

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

**Der Einfluss verschiedener Versuchsbedingungen
auf Kaufunktionsparameter in einer klinischen Studie**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin
der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

André Christoph Weiser

2016

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

gez.:

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. Joachim Windolf

Erstgutachter: Prof. Dr. med. dent. Alfons Hugger

Zweitgutachter: Univ.-Prof. Dr. med. dent. Stefan Rüttermann

„How did it go so fast“
you'll say as we are looking back
and then we'll understand
we held gold dust
in our
hands.

Tori Amos – Gold Dust

I Zusammenfassung

Der Kauvorgang wird durch ein komplexes Zusammenspiel von oralen Hart- und Weichgeweben, den Kiefergelenken und der Kaumuskulatur gewährleistet. Dabei lassen sich starke interindividuelle Unterschiede feststellen. Zur Quantifizierung der Bewegungsmuster und Muskelfunktion werden seit vielen Jahren kinematische elektronische Messverfahren und Oberflächenelektromyographie eingesetzt. Ziel der vorliegenden Studie war es, den Einfluss der Messsituation (3 Messsituationen), der Kauaufgabe (freies Kauen und angewiesenes Rechts- und Linkskauen) und der Sensorbeschaffenheit des kinematischen Registrierverfahrens auf Kaufunktionsparameter und elektrophysiologische Parameter zu untersuchen. 18 Probanden (9 w., 9 m.) im Alter von 21 bis 28 Jahren wurden an 3 verschiedenen Tagen mit zwei Versionen des Jaw Motion Analyzer (JMA, Fa. Zebris) untersucht. Es wurden 3 verschiedene Kauaufgaben gestellt: Freies Kauen, Rechtskauen und Linkskauen. Als standardisierte Testnahrung diente Weingummi (Haribo Goldbären®). Mithilfe einer Software wurden die folgenden Werte ermittelt: Anzahl der Kauzyklen, Dauer und Frequenz der Kausequenz, Muskelarbeit, Asymmetrieindex (AI) und Deliberate Chewing Index (DCI). Die Auswertung der Daten ergab, dass die Kauaufgabe signifikant mit der Anzahl der Kauzyklen ($p=0,033$), mit der Dauer der Kausequenz ($p=0,034$), mit der Frequenz der Kausequenz ($p=0,003$) und mit dem Asymmetrieindex ($p<0,001$) korreliert. Die Muskelarbeit korrelierte ebenfalls signifikant mit der Kauaufgabe und der Seite ($p<0,001$). Die Sitzung korrelierte signifikant mit der Dauer der Kausequenz ($p=0,034$): Die Kausequenzdauer nahm von der ersten zur zweiten Sitzung signifikant ab ($p<0,001$), ebenso von der ersten zur dritten Sitzung ($p<0,001$). Unterschiede bei der Kausequenzdauer der zweiten und dritten Sitzung waren nicht signifikant ($p=0,142$). Die Sensorbeschaffenheit wirkte sich kaum auf die untersuchten Parameter aus. Es fand sich lediglich eine signifikante Korrelation von Kauaufgabe und Sensor, die zusammen den AI signifikant beeinflussten ($p=0,023$). Die Studie zeigt, dass konkrete Anweisungen zur Durchführung des Kauens (freies oder angewiesenes Rechts- bzw. Linkskauen) einen besonderen Einfluss auf kinematische und muskuläre Parameter ausüben.

II **Abkürzungen**

ACh	Acetylcholin	ms	Millisekunde
Ag	Silber	LL	Laterotrusion nach links
AgCl	Silberchlorid	LR	Laterotrusion nach rechts
AI	Asymmetrieindex [%]	M.	Musculus
akz	Anzahl der Kauzyklen	max.	maximal
ANOVA	multifaktorielle Varianzanalyse	mm	Millimeter
ant.	anterior	MÖ	Mundöffnung
AP	Aktionspotential	MU	Motor Unit, Motorische Einheit
bit	Bit	MVC	maximum voluntary contraction
cm	Zentimeter	µm	Micrometer
CMRR	Gleichtaktunterdrückung engl.: Common-Mode Rejection Ratio	µV	Microvolt
dB	Dezibel	n	Anzahl
DCI	Deliberate Chewing Index [%]	OEMG	Oberflächen- elektromyographie
DIR	Dynamics and Intraoral Registration ®	OTC	Oral task collector (Software)
EMG	Elektromyographie	PC	Personal Computer
FK	Freies Kauen	post.	Posterior
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomografie	RK	Rechtskauen
GI.	Glandula	RMS	Root Mean Square
Hz	Hertz	SAM	Schulartikulator München ®
ICC	Intraclass Correlation Coefficient	s	Sekunde
JMA	Jaw Motion Analyzer ®	SD	Standardabweichung
KinEMG	kinesiologische Elektromyographie	ZMG	Zentraler Mustergenerator
kΩ	Kiloohm		
lat.	lateral, lateralis		
LK	Linkskauen		

III Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Der Kauvorgang	1
1.2 Besonderheiten der Kaumuskulatur	4
1.3 Oberflächen-Elektromyographie	5
1.4 Verfahren zur Registrierung von Unterkieferbewegungen	7
1.5 Beispiele für Messsysteme zur Aufzeichnung von Unterkieferbewegungen	9
2 Problemstellung	12
3 Material und Methoden	13
3.1 Auswahl des Probandenkollektivs	13
3.2 Benutzte Materialien und Geräte	13
3.3 Durchführung der Messung	15
3.4 Auswertung der kinematischen und EMG-Daten	17
3.5 Statistische Analyse	18
4 Ergebnisse	21
4.1 Unterkiefergrenzbewegungen der Probanden	21
4.2 Kauseitenpräferenz	23
4.3 Anzahl der Kauzyklen	24
4.4 Dauer der Kausequenz	27
4.5 Frequenz der Kausequenz	30
4.6 Muskelarbeit	33
4.7 Asymmetrieindex (AI)	36
4.8 Angewiesener seitenbezogener Kauindex (Deliberate Chewing Index / DCI)	37
5 Diskussion	40
5.1 Diskussion der Methode, des Probandenkollektivs und der verwendeten Materialien	40
5.2 Studien zum Einfluss der Messsituation	42

5.3	Studien zum Einfluss der Kauaufgabe	47
5.4	Studien zum Einfluss der Sensorgestaltung	54
5.5	Studien zu anderen Faktoren mit Einfluss auf die Kausequenz	54
5.6	Studien zur bevorzugten Kauseite	59
6	Schlussfolgerungen	63
7	Literaturverzeichnis	64

1 Einleitung

1.1 Der Kauvorgang

Der Kauvorgang ist ein Prozess, der dazu dient, Nahrungsmittel für die Aufnahme von Nährstoffen im Magen-Darm-Trakt, auch Gastrointestinaltrakt genannt, vorzubereiten. Damit ist der Kauvorgang der erste Schritt der Verdauung. An ihm ist eine Vielzahl anatomischer Strukturen beteiligt. Die beteiligten Hartgewebe sind der Ober- und Unterkiefer, das Kiefergelenk und die Zähne. Die beteiligten Weichgewebe sind die Kaumuskulatur, die Zunge, die Wangen, die Lippen und die Speicheldrüsen (Vaupel, 2005). Nach dem willkürlichen Abbeißen einer Speise wird diese im Mund mithilfe der Zähne auf mechanischem Wege zu kleinen Partikeln verarbeitet. Zunge, Wangen und Lippen sorgen für die korrekte Positionierung des Bissens auf den Zahnreihen, während die Speichelsekretion, welche hauptsächlich von den drei großen Speicheldrüsen (Gl. parotidea, Gl. submandibularis, Gl. sublingualis) geleistet wird, dazu dient, die Nahrung mit dem im Speichel enthaltenen Wasser aufzuweichen und durch Schleimstoffe, so genannte Muzine, alle Partikel zu einem gleitfähigen Bolus zu binden. Enzyme sorgen zusätzlich für eine erste Aufspaltung von Kohlenhydraten. Durch die mechanische Zerkleinerung der Speisen findet eine Oberflächenvergrößerung statt, welche die enzymatische Aufspaltung erleichtert (Schindler und Hugger, 2006). Ist eine bestimmte Menge an Partikeln zu einem schluckfertigen Speisebolus verarbeitet, so wird der Schluckreflex ausgelöst und der Bolus durch die Schlundenge in den Ösophagus transportiert. Die Dauer, bis der Schluckreflex (Deglutationsreflex) ausgelöst wird, ist umso kürzer, je wohlschmeckender die Speise vom Individuum wahrgenommen wird und je angenehmer diese Textur und Konsistenz erscheinen (van der Bilt et al., 2006). Vom Ösophagus aus gelangt der Bolus in den Magen, wo die weitere enzymatische Aufspaltung stattfindet. Danach erfolgt die Weiterleitung in den Dünndarm, in dem Nährstoffe über das Blut und die Lymphe aus dem im Magen entstandenen Nahrungsmittelbrei (Chymus) resorbiert werden. Nach abgeschlossener Aufbereitung und dem Entzug von Wasser im Dickdarm folgt die Ausscheidung.

Bewegungen des Unterkiefers sind dreidimensional möglich. Innerhalb seines Bewegungsraumes sind Vorschub- (Protrusion), Seitschub- (Laterotrusion), Rückschub- (Retrusion) und Öffnungsbewegungen möglich. Funktionelle Bewegungen, wie Kaubewegungen, Schlucken und Bewegungen, die zur Lautbildung, auch Phonetik genannt, nötig sind, setzen sich aus diesen Komponenten zusammen und starten aus einer habituellen Schlussposition. Diese weist in der Regel einen maximalen Vielpunktkontakt zwischen Zähnen des Ober- und Unterkiefers auf (Hugger und Schindler, 2006). Nach dem Abbeißen einer Speise kommt es zunächst zur Positionierung der Nahrung im Bereich des Kauzentrums, welches sich zwischen den Molaren und Prämolaren befindet. Dann setzt die Öffnungsphase ein, bei der der Unterkiefer nach unten und vorne gleitet. In der folgenden frühen Schließphase findet eine Lateralbewegung des Inzisalpunktes, der Punkt zwischen den beiden mittleren Unterkieferfronzähnen, statt. Bei der folgenden langsamen Schließphase bewegt sich der Inzisalpunkt zurück in den Bereich des habituellen Schlussbisses (Hugger und Schindler, 2006).

Der zeitliche Ablauf vom Einführen der Nahrung in den Mund bis hin zum Herunterschlucken des Bolus wird als Kausequenz bezeichnet. Jede Sequenz besteht aus mehreren Kauzyklen. Als Kauzyklus bezeichnet man „das Intervall zwischen den beiden Wendepunkten von Öffnungs- und Schließbewegung“ (Hugger und Schindler, 2006). Ein Zyklus dauert im Mittel zwischen 0,5 und 0,7 Sekunden, abhängig von den rheologischen Eigenschaften der Speisen (Hugger und Schindler, 2006). Dabei ist die Anzahl der zur Vorbereitung für das Herunterschlucken benötigten Kauzyklen intraindividuell für gleiches Kaugut im Mittel gleich, unabhängig davon, ob es sich um Nahrung oder Nahrungsmittelm Modelle für klinische Untersuchungen handelt (van der Bilt et al., 2006). Ein Zyklus beginnt mit dem Öffnen und endet mit dem Schließen der Zahnreihen. Dieser Rhythmus ist das Hauptcharakteristikum des Kauens und wird durch den Zentralen Mustergenerator (ZMG) im Hirnstamm, auf Höhe von Pons und Medulla oblongata gelegen, gesteuert (Lund und Kolta, 2005). Beim Kauen ändern sich die physikalischen Eigenschaften des Bolus (Härte, Textur, Viskosität) permanent, daher ist eine ständige Anpassung des Kaurhythmus erforderlich. Diese Eigenschaften werden als extrinsische Faktoren bezeichnet.

