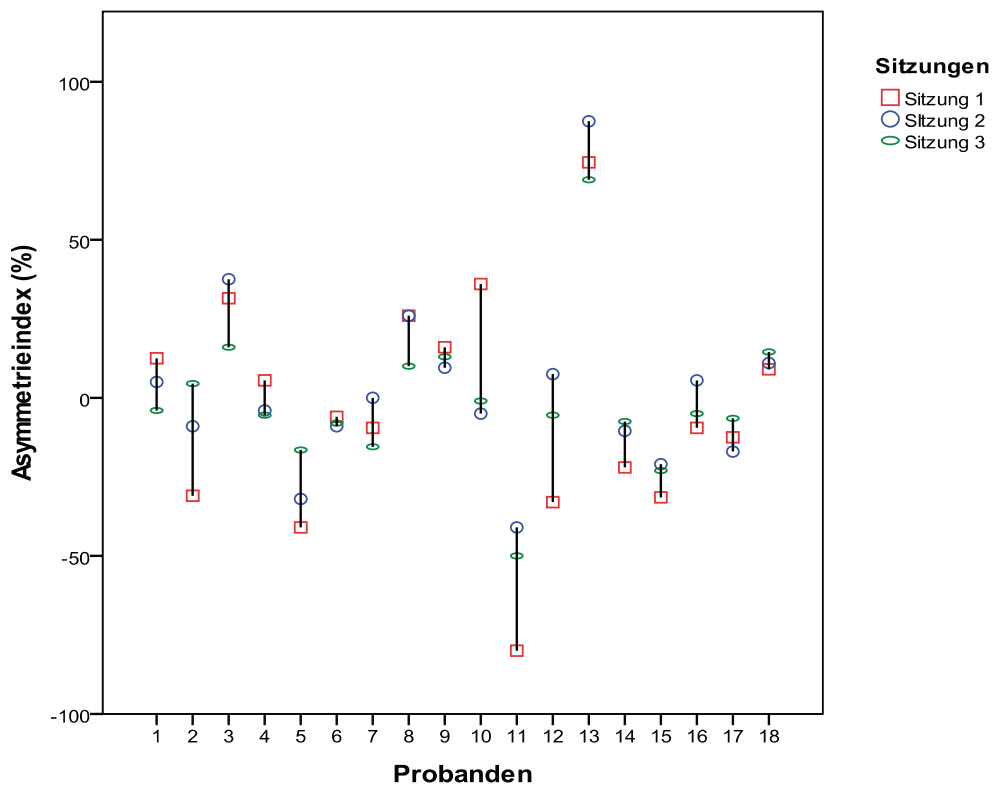


Abbildung 32: Asymmetrieindex (AI, μ V-basiert) aller Probanden bei freiem Kauen.

Abbildungen 32 bis 37 zeigen den Asymmetrieindex (μ V- und MVC-basiert) einzelner Probanden für die unterschiedlichen Kauübungen in der sogenannten Verbundliniendarstellung. Es zeigt sich eine deutliche interindividuelle Variabilität der Muskelarbeit während unterschiedlicher Kauübungen in den drei Untersuchungssitzungen.

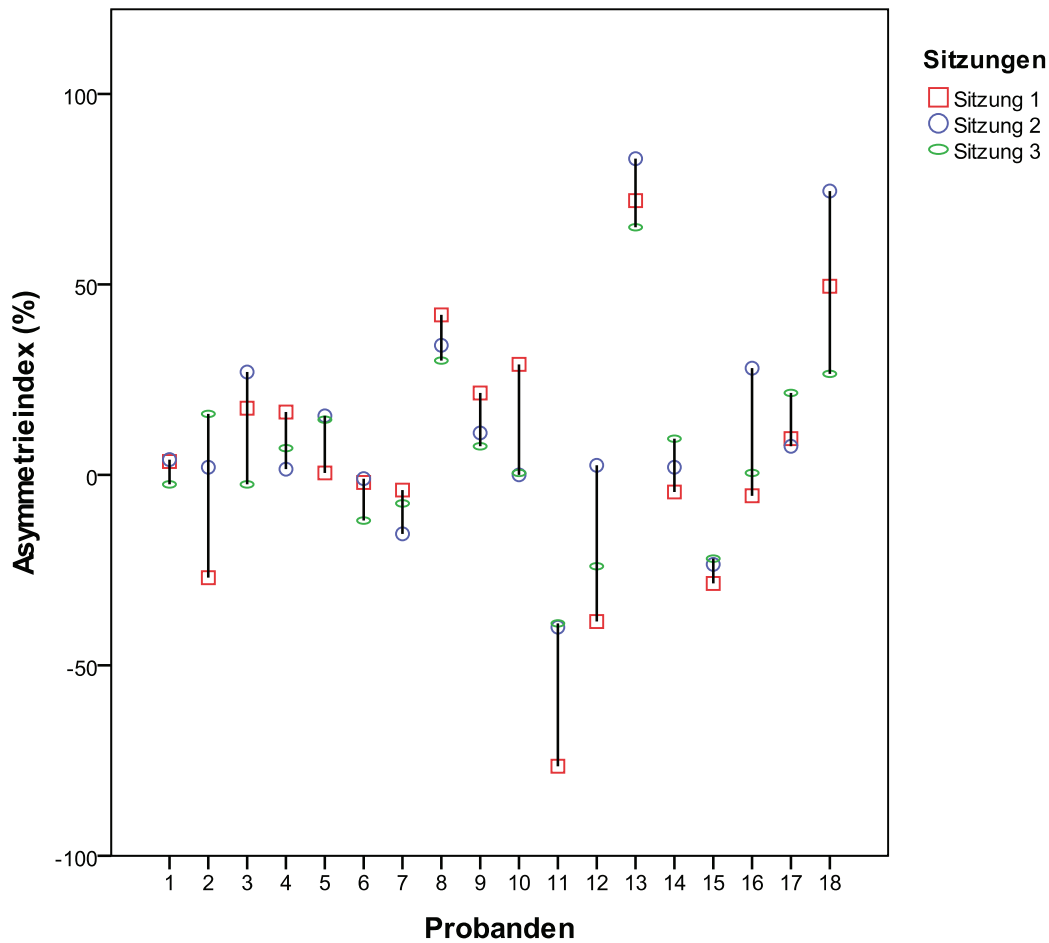


Abbildung 33: Asymmetrieindex (AI, MVC-basiert) aller Probanden bei freiem Kauen.

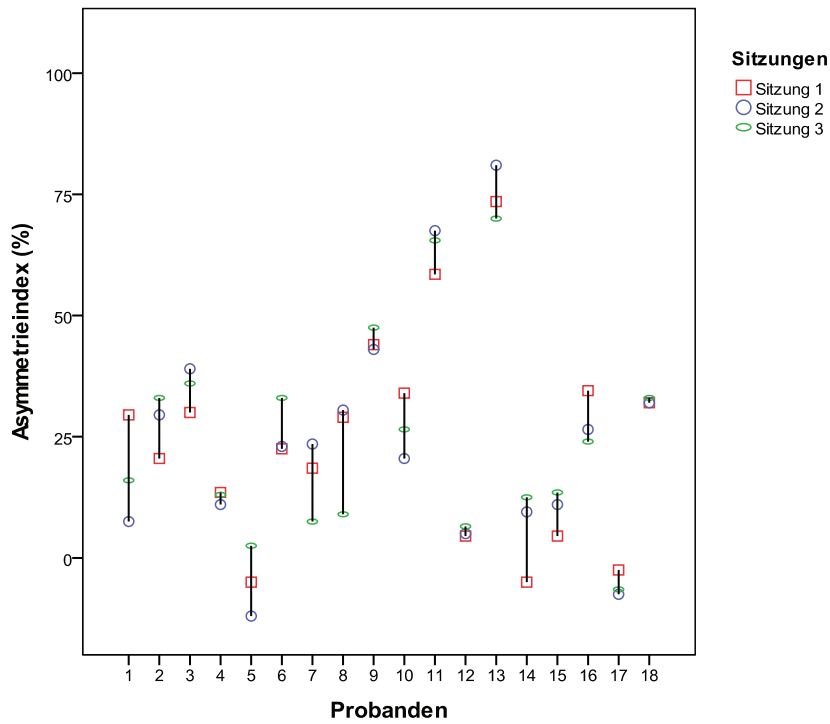


Abbildung 34: Asymmetrieindex (AI, μV -basiert) aller Probanden bei angewiesenem Rechtskaufen.

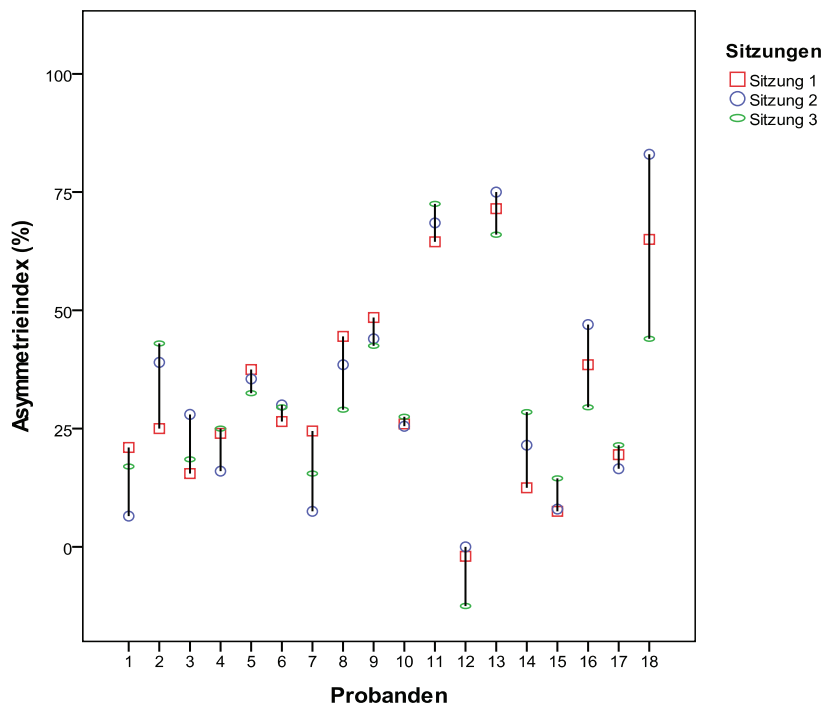


Abbildung 35: Asymmetrieindex (AI, MVC-basiert) aller Probanden bei angewiesenem Rechtskaufen.

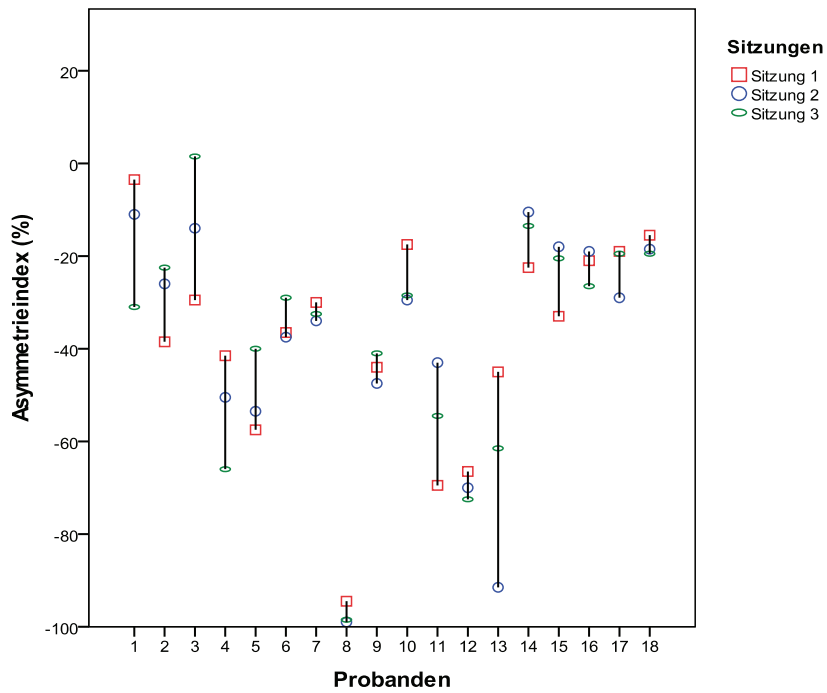


Abbildung 36: Asymmetrieindex (AI, μV -basiert) aller Probanden bei angewiesenem Linkskauen.