Härte und Größe des Kauguts, welche zu den extrinsischen Faktoren zählen, führen proportional zu einem Anstieg der Anzahl der Kauzyklen, der Sequenzdauer und der Muskelaktivität pro Kausequenz (Woda et al., 2006). Eine Anpassung dieses Rhythmus ist auch notwendig in Bezug auf die sich im Laufe des Lebens ergebenden Veränderungen der Gebissituation (Wechselgebiss, Zahnverlust, Kiefergelenkserkrankungen). Diese Faktoren, welche vom Individuum ausgehen, werden als intrinsische Faktoren bezeichnet. Dazu zählen das Geschlecht, das Alter, der Gesundheitszustand und der Zahnstatus. Ein Kautvorgang im Sinne einer mechanischen Zerkleinerung des Kauguts kann nur dann erfolgen, wenn Antagonistenkontakte zwischen Zähnen des Ober- und Unterkiefers vorhanden sind. Somit ist die Anzahl der vorhandenen Zähne für den Grad der Zerkleinerung und den Kautvorgang entscheidend. Auch Myoarthropathien und Zahnfehlstellungen rufen eine verminderte Kauleistung hervor. Somit steigen die Dauer der Kausequenz und die benötigte Muskelaktivität pro Kausequenz an (Woda et al., 2006).

Zur Bewertung der Kaufunktion werden zwei Kenngrößen, die Kauleistung und die Kaueffektivität, benötigt. Die Kauleistung ist definiert über die Partikelgrößenverteilung nach einer vorgegebenen Anzahl von Kauzyklen. Die Kaueffektivität ist definiert durch die Anzahl der Kauzyklen, die zur Zerkleinerung der Nahrung bis zu einer bestimmten Partikelgröße benötigt wird (Schindler und Hugger, 2006). Paphangkorakit et al. wiesen 2008 nach, dass Individuen mit guter Kauleistung nicht unbedingt effizient kauen, da sie oftmals höhere Muskelkräfte aufwenden als eigentlich benötigt. Um die beiden Kenngrößen zu ermitteln, werden bislang zwei Methoden eingesetzt. Paphangkorakit et al. (2008) nutzten in der Studie ein sehr aufwändiges Siebverfahren, bei dem die Probanden Kauproben mit fünf Kauzyklen kauten und nach Trocknung die mittlere Partikelgröße ermittelt wurde. Escudeiro Santos et al. (2006) nutzten ein anderes Verfahren, bei dem standardisierte mehrfarbige Kautestkörper nach dem Kauen auf den Farbdurchmischungsgrad hin untersucht wurden.

1.2 Besonderheiten der Kaumuskulatur

Die Kaumuskulatur besteht aus sieben Kaumuskelpaaren, die am Unterkiefer ansetzen. Am Kieferschluss sind M. temporalis, M. masseter und M. pterygoideus medialis beteiligt, welche die größte Masse und die größte Kraftentwicklung der Kaumuskeln aufweisen. Für die Kieferöffnung sind M. pterygoideus lat., M. digastricus (venter anterior), M. mylohyoideus und M. geniohyoideus zuständig. Die Protrusion wird durch M. masseter, M. pterygoideus medialis, M. pterygoideus lateralis und M. digastricus (venter anterior) bewerkstelligt, und den Rückschub ermöglicht M. temporalis mit Stabilisierung durch M. pterygoideus lateralis.

Kaumuskeln gehören zur Gruppe der quergestreiften, oder auch Skelettmuskulatur. Ihre Fasern setzen sich aus einzelnen Muskelzellen mit randständigem Zellkern zusammen. Die Kaumuskelfasern sind mit einem Durchmesser von 10-50 µm dünner als Fasern der Extremitäten- oder Rumpfmuskulatur, welche einen Durchmesser von 10-100 µm besitzen (Hugger und Schindler, 2006). Die Fasern enthalten längs verlaufende Myofibrillen, die sich aus Sarkomeren zusammensetzen. Diese Sarkomere setzen sich aus verschieden dicken und dünnen Myofilamenten zusammen, deren Bestandteile Aktin- und Myosinketten, kontraktile Eiweißketten, sind. Um die Aktinketten sind Troponin-Tropomyosinketten geschlungen. Um eine Kontraktion des Muskels hervorzurufen, setzen an einzelnen Muskelfasern die Motorischen Endplatten an. Diese schütten als Reaktion auf eine Erregung den Neurotransmitter Acetylcholin (ACh) aus. Durch die nun stattfindende Öffnung von Natriumionenkanälen an den Muskelzellen und den darauf folgenden Einstrom von Natriumionen in die Muskelzelle werden viele kurze Aktionspotentiale (APs) ausgelöst. Ein AP breitet sich von der mittig gelegenen motorischen Endplatte aus entlang einer Muskelfaser in beiden Richtungen aus. Im M. masseter beträgt die mittlere Fortleitungsgeschwindigkeit ca. 12 m/s, während sie im M. biceps brachii bei 4 m/s liegt. Das entstandene AP bewirkt einen Einstrom von Kalziumionen ins Zellplasma, ausgehend von den Zisternen des zellinternen Kalziumspeichers, dem sarkoplasmatischen Reticulum. Durch die Erhöhung der Kalziumkonzentration im Zellinneren ändert sich die Beschaffenheit der

Troponin-Tropomyosinketten, so dass die Myosinköpfe in Form von Ruderbewegungen an das Aktin gebunden werden können. Es kommt zur Verkürzung der Sarkomere und damit zur Kontraktion des Muskels. Wird über einen weiteren Mechanismus der Rücktransport der Kalziumionen ausgelöst, so endet der Kontraktionsprozess (Schindler und Türp, 2006).

Kaumuskeln gehören zu den am komplexesten strukturierten Skelettmuskeln des menschlichen Körpers, denn die Kaumuskulatur weist im Vergleich zur Skelettmuskulatur anderer Körperregionen eine enorm hohe Dichte an motorischen Einheiten (MU) auf. Als motorische Einheit bezeichnet man ein Motoneuron und die von ihm innervierten Muskelfasern. Die einzelnen MUs des M. masseter haben eine Ausdehnung von 3-4 mm in mediolateraler Richtung; manche erreichen eine Ausdehnung von 9-12 mm. Dieser Umstand erlaubt eine sehr differenzierte Aktivierbarkeit einzelner Kompartimente der Kaumuskulatur (Hugger und Schindler, 2006).

1.3 Oberflächen-Elektromyographie

Will man die Muskelaktivität, bzw. die elektrische Aktivität der Kaumuskulatur sichtbar machen, so bedient man sich der Oberflächenelektromyographie. Bei der klassischen in der Neurologie verwendeten Elektromyographie wird meistens ein in Ruhe gelagerter Muskel elektrisch gereizt und die Erregungsweiterleitung durch Nadelelektroden, welche zuvor im Muskel bzw. in einzelnen Muskelfasern inseriert wurden, registriert. Die Erregungsweiterleitung wird nach Analog/Digital-Wandlung in ein graphisches Signal umgewandelt (Konrad, 2005). Anders als bei diesem Verfahren werden in der sog. kinesiologischen EMG (KinEMG) Erregungsmuster der Muskulatur während dynamischer Prozesse registriert. Dieses Verfahren erlaubt einen Blick auf das Verhalten des Muskels bei funktioneller Belastung und eine quantitative und objektive Erfassung der Muskelfunktion. Beim KinEMG summieren sich die Aktionspotentiale aller motorischer Einheiten, welche sich zwischen den beiden Messelektroden befinden (Konrad, 2005). Das bisher beschriebene Verfahren

der EMG mittels Nadelelektroden liefert sehr genaue Werte, allerdings ist es auch invasiv und aufwändig. Eine einfachere und für die Untersuchung der Kaumuskelaktivität praktikablere Methode ist die Oberflächen-EMG (OEMG), bei der Summenaktionspotentiale der Muskulatur (in diesem Falle M. masseter) mittels Hautelektroden abgeleitet werden. In Ruhelage ist eine Nulllinie erkennbar, bei Belastung entsteht ein Erregungsmuster. Die Nulllinie weist immer ein Rauschen auf, welches abhängig ist von der Güte der verwendeten Gerätschaften, von möglichen elektrischen Störquellen in der Messumgebung, von den Gewebeeigenschaften, vom Ruheaktionspotential, der Hautoberflächenvorbereitung, elektrischen Potentialen benachbarter Muskeln sowie Distanzänderungen zwischen Muskeln und Elektroden. Um dieses Signalrauschen möglichst gering zu halten, ist es notwendig, einen EMG-Verstärker zwischenschalten. Moderne Signalverstärker werden als Vorverstärker im Messkabel integriert oder befinden sich direkt über den Hautelektroden. Wichtig für eine gute Signalqualität ist auch der Hautwiderstand (Konrad, 2005). Die Hautareale, auf denen die Elektroden aufgeklebt werden, sollten frei von Haaren sein und anschließend entweder mit einer abrasiven Paste (Peeling), mit feinem Sandpapier oder mit einem in Alkohol getränkten Mulltuch gründlich von abgeschilferten Epithelresten befreit werden. Eine anschließende leichte Rötung ist für die Messung von Vorteil. Bei den Oberflächenelektroden, die auf die Haut aufgebracht werden, handelt es sich um bipolare Silber/Silberchloridbasierte Einmalelektroden, die mit einem Nass- oder Adhäsivgel benetzt sind und deren Leitfläche einen Durchmesser von bis zu 1 cm² besitzt. Die Elektroden sollten in Richtung des Muskelfaserlaufes im zentralen Bereich des inserierenden Muskelbauches mit einem Abstand von rund 20 mm appliziert werden (Hugger et al., 2008). Als Referenzwert wird eine Referenzelektrode an einer am zu untersuchenden Bewegungsvorgang unbeteiligten Stelle angebracht (Konrad, 2005). Bei sich wiederholenden Messungen werden Schablonen hergestellt, welche sich an vorher festgelegten Weichteilpunkten orientieren. Dadurch können die Elektroden bei jeder Messung näherungsweise am selben Ort fixiert werden. Castroflorio et al. (2005) wiesen nach, dass die so gewonnenen EMG-Werte für M. masseter und M. temporalis ant. sowohl innerhalb einer Sitzung als auch im Vergleich zu zwei verschiedenen Sitzungen mit einwöchigem Abstand

reproduzierbar waren. Die Autoren benutzten in der Studie sowohl die Palpationsmethode als auch die gesichtsbogengestützte Elektroden-Repositionierung und stellten fest, dass die Anwendung von Hilfsmitteln zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit sehr sinnvoll ist.

Um EMG-Messungen unterschiedlicher Individuen oder unterschiedlicher Messzeitpunkte miteinander vergleichen zu können, bedarf es einer Anpassung der y-Achsenkalierung, ohne dabei das EMG-Signal zu verändern. Als Referenzwert wird die MVC-Normalisierung (maximum voluntary contraction) genutzt. Der Proband wird instruiert, über ein bestimmtes Zeitfenster eine maximale, möglichst isometrische Kontraktion zu halten. Isometrisch bedeutet, dass eine Kontraktion ohne Längenveränderung des Muskels durchgeführt wird. Der MVC-Wert wird mit 100% gleichgesetzt, so dass alle weiteren gemessenen Werte aus den kinematischen Analysen in Relation zur maximalen Kontraktionskraft angegeben werden können. MVC-Werte sind schwer zu erzielen, wenn durch Schmerzsensationen Hemmprozesse auftreten (Hugger et al., 2008).

1.4 Verfahren zur Registrierung von Unterkieferbewegungen

Exakte Kenntnisse über die Bewegungsabläufe beim Kauakt sind interessant für anatomische, physiologische und funktionelle Studien, aber auch in der restaurativen Zahnmedizin und Funktionsdiagnostik sind sie von großem Interesse, da Zahnersatz allen funktionellen Belastungen standhalten und außerdem noch dem Patienten ein möglichst natürliches Mundgefühl bieten soll. Daher versucht man bereits seit dem 19. Jahrhundert Kaubewegungen und Bewegungsmuster zu analysieren. Dabei unterscheidet man graphische, optische, röntgenologische und elektronische Verfahren. Bei allen Verfahren gibt es extraoral und intraoral aufzeichnende Systeme, sowie berührungshafte und nicht berührungshafte Messmethoden. Eine weitere Klassifizierung bezieht sich auf den Messort: Gelenknahe Geräte werden von gelenkfernen Geräten unterschieden (Hugger, 2000).

Der Schweizer Zahnmediziner Alfred Gysi (1865-1957) entwickelte einen Registrierbogen, an dessen statischen Anteil Stifte und an dessen beweglichen Anteil Schreibplatten angebracht waren, so dass die Unterkieferbewegungen in horizontaler und sagittaler Ebene aufgezeichnet werden konnten. Ähnlich funktioniert auch die Pantographie nach McCollum. Im heutigen Praxisalltag wird eher die Achsiographie eingesetzt. Bei diesem Verfahren werden auf mechanisch-graphischem, aber auch auf elektrischem Wege wichtige Parameter erfasst, die vom Zahntechniker im Artikulator eingestellt werden. Auf diese Weise kann Zahnersatz unter Berücksichtigung funktioneller Parameter angefertigt werden. Die in der Achsiographie erfassten Parameter sind u.a. die sagittale Kondylenbahnneigung, der Bennett-Winkel und die Immediate Sideshift in transversaler Ebene. Ältere Geräte, wie z.B. der Mandibular-Kinesiograph nach Jankelson aus dem Jahr 1975 erlaubten die schädelbezogene Aufzeichnung der Inzisalpunktbewegungen, aber ohne Erfassung aller sechs Freiheitsgrade der Mandibularbewegung. Moderne elektronische Systeme ermöglichen die schädelbezogene Registrierung funktioneller Bewegungen unter Berücksichtigung aller Freiheitsgrade des Unterkiefers (Hugger und Schindler, 2006).

Woda arbeitete in einer Studie verschiedene Verfahren zur Aufzeichnung von am Kauvorgang beteiligten Strukturen heraus (Woda et al., 2006). Er teilt sie ein in kinematische, elektromyographische und videographische Verfahren. Kinematische Verfahren dienen zur Aufzeichnung der Kieferbewegungen, elektromyographische Techniken dienen zur Registrierung bioelektrischer Aktivität von Kaumuskeln. Videoaufzeichnungen sind weniger invasiv und eignen sich daher sehr gut, um ängstliche oder schwierige Patienten zu untersuchen. Außerdem hat diese Technik den Vorteil, dass die Weichgewebe ohne Beeinträchtigung des Lippen schlusses beobachtet werden können (Hennequin et al., 2005; Hennequin et al., 2005; Woda et al., 2006). Mioche und Hiemae bedienten sich der Videofluorographie, bei der die Orientierung von nicht essbaren Materialien im Mund während des Kauens beobachtet wurde (Mioche et al., 2002). Ultraschallverfahren dienten bei Casas und seinen Mitarbeitern zur Bewegungsaufzeichnung der oralen Weichgewebe (Casas et al., 2003). Woda stellte heraus, dass alle Verfahren den rhythmischen

Charakter des Kauvorgangs erkennen ließen. Außerdem stellte er fest, dass während des Kauvorgangs immer wieder intermediäre Schluckphasen stattfinden und dass nach dem finalen Herunterschlucken eine Reinigungsphase mit unregelmäßiger Muskelaktivität erkennbar ist (Woda et al., 2006).

1.5 Beispiele für Messsysteme zur Aufzeichnung von Unterkieferbewegungen



Abb. 1: **ARCUSdigma** (KaVo)
extraoral, gelenkfern, berührungslos
Quelle: www.kavo.de
Zugriff: 12.06.2011
Genehmigung: 20.10.2015



Abb. 2: **Freecorder® BlueFox**
extraoral, gelenknah, berührungslos
Quelle: Dental Innovation GmbH
Genehmigung: 20.10.2015



Abb. 3: **Zebris-JMA**
extraoral, gelenkfern, berührungslos
Quelle: zebris Medical GmbH
Genehmigung: 20.10.2015



Abb. 4: **Mandibular-Kinesiograph**
extraoral, gelenkfern, berührungslos
Quelle: www.scielo.br
Zugriff: 12.06.2011
Genehmigung: 20.10.2015



Abb. 5: **DIR-System**

intraoral, gelenkfern, berührungslos

Quelle: Gesellschaft für Funktions-

Diagnostik DIR ® System mbH & Co. KG

Genehmigung: 29.10.2015



Abb. 6: **SAM-Axiograph**

extraoral, gelenknah, berührungshaft

Quelle: SAM Dental

Genehmigung: 22.10.2015

Die Abbildungen 1 bis 6 zeigen Beispiele für unterschiedliche Arten von Messsystemen. Es gibt sowohl extraoral als auch intraoral anwendbare Geräte. Die elektronisch gestützte Registrierung der Unterkieferbewegungen erfolgt überwiegend durch extraoral angewandte Messsysteme. Beispielhaft dafür sind die Systeme auf den Abbildungen 1-4 und 6. Abbildung 5 zeigt im Gegensatz dazu das intraoral anzuwendende DIR-System, welches eine digitale Stützzstiftregistrierung nach Gysi und McCrane ermöglicht (www.dir-system.de, Juni 2006). Abhängig von der Lage des registrierenden Sensors werden die unterschiedlichen Messsysteme in gelenknahe und gelenkferne Systeme eingeteilt. Beim Zebris-JMA (Abb. 3) wird ein Registrierbogen mit Ultraschallsensoren mithilfe eines paraokklusalen Behelfs an den Unterkieferinzisiven angebracht. Auf dem Kopf aufsitzend befindet sich ein mit Laufzeitmessern ausgestatteter Registrierbogen, welcher die Ultraschallfrequenzen registriert. Anschließend werden die Daten von einer Software weiterverarbeitet, so dass die Bewegungsabläufe abgelesen werden können. Der Registriervorgang findet also weitgehend gelenkfern statt. Der Freecorder ® Bluefox (Abb. 2) registriert die Unterkieferbewegungen mithilfe eines optoelektronischen Mustertracking-Verfahrens gelenknah. Dabei werden kodierte grafische Muster, welche am Patienten angebracht werden, von

Spezialkameras, welche sich in einem an der Wand befestigten C-Bogen befinden, registriert. Die Muster werden in Form von Referenzstreifen auf Höhe des Kiefergelenks befestigt. Auch am Unterkieferbogen befinden sich solche Muster. Die Lage der Kondylen wird rechnerisch aus der Position der Muster ermittelt. Die Daten werden auf einem Speichermedium im C-Bogen gespeichert und drahtlos an einen PC übermittelt (Klett, 2007). Abbildung 6 zeigt den nicht elektronischen, berührungshaft registrierenden SAM-Axiographen. Ober- und Unterkieferbogen sind extraoral miteinander verbunden.

2 Problemstellung

Das Ziel dieser Dissertation war es, den Einfluss von verschiedenen Versuchsbedingungen auf die Kauparameter *Anzahl der Kauzyklen*, *Dauer der Kausequenz*, *Kaufrequenz*, *totale Muskelarbeit*, *Asymmetrieindex* und *Deliberate Chewing Index* bei einer Gruppe von funktionsgesunden Probanden unter Verwendung von standardisiertem Kaugut zu untersuchen.

3 Material und Methoden

3.1 Auswahl des Probandenkollektivs

Insgesamt wurden 18 Probanden im Alter von 21 bis 28 Jahren untersucht. Der Altersdurchschnitt betrug 23,5 Jahre. Die Probanden wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt: Das Mindestalter sollte 18 Jahre betragen, schmerzfreie Mundöffnung von mindestens 30 mm (Overbite ausgenommen), Protrusions- und Laterotrusionsbewegungen von mindestens 7 mm und die Teilnahme an der Studie sollte aus freien Stücken stattfinden. Zum Ausschluss an der Studie führten folgende Kriterien: Myoarthropathien und schmerzhafte Mundöffnung, mehr als 3 Monate andauernde chronische Schmerzen im Kopfbereich, Parodontalerkrankungen, das Vorhandensein herausnehmbaren Zahnersatzes, sowie die Einnahme von Medikamenten, mit Einfluss auf das Zentralnervensystem. Alle Patienten wurden nach ihrer bevorzugten Kauseite gefragt und mussten ihr schriftliches Einverständnis für die Teilnahme an der Studie geben. Der Studie wurde durch die Ethikkommission der HHU Düsseldorf zugestimmt (Studiennummer 3642).

3.2 Benutzte Materialien und Geräte

Für die gleichzeitige Messung der Muskelaktivität und der graphischen Registrierung der Unterkieferbewegungen wurden zwei verschiedene Messapparaturen eingesetzt:

Tabelle 1: Technische Daten zu den Messapparaturen.