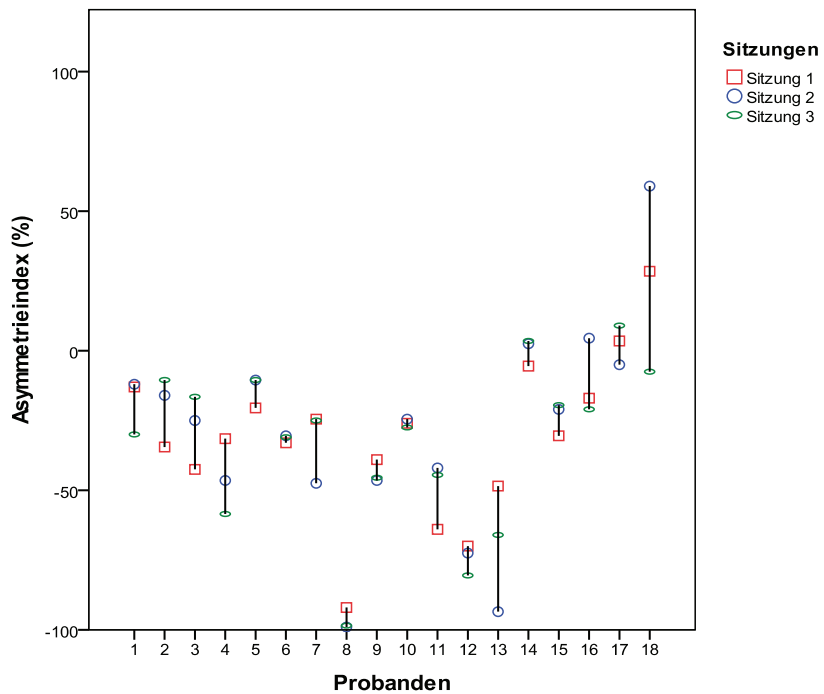


Abbildung 37: Asymmetrieindex (AI, MVC-basiert) aller Probanden bei angewiesenem Linkskauen.

4.6 Angewiesener seitenbezogener Kauindex (DCI)

Abbildung 38 zeigt den seitenbezogenen angewiesenen Kauindex (DCI) für den rechten und linken Masseter. Die DCI-Werte für den rechten M. masseter unterscheiden sich signifikant ($p < 0,001$) von den DCI-Werten des linken M. masseter. Der DCI-Wert vergleicht die Muskelarbeit des Masseter einer Körperseite bei angewiesenem Rechtskauen mit der Muskelarbeit bei angewiesenem Linkskauen. Aus der Abbildung lässt sich entnehmen, dass bei der Mehrheit der Probanden der rechte M. masseter während des angewiesenen Rechtskauens deutlich mehr Arbeit leistete als der linke M. Masseter. Das gleiche gilt analog für den linken M. masseter.

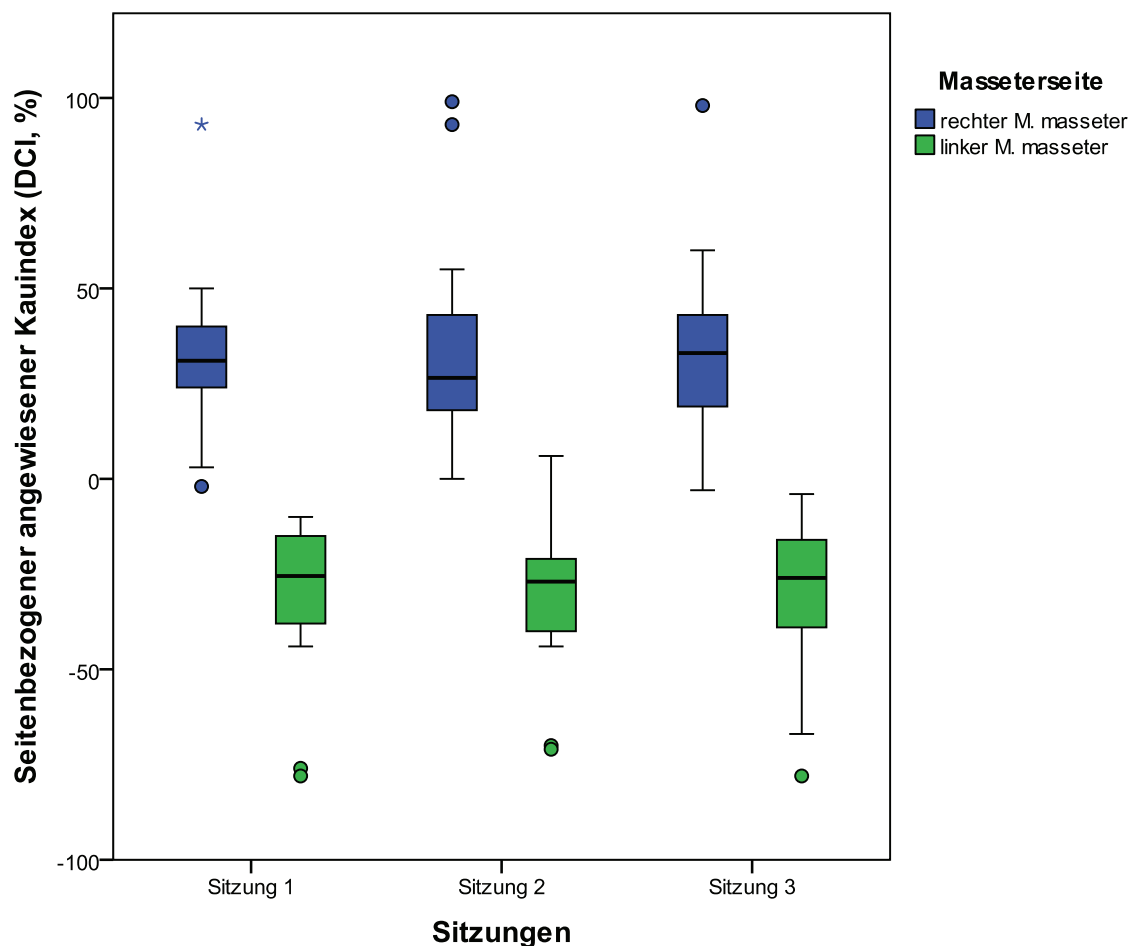


Abbildung 38: Seitenbezogener angewiesener Kauindex (Deliberate Chewing Index, DCI, μ V-basiert, identisch mit MVC-basiert).

Die einzelnen DCI-Werte für den rechten und den linken M. masseter einzelner Probanden in den drei Sitzungen sind in der Tabelle 31 dargestellt.

Proband	DCI_re_a	DCI_li_a	DCI_re_b	DCI_li_b	DCI_re_c	DCI_li_c
1	24	-10	23	6	36	-11
2	29	-30	25	-31	15	-39
3	40	-20	32	-21	15	-16
4	40	-15	34	-25	60	-22
5	33	-25	16	-30	22	-22
6	14	-44	15	-44	35	-26
7	35	-14	43	-13	35	-4
8	93	-39	99	-43	98	-43
9	49	-38	51	-40	43	-45
10	26	-26	28	-22	29	-26
11	50	-76	39	-70	53	-67
12	49	-30	55	-29	58	-31
13	36	-78	93	-71	41	-78
14	3	-15	7	-12	0	-26
15	25	-13	18	-10	20	-15
16	20	-36	23	-22	19	-32
17	-2	-18	0	-21	-3	-15
18	24	-23	21	-29	31	-22

Tabelle 31: μ V-basierte DCI-Werte (re= rechter M. masseter, li= linker M. masseter, a= erste Sitzung, b= zweite Sitzung, c= dritte Sitzung).

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,819	0,655	0,921

Tabelle 32: *Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für den seitenbezogenen angewiesenen Kauindex (DCI, μ V-basiert, identisch mit MVC-basiert) für den rechten Masseter in den drei Sitzungen.*

Korrelation innerhalb der Klasse	95%-Konfidenzintervall	
	Untergrenze	Obergrenze
0,925	0,846	0,969

Tabelle 33: *Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für den seitenbezogenen angewiesenen Kauindex (DCI, μ V-basiert, identisch mit MVC-basiert) für den linken Masseter in den drei Sitzungen.*

Der ICC-Wert für den DCI ist sowohl für den rechten als auch für den linken M. masseter relativ hoch und spricht für eine gute Reproduzierbarkeit der Werte.

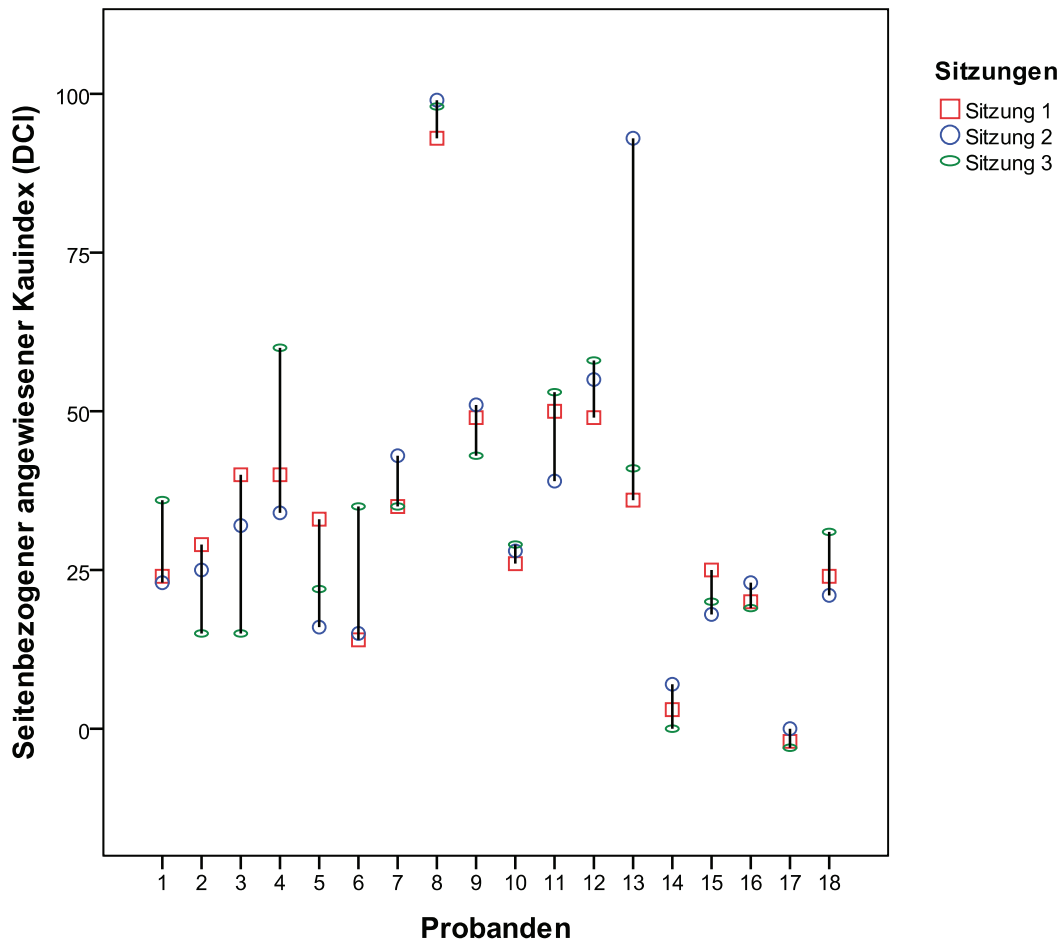


Abbildung 39: Seitenbezogener angewiesener Kauindex (*Deliberate Chewing Index, DCI, μ V-basiert, identisch mit MVC-basiert*) des rechten *M. masseter*.

Die Abbildungen 39 und 40 veranschaulichen die DCI-Werte jedes einzelnen Probanden in den drei Untersuchungssitzungen anhand der Verbundliniendarstellung. Ähnlich dem Asymmetrieindex weist auch der angewiesene seitenbezogene Index (DCI) deutliche interindividuelle Unterschiede auf.