			Sensortyp 1	Sensortyp 2
			inzisalnah, gelenkfern	okklusionsnah
Systemname			CMS JMA V5CS	CMS20S A4USB
Grund- gerät	Bezeichnung		CMS 70 P	CMS 20 JMA
	Schnittstelle		parallel	USB
EMG	Bezeichnung		EMG8	EMG4
	Differenzial- verstärker	Eingangsimpedanz	50 k Ω	146 k Ω
		Eingangsrauschen	1.5 μ V pp	0.28 μ V pp
		CMRR	120 dB	110 dB
	Verstärkung	Spannungsverstärkung	1000	1000
		Bandweite	10 – 1000 Hz	7.5 – 1000 Hz
	A/D-Wandlung	Auflösung	12bit	12 bit
		Messfrequenz	900 Hz	1000 Hz

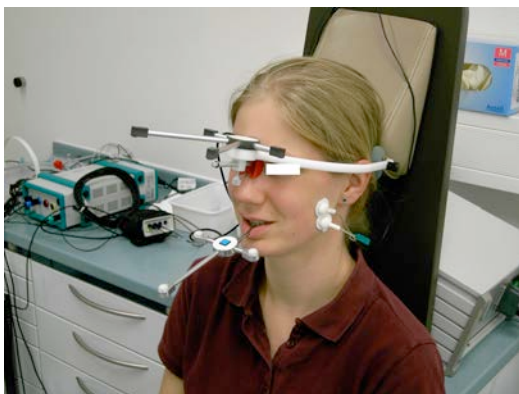


Abb. 7: **Sensortyp 1:**
CMS JMA V5CS

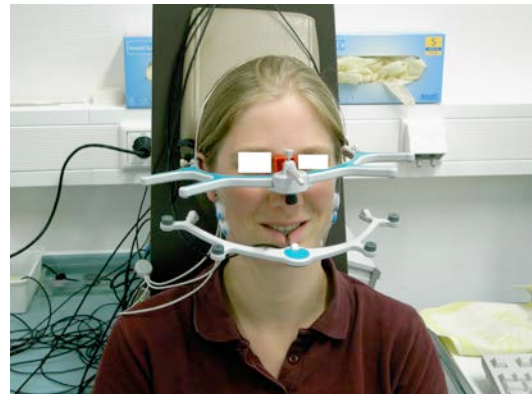


Abb. 8: **Sensortyp 2:**
CMS 20S A4USB

Bei den beiden Sensortypen 1 und 2 handelt es sich um zwei zeitlich nacheinander erschienene Versionen des Ultraschall-Laufzeit-Messsystems Jaw Motion Analyzer ® (JMA) der Firma Zebris Medical (Isny, Deutschland). Beide Systeme setzen sich jeweils aus einem Grundgerät zur Aufzeichnung der Unterkieferbewegungen und einem EMG-Gerät zusammen. Jedes der Geräte greift auf einen Personalcomputer mit der Verarbeitungssoftware WinJaw (Version 10.5.42, Firma Zebris Medical, Isny, Deutschland) zu. Sensortyp 1 ist

ein inzisalnahes und gelenkfernes System, welches aus 3 Sendern und 4 Empfängern besteht. Sensortyp 2 ist okklusionsnah orientiert und besitzt 4 Sender und 4 Empfänger.

Zur Ableitung des EMGs am rechten und linken M. masseter wurden selbstklebende bipolare Ag/AgCl-Einwegelektroden (Fa. Noraxon, Scottsdale, Arizona, USA) mit einem Durchmesser von 14 mm verwendet. Eine entsprechende Hautoberflächenvorbereitung diente zur Herabsetzung des Hautwiderstandes. Dazu wurden männliche Probanden angewiesen sich im Bereich der Wangen zu rasieren, Frauen wurden gebeten, keinerlei Make up oder Gesichtscreme aufzutragen. Die Haut wurde mit Wattepad und Spitacid®-Desinfektionslösung entfettet, bis eine leichte Rötung auftrat. Dann wurden die Elektroden mit einem Interelektrodenabstand von 20 mm parallel zum Muskelfaserverlauf über dem Muskelbauch des M. masseter aufgeklebt. Um in den folgenden Messsitzen die Position möglichst exakt wiederzufinden, wurden mithilfe von PVC-Folien Schablonen erstellt. Die Folie wurde parallel zur Tragus-Canthus-Linie angelegt und die Mittelpunkte der Elektroden wurden auf die Folien übertragen. Eine Referenzelektrode wurde auf dem rechten Processus mastoideus befestigt. Ein paraokklusaler Behelf wurde vestibulär an den Unterkieferfrontzähnen mithilfe des Provisorienkunststoffes Luxatemp adaptiert und mit Acrylatkleber befestigt. Die statische und dynamische Okklusion wurde durch den Behelf nicht beeinträchtigt. Die Ultraschallsensoren (Sender) wurde anschließend am Behelf mit einem Magnetmechanismus befestigt. Derselbe Behelf wurde für beide Sensortypen und jeden der drei Messtermine benutzt. Ein jeweils zu den Ultraschallsensoren gehöriger Registrierbogen mit Ultraschallempfängern wurde am Kopf befestigt.

3.3 Durchführung der Messung

Alle Messungen mit beiden Messaufbauten wurden an jeweils drei Tagen durchgeführt. Die Probanden wurden dazu per Losverfahren auf sechs

verschiedene Gruppen zu je drei Versuchsteilnehmern aufgeteilt. Die Gruppen wurden ABA, BAB, AAB, BBA, BAA, ABB genannt. Die Messungen in der Gruppe ABA wurden am ersten Versuchstag mit dem Sensortyp 1 begonnen, am zweiten Tag mit Sensortyp 2 und am dritten Tag wieder mit Sensortyp 1. Dieses Prinzip wurde auch auf die anderen Gruppen angewandt.

Die Messungen wurden immer im selben ruhigen Versuchsraum durchgeführt. Die Probanden saßen aufrecht, mit leicht abgestütztem Kopf und wurden angewiesen, ihre Kopf- und Körperhaltung nicht zu verändern. Nach dem Anbringen der Sensoren und dem Einstellen der schädelbezogenen Referenzebenen wurde den Probanden auf die rechte und linke Zahnreihe jeweils eine Watterolle gelegt. Die Probanden wurden angewiesen, für jeweils 2 Sekunden mit maximaler Kraft zusammenzubeißen. Nach einmaliger Wiederholung wurde der Mittelwert berechnet. Der so ermittelte MVC-Wert (maximum voluntary contraction) diente nun als Referenzwert für die anschließend gemessenen Kontraktionskräfte.

Im Anschluss wurden Grenzbewegungen aufgezeichnet. Die Probanden wurden dazu zu maximaler Vorschubbewegung, maximalen Seitenschubbewegungen nach rechts und links, maximaler Öffnung, sowie zu kombinierten Bewegungsabläufen instruiert, aus denen sich dann ein sagittales und frontales Posselt-Diagramm aufzeichnen ließ. Jede Bewegung wurde zweimal aufgezeichnet. Danach erfolgte – ebenfalls zweimal – die Registrierung der Kaubewegungen: zunächst freies Kauen (FK), dann angewiesenes Rechtskauen (RK) und angewiesenes Linkskauen (LK). Als standardisiertes Kaugut wurde Weingummi (Goldbären, Fa. Haribo/Bonn) benutzt, und zwar genau eins pro Kausequenz. Vor dem Kauen wurde das Kaugut auf der Zunge platziert und der Proband gebeten, habituelle Okklusion einzunehmen. Jede Kausequenz wurde bis zum finalen Schluckakt gemessen. Nach Beendigung der ersten Messung wurden die Sensoren und Elektroden der zuerst benutzten Messapparatur gegen die zweite Messapparatur ausgetauscht und die Messung gemäß Protokoll erneut durchgeführt.

3.4 Auswertung der kinematischen und EMG-Daten

Die gemessenen EMG-Werte werden zwar durch die Software WinJaw parallel zu den kinematischen Daten angezeigt, aber durch eine spezielle Software verarbeitet. Diese Analysesoftware stammt aus dem Institut für Informatik, Bereich Algorithmen und Datenstrukturen (Prof. Dr. E. Wanke), HHU Düsseldorf. Die Software gibt die Anzahl der Kauzyklen, die Dauer der Kausequenz und die Kaufrequenz aus.

Für die EMG-Werte wurde folgendes Verfahren der Auswertung gewählt: Zunächst erfolgte die Glättung der EMG-Daten durch die Berechnung des Root Mean Square (RMS) über ein gleitendes Zeitfenster von 50 ms. Danach wurde für die Kanäle des rechten und linken Masseters separat das Signalrauschen errechnet. Dazu wurde der kleinste Mittelwert über alle geglätteten EMG-Werte bei einem gleitendem Zeitfenster von 100 ms über alle Messdaten verwendet. Der MVC wurde für beide Seiten separat als größter Mittelwert aller vorhandenen Messungen zur maximalen Kontraktion ermittelt und in der Einheit μV angegeben (Kravchenko, 2011). Zur Bestimmung der Muskelaktivität wurden alle Zeitabschnitte ermittelt, innerhalb derer die geglätteten EMG-Werte pro Kanal abzüglich des Signalrauschens oberhalb eines Schwellenwertes von 3% des MVC-Wertes lagen. Zur Berechnung der Muskularbeit wurden nur die Messwerte herangezogen, die sich in Zeitabschnitten befanden, in denen die EMG-Aktivität durch tatsächlich geleistete Kauaktivität resultierte, also nicht aus den Öffnungsphasen der Kauzyklen. Die Muskularbeit wurde für diese Untersuchung definiert „durch den Durchschnitt aller geglätteten EMG-Werte multipliziert mit der Summe aller zuvor festgelegten Zeitabschnitte der Muskelaktivität“ (Kravchenko, 2011). Das entspricht der Fläche über den geglätteten Messkurven, die abzüglich des Rauschens oberhalb des Schwellenwertes von 3% des MVC-Wertes lagen. Für jeden Kanal wurden die Werte separat in der Einheit $\mu\text{V}\cdot\text{s}$ angegeben. (Kravchenko, 2011).

Für den Vergleich der Muskularbeit des rechten Masseters mit der Muskularbeit des linken Masseters wird der von Naeije et al. (1989) eingeführte Asymmetrieindex (AI) herangezogen. Dieser berechnet sich aus dem

Quotienten aus Differenz von Muskelarbeit des rechten und linken Masseters und der Summe von Muskelarbeit des rechten und linken Masseters nach der Formel

$$AI = \frac{mw_{RMass} - mw_{LMass}}{mw_{RMass} + mw_{LMass}}.$$

Damit liegt der AI immer zwischen -1 und 1, bzw. zwischen -100% und 100%. Bei balancierter Muskelarbeit ergibt sich somit der Wert 0. Ist die Muskelarbeit des rechten Masseters viermal größer als die Muskelarbeit des linken Masseters, so ergibt sich ein AI von 60%. Bei zweifach größerer Aktivität im linken M. masseter liegt der AI bei -33%.

Um die Muskelarbeit des Masseters einer Seite bei angewiesenem Rechts- und angewiesenem Linkskauen zu vergleichen, benötigt man den seitenbezogenen angewiesenen Kauindex (Deliberate Chewing Index, DCI). Dieser berechnet sich analog zum AI nach der Formel

$$DCI = \frac{mw_{RC} - mw_{LC}}{mw_{RC} + mw_{LC}}.$$

3.5 Statistische Analyse

Die statistische Analyse der erhobenen Daten wurde mit einer multifaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung durchgeführt. Die Analyse erfolgte hinsichtlich der Parameter *Kauzyklusanzahl*, *Dauer der Kausequenz*, *Frequenz der Kausequenz*, *totale Muskelarbeit*, *Asymmetrieindex* und *Deliberate Chewing Index* sowie deren Beeinflussung durch die Faktoren *Sitzung* (Sitzung 1, 2 und 3), *Kaufaufgabe* (freies Kauen, Rechtskauen, Linkskauen), *Kauseite* (rechts und links) und *Sensortyp* (A und B).

Im Rahmen der Analyse der Parameter *Anzahl der Kauzyklen*, *Dauer der Kausequenz* und *Frequenz der Kausequenz* wurde auch der Intraclass Correlation Coefficient (ICC) berechnet. Der „ICC ist ein Zusammenhangsmaß mit Werten zwischen -1 und +1. Mit dem ICC versucht man die beiden Aspekte

Korrelation und Unterschiede im mittleren Niveau der Werte in einer Maßzahl zu vereinen. 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. 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, 2005).