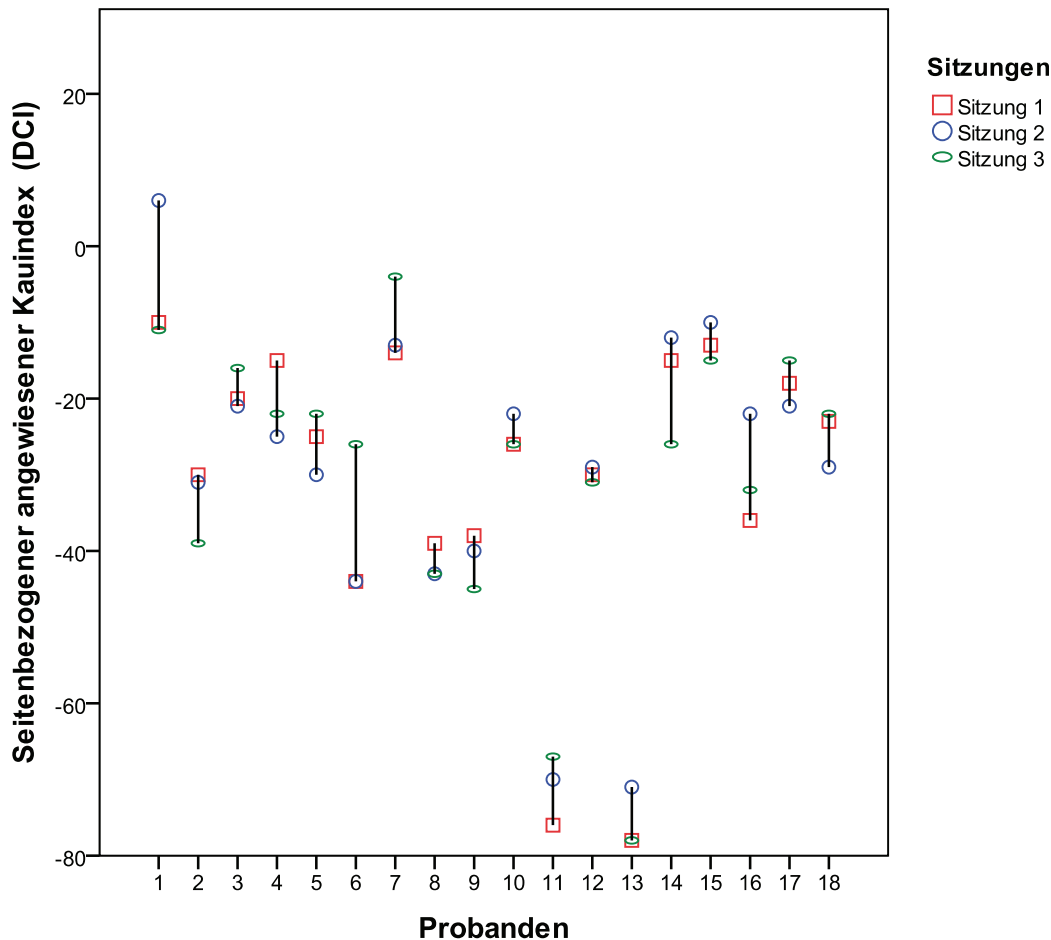


Abbildung 40: Seitenbezogener angewiesener Kauindex (Deliberate Chewing Index, DCI, μ V-basiert, identisch mit MVC-basiert) des linken M. masseter.

4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend lassen sich folgende Aussagen zu den Ergebnissen der vorliegenden Studie festhalten: die rechte Seite wurde von den Probanden bedeutend häufiger (67%) als die linke Seite (27,8%) als bevorzugte Kauseite angegeben. Für den maximalen voluntären Kontraktionswert (MVC-Wert) des rechten und des linken M. masseter konnte eine gute Reproduzierbarkeit nachgewiesen werden (ICC-Wert des rechten M. masseter 0,747, des linken M. masseter 0,706).

Der Asymmetrieindex (AI) zeigte signifikante Unterschiede ($p < 0,001$) zwischen den drei Kauübungen. Keine signifikanten Unterschiede konnten zwischen den einzelnen

Sitzungen nachgewiesen werden. Der seitenbezogene angewiesene Kauindex (DCI) zeigte einen signifikanten Unterschied ($p < 0,001$) für die Werte des rechten gegenüber dem linken Masseter. Keine signifikanten Unterschiede konnten für die DCI-Werte der einzelnen Sitzungen festgestellt werden (ICC-Wert für den rechten M. masseter betrug 0,819 und für den linken M. masseter 0,925).

Bei der Betrachtung der Werte der Muskelarbeit konnte eine deutliche interindividuelle Variabilität zwischen den Probanden nachgewiesen werden. Ferner wurde ein individuelles Rekrutierungsmuster des rechten und des linken M. Masseter während unterschiedlicher Kauübungen beobachtet. Dies zeigte sich beispielsweise darin, dass zwei Probanden (Nr. 8 und 13) in der Lage waren, bei angewiesenem Kauen auf einer Seite die Aktivität des M. masseter auf der Balanceseite nahezu auf 0 herunterzufahren.

5 Diskussion

5.1 Diskussion der Methode und der verwendeten Materialien

Das Ziel der vorliegenden Studie war, die Reproduzierbarkeit von EMG-Daten zu bestimmen, die während unterschiedlicher Aufgaben (maximale voluntäre Kontraktion sowie Kauübungen) vom rechten und linken M. masseter in drei Sitzungen erfasst wurden.

Achtzehn gesunde vollbezahnte Probanden (9 Frauen und 9 Männer) im Alter zwischen 21 und 28 Jahren (Durchschnittsalter 23,5 Jahre) wurden nach einer sorgfältigen Vorauswahl für die Studie rekrutiert. Ein besonderes Augenmerk wurde darauf gerichtet, dass die ausgewählten Personen keinerlei Symptome und/oder Anzeichen einer CMD aufwiesen, so dass ein Basisdatensatz gewonnen werden konnte, welcher gegebenenfalls in einer weiteren Studie mit den Daten von Personen mit CMD-Symptomatik verglichen werden kann. So wurden vor Beginn der ersten Messung nach einer mündlichen Befragung zu Anamnese und bevorzugter Kauseite, die Grenzbewegungen des Unterkiefers bei allen Probanden aufgezeichnet, um mögliche Diskoordinationen bzw. Bewegungslimitationen auszuschließen.

An drei Tagen wurde die Aktivität des rechten und des linken M. masseter während unterschiedlicher Aufgaben mittels Oberflächenelektroden und unter Verwendung der EMG-Einheit der Firma Zebris registriert. Um jeden Kauzyklus von Beginn an bis zum Schluss definieren zu können, wurden simultan die Unterkieferbewegungen mit dem Jaw Motion Analyzer Registriersystem (JMA, Fa. Zebris) aufgezeichnet. Bei dem verwendeten Registriersystem handelt es sich um ein gängiges Messsystem, welches bereits in einer Reihe weiterer Studien bereits eingesetzt worden ist und eine gute Reliabilität und Validität aufweist (Best 2010, Bölöni 2002, Verch 2002). Die Verwendung eines paraokklusalen Behelfs in der vorliegenden Studie ließ einen ungestörten Mundschluss zu, so dass neben Grenzbewegungen des Unterkiefers und maximaler voluntärer Kontraktion auch Kaubewegungen problemlos aufgezeichnet werden konnten.

Die gesamten Messungen erfolgten in einem standardisierten Verfahren. So wurden die Messungen bei allen Probanden an möglichst drei aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt. Der Ablauf der Messungen blieb in jeder Sitzung konstant.

Bei den verwendeten Oberflächenelektroden handelte es sich um selbstklebende, gelbeschichtete bipolare Einwegelektroden mit fixer Zwischenelektrodenabstand von 20 mm, die einen verbreiteten Einsatz in der klinischen Praxis gefunden haben und den Vorteil bieten, dass der Zwischenelektrodenabstand in jeder Sitzung konstant bleibt. Zur Vermeidung von Abweichungen bei der Elektrodenpositionierung in den Folgesitzungen wurden bei jedem Probanden die Mittelpunkte der Elektroden in der ersten Sitzung markiert und unter Berücksichtigung der Bezugsebene (Tragus-Canthus-Linie) auf eine transparente Folie übertragen. Mit Hilfe dieser konnten die Punkte in der zweiten und dritten Sitzung exakt auf die Haut zurückübertragen werden.

Kauübungen wie freies Kauen (FC), angewiesenes Rechtskauen (RC) und angewiesenes Linkskauen (LC) wurden unter Zuhilfenahme eines standardisierten Kauguts in Form von Weingummis durchgeführt. Dies hatte den Vorteil, dass Probanden bei jeder Messung mit Kaugut gleicher Härte und mit gleichen Textureigenschaften konfrontiert wurden. Außerdem wurden beim Zerkauen von Weingummis, anders als zum Beispiel bei Karotten oder Kartoffelchips, ausladende und überwiegend gleichmäßige Unterkieferbewegungen gewonnen, welche bis zum finalen Schluckakt aufgezeichnet werden konnten.

Mit Hilfe einer Analysesoftware wurden aus den gewonnenen EMG-Signalen Daten zu den Parametern maximaler voluntärer Kontraktionswert (MVC), Muskelarbeit, Asymmetrieindex (AI) sowie seitenbezogener angewiesener Kauindex (DCI) ermittelt und ausgewertet.

5.2 Studien zur bevorzugten Kauseite

Studien belegen, dass der Kauvorgang abwechselnd bilateral, häufig aber auch vorwiegend auf einer Seite erfolgen kann. So bevorzugen manche Personen eine Kauseite, auf der sie die Speisen zum größten Teil zerkleinern.

In der SHIP-Studie von Diernberger et al. (2008) wurden die Prävalenz einer bevorzugten Kauseite und ihr Zusammenhang mit okklusalen, muskulären, artikulären und prothetischen Faktoren untersucht. An der Studie nahmen 4086 Probanden im Alter zwischen 20 und 80 Jahren teil (50,2% Frauen und 49,8% Männer). Die Teilnehmer wurden in einem Fragebogen aufgefordert anzugeben, ob sie eine bestimmte Kauseite bevorzugten und wenn ja, welche. Jeder Proband konnte die Frage auch mit „Ich weiß nicht“ beantworten. Diese Option wurde nur von einer sehr geringen Anzahl der Teilnehmer (1,7%) gewählt. Fast die Hälfte der Probanden (45,4%) gab an, eine Seite beim Kauen zu bevorzugen. Die rechte Seite wurde häufiger (64%) bevorzugt als die linke. Frauen gaben signifikant häufiger eine Seitigkeit an als Männer. Es zeigte sich ferner, dass Alter und Geschlecht einen Einfluss auf das einseitige Kauen haben. Frauen zwischen 40 und 69 Jahren wiesen eine deutlich häufigere Bevorzugung einer Kauseite auf. Außerdem konnte in der Studie von Diernberger et al. (2008) der Zusammenhang zwischen Symptomen kranio-mandibulärer Dysfunktion und bevorzugt einseitigem Kauen bestätigt werden. Asymmetrischer Stützzonenverlust sowie häufiges Pressen mit den Zähnen gingen mit der Bevorzugung einer Kauseite einher. In der vorliegenden Studie haben 94,5% der Probanden eine bevorzugte Kauseite angegeben. In der oben beschriebenen Studie gaben 35,8% der Probanden im Alter zwischen 20 und 29 Jahren eine bevorzugte Kauseite an. Der Anteil der Seitigkeit in der vorliegenden Studie liegt deutlich über dem Ergebnis der Studie von Diernberger et al. Jedoch können die Ergebnisse beider Studien nur bedingt miteinander verglichen werden, da in der vorliegenden Studie eine wesentlich geringere Probandenanzahl untersucht worden ist. Ferner stellte sich in der vorliegenden Studie heraus, dass die rechte Seite (66,7%) deutlich häufiger als die linke Seite (27,8%) als bevorzugte Kauseite angegeben wurde. Eine wesentliche Bevorzugung der rechten Kauseite (64%) zeigte sich ebenfalls in der SHIP-Studie. In einer Reihe weiterer Studien wurde ein ähnliches Ergebnis erzielt (Weiner 2001, Nissan et al. 2004, Paphangkorakit et al. 2006). Als mögliche Erklärung dafür wird ein zentral gesteuerter, auf Seitigkeit bezogener neuromuskulärer Mechanismus angenommen (Diernberger et al. 2008).

Die Studie von Ratnasari et al. (2010) beschäftigte sich mit der Fragestellung, ob es eine Beziehung zwischen dem Vorhandensein einer bevorzugten Kauseite und einer anterioren Diskusverlagerung des Kiefergelenks gibt. Die Ergebnisse der Studie

zeigten, dass bei asymptomatischen Patienten mit anteriorer Diskusverlagerung eine signifikante Prädominanz der bevorzugten Kauseite auf der Seite mit der Diskusverlagerung beim Zerkleinern von hartem Kaugut (Trockenfleisch) vorlag. Im Gegensatz dazu wurde beim Kauen von weichem Kaugut (Käsekuchen) keine Korrelation zwischen der anterioren Diskusverlagerung und der bevorzugten Kauseite festgestellt. Aus den Ergebnissen resultierte die Schlussfolgerung, dass die anteriore Diskusverlagerung des Kiefergelenks einen begünstigenden Faktor für eine bevorzugte Kauseite beim Kauen von harten Speisen darstellt.

In der Studie von Nissan et al. (2010) wurde bei 81 Probanden untersucht, wie sich das Vorhandensein von implantatgetragenen prothetischen Versorgungen auf die bevorzugte Kauseite auswirkt. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass die Lokalisation von Implantaten keinen signifikanten Einfluss auf die Bevorzugung einer Kauseite hatte.

5.3 Studien zur maximalen voluntären Kontraktion (MVC)

Die Studie von Suvinen et al. (2009) beschäftigte sich mit der Frage der Reproduzierbarkeit von MVC-Daten. Es wurde die intra- und interindividuelle Variabilität sowie die Variabilität der Daten zweier Sitzungen ermittelt. Zehn asymptomatische (ohne Anzeichen bzw. Symptome einer CMD) vollbezahnte Probanden (5 Frauen und 5 Männer; Durchschnittsalter 21-50 Jahre) nahmen an der Studie teil. Die EMG-Signale der M. masseter und M. temporalis anterior beidseits wurden mit Hilfe von Oberflächenelektroden abgeleitet. Die Ruheaktivität der oben genannten Muskeln sowie deren Aktivität während der Öffnungs- und Schließbewegung, in der Interkuspitationsposition sowie während des maximalen Zubeißens (Dauer: 5 Sekunden) wurden registriert. Jede Aufgabe wurde jeweils dreimal wiederholt. Am darauffolgenden Tag fand eine Wiederholungsmessung statt. Eine individuelle Schablone wurde bei jedem Probanden zum exakten Repositionieren der Oberflächenelektroden in der zweiten Sitzung verwendet. Während der Messungen hatten die Probanden die Möglichkeit, die EMG-Aufzeichnungen auf einem Monitor zu verfolgen. Mit Hilfe der Intraklassenkorrelationsanalyse (ICC-Analyse) konnte eine hohe Reproduzierbarkeit der MVC-Werte und der Werte der Muskelaktivität in der Interkuspitationsposition

nachgewiesen werden. Der MVC-Wert erwies sich als der am besten reproduzierbare Parameter in der Studie. Suvinen et al. wiesen auf die Bedeutung einer standardisierten Versuchsdurchführung hin, die für das Erzielen reliabler Studienergebnisse unabdingbar ist. In der vorliegenden Studie konnte ebenfalls eine gute Reproduzierbarkeit der MVC-Werte nachgewiesen werden. Der ICC-Wert für die maximale voluntäre Kontraktion des rechten Masseter lag bei 0,747, der für die maximale voluntäre Kontraktion des linken Masseter bei 0,706. Im Vergleich dazu wurden für die maximale voluntäre Kontraktion bei Suvinen et al. (2009) folgende ICC-Werte ermittelt: 0,882 für den rechten M. masseter und 0,877 für den linken M. masseter. Beim Vergleich der ICC-Werte beider Studien muss berücksichtigt werden, dass bei Suvinen et al. (2009) Daten von zwei Messsitzungen berechnet worden sind, während in der vorliegenden Studie Daten von drei Tagen in die Berechnung einbezogen wurden. Dies könnte ein Grund für die etwas niedrigeren ICC-Werte der vorliegenden Studie sein. Beim Vergleich der MVC-Werte beider Studien fiel ferner auf, dass diese deutlich höher ausfielen als die MVC-Werte der vorliegenden Studie. So liegt der höchste durchschnittliche MVC-Wert des M. masseter bei Suvinen et al. (2009) bei ca. 450 mV. Der höchste MVC-Wert in der vorliegenden Studie beträgt hingegen nur 875,4 μ V. Beide Studien unterscheiden sich darin, dass die MVC-Messung in der Studie von Suvinen et al. (2009) in der habituellen Interkuspitationsposition durchgeführt wurde, in der vorliegenden Studie wurden die Patienten hingegen gebeten, auf die Watterollen zu beißen.

In einer weiteren Studie (Castroflorio et al. 2006) wurde der Aspekt der Reproduzierbarkeit von MVC-Messungen und deren Abhängigkeit von der Zwischenelektrodenabstand untersucht. Neun ausgewählte, gesunde (ohne Anzeichen bzw. Symptome einer CMD), vollbezahlte Probanden (5 Männer, 4 Frauen, Durchschnittsalter $27,5 \pm 2,5$ Jahre) nahmen an der Studie teil. Die EMG-Signale von M. masseter und M. temporalis anterior beidseits wurden mittels spezieller Oberflächenelektroden (4 linear mit jeweils 10 mm Abstand angeordnete Elektroden) abgeleitet. Mit Hilfe einer intraoral angebrachten Apparatur, die einen Drucksensor beinhaltete, wurde gleichzeitig die Kaukraft in der Interkuspitation gemessen. Die Messungen wurden in drei Sitzungen, im Abstand von jeweils einer Woche, durchgeführt. In jeder Sitzung wurden die Probanden zunächst gebeten, drei maximale voluntäre Kontraktionen von 3 bis 5 Sekunden auszuführen. Nach jeder

einzelnen MVC-Messung wurde eine Entspannungspause von 5 Minuten eingehalten. Anschließend folgten drei MVC-Messungen, wobei die Probanden gebeten wurden, 30 Sekunden lang so zuzubeißen, dass das 80%-Niveau der maximalen voluntären Kontraktion erreicht wurde. Zwischen den Messungen wurde eine 10-minütige Entspannungspause eingehalten. Während der gesamten Messungen hatten die Patienten die Möglichkeit, die Aufzeichnungen auf einem Monitor zu verfolgen, so dass das Aktivitätsniveau von 80% des maximalen voluntären Kontraktionswertes konstant über die 30 Sekunden eingehalten werden konnte. In der Studie wurde eine hohe Reproduzierbarkeit der MVC-Daten nachgewiesen. Der Intraklassenkorrelationskoeffizient (ICC) betrug bei einem Zwischenelektrodenabstand von 20 mm bei dem linken Masseter 0,705 und bei dem rechten Masseter 0,604. Bei einem vergrößerten Zwischenelektrodenabstand von 30 mm stieg der ICC-Wert bei dem rechten M. masseter auf 0,818 und bei dem linken M. masseter auf 0,762 an. Castroflorio et al. (2006) wiesen darauf hin, dass Faktoren, wie die exakte Elektrodenpositionierung, sowie ein fixer und möglichst großer Zwischenelektrodenabstand, die Reproduzierbarkeit der Messdaten erhöhen.

Wang et al. (2010) beschäftigten sich in einer Studie mit der Frage, ob experimentelle reversible Veränderungen der Okklusion das Niveau der EMG-Signale des M. temporalis anterior und M. masseter während des unilateralen maximalen voluntären Zubeißens in zentrischer und exzentrischer Position beeinflussen. 21 Probanden nahmen an der Studie teil. Sie wurden gebeten, mit und ohne einer zwischen den Zähnen positionierten Watterolle im Prämolaren- bzw. Molarenbereich maximal zuzubeißen. Die Watterolle wurde alternierend auf der rechten bzw. linken Seite platziert. Beim Zubeißen in exzentrischer Unterkieferposition ohne Watterolle war die Muskelaktivität stets niedriger als beim Zubeißen mit einer applizierten Watterolle. Geringere Muskelaktivität zeichnete sich bei beiden Muskeln während des Zubeißens auf die Watterolle in der Prämolarenregion im Vergleich zum Zubeißen auf die Watterolle in der Molarenregion aus. Bei M. temporalis anterior wurde stets eine geringere Aktivität auf der Balanceseite im Vergleich zur Arbeitsseite gemessen. Diese Beobachtung wurde ebenfalls beim M. masseter festgestellt, allerdings nur während des maximalen Zubeißens auf die Watterolle in der Molarenregion bei zentrischer Unterkieferposition. Keine signifikanten Unterschiede wurden beim Vergleich der

Werte der Masseteraktivität beim zentrischen und exzentrischen Zubeißen ermittelt. Bei M. temporalis anterior war die Muskelaktivität auf der Balanceseite während des exzentrischen Zubeißens kleiner als beim Zubeißen in zentrischer Position und zwar immer dann, wenn sich die Watterolle in der Molarenregion befand. Folgende durchschnittliche Messwerte wurden in der Studie von Wang et al. (2010) beim maximalen voluntären Zubeißen auf eine Watterolle in zentrischer Unterkieferposition für den M. masseter ermittelt: in der Prämolarenregion der Arbeitseite $137 \pm 63,3 \mu\text{V}$, in der Molarenregion der Arbeitsseite $209 \pm 51,5 \mu\text{V}$; in der Prämolarenregion der Balanceseite $149 \pm 52,1 \mu\text{V}$, in der Molarenregion der Balanceseite $182 \pm 55,7 \mu\text{V}$. Die ermittelten MVC-Durchschnittswerte dieser Studie fallen etwas niedriger aus als die MVC-Werte der vorliegenden Studie. Ein Grund dafür könnte sein, dass in der Studie von Wang et al. (2010) die maximale voluntäre Kontraktion nur auf einer Seite ausgeführt wurde und dadurch die Muskelaktivität geringer ausfiel. Ferner wurde in der Studie von Wang et al. (2010) im Gegensatz zur vorliegenden Studie die Watterolle in der Prämolaren- bzw. Molarenregion platziert, was ebenfalls zur niedrigen Muskelaktivität geführt haben könnte.

Die Ergebnisse der Studie von Wang et al. 2010 ließen die Schlussfolgerung zu, dass M. temporalis anterior und M. masseter unterschiedliche Rollen bei der Aufrechterhaltung der Unterkieferbalance während des einseitigen maximalen Zubeißens auf eine Watterolle spielen. Es wurde festgestellt, dass okklusale Veränderungen, welche in diesem Versuch durch die Applikation der Watterollen bzw. durch Zubeißen in exzentrischer Unterkieferposition erreicht wurden, das Niveau der Muskelaktivität im Oberflächenelektromyogramm beeinflussen.

In der Studie von Roldan et al. (2009) wurde die maximale voluntäre Kontraktion bei 28 Probanden, alternierend im Bereich der Schneidezähne bzw. der Molaren auf der rechten und linken Seite, mit Hilfe eines Kraftumwandlers, welcher zwischen den Zähnen platziert wurde, gemessen. Es fanden zwei Messungen in einem Abstand von 90 Minuten statt; die maximale voluntäre Kontraktion wurde in jeder Region jeweils dreimal ausgeführt. Die Reliabilität der Messwiederholungen innerhalb einer Sitzung sowie die Reliabilität zwischen den beiden Sitzungen wurden berechnet. Die höchste Reliabilität wurde für die Messungen in der Schneidezahnregion ermittelt.

5.4 Studien zur Muskelarbeit der Unterkiefererlevatoren

Bereits 1966 wurde eine klinische Untersuchung zur Muskelarbeit bei Mastikation von standardisiertem Kaugut publiziert. In der Studie von Ahlgren (1966) wurde die Aktivität des M. masseter und M. temporalis auf der rechten und linken Seite während des Kauvorgangs mit Hilfe von subkutanen Drahtelektroden bei 80 Kindern (Durchschnittsalter 12 Jahre) gemessen. Als standardisiertes Kaugut wurden Erdnüsse und Kaugummi verwendet.

Die durchschnittliche Muskelarbeit des M. masseter, die aus der Aktivität des Muskels während eines 20-sekündigen Kaugummikauens aller Probanden ermittelt wurde, betrug auf der Arbeitsseite 1760 $\mu\text{V}\cdot\text{s}$ und auf der Balanceseite 960 $\mu\text{V}\cdot\text{s}$. Sowohl bei M. masseter ($p < 0,001$), als auch bei M. temporalis ($p < 0,01$) wurden signifikant höhere Werte der Muskelaktivität auf der Arbeitsseite gegenüber den Werten der Muskelaktivität auf der Balanceseite gemessen.

Die ermittelten Werte für die Muskelarbeit in der Studie von Ahlgren (1966) lassen sich nicht unmittelbar mit den Werten der vorliegenden Arbeit vergleichen, da in der Studie von Ahlgren einerseits andere technische und methodische Bedingungen (u.a. Anwendung von subkutanen Drahtelektroden) bestanden und andererseits ein anderes Kaugut verwendet wurde. Es lässt sich dennoch feststellen, dass sich die gemessenen Werte für die Muskelarbeit in der Studie von Ahlgren (1966) in der Größenordnung befanden, die in der vorliegenden Arbeit ebenfalls ermittelt werden konnte.