Die statistischen Analysen wurden mit der Statistiksoftware IBM SPSS Statistics Version 19 durchgeführt. Als signifikant wurden alle p-Werte kleiner 0,05 festgelegt. Die graphische Darstellung der Daten erfolgte mithilfe von Boxplotdiagrammen (Kastendiagramm). „Der Boxplot besteht aus einer Box, die vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt wird und deren innere Linie den Median repräsentiert“ (Krentz, 2005). Als Median bezeichnet man den in der Mitte liegenden Wert einer der Größe nach geordneten Stichprobe. Ober- und unterhalb des Medianwertes befinden sich jeweils 50% der Messwerte. Der größte und der kleinste Wert werden mit einer Markierung versehen, sofern es sich nicht um Ausreißer handelt. (Krentz, 2005). Als Ausreißer bezeichnet man Werte, die mehr als 1,5 Kastenlängen vom 75. Perzentil entfernt liegen. Sie werden mit kleinen Kreisen markiert. Der kleinste oder größte beobachtete Wert wird jeweils durch so genannte Whisker (Schnurrbarthaare) markiert. Mit Sternchen sind die Extremwerte gekennzeichnet. Sie sind als die Werte definiert, die mehr als 3 Kastenlängen vom 75. Perzentil entfernt liegen.



Abb. 9: Schema eines Boxplots (nach Krentz, 2005).

4 Ergebnisse

4.1 Unterkiefergrenzbewegungen der Probanden

Das Probandenkollektiv bestand aus 9 weiblichen und 9 männlichen voll bezahnten Probanden im Alter zwischen 21 und 28 Jahren. Die Maximale Mundöffnung (MÖ) betrug im Mittel $46,4 \pm 6,6$ mm. Für den maximalen Vorschub ergab sich ein Wert von $10,1 \pm 1,7$ mm, für maximalen Seitschub nach rechts $11,8 \pm 1,8$ mm und maximalen Seitschub nach links $11,6 \pm 2,1$ mm. Diese Werte lassen bei allen Probanden auf physiologische Unterkiefermobilität schließen. Die einzelnen Messwerte können Tabelle 2 und 3 entnommen werden.

Tabelle 2: **Unterkiefergrenzbewegungen der Probanden bei allen drei Sitzungen.**

(MÖ = Mundöffnung, LR = Laterotrusion nach rechts, LL = Laterotrusion nach links)

Proband	Sitzung	Max. MÖ (mm)	Max. Vorschub (mm)	Max. LR (mm)	Max. LL (mm)
1	1	49,6	8,1	9,9	7,7
1	2	54,4	8,3	10,1	8,8
1	3	48,9	9,5	8,4	10,3
2	1	51,6	7,6	10,4	11
2	2	49,5	7,2	13,4	11,5
2	3	47,5	7,2	12,5	11,4
3	1	46,4	9,5	12,5	11
3	2	47,7	9,7	12	13,3
3	3	46,3	9,7	12,5	13,2
4	1	44	13,5	12,4	13,1
4	2	52	13,5	13,4	12,9
4	3	51,8	14,9	14,5	14,4
5	1	40,8	11,8	10,6	11,4
5	2	45,3	12,4	9,2	10,5
5	3	45,7	11,5	8,4	9,2
6	1	52,7	13	12,8	13,9
6	2	55,5	12	12,7	15,4
6	3	57,7	11,9	12,4	14,7
7	1	39,2	9	13	7,4
7	2	41,3	9,9	13,2	10,7
7	3	42,4	8,1	12,5	11,4
8	1	30,4	8,1	11,5	10,3
8	2	30	8,7	10,6	10,5

8	3	30,1	8,9	10,7	10,3
9	1	46,7	11,3	13,3	13,7
9	2	47,2	11,9	12,9	13,1
9	3	46,2	11,3	13,6	13,1
10	1	51	9,1	11,7	12,6
10	2	53	9,2	12,7	11,9
10	3	55,5	9,1	11,9	11,3
11	1	41,5	9,5	14,6	16,6
11	2	39,4	9,3	12,1	13,2
11	3	40,5	9,6	11,7	11,8
12	1	40,1	11,3	13,4	12,2
12	2	40,1	11,1	14,2	11,4
12	3	45	12,1	13,5	11,1
13	1	54,2	10,1	11,5	9,6
13	2	55,4	10,7	9,9	9,1
13	3	58	10,3	6,6	8,8
14	1	49	8,8	9,2	11,2
14	2	47,4	8,3	8,7	10,4
14	3	48,3	8,5	9,2	10,1
15	1	56,1	9,9	11,3	15,1
15	2	53,1	10,1	12,2	14,5
15	3	50,7	9,7	10,9	16,1
16	1	46,3	9,2	10,8	8,9
16	2	38,8	8,7	10,2	8,4
16	3	44,4	8,3	11,2	8,8
17	1	42	10	11,6	10,8
17	2	39,5	10	11,4	10,4
17	3	40,5	10,1	12,7	10,8
18	1	46,7	11	14,2	12,2
18	2	45,2	10,6	14,2	12,5
18	3	43,4	10,8	14,4	12,6

Tabelle 3: **Mittelwerte und Standardabweichung der Unterkiefergrenzbewegungen.** (MÖ = Mundöffnung, LR = Laterotrusion nach rechts, LL = Laterotrusion nach links, SD = Standardabweichung)

	Max. MÖ (mm)	Max. Vorschub (mm)	Max. LR (mm)	Max LL (mm)
Mittelwert	46,4	10,1	11,8	11,6
SD	±6,6	±1,7	±1,8	±2,1

4.2 Kauseitenpräferenz

Tabelle 4: **Kauseitenpräferenzen der Probanden.**

Proband	Geschlecht	Bevorzugte Kauseite		Keine präf. Kauseite
		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 5: Prävalenz bevorzugter Kauseiten.

	Präferierte Kauseite					
	rechts		links		keine	
	n	%	n	%	n	%
Geschlecht						
Weiblich	6	66,7	3	33,3	0	0
Männlich	6	66,7	2	22,2	1	11,1

Tabelle 4 und 5 zeigen die präferierten Kauseiten der Probanden. 6 weibliche und 6 männliche Probanden gaben an, bevorzugt rechts zu kauen. 3 weibliche und 2 männliche Probanden kauen bevorzugt auf der linken Seite. Lediglich 1 männlicher Proband gab an, keine bevorzugte Kauseite zu haben. Insgesamt haben damit 94,5% der Probanden eine bevorzugte Kauseite. Die rechte Kauseite wurde zu 66,7% bevorzugt, die linke Seite zu 27,8%.

4.3 Anzahl der Kauzyklen

Tabelle 6: Analyse der Anzahl der Kauzyklen in Abhängigkeit von Sensortypen, der Sitzung und der Kauaufgabe. (fk = freies Kauen, rk = Rechtskauen, lk = Linkskauen, akz = Anzahl der Kauzyklen, SD = Standardabweichung, Sensortyp 1 = inzisalnah, gelenkfern, Sensortyp 2 = okklusionsnah)

				Anzahl der Kauzyklen					
				fk		rk		lk	
				Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Sitzung	1	Sensortyp	1	34,75	13,43	33,39	12,05	34,44	12,33
			2	32,33	10,02	32,03	11,38	34,14	13,44
	2	Sensortyp	1	32,31	12,75	34,33	14,12	37,11	16,83
			2	32,81	14,15	33,97	15,45	35,17	17,64
	3	Sensortyp	1	32,64	13,98	33,33	15,25	36,47	16,56
			2	33,00	14,24	32,94	15,32	36,31	17,66

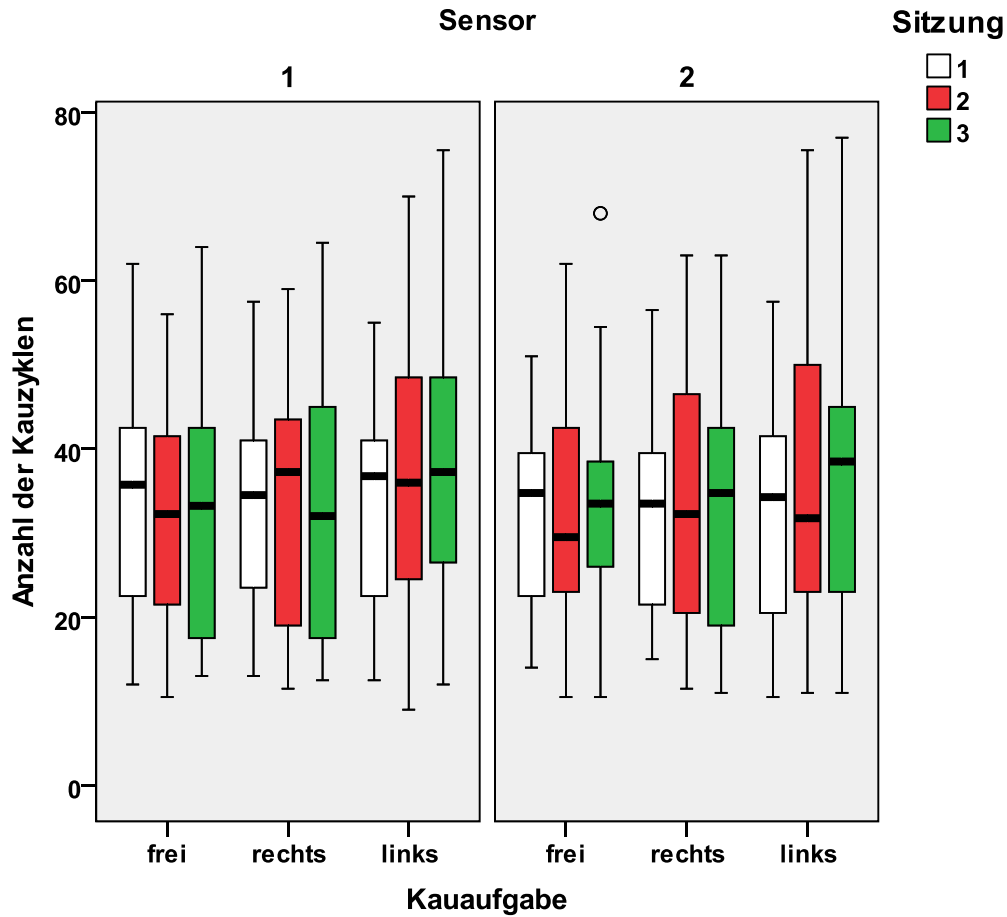


Abb. 10: **Anzahl der Kauzyklen in Abhängigkeit vom Sensortyp, Sitzung und Kauaufgabe.**

Abbildung 10 zeigt für beide Sensortypen getrennt die Verteilung der Anzahl der Kauzyklen bei den unterschiedlichen Kauaufgaben. Die zugrunde liegenden Werte können Tabelle 6 entnommen werden. Es gab lediglich einen Ausreißer beim freien Kauen in der dritten Sitzung mit Sensortyp 2.

Die statistische Analyse der Daten ergab, dass die Kauaufgabe (also freies Kauen, angewiesenes Rechts- bzw. Linkskauen) die Anzahl der Kauzyklen signifikant beeinflusst ($p=0,033$).