In einer Studie von Mioche et al. (1999) wurde das Aktivitätsmuster von M. masseter und M. temporalis beim Kauen von ausgewählten Nahrungsproben untersucht und die interindividuelle Variabilität ermittelt. EMG-Aufzeichnungen des rechten und des linken M. masseter und M. temporalis wurden bei 36 jungen Erwachsenen im Alter zwischen 19 und 22 Jahren während des freien und des angewiesenen Rechts- bzw. Linkskauens mit Hilfe von Oberflächenelektroden vorgenommen. Fünf Kaugutproben unterschiedlicher Härte und bekannter Textureigenschaften wurden für die Kauübungen verwendet. Jede Kauübung wurde mit jeder Kaugutart jeweils dreimal wiederholt. Bei jedem Probanden wurden die Aufzeichnungen in einer zweistündigen

Sitzung durchgeführt, so dass Abweichungen aufgrund der Elektrodenplatzierung vermieden werden konnten. Im Rahmen der Studie wurde festgestellt, dass der Kauvorgang bei Menschen durch die Nahrungstextur beeinflusst wird. Die EMG-Analyse ergab, dass die Gesamtmuskelarbeit kontinuierlich mit zunehmender Härte der Kaugutproben anstieg. Es fiel auf, dass während des freien Kauens signifikant weniger Arbeit von der Kaumuskulatur verrichtet wurde als bei angewiesenem Rechts- bzw. Linkskauen. Diese Beobachtung stimmt mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie überein. Als Erklärung für dieses Ergebnis wurden von Mioche et al. das optimale Platzieren des Speisebolus und damit auch eine höhere Kaeffizienz während des freien Kauens angenommen. In der Studie von Mioche et al. (1999), als auch in der vorliegenden Studie wurden jedoch auch interindividuelle Unterschiede festgestellt. Bei 25 % der Probanden wurde in der Studie von Mioche et al. (1999) sowohl beim freien, als auch beim angewiesenen Kauen ein ähnlicher Wert für die Gesamtarbeit der Kaumuskulatur ermittelt. Dies führte zur Annahme, dass diese Probanden eine höhere Kaeffizienz auf einer bestimmten Seite aufwiesen. Ferner konnte in der Studie von Mioche et al. (1999) nachgewiesen werden, dass während des angewiesenen Rechts- bzw. Linkskauens die Kaumuskulatur der Arbeitsseite, insbesondere bei der Zerkleinerung von harten Kaugutproben, eine höhere Aktivität aufweist, wobei bei manchen Individuen währenddessen ein deutlicher Aktivitätsrückgang der Kaumuskulatur auf der Balanceseite beobachtet werden konnte. In der Studie von Mioche et al. (1999) zeigten sich deutliche interindividuelle Unterschiede für alle untersuchten EMG-Variablen. Diese interindividuelle Variabilität wurde im Wesentlichen auf Faktoren wie die Elektrodenplatzierung, Unterschiede in der Ausprägung des subkutanen Fettgewebes, welche die Hautimpedanz negativ beeinflussen können, sowie das unterschiedliche Kauverhalten zurückgeführt.

In der Studie von Lassauzay et al (2000) wurde die Reproduzierbarkeit verschiedener Parameter (durchschnittliche Muskelarbeit, Amplitude der Unterkieferbewegungen, Kaufrequenz etc.) beim Kauvorgang untersucht. Die Variabilität der Parameter wurde zwischen den einzelnen Kauzyklen, den Wiederholungsaufzeichnungen innerhalb einer Sitzung und zwischen den Sitzungen sowie unter den Probanden ermittelt. Fünfzehn vollbezahlte, beschwerdefreie männliche Probanden im Alter von 21 bis 25 Jahren nahmen an der Studie teil. Jeder

Proband wurde aufgefordert, vier künstlich hergestellte Kaugutproben unterschiedlicher Härte (sehr weich, weich, hart, sehr hart) auf einer von ihm bevorzugten Seite zu zerkauen. Die Messungen wurden an insgesamt vier Terminen, welche in einem Abstand von circa einer Woche am gleichen Wochentag und zur gleichen Uhrzeit stattgefunden haben, durchgeführt. Mit jeder Kaugutprobe wurden jeweils drei Messungen aufgezeichnet. Alle Kaugutproben wurden auf der bevorzugten Kauseite des Probanden zerkleinert. Die Unterkieferbewegungen und die EMG-Aufzeichnungen der M. masseter und M. temporalis anterior beidseits wurden während des Kauvorgangs bis zum finalen Schluckakt simultan registriert. Um Abweichungen bei der Elektrodenplatzierung in den Folgesitzungen so gering wie möglich zu halten, wurde für jeden Probanden jeweils eine individuelle Schablone mit Referenzpunkten verwendet. Bei der Betrachtung der Messdaten im Verlauf einer Kausequenz fielen in der Studie von Lassauzay et al (2000) folgende Besonderheiten auf: mit fortschreitendem Kauvorgang nahm die vertikale und laterale Amplitude der Unterkieferbewegungen, die Dauer der einzelnen Kauzyklen, sowie die Muskelarbeit (Summe der Muskelarbeit des M. masseter und M. temporalis anterior beidseits) kontinuierlich vom ersten bis zum letzten Kauzyklus ab. Die Reduktion dieser Parameter geschah in Folge der Adaptation des Kauvorgangs an die Größen- und Volumenreduktion des Kauguts. Der größte Unterschied wurde zwischen den ersten beiden Kauzyklen verzeichnet. Der Vergleich der Daten von Wiederholungsmessungen innerhalb einer Sitzung mit allen Kaugutproben zeigte keine signifikanten Unterschiede für alle Parameter. Dies spricht für eine gute Reproduzierbarkeit der Messdaten aus den Wiederholungsmessungen in einer Sitzung. Der Vergleich von Messdaten unterschiedlicher Sitzungen zeigte, dass die Kaubewegungen von Sitzung zu Sitzung bis zu einem gewissen Grad variierten. Die Kaufrequenz, die Amplitude und Geschwindigkeit der Kaubewegungen, als auch die Schließdauer stiegen von Sitzung zur Sitzung an. Die Anzahl der Kauzyklen sowie die durchschnittliche Gesamtmuskelarbeit stiegen von der ersten bis zur zweiten Sitzung an. Die Kaufrequenz und die Schließzeit nahmen von der zweiten zur dritten Sitzung am deutlichsten zu. Öffnungsdauer und die laterale Amplitude der Kaubewegungen blieben über die Sitzungen konstant. Psychologische und physische Einflüsse, wie emotionaler Zustand, Ärger, Müdigkeit oder Gelassenheit, könnten zu Variabilität der Messdaten in den einzelnen Sitzungen beitragen haben. Trotz des Einsatzes von standardisierten Kaugutproben und einer rigorosen Auswahl

von Probanden wurde eine deutliche Variabilität der Parameter zwischen den Individuen beobachtet. Morphologische Unterschiede im Kausystem, wie die spezifische anatomische Beziehung zwischen den Muskeln, den Knochen und den Zähnen, könnten eine Erklärung für die interindividuelle Variabilität liefern. In der Studie von Lassauzay et al (2000) konnte dennoch gezeigt werden, dass für bestimmte Parameter wie die Muskelarbeit, die Schließdauer und die vertikale Amplitude der Kaubewegungen die interindividuelle Variabilität geringer war als die Unterschiede zwischen den Kauzyklen innerhalb einer Kausequenz. Zusammenfassend ließ sich feststellen, dass die Variabilität der Messdaten zwischen den Sitzungen geringer war als die Variabilität zwischen den einzelnen Kauzyklen und zwischen den Probanden. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie weisen ebenfalls eine hohe interindividuelle Variabilität der Parameter beim Kauvorgang auf. Der Vergleich von Messdaten unterschiedlicher Sitzungen zeigt keinen signifikanten Unterschied, was mit den Ergebnissen der Studie von Lassauzay et al. übereinstimmt und für eine gute Reproduzierbarkeit der Daten spricht. Da jedoch in der Studie von Lassauzay et al. erstens andere Kaugutproben verwendet wurden und es sich zweitens bei den Angaben zur Muskelarbeit um durchschnittliche Werte der Summe der Arbeit des M. masseter und M. temporalis anterior beidseits handelt, können die Ergebnisse nicht unmittelbar mit den Werten der vorliegenden Arbeit verglichen werden.

Das Ziel der Studie von Paphangkorakit et al. (2008) war, den Zusammenhang zwischen der Kauleistung (engl. masticatory performance genannt, definiert als die Anzahl von Kauzyklen, die benötigt werden, um das Nahrungsgut bis zu einer bestimmten Partikelgröße zu zerkleinern) und der Muskelarbeit während des Kauens zu untersuchen. 23 ausgewählte beschwerdefreie Probanden im Alter zwischen 20 und 26 Jahren nahmen an der Studie teil. Jeder Proband wurde gebeten eine Mandel, welche von einer Latex-Hülle umschlossen war, in fünf Kauzyklen zu zerkleinern. Anschließend wurde jeder Proband aufgefordert, in der maximalen Interkuspitation maximal zuzubeißen. Dabei wurde seine maximale voluntäre Kontraktion registriert. Während des Kauens und des maximalen Zubeißens wurde die Aktivität des rechten und linken M. masseter mittels Oberflächen-Elektromyographie aufgezeichnet. Drei Wiederholungsmessungen- jeweils auf der rechten und linken Seite- wurden durchgeführt. Danach wurde das Kaugut aus der

Hülle herausgenommen, getrocknet, durch ein Sieb (mit 1,4 mm Maschenweite) geschüttet und anschließend gewogen. Der prozentuale Anteil der Partikel, welche das Sieb passierten, wurde herangezogen, um die Kauleistung (masticatory performance, Angaben in %) zu berechnen. Muskelarbeit, Muskelleistung und die mastikatorische Effektivität wurden ebenfalls berechnet. Die ermittelten durchschnittlichen Werte der Arbeit beider Masseteren sind in der Studie von Paphangkorakit et al. (2008) deutlich geringer als die Werte der Muskelarbeit in der vorliegenden Studie. Dies lässt sich zum einen dadurch erklären, dass die Werte für die Muskelarbeit in der Studie von Paphangkorakit et al. (2008) aus nur insgesamt 5 Kauzyklen errechnet wurden, zum anderen wurde in der oben genannten Studie ein anderes Kaugut (Mandeln) verwendet. So betrug zum Beispiel der durchschnittliche Wert für die Muskelarbeit des rechten und linken M. masseter beim Kauen einer Mandel auf der rechten Seite nach 5 Kauzyklen $71,6 \pm 31,2 \mu\text{V}\cdot\text{s}$. Eine große Variabilität der Muskelarbeit und der Kaueffizienz wurde in der Studie von Paphangkorakit et al. (2008) unter den Probanden ermittelt. Keine signifikanten Unterschiede wurden beim Vergleich der Werte von der rechten und linken Seite festgestellt. So weist diese Studie eine Parallele zur vorliegenden Studie auf, in der ebenfalls eine große interindividuelle Variabilität der Werte der Muskelarbeit festgestellt wurde. Ferner wurde in der Studie von Paphangkorakit et al. (2008) eine signifikant positive Korrelation zwischen der Kauleistung und der Muskelarbeit festgestellt. Dies gibt einen Hinweis darauf, dass Probanden mit einer höheren Kauleistung den Nahrungsbolus nicht unbedingt effektiver zerkauen, da sie statistisch betrachtet auch mehr Muskelarbeit verrichten. Für eine Gesamtbeurteilung wäre es erforderlich, weitere biomechanische Einflussfaktoren (wie z.B. Muskelmasse und okklusale Gestaltung) zu berücksichtigen.

In der Studie von Veyrone et al. (2007) wurde die Adaptation der Kaumuskelaktivität während der Zerkleinerung von Kaugutproben unterschiedlicher Härte bei Totalprothesenträgern und vollbezahnten Probanden untersucht und verglichen. An der Studie nahmen fünfzehn Totalprothesenträger teil. Die Kontrollgruppe setzte sich aus neun Probanden (mit mind. 26 bleibenden Zähnen) zusammen. Zwei Messungen wurden in zwei Sitzungen durchgeführt, welche an zwei Terminen im Abstand von einer Woche an gleichem Wochentag und zur gleichen Uhrzeit stattgefunden haben. Die erste Messung diente der Gewöhnung der Probanden an die Messapparatur, so

dass ausschließlich die Daten aus der zweiten Sitzung statistisch ausgewertet wurden. Die Oberflächenelektromyographie der rechten und linken M. masseter und M. temporalis wurde während des Kauens von vier künstlich hergestellten Kaugutproben unterschiedlicher Härte und ähnlicher Textureigenschaften abgeleitet, welche den Probanden in randomisierter Reihenfolge nacheinander verabreicht wurden. Die EMG-Aufzeichnungen wurden bis zum finalen Schluckakt registriert. Vor Beginn der Messung wurde jeder Proband gebeten, seine bevorzugte Kauseite anzugeben, auf der er in den beiden Sitzungen die gesamten Kaugutproben zerkaut hatte. Parameter, wie die Anzahl von Kauzyklen, die Kausequenzdauer, die Kaurate („masticatory rate“) und die Aktivität der Kaumuskulatur pro Kauzyklus und Kausequenz wurden ermittelt. Sowohl vollbezahnte Probanden als auch Probanden mit Totalprothesen zeigten eine Anpassung der Kaumuskelaktivität an die steigende Härte der Kaugutproben, die sich in der Zunahme der Kauzyklenanzahl, der Kausequenzdauer sowie der gesamten Aktivität der Kaumuskulatur äußerte. Im Vergleich zu vollbezahnten Probanden benötigten die Totalprothesenträger jedoch eine größere Anzahl von Kauzyklen und eine längere Mastikationszeit, um das Kaugut gleicher Härte zu zerkleinern. Bei Probanden mit Totalprothesen war die Kaurate („masticatory rate“, definiert als die Anzahl der Kauzyklen pro Sekunde) geringer als bei den Probanden in der Kontrollgruppe. In beiden Vergleichsgruppen blieb die Kaurate für alle Kaugutproben konstant. Ferner wurde in der Studie gezeigt, dass es den Totalprothesenträgern nicht gelang, die EMG-Signale der Kaumuskulatur pro Kauzyklus mit zunehmender Härte der Kaugutproben zu steigern. Die Ergebnisse der Studie ließen darauf schließen, dass die Totalprothesenträger während des Mastikationsvorgangs Probleme in der Adaptation an unterschiedliches Kaugut bezüglich der Härte der Nahrung aufwiesen.

In einer Studie von Wilding und Shaikh (1997) wurde das Verhältnis zwischen der Kauleistung (chewing performance) und der elektromyographisch gemessenen Aktivität des M. temporalis anterior, des M. masseter und des M. digastricus venter anterior beim Kauen von ausgewähltem Kaugut untersucht. Das Ziel der Studie war es herauszufinden, ob die Kauleistung (chewing performance) verwendet werden kann um den optimalen Bereich der Muskelaktivität zu ermitteln. 24 Probanden (12 Frauen und 12 Männer, Durchschnittsalter 27,3 Jahre), die keinerlei Symptome einer CMD aufwiesen, nahmen an der Studie teil. Jeder Proband wurde gebeten, ein

hartes Fruchtgummi jeweils fünfzehn Sekunden lang, zunächst auf der linken und anschließend auf der rechten Seite, zu kauen. Währenddessen wurden elektrognathographische sowie elektromyographische Aufzeichnungen mit Hilfe von Oberflächen Elektroden durchgeführt, welche beidseits auf der Haut oberhalb des M. temporalis ant., M. masseter und M. digastricus venter ant. angebracht wurden. Für jeden Muskel wurde der Wert für die Muskelarbeit ($\mu\text{V}\cdot\text{s}$) für jede Schließphase eines Kauzyklus errechnet und der Durchschnittswert für die gesamte Kausequenz ermittelt.

Die Durchschnittswerte der Muskelarbeit vom ipsilateralen und kontralateralen M. masseter wurden miteinander verglichen. Dabei wurde ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Werten beider Masseteren ermittelt ($p < 0,001$). Der M. masseter der Arbeitsseite verrichtete signifikant mehr Arbeit als der M. masseter der Balanceseite. Geschlechtsspezifische Unterschiede wurden bei der Betrachtung aller ermittelten Werte des M. masseter nicht festgestellt. Hingegen wurden bei den weiblichen Probanden signifikant höhere Werte der Muskelarbeit des M. temporalis ermittelt. Im Gegensatz zum M. temporalis und M. digastricus ant. wurde ferner beim M. masseter folgendes beobachtet: der M. Masseter auf der Balanceseite war in der Regel um wenige ms (Durchschnittswert 20.3 ms) eher aktiv als der M. masseter der Arbeitsseite. In der vorliegenden Arbeit wurden bei 14 von 18 Probanden bei angewiesenem Kauen in allen 3 Sitzungen höhere Werte der Muskelarbeit für den M. masseter der Arbeitsseite im Vergleich zu den Werten des M. masseter auf der Balanceseite registriert. Die statistische Signifikanz für die Werte der Muskelarbeit wurde jedoch nicht ermittelt.

5.5 Studien zum Asymmetrieindex (AI) und zum angewiesenen seitenbezogenen Kauindex (DCI)

Um die Muskelarbeit beider Masseteren während unterschiedlicher Aufgaben miteinander vergleichen zu können wurde in der vorliegenden Arbeit der Asymmetrieindex (AI) nach der Formel $(mW_{\text{RMass}} - mW_{\text{Lmass}}) / (mW_{\text{RMass}} + mW_{\text{Lmass}})$ bei jedem Probanden für jede Kauübung ermittelt.

In der Studie von Pröschel et al. (1994) wurde auf eine ähnliche Weise die Aktivität der Elevatoren auf der Balanceseite mit der Aktivität der Elevatoren auf der Arbeitsseite beim einseitigen Kauen ausgewählter Kaugutproben (Weingummi und Brot) miteinander verglichen. Es wurde das Verhältnis zwischen den Aktivitäten bei balanceseitiger zu den Aktivitäten bei arbeitsseitiger Aktion (Summe der Aktivitäten auf der Balanceseite/ Summe der Aktivitäten auf der Arbeitsseite) von M. masseter und M. temporalis getrennt bestimmt. Beim Zerkleinern von Gummibären lag das Verhältnis für den M. masseter zwischen ca. $\approx 0,35$ und $0,9$ (Medianwert betrug $0,62$) und für den M. temporalis zwischen ca. $\approx 0,7$ und $0,95$ (Medianwert $0,86$). Beim Zerkleinern von weichem Brot betrug das Verhältnis für den M. masseter zwischen ca. $\approx 0,175$ und $0,75$ (Medianwert $0,53$) und für den M. temporalis zwischen ca. $\approx 0,35$ und $1,1$ (Medianwert $0,78$). Die großen Spannweiten dieser Werte ließen auf eine hohe interindividuelle Variabilität der Muskelaktivität schließen. Das bedeutet mit anderen Worten, dass das Verhältnis zwischen der Aktivität des M. masseter auf der Balanceseite und der Aktivität des M. masseter auf der Arbeitsseite bei unterschiedlichen Personen unterschiedlich hoch ausfallen kann. Die hohen Werte der Aktivitätsverhältnisse (Summe der Aktivitäten auf der Balanceseite/ Summe der Aktivitäten auf der Arbeitsseite) beim einseitigen Kauen zeugten von unerwartet hoher Aktivität der Elevatoren auf der Balanceseite. In einzelnen Fällen glich die Aktivität der Muskeln auf der Nichtarbeitsseite annähernd der Aktivität der Muskulatur auf der Arbeitsseite. In der vorliegenden Studie wurde ähnlich wie in der Studie von Pröschel et al. (1994) eine hohe interindividuelle Variabilität des Asymmetrieindex ermittelt.

In einer weiteren Studie von Pröschel und Morneburg (2010) wurde der Zusammenhang zwischen der Muskelaktivität und der minimalen interokklusalen Distanz (MID) beim Kauen untersucht. 52 ausgewählte männliche Probanden nahmen an der Studie teil. Jeder Proband wurde aufgefordert, ein Gummibärchen 20 Sekunden lang auf der rechten Seite zu kauen. Währenddessen wurde die Obeflächenelektromyographie des rechten und linken M. masseter und M. temporalis abgeleitet. Ferner wurden für die Ermittlung der MID die Unterkieferbewegungen am Inzisalpunkt mit Hilfe eines Sirogathographen (Fa. Siemens) registriert. Die Werte der Muskelaktivität aus jeder Messung wurden anhand des Wertes aus dem ersten Kauzyklus, welcher als 100% festgesetzt wurde, normiert. Bei fortlaufendem Kauen

nahm das Verhältnis der Masseteraktivität auf der Arbeitsseite zu Masseteraktivität auf der Balanceseite (W/B-ratio) signifikant ($p < 0,0001$) zu und erreichte beim letzten Kauzyklus 147% des Anfangswertes. Eine nichtlineare umgekehrte Korrelation wurde zwischen dem W/B-ratio und dem interokklusalen Abstand (MID) festgestellt. Das bedeutet, dass das Verhältnis der Masseteraktivität auf der Arbeitsseite zu Masseteraktivität auf der Balanceseite mit abnehmender interokklusaler Distanz anstieg. Das Verhältnis der Aktivität des M. temporalis anterior auf der Arbeitsseite zu seiner Aktivität auf der Balanceseite nahm moderat zu und erreichte 116% des Ausgangswertes. Die Zunahme des Verhältnisses bei M. masseter konnte auf die stärkere Reduktion der Aktivität auf der Balanceseite bei nur gering abnehmender Aktivität auf der Arbeitsseite zurückgeführt werden. Diese Beobachtung unterstützt den Gedanken einer Schutzstrategie, bedarf aber ergänzender Untersuchungen.

In der Studie von Ferrario et al. (2000) wurde die Symmetrie der Elevatorenkontraktion während unterschiedlicher MVC-Tests ermittelt. Die EMG-Aktivität des rechten und linken M. masseter und M. temporalis wurde bei 30 gesunden Erwachsenen mit regelrechter Okklusion während a) einer 3-sekündigen maximalen voluntären Kontraktion auf Watterollen (beidseits auf dem zweiten Prämolare und dem ersten Molare im Unterkiefer positioniert), b) einer 3-sekündigen maximalen voluntären Kontraktion in der habituellen Interkuspitationsposition; und c) maximaler voluntärer Kontraktion alternierend mit Entspannungseinheiten (dynamic clench-relax-test), die ebenfalls 3 Sekunden lang mit einer Frequenz von 1Hz ausgeführt wurden, aufgezeichnet. Für jeden Muskel wurde der maximale EMG-Wert aus dem ersten Test als 100% festgelegt, weitere EMG-Werte wurden anschließend als prozentualer Anteil dieses Wertes (Einheit $\mu V/\mu V \cdot 100$) ausgedrückt. Der „percentage overlapping coefficient“ (POC, Einheit: %), der dem Asymmetrieindex der vorliegenden Studie entspricht, wurde ermittelt, um die Symmetrie der Kontraktion gleichnamiger Elevatoren auf der Arbeits- und Balanceseite bewerten zu können. Bei einer absolut symmetrischen Muskelkontraktion auf beiden Seiten beträgt der POC-Wert 100%. Sowohl beim maximalen Zubeißen in der habituellen Interkuspitation, als auch beim „clench-relax-test“ wurde ein hoher POC-Wert (>88%) ermittelt. Das bedeutet, dass bei beiden Tests die Probanden recht hohe symmetrische Kontraktionen des M. masseter und M. temporalis auf beiden Seiten aufwiesen. Der POC-Wert des M. temporalis lag bei beiden Tests leicht oberhalb des

POC-Wertes von M. masseter. So betrug zum Beispiel der POC-Wert beim M. masseter beim maximalen Zubeißen in der habituellen Interkuspitation durchschnittlich $88,06 \pm 4,55\%$ und beim M. temporalis $89,34 \pm 3,90\%$.

Vergleichsstudien zum angewiesenen seitenbezogenen Kauindex (Deliberate Chewing Index, DCI) konnten in der Literatur nicht ermittelt werden.