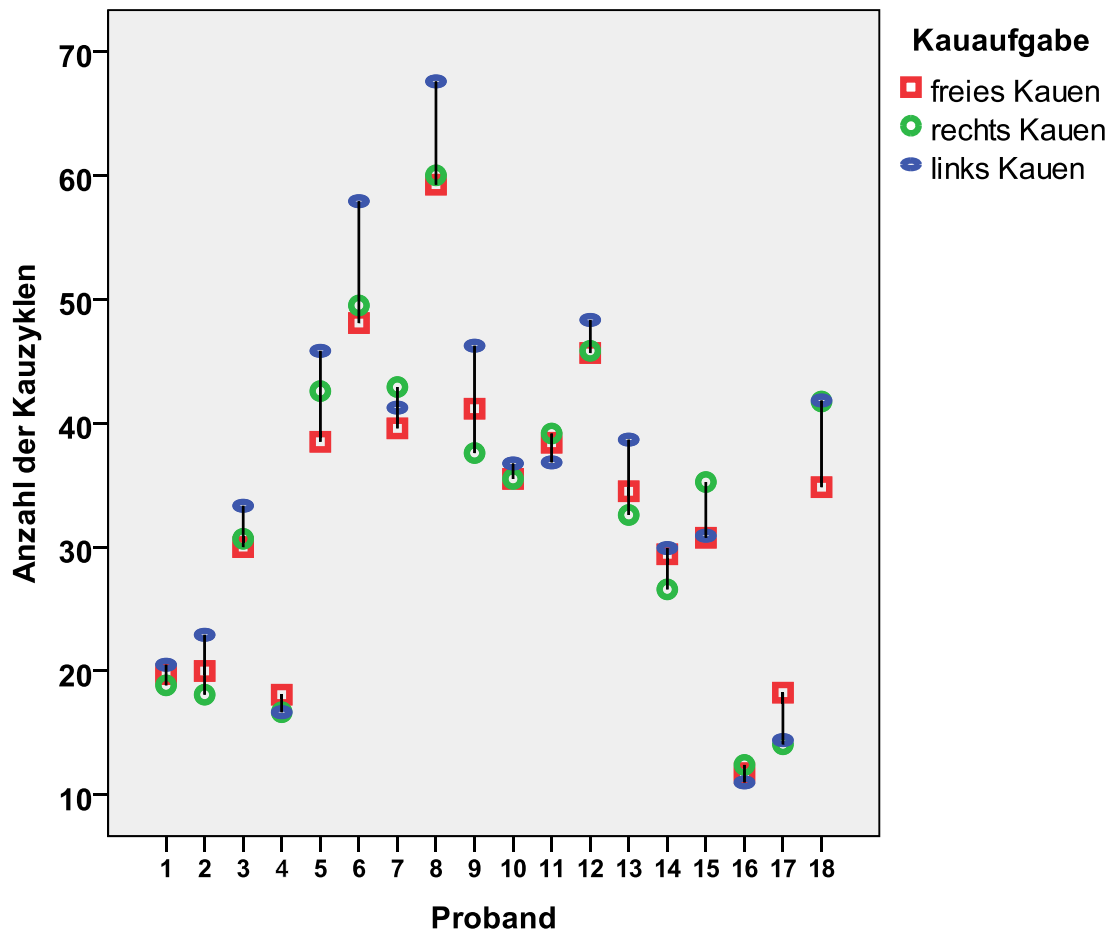


Abb. 11: **Verbundliniendiagramm der Anzahl der Kauzyklen.**

Abbildung 11 zeigt für alle 18 Probanden die Mittelwerte der mit beiden Sensoren gemessenen Kauzyklenanzahl beim freien, Rechts- und Linkskauen. Durch die Verbundlinien wird die Bandbreite der intraindividuellen Anzahl an Kauzyklen bei den unterschiedlichen Kauaufgaben deutlich. Proband 6 wies den größten Unterschied bei der Anzahl der Kauzyklen zwischen freiem, Rechts- und Linkskauen auf. Bei Proband 1, 10 und 16 lag die Anzahl der Kauzyklen sehr nah beieinander. Bildet man die Differenzen zwischen der Kauzyklusanzahl beim freien und beim Links- bzw. Rechtskauen, so stimmt die kleinere Differenz bei 10 Probanden mit der Aussage über die bevorzugte Kauseite überein. Bei Proband 1, 2, 5, 7, 16 und 17 stimmten die Werte nicht überein, Proband 12 gab keine bevorzugte Kauseite an und bei Proband 4 lag die Kauzyklusanzahl für das angewiesene Kauen für beide Seiten bei 16,67.

Tabelle 7: Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für die Anzahl der Kauzyklen.

	ICC für die Anzahl der Kauzyklen		
	Korrelation innerhalb der Klasse	95% Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Freies Kauen	0,825	0,702	0,919
Rechtskauen	0,884	0,793	0,947
Linkskauen	0,876	0,781	0,944

Die relativ hohen ICC-Werte in Tabelle 7 lassen den Rückschluss zu, dass die gemessenen Werte sehr gut reproduzierbar sind.

4.4 Dauer der Kausequenz

Tabelle 8 zeigt nachfolgend die Mittelwerte und die Standardabweichung für die Dauer der gemessenen Kausequenzen für jeden Probanden, abhängig von der Sensorbeschaffenheit, der Sitzung und der Kauaufgabe.

Tabelle 8: **Statistische Analyse der Dauer der Kausequenz.** (fk = freies Kauen, rk = Rechtskauen, lk = Linkskauen, SD = Standardabweichung, Sensortyp 1 = inzisalnah, gelenkfern, Sensortyp 2 = okklusionsnah)

				Dauer der Kausequenz [s]			
		fk		rk		lk	
		Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Sensortyp 1	Sitzung 1	32,63	9,17	29,99	7,72	29,62	8,31
	2	27,63	7,96	27,70	7,71	28,90	9,96
	3	26,22	7,36	25,60	7,41	28,17	9,15
2	1	31,42	8,21	29,06	8,12	30,01	10,78
	2	27,76	7,22	27,20	8,02	27,45	8,78
	3	27,17	8,02	26,92	8,06	28,40	9,91

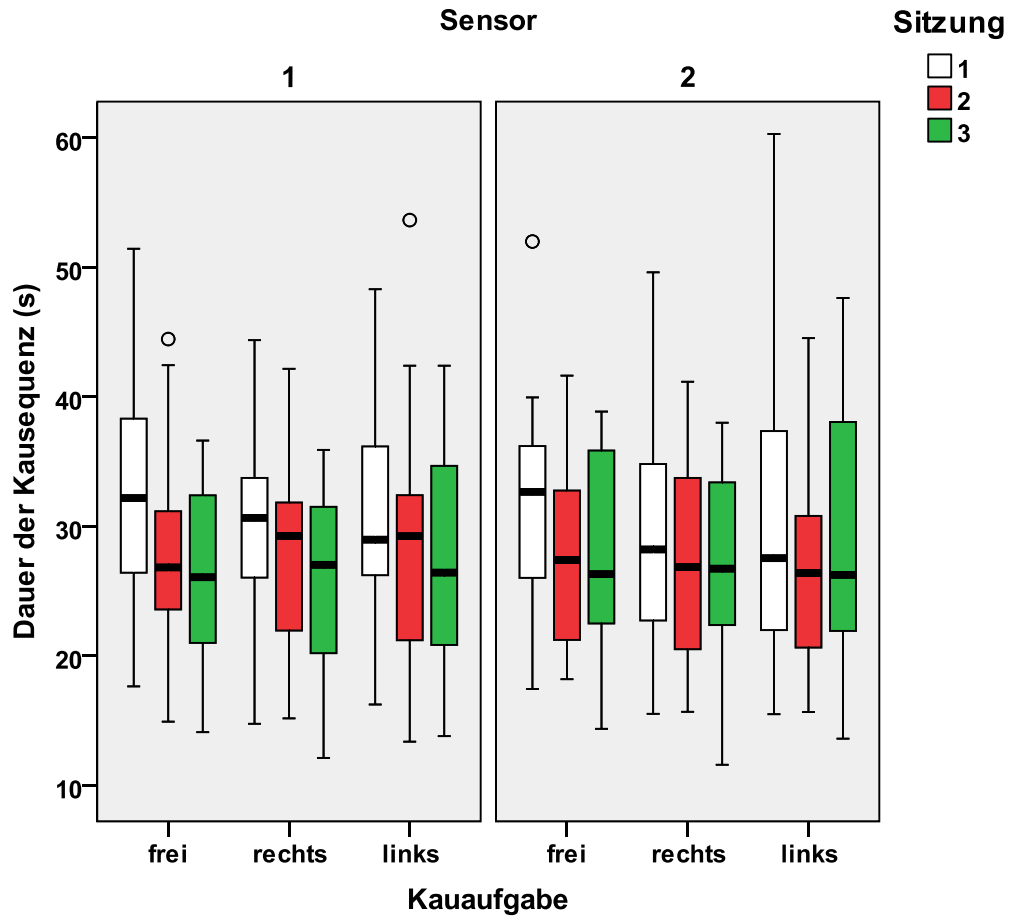


Abb. 12: **Dauer der Kausequenz [s] in Abhängigkeit vom Sensortyp, Kauaufgabe und der Sitzung.**

Die größte Streuung der Werte und die höchste Dauer der Kausequenz ist in der 1. Sitzung beim Linkskauen in der Messung mit Sensortyp 2 erkennbar. Die insgesamt geringsten Kausequenzdauern zeigen sich bei beiden Sensoren beim Rechtskauen in der 3. Sitzung.