5.6 Studien zur Muskelkraftabschätzung aus dem Elektromyogramm

An einer Studie von Pröschel et al. (1994), die sich mit der Fragestellung beschäftigte, inwieweit das Elektromyogramm der Elevatoren zur Abschätzung der Kaukraft herangezogen werden kann, nahmen 16 Probanden mit normalen stomatognathen Verhältnissen sowie zwei Probanden mit einer Masseterhypertrophie teil. An mindestens fünf verschiedenen Tagen wurden bei den Probanden die EMG-Signale des M. masseter und M. temporalis beidseitig mit Hilfe von bipolaren Oberflächenelektroden registriert. Zu Beginn jeder Sitzung wurden die Probanden aufgefordert, auf eine zentral im Mund platzierte Kraftmessdose 30 unterschiedlich starke isometrische Kontraktionen auszuüben, die in Dauer und Periode einem Kauzyklus entsprechen sollten. Die Kraftamplituden wurden gegen die Aktivitätsamplituden für jeden einzelnen Muskel aufgetragen, daraus wurde anschließend ein sitzungs- und personenspezifischer Zusammenhang ermittelt. Danach kauten die Probanden nacheinander zwei Testkaugutproben (zähe Weingummis und weiches Brot) auf der rechten und linken Seite je 20 Sekunden. Die durchschnittliche Aktivitätsamplitude einer Kaumessung wurde zu den während isometrischer Kontraktionen gemessenen Daten in Beziehung gesetzt und daraus die Kaukraft abgeschätzt. Es wurde sowohl die Schätzung über die Aktivitätssumme aller Muskeln als auch die Schätzung aus der Aktivität einzelner Muskeln durchgeführt. Bei der Zerkleinerung zäher Testnahrung (Gummibären) lagen die geschätzten Kräfte des M. masseter der Arbeitsseite zwischen 282 und 525 N, bei weichem Kaugut (Brot) zwischen 143 und 351 N. Die in der Studie ermittelten Kaukräfte (sowohl für die Aktivitätssumme aller gemessenen Muskeln als auch für die Aktivität einzelner Muskeln) waren größer als die Mehrzahl der mit Kraftsensoren intraoral gemessenen Kräfte in anderen Studien, stimmten aber weitestgehend mit

den extraoral über Oberflächenelektroden und EMG ermittelten Kräfte anderer Studien überein. Die gemessene erhöhte Aktivität der Muskulatur auf der Balanceseite gegenüber der Arbeitsseite wurde als Ursache einer Überschätzung der Kaukraft, ermittelt aus der EMG-Aktivität der Kaumuskulatur, diskutiert. Die Bissperrung von 4 bis 5 mm, die durch die Kraftmessdose verursacht wurde, könnte ebenfalls zu hohen Messwerten geführt haben. Die Frage nach der Kraftaufnahme durch die Kiefergelenke blieb offen. Insgesamt konnte schlussgefolgert werden, dass eine Verifikation der Kraftabschätzung aus dem Elektromyogramm notwendig ist und in weiteren Untersuchungen abgeklärt werden sollte.

Die Ergebnisse der Studie von Pröschel und Morneburg (2002) zeigten ebenfalls, dass die Abschätzung der Kraukraft aus dem Elektromyogramm der Elevatoren beim Kauen zu erheblich überhöhten Werten führte. Daraus resultierte die Annahme, dass höhere Muskelaktivität beim Kauen nicht zugleich mit höheren Kaukräften einhergeht.

5.7 Studien zu Einflussfaktoren auf die Muskelaktivität beim Kauen

Zahlreiche Studien beweisen, dass Faktoren wie Härte, Textur und Größe des Kauguts sowohl die Kinematik der Kauzyklen als auch die Aktivität der Kaumuskulatur beeinflussen. In der Studie von Wintergerst et al. (2008) wurde festgestellt, dass die Härte und Größe eines Bolus die intraindividuelle Variabilität der Kinematik von Kauzyklen beeinflusst. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass die Variabilität beim Kauen von hartem Kaugut (hartes Kaugummi) ständig größer war als beim Kauen von weichem Kaugut (weiches Kaugummi).

Einige Studien haben bewiesen, dass die Muskelaktivität mit zunehmender Härte (Foster et al. 2006, Fueki et al 2009, Peyron et al. 2002) und zunehmendem Volumen des Kauguts (Ottenhoff et al. 1993) ansteigt. So wurde zum Beispiel in der Studie von Mioche et al. (2003) festgestellt, dass die durchschnittliche Muskelaktivität der Elevatoren beim Kauen von zähem Fleisch höher war als während des Kauens von weichen Fleischstücken. Die durchschnittliche Muskelarbeit pro Kauzyklus betrug bei zähen Fleischproben $0,170 \pm 0,008$ mV/s und bei weichen Fleischproben $0,144 \pm 0,007$ mV/s. Die gesamte Muskelarbeit der Kausequenz betrug bei der

Mastikation von zähem Fleisch $7,964 \pm 0,78$ mV/s und bei weichem Fleisch $5,315 \pm 0,53$ mV/s.

In der Studie von Miyawaki et al. (2001) wurde der Einfluss von Kaugutgröße auf die Aktivität der Kaumuskulatur untersucht. Während des Kauens größerer Kaugutproben (10g Gelee-Proben) wurden signifikant höhere Werte für die Muskelaktivität verzeichnet als bei der Zerkleinerung von kleineren Kaugutproben (5g-Gelee-Proben). Außerdem wurde in der Studie festgestellt, dass sich die Aktivität der Elevatoren (M. masseter, M. temporalis) proportional zur Kaugutgröße änderte.

In der Studie von Mioche et al. (2003) wurde eine kürzere Mastikationsdauer bei weiblichen im Vergleich zu männlichen Probanden festgestellt. Weibliche Probanden entwickelten weniger Muskelaktivität als die männlichen Probanden und wiesen somit niedrigere Werte für die gesamte Muskularbeit auf. Infolgedessen war der schluckfertige Bolus bei weiblichen Probanden weniger zerkleinert und weniger homogen.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Mioche et al. (2003) wurde in der Studie von Nagasawa et al. (1996) festgestellt, dass weibliche Probanden langsamer kauten und eine geringere Muskelaktivität beim Kauen entwickelten. Die Kauzyklusdauer war bei den weiblichen Probanden im Vergleich zu männlichen Probanden signifikant länger. Außerdem wurde in dieser Studie davon ausgegangen, dass weibliche Probanden beim Kauen wesentlich weniger Kaukraft aufwenden als männliche Probanden.

Ergebnisse der Studie von Cecilio et al (2010) zeigten, dass deutliche Musterunterschiede der Elevatorenaktivierung bei Probanden verschiedenen Alters vorhanden sind. Höhere EMG-Aktivität der Kaumuskulatur wurde bei Kindern und Jugendlichen gemessen, während bei älteren Probanden ein Abfall in der EMG-Aktivität zu verzeichnen war.

In der Studie von Galo et al. (2006) wurde bei 10 vollbezahnten Probanden im Alter zwischen 60 und 75 Jahren (Gruppe 1) und bei 10 vollbezahnten Probanden im Alter zwischen 23 und 39 Jahren (Gruppe 2) die EMG-Aktivität von M. masseter und M.

temporalis während unterschiedlicher Aufgaben (darunter das Kauen von ausgewählten Kaugutproben und maximale voluntäre Kontraktion) aufgezeichnet. Bei den jüngeren Probanden wurden höhere Werte der EMG-Aktivität im Bezug auf die MVC-Werte gemessen. Beim Vergleich der normierten EMG-Durchschnittswerte der Probanden beider Gruppen konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. So wurde in der Studie schlussgefolgert, dass das Alter als solches nicht unbedingt mit Effizienzeinbußen der Kaumuskulatur zusammenhängen muss, so lange es nicht von Zahnverlust begleitet ist.

6 Zusammenfassung

Der Kauvorgang stellt ein komplexes Geschehen dar, das von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst wird und von großer Variabilität geprägt erscheint. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war, die Reproduzierbarkeit der beim Kauvorgang erzeugten Muskelaktivität des M. masseter bei einer Gruppe von funktionsgesunden Probanden unter standardisierten Bedingungen zu untersuchen. 18 vollbezahlte Probanden (9 Frauen und 9 Männer) im Alter zwischen 21 und 28 Jahren nahmen an der Studie teil. An drei aufeinanderfolgenden Tagen wurde die Aktivität des rechten und linken M. masseter beim Kauvorgang mit Hilfe von Oberflächenelektroden und der EMG-Einheit eines Jaw-Motion-Analyzer-Registriersystem (JMA, Zebris Medical) registriert. Um jeden Kauzyklus von Beginn an bis zum Schluss definieren zu können, wurden simultan die Unterkieferbewegungen mit JMA aufgezeichnet. Kauübungen in Form von freiem Kauen, angewiesenem Rechtskauen und angewiesenem Linkskauen wurden unter Zuhilfenahme eines standardisierten Kauguts in Form von Weingummi durchgeführt. Die ermittelten Werte für die Muskelarbeit des rechten und linken M. masseter wurden für jede Kauübung anhand des Asymmetrieindex (AI), und des seitenbezogenen angewiesenen Kauindex (DCI) analysiert.

Der Asymmetrieindex (AI) zeigte signifikante Unterschiede ($p < 0,001$) zwischen den drei Kauübungen, während zwischen den einzelnen Sitzungen keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden konnten. Bezogen auf den AI variierte der Intraklassenkorrelationskoeffizient (ICC) im Hinblick auf die drei Untersuchungssitzungen zwischen 0,84 und 0,91. Auch der seitenbezogene angewiesene Kauindex (DCI) zeigte einen signifikanten Unterschied ($p < 0,001$) zwischen den Werten des rechten und denen des linken Masseters. Unter den DCI-Werten der einzelnen Sitzungen konnten ebenfalls keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Für den DCI ergaben sich ICC-Werte von 0,82 – 0,93 im Hinblick auf die drei Messsitzungen. Bei der Betrachtung der Werte der Muskelarbeit der einzelnen Probanden wurde eine deutliche interindividuelle Variabilität im Rahmen der durchgeführten Kauübungen festgestellt. Anhand der Studie konnte nachgewiesen werden, dass unter standardisierten Bedingungen die beim Kauvorgang erzeugte

Muskelaktivität des M. masseter, eine gute bis sehr gute Reproduzierbarkeit in verschiedenen Mess-sitzungen aufweist. Individuell wurden unterschiedliche Strategien der bilateralen Masseteraktivierung bei freiem und angewiesenem Kauen genutzt.

7 Literaturverzeichnis

Ahlgren J: Mechanism of mastication. A quantitative cinematographic and electromyographic study of masticatory movements in children, with special reference to occlusion of the teeth. *Acta Odontol Scand* 1966;24(suppl. 44):1-109.

Bakke M, Holm B, Jensen BL, Michler L, Möller E: Unilateral, isometric bite force in 8-68-year-old women and men related to occlusal factors. *Scand J Dent Res* 1990;98(2):149-158.

Best N: Untersuchungen zur Reliabilität und Validität der dreidimensionalen Kiefergelenkfunktionsanalyse mittels Zebris WinJaw-System. *Med Diss, Jena* 2010.

Blanksma NG, van Eijden TM, van Ruijven LJ, Weijs WA: Electromyographic heterogeneity in the human temporalis and masseter muscles during dynamic tasks guided by visual feedback. *J Dent Res* 1997;76(1):542-551.

Bodéré C, Téa SH, Giroux-Metges MA, Woda A: Activity of masticatory muscles in subjects with different orofacial pain conditions. *Pain* 2005;116(1-2):33-41.

Bölöni E: Untersuchungen zur Messgenauigkeit des JMA-Systems. *Med Diss, Düsseldorf* 2002.

Castroflorio T, Icardi K, Becchino B, Merlo E, Debernardi C, Bracco P, Farina D: Reproducibility of surface EMG variables in isometric sub-maximal contractions of jaw elevator muscles. *J Electromyogr Kinesiol* 2006;16(5):498-505.

Castroflorio T, Bracco P, Farina D: Surface electromyography in the assessment of jaw elevator muscles. *J Oral Rehabil* 2008;35(8):638-645.

Cecilio FA, Regalo SC, Palinkas M, Issa JP, Siéssere S, Hallak JE, Machado-de-Sousa JP, Semprini M: Ageing and surface EMG activity patterns of masticatory muscles. *J Oral Rehabil* 2010;37(4):248-255.

Chan KM, Doherty TJ, Brown WF: Contractile properties of human motor units in health, aging and disease. *Muscle Nerve* 2001;24(9):1113-1133.

Chandu A, Suvinen TI, Reade PC, Borromeo GL: The effect of an interocclusal appliance on bite force and masseter electromyography in asymptomatic subjects and patients with temporomandibular pain and dysfunction. *J Oral Rehabil* 2004;31(6):530-537.

Christensen LV, Radue JT: Lateral preference in mastication: a feasibility study. *J Oral Rehabil* 1985;12(5):421-427.

Diernberger S, Bernhardt O, Schwahn C, Kordass B: Self-reported chewing side preference and its associations with occlusal, temporomandibular and prosthodontic factors: results from the population-based Study of Health in Pomerania (SHIP-0). *J Oral Rehabil* 2008;35(8):613-620.

Escudeiro Santos C, de Freitas O, Spadaro AC, Mestriner-Junior W: Development of a colorimetric system for evaluation of the masticatory efficiency. *Braz Dent J* 2006;17(2):95-99.