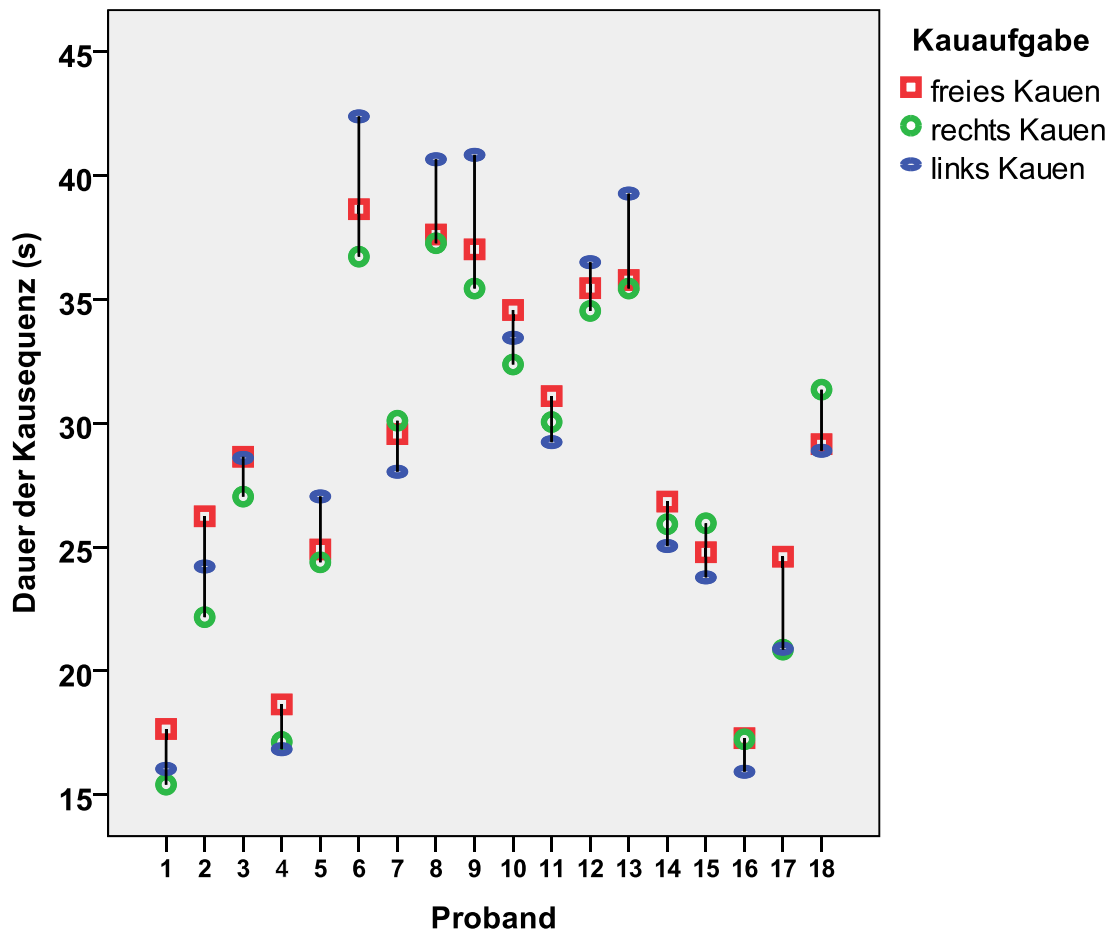


Abb. 13: **Verbundliniendiagramm der Dauer der Kausequenz [s] für alle 18 Probanden beim freien, Rechts- und Linkskauen.**

Abbildung 13 stellt graphisch die Unterschiede der Mittelwerte der Kausequenzdauer bei den unterschiedlichen Kauaufgaben dar. Es wird dabei deutlich, dass die Dauer der Kausequenz bei manchen Probanden, z.B. bei Proband 2, 6, 9, 17, zwischen den einzelnen Kauaufgaben stark variiert, während bei anderen Probanden, z.B. bei Proband 3, 4, 11, 16, kaum Unterschiede in der Kausequenzdauer beim angewiesenen oder freien Kauen bestehen.

Die statistische Analyse ergibt, dass der Faktor „Sitzung“ die Dauer der Kausequenz signifikant beeinflusst ($p=0,034$). Der Vergleich der Kauzyklusdauern von Sitzung 1 zu Sitzung 2 ergibt einen p-Wert von $<0,001$, der Vergleich von Sitzung 2 und Sitzung 3 $p=0,142$ (nicht signifikant), der Vergleich von Sitzung 1 und Sitzung 3 $p<0,001$.

Die Kauaufgabe beeinflusst die Dauer der Kausequenz ebenfalls signifikant ($p=0,034$). Die einzelnen Vergleiche der Kauaufgaben ergeben folgenden p-Werte: Freies Kauen zu Rechtskauen $p=0,003$, Freies Kauen zu Linkskauen $p=0,911$ (nicht signifikant), Rechtskauen zu Linkskauen $p=0,012$.

Die Faktoren Sitzung und Kauaufgabe haben gemeinsam einen signifikanten Einfluss auf die Dauer der Kausequenz ($p=0,001$).

Tabelle 9: Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für die Dauer der Kausequenz.

	ICC für die Dauer der Kausequenz		
	Korrelation innerhalb der Klasse	95% Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Freies Kauen	0,672	0,493	0,834
Rechtskauen	0,778	0,633	0,894
Linkskauen	0,780	0,636	0,895

Tabelle 9 zeigt den ICC für die Dauer der Kausequenz. Der Wert für das freie Kauen liegt unterhalb der Werte für angewiesenes Rechts- und Linkskauen. Insgesamt sind die Werte relativ hoch, so dass von einer guten Reproduzierbarkeit der Werte ausgegangen werden kann.

4.5 Frequenz der Kausequenz

In der nachfolgenden Tabelle 10 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der in den 3 Sitzungen gemessenen Frequenzen der Kausequenz angegeben.

Tabelle 10: **Statistische Analyse der gemessenen Frequenz [1/s] der Kausequenz in Abhängigkeit von Sitzung, Sensor und Kauaufgabe.** (fk = freies Kauen, rk = Rechtskauen, lk = Linkskauen, SD = Standardabweichung, Sensortyp 1 = inzisalnah, gelenkfern, Sensortyp 2 = okklusionsnah)

		Frequenz der Kausequenz [1/s]					
		fk		rk		lk	
		Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Sensortyp 1	Sitzung 1	1,04	0,22	1,10	0,24	1,15	0,24
	2	1,15	0,26	1,20	0,28	1,24	0,28
	3	1,22	0,31	1,27	0,37	1,26	0,32
2	1	1,04	0,27	1,10	0,28	1,13	0,28
	2	1,14	0,28	1,20	0,30	1,22	0,30
	3	1,19	0,26	1,20	0,36	1,24	0,32

Die statistische Auswertung ergibt einen p-Wert von 0,005 für die Beeinflussung der Frequenz der Kausequenz durch die Sitzung. Der Faktor „Sitzung“ beeinflusst also die Frequenz der Kausequenz signifikant.

Der Faktor „Kaufaufgabe“ beeinflusst die Frequenz der Kausequenz ebenfalls signifikant. Es ergibt sich ein p-Wert von 0,003. Beide Faktoren zusammengekommen, also Sitzung und Kaufaufgabe, üben keinen signifikanten Einfluss auf die Frequenz aus ($p=0,186$).

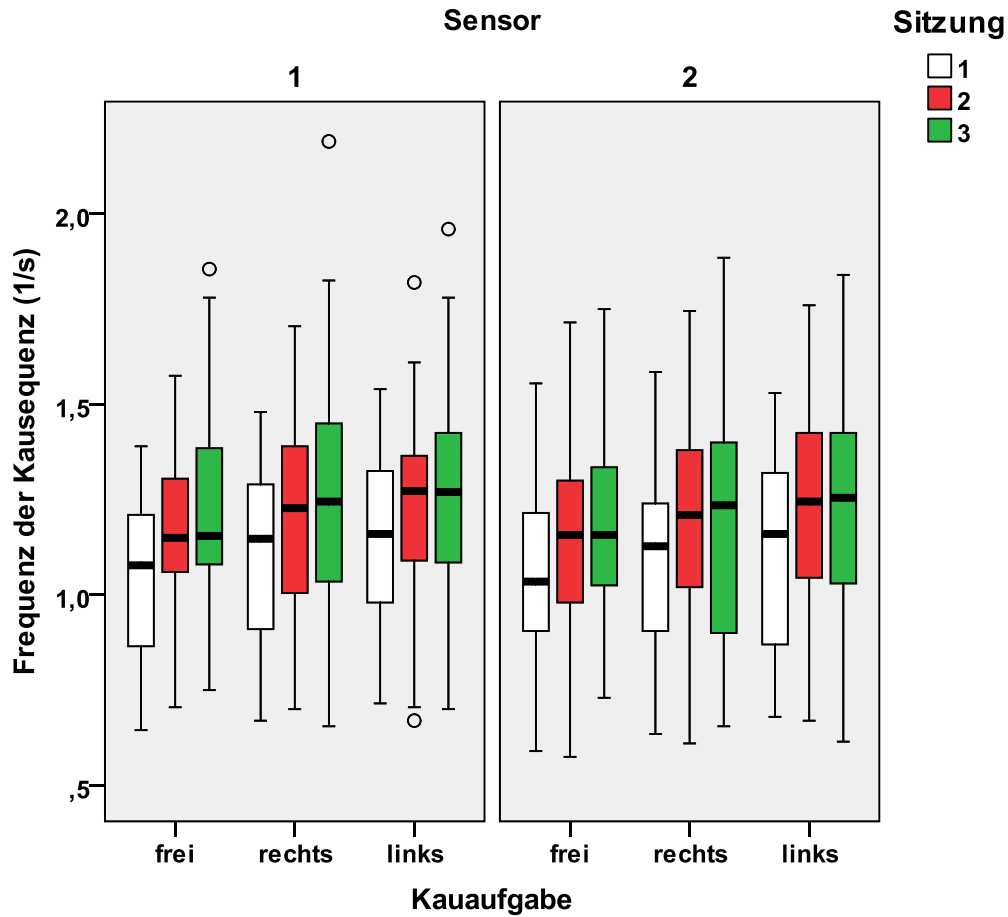


Abb. 14: Frequenz der Kausequenz [1/s] in Abhängigkeit von Sensortyp, Kauaufgabe und Sitzung.

Es fallen Ausreißer bei den Messergebnissen in Sitzung 2 und 3 beim Sensortyp 1 auf. Insgesamt sind die Medianwerte in Sitzung 2 und 3 höher als in Sitzung 1.

Tabelle 11: Intraclass Correlation Coefficient (ICC) für die Frequenz der Kausequenz.

	ICC für die Frequenz der Kausequenz		
	Korrelation innerhalb der Klasse	95% Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Freies Kauen	0,846	0,733	0,929
Rechtskauen	0,859	0,753	0,935
Linkskauen	0,904	0,827	0,957

Tabelle 11 stellt den ICC für die Frequenz der Kausequenz dar. Der ICC für das Linkskauen liegt geringfügig oberhalb der Werte für freies und Rechtskauen. Die hohen Werte sprechen für eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Messungen.

4.6 Muskularbeit

Tabelle 12 können die Mittelwerte für die Muskularbeit in Abhängigkeit vom Sensor, der Sitzung und der Kauaufgabe entnommen werden.

Tabelle 12: **Statistische Analyse der Muskularbeit [μ Vs] angegeben für die unterschiedlichen Kauaufgaben und Masseterseiten.** (SD = Standardabweichung, Sensortyp 1 = inzisalnah, gelenkfern, Sensortyp 2 = okklusionsnah)

			Muskularbeit [μ Vs]			
			freies Kauen			
			rechts		links	
			Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Sensortyp 1	Sitzung 1	1	1607,47	838,43	1656,94	893,10
		2	1443,53	726,80	1380,53	648,63
		3	1343,06	644,80	1372,83	675,54
	Sitzung 2	1	1805,81	1330,66	1507,28	724,58
		2	1503,19	634,65	1318,44	519,12
		3	1355,31	655,68	1383,75	632,25

			Muskularbeit [μ Vs]			
			rechts Kauen			
			rechts		links	
			Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Sensortyp 1	Sitzung 1	1	1849,75	823,75	1145,94	640,12
		2	1802,28	808,77	1089,36	504,61
		3	1648,42	756,08	1004,67	517,06
	Sitzung 2	1	1722,47	737,53	1051,47	553,97
		2	1775,58	843,14	1013,78	523,83
		3	1669,53	888,21	956,28	564,96

zu Tabelle 12: **Statistische Analyse der Muskularbeit [μ Vs] angegeben für die unterschiedlichen Kauaufgaben und Masseterseiten.** (SD = Standardabweichung)

			Muskularbeit [μ Vs]			
			links Kauen			
			rechts		links	
			Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Sensortyp 1	Sitzung 1	1	936,11	464,94	2136,31	1000,91
		2	897,50	533,00	1991,14	920,29
		3	860,67	452,47	1907,11	822,03
	2 Sitzung	1	967,89	644,46	2036,25	828,11
		2	819,47	443,21	1914,03	843,99
		3	786,53	464,44	1839,42	870,92

Bei der statistischen Analyse der gemessenen Werte ergibt sich ein p-Wert von 0,160 für die Beeinflussung des Parameters Muskularbeit durch den Faktor „Kauaufgabe“ und ein p-Wert von 0,325 für den Faktor „Muskelseite“. Damit ist das Signifikanzniveau nicht erreicht. Zusammengenommen beeinflussen Kauaufgabe und Muskelseite die Muskularbeit jedoch signifikant ($p < 0,001$).