Ferrario VF, Sforza C, Colombo A, Ciusa V: An electromyographic investigation of masticatory muscles symmetry in normo-occlusion subjects. *J Oral Rehabil* 2000; 27(1):33-40.

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):3469-3479.

Freiwald J, Baumgart C, Konrad P: Einführung in die Elektromyographie. Spitta, Balingen 2007.

Fueki K, Sugiura T, Yoshida E, Igarashi Y: Association between food mixing ability and electromyographic activity of jaw-closing muscles during chewing of a wax cube. *J Oral Rehabil* 2008;35(5):345-352.

Fueki K, Yoshida E, Sugiura T, Igarashi Y: Comparison of electromyographic activity of jaw-closing muscles between mixing ability test and masticatory performance test. *J Prosthodont Res* 2009;53(2):72-77.

Galo R, Vitti M, Santos CM, Hallak JE, Regalo SC: The effect of age on the function of the masticatory system – an electromyographical analysis. *Gerodontology* 2006;23(3):177-182.

Glaros AG, Glass EG, Brockman D: Electromyographic data from TMD patients with myofascial pain and from matched control subjects: evidence for statistical, not clinical, significance. *J Orofac Pain* 1997;11(2):125-129.

Grünheid T, Langenbach GE, Korfage JA, Zentner A, van Eijden TM: The adaptive response of jaw muscles to varying functional demands. *Eur J Orthod* 2009;31(6):596-612.

Hugger A: Gelenknahe elektronische Erfassung der Unterkieferfunktion und ihre Umsetzung in den Artikulator. *Klinisch-experimentelle Untersuchungen an Probanden und Patienten*. Quintessenz, Berlin 2000.

Hugger A, Schindler HJ: Unterkieferbewegungen und deren Simulation In: Hugger A, Kerschbaum T, Türp JC (Hrsg) *Orale Physiologie*. Quintessenz, Berlin 2006,53-83.

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;11(2):81-106.

Konrad P: *EMG-Fibel. Eine praxisorientierte Einführung in die kinesiologische Elektromyographie*. Köln 2005.

Kordass B: Computer-assisted instrumental functional diagnostics - state of development, possibilities, and limits. *Int J Comput Dent* 2002;5(4):249-269.

Krentz H: Statistische Analysen mit SPSS in der Medizin. Shaker, Aachen 2008, Band 1 und 2.

Küspert VM: Präzision und Validität des Ultraschall-Diagnostikgerätes CMS20 JMA. Med Diss, Ulm 2007.

Lassauzay C, Peyron MA, Albuisson E, Dransfield E, Woda A: Variability of the masticatory process during chewing of elastic model foods. Eur J Oral Sci 2000;108(6):484-492.

Lewin A: Electrognathographics: Atlas of diagnostic procedures and interpretation. Quintessence, Chicago 1985.

Linke W, Pfitzer G: Kontraktionsmechanismen. In: Schmidt RF, Lang F (Hrsg) Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie. Springer, Heidelberg 2007;123.

Lund JP: Mastication and its control by the brain stem. Crit Rev Oral Biol Med 1991;2(1):33-64.

Mioche L, Bourdiol P, Martin JF, 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(12):1005-1012.

Mioche L, Bourdiol P, Monier S: Chewing behaviour and bolus formation during mastication of meat with different textures. Arch Oral Biol 2003;48(3):193-200.

Mioche L, Bourdiol P, Peyron MA: Influence of age on mastication: effects on eating behaviour. Nutr Res Rev 2004;17(1):43-54.

Mishellany A, Woda A, Labas R, Peyron MA: The challenge of mastication: preparing a bolus suitable for deglutition. Dysphagia 2006;21(2):87-94.

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):778-784.

Nagasawa T, Yanbin X, Tsuga K, Abe Y: Sex difference of electromyogram of masticatory muscles and mandibular movement during chewing of food. *J Oral Rehabil* 1997;24(8):605-609.

Nissan J, Berman O, Gross O, Haim B, Chaushu G: The influence of partial implant-supported restorations on chewing side preference. *J Oral Rehabil* 2010; doi:10.1111/j.1365-2842.2010.02142.x (Epub ahead of print).

Ottenhoff FA, van der Bilt A, van der Glas HW, Bosman F: Control of human jaw elevator muscle activity during simulated chewing with varying bolus size. *Exp Brain Res* 1993;96(3):501-512.

Paphangkorakit J, Chaiyapanya N, Sriladlao P, Pimsupa S: Determination of chewing efficiency using muscle work. *Arch Oral Biol* 2008;53(6):533-537.

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(1):41-51.

Pröschel P, Goedecke U, Hofmann M: Mandibular movements recorded with six degrees of freedom by supersonic runtime measurement. Abstract #43. *Adv Dent Res* 1993;7:235.

Pröschel PA, Morneburg TR: Task-dependence of activity / bite-force relations and its impact on estimation of chewing force from EMG. *J Dent Res* 2002;81(7):464-468.

Pröschel PA, Morneburg TR: Indications for jaw gape-related control of relative muscle activation in sequent chewing strokes. *J Oral Rehabil* 2010;37(3):178-184.

Pröschel P, Ohkawa S, Hardtmann G, Ott RW: Zur Möglichkeit der Kaukraftabschätzung aus dem Elektromyogramm der Elevatoren. Dtsch Zahnärztl Z 1994;49(1):37-40.

Ratnasari A, Hasegawa K, Oki K, Kawakami S, Yanagi Y: Manifestation of preferred chewing side for hard food on TMJ disc displacement side. J Oral Rehabil 2010; doi:10.1111/j.1365-2842.2010.02128.x (Epub ahead of print).

Roldan S, Buschang PH, Isaza Saldarriaga JF, Throckmorton G: Reliability of maximum bite force measurements in age-varying populations. J Oral Rehabil 2009;36(11):801-807.

Schindler HJ, Hugger A: Kauphysiologie und Kieferreflexe. In: Hugger A, Kerschbaum T, Türp JC (Hrsg) Orale Physiologie. Quintessenz, Berlin 2006,113-142.

Schindler HJ, Türp JC: Kaumuskulatur. In: Hugger A, Türp JC, Kerschbaum T(Hrsg) Orale Physiologie. Quintessenz, Berlin 2006,85-112.

Schindler HJ, Türp JC: Functional characteristics of the jaw musculature. J Cranio Mand Func 2008;1(1):9-28.

Schönwälder G: Die Weiterentwicklung des Messsystems Sirognathograph und deren klinische Erprobung unter besonderer Berücksichtigung klinischer und technischer Störgrößen. Med Diss, Greifswald 2002.

Stüttgen U: Zahnärztliche Prothetik im Zeichen der Computertechnologie. Zahnärztl Welt 1988;97(4):304-307.

Suvinen TI, Malmberg J, Forster C, Kempainen P: Postural and dynamic masseter and anterior temporalis muscle EMG repeatability in serial assessments. J Oral Rehabil 2009;36(11):814-820.

Van der Bilt A, Engelen L, Pereira LJ, van der Glas HW, Abbink JH: Oral physiology and mastication. Physiol Behav 2006;89(1):22-27.

Vaupel P: Mundhöhle, Pharynx und Ösophagus. In: Schmidt RF, Lang F(Hrsg) Physiologie des Menschen mit Pathophysiologie. Springer, Heidelberg 2007, 867-871.

Verch S: Vergleichende Untersuchung der Messergebnisse der sagittalen Kondylenbahnneigung und des Bennettwinkels dreier Registrierverfahren. Med Diss, Berlin 2002.

Veyrone JL, Lassauzay C, Nicolas E, Peyron MA, Woda A: Mastication of model products in complete denture wearers. Arch Oral Biol 2007;52(12):1180-1185.

Wang MQ, He JJ, Zhang JH, Wang K, Svensson P, Widmalm SE: SEMG activity of jaw-closing muscles during biting with different unilateral occlusal supports. J Oral Rehabil 2010;37(9):719-725.

Wilding RJ, Shaikh M: Muscle activity and jaw movements as predictors of chewing performance. J Orofac Pain 1997;11(1):24-36.

Wintergerst AM, Throckmorton GS, Buschang PH: Effects of bolus size and hardness on within-subject variability of chewing cycle kinematics. Arch Oral Biol 2008;53(4):369-375.

Woda A, Foster K, Mishellany A, Peyron MA: Adaptation of healthy mastication to factors pertaining to the individual or to the food. Physiol Behav 2006;89(1):28-35.

8 Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Professor Dr. Ulrich Stüttgen dafür bedanken, dass er es mir ermöglicht hat, in der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik die Promotionsarbeit durchzuführen.

Ein ganz besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. Alfons Hugger für die freundliche Überlassung des Themas dieser Dissertation sowie für die ständige Motivation und die wunderbare Unterstützung bei der Durchführung der Promotionsarbeit.

Ferner möchte ich mich bei Herrn Professor Dr. Egon Wanke aus dem Institut für Informatik für die fachkundige Unterstützung und Beratung bei der Auswertung der erhobenen Daten bedanken.

Meinem Kollegen André Weiser danke ich für seine Hilfe und Unterstützung bei der Durchführung der Untersuchungen.

Vielen Dank auch an alle Probanden, die sich bereit erklärt haben, an dieser Studie teilzunehmen.

Ich danke meiner Mutter und ihrem Lebensgefährten sowie meiner Großmutter ganz herzlich dafür, dass sie mir das Zahnmedizinstudium ermöglicht haben, ohne das ich diese Dissertation nicht hätte anfertigen können.

Bei meinem Lebensgefährten Sebastian möchte ich mich für seine Geduld und unermüdliche Unterstützung während der gesamten Zeit von ganzem Herzen bedanken.

9 Abstract

Reproduzierbarkeit von Kaufunktionsdaten in einer klinischen Studie

vorgelegt von Alexandra Kravchenko

Der Kauvorgang stellt ein komplexes Geschehen dar, das von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst wird und von großer Variabilität geprägt erscheint. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Reproduzierbarkeit der beim Kauvorgang erzeugten Muskelaktivität des M. masseter bei einer Gruppe von funktionsgesunden Probanden zu untersuchen. 18 vollbezahnte Probanden (9 Frauen und 9 Männer) im Alter zwischen 21 und 28 Jahren nahmen an der Studie teil. An drei aufeinanderfolgenden Tagen wurde die Aktivität des rechten und linken M. masseter beim Kauvorgang mit Hilfe von Oberflächenelektroden und der EMG-Einheit des JMA-Systems (Zebris Medical) registriert. Um jeden Kauzyklus von Beginn an bis zum Schluss definieren zu können, wurden simultan die Unterkieferbewegungen mit dem Jaw-Motion-Analyzer-Registriersystem (JMA, Zebris Medical) aufgezeichnet. Kauübungen in Form von freiem Kauen, angewiesenem Rechtskauen und angewiesenem Linkskauen wurden unter Zuhilfenahme eines standardisierten Kauguts in Form von Weingummi durchgeführt. Die ermittelten Werte für die Muskelarbeit des rechten und linken M. masseter wurden anhand des Asymmetrieindex (AI) und des seitenbezogenen angewiesenen Kauindex (DCI) für jede Kauübung analysiert.

Der Asymmetrieindex (AI) zeigte signifikante Unterschiede ($p < 0,001$) zwischen den drei Kauübungen, während zwischen den einzelnen Sitzungen keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden konnten. Bezogen auf den AI variierte der Intraklassenkorrelationskoeffizient (ICC) im Hinblick auf die drei Untersuchungssitzungen zwischen 0,84 und 0,91. Der seitenbezogene angewiesene Kauindex (DCI) zeigte einen signifikanten Unterschied ($p < 0,001$) für die Werte des rechten gegenüber dem linken Masseter. Keine signifikanten Unterschiede konnten für die DCI-Werte der einzelnen Sitzungen festgestellt werden. Für den DCI ergaben sich ICC-Werte von 0,82 – 0,93 im Hinblick auf die drei Messsitzungen. Bei der Betrachtung der Werte der Muskelarbeit der einzelnen Probanden wurde eine deutliche interindividuelle Variabilität im Rahmen der durchgeführten Kauübungen festgestellt. Anhand der Studie konnte nachgewiesen werden, dass unter standardisierten Bedingungen die beim Kauvorgang erzeugte Muskelaktivität des M. masseter eine gute bis sehr gute Reproduzierbarkeit in verschiedenen Messsitzungen aufweist. Individuell wurden unterschiedliche Strategien der bilateralen Masseteraktivierung bei freiem und angewiesenem Kauen genutzt.