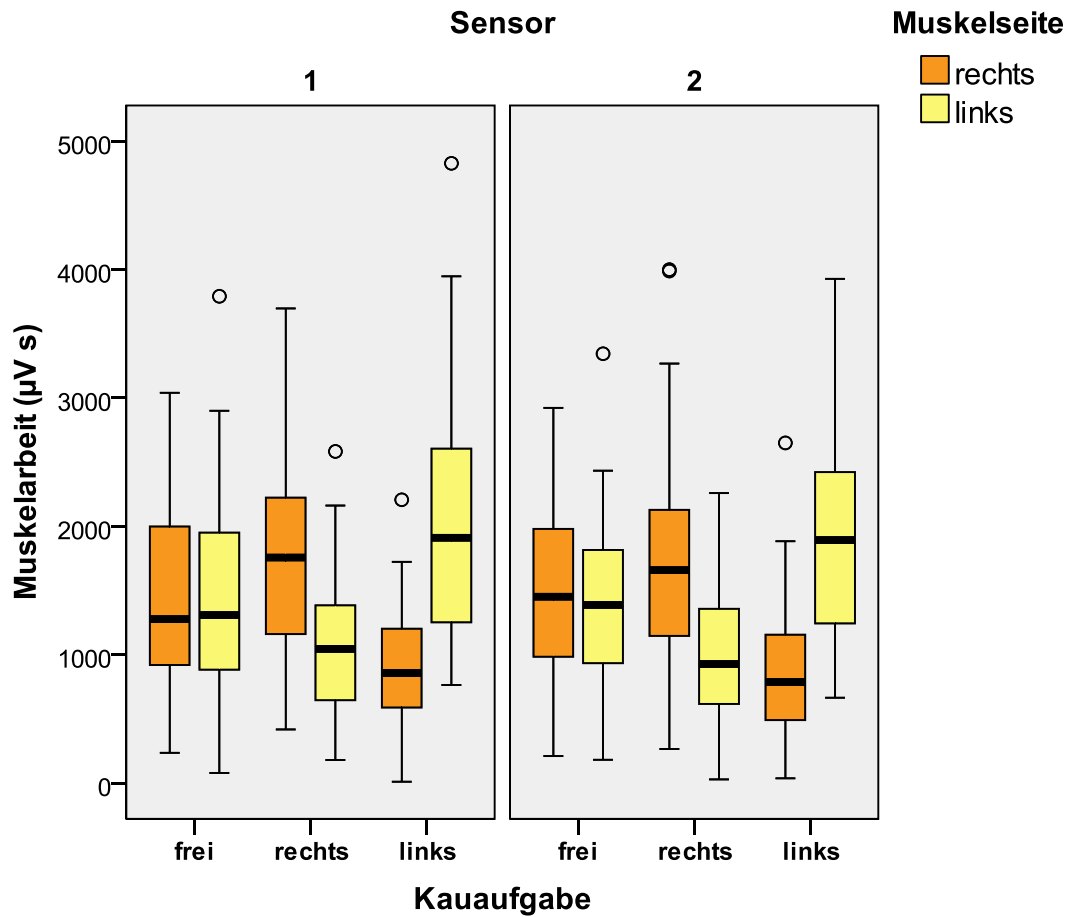


Abb. 15: **Muskelarbeit des M. masseter [μ Vs] auf der rechten und linken Seite in Abhängigkeit von der Kauaufgabe und Sensortyp.**

Abbildung 15 zeigt, dass die höchsten Werte für die Muskelarbeit beim Linkskauen beim linken M. masseter gemessen wurden. Die niedrigsten Werte fanden sich beim rechten M. masseter, ebenfalls beim Linkskauen. Beim Vergleich der Messwerte vom rechten und linken M. masseter fällt auf, dass beim freien Kauen die Muskelarbeit auf beiden Seiten fast ausgeglichen ist, während beim angewiesenen Rechtskauen im rechten Masseter eine deutlich höhere Muskelarbeit als im linken Masseter gemessen wurde. Beim angewiesenen Linkskauen ist die Muskelarbeit im linken Masseter noch höher als auf der rechten Seite beim Rechtskauen.

4.7 Asymmetrieindex (AI)

In Tabelle 13 zeigt die statistische Analyse der aus jedem Messvorgang errechneten Asymmetrieindices für alle 18 Probanden in Abhängigkeit vom Sensortypen, der Sitzung und der Kauaufgabe. Der Asymmetrieindex wird durch die Kauaufgabe signifikant beeinflusst ($p < 0,001$). Die Sensorgestaltung beeinflusst den Asymmetrieindex nicht signifikant ($p = 0,424$). Kauaufgabe und Sensorgestaltung wirken sich jedoch gemeinsam signifikant auf den Asymmetrieindex aus ($p = 0,023$).

Tabelle 13: **Deskriptive Analyse der errechneten Werte des Asymmetrieindex [%].**

(fk = freies Kauen, rk = Rechtskauen, lk = Linkskauen, SD = Standardabweichung)

				Asymmetrieindex [%]					
				fk		rk		lk	
				Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Sitzung	1	Sensortyp	1	-3,61	34,96	24,25	21,29	-38,06	22,55
			2	-0,72	34,48	23,50	24,32	-37,97	23,62
	2	Sensortyp	1	2,28	28,40	24,47	23,45	-39,00	26,14
			2	5,42	30,38	28,06	25,82	-39,47	24,58
	3	Sensortyp	1	-1,17	23,39	24,58	20,87	-37,53	24,55
			2	-1,86	26,80	26,19	20,18	-40,44	23,35

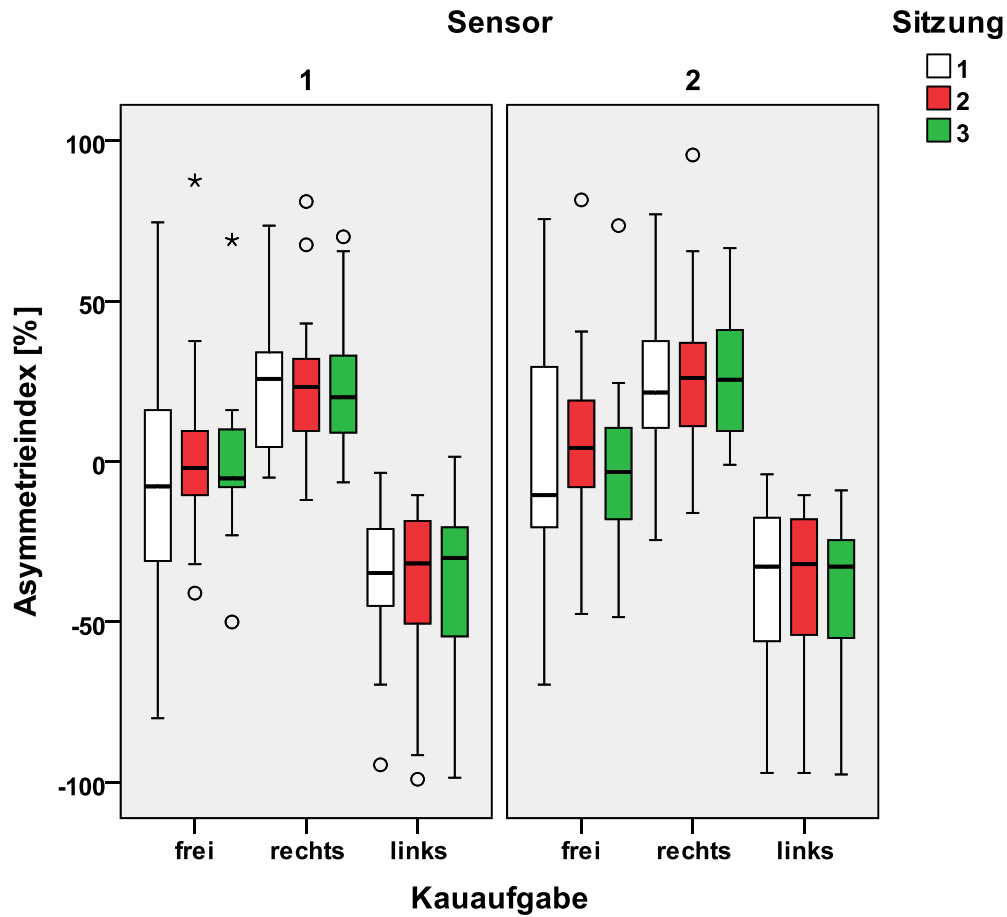


Abb. 16: Asymmetrieindex [%] in Abhängigkeit von Kauaufgabe, der Sitzung und der Sensorgestaltung.

Die Abbildung 16 zeigt geschlechtsunspezifisch, dass die Verteilung der errechneten Asymmetrieindices beim freien Kauen überwiegend im negativen Bereich liegt. Beim Rechtskauen liegen die Werte des 25. bis 75. Perzentils überwiegend im positiven Bereich und beim Linkskauen liegen die Werte stärker im negativen Bereich als beim freien Kauen. Die größte Streuung findet sich für beide Sensortypen beim freien Kauen in der ersten Sitzung.

4.8 Angewiesener seitenbezogener Kauindex (Deliberate Chewing Index / DCI)

Tabelle 14 gibt Mittelwerte und Standardabweichungen der DCI-Werte für den Vergleich der Muskelarbeit des Masseters einer Seite beim angewiesenen

Rechtskauen mit der Muskelarbeit desselben Masseters beim Linkskauen wieder.

Tabelle 14: **Mittelwerte und Standardabweichungen der errechneten Deliberate Chewing Indices [%] über alle Sitzungen bei beiden Sensortypen.** (SD = Standardabweichung)

				Deliberate Chewing Index [%]			
				rechts		links	
				Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
Sensortyp	1 Sitzung	1		32,67	20,94	-30,56	19,58
		2		34,56	26,45	-29,28	19,35
		3		33,72	23,87	-30,00	18,91
	2 Sitzung	1		30,00	25,47	-32,22	19,97
		2		36,06	25,34	-32,39	22,22
		3		36,56	25,93	-32,72	15,25

Bei der statistischen Analyse der Werte aus Tabelle 14 ergibt sich, dass der DCI signifikant mit der Körperseite korreliert ($p < 0,001$). Das bedeutet, dass die Muskelarbeit auf der rechten Seite beim Rechtskauen höher ist als auf der linken Seite. Dasselbe gilt für die linke Seite: Hier ist die Muskelarbeit beim Linkskauen höher als rechts. Für die Abhängigkeit des DCI von Seite und Sensortyp ergibt sich ein p-Wert von 0,053. Das Signifikanzniveau wird nicht erreicht.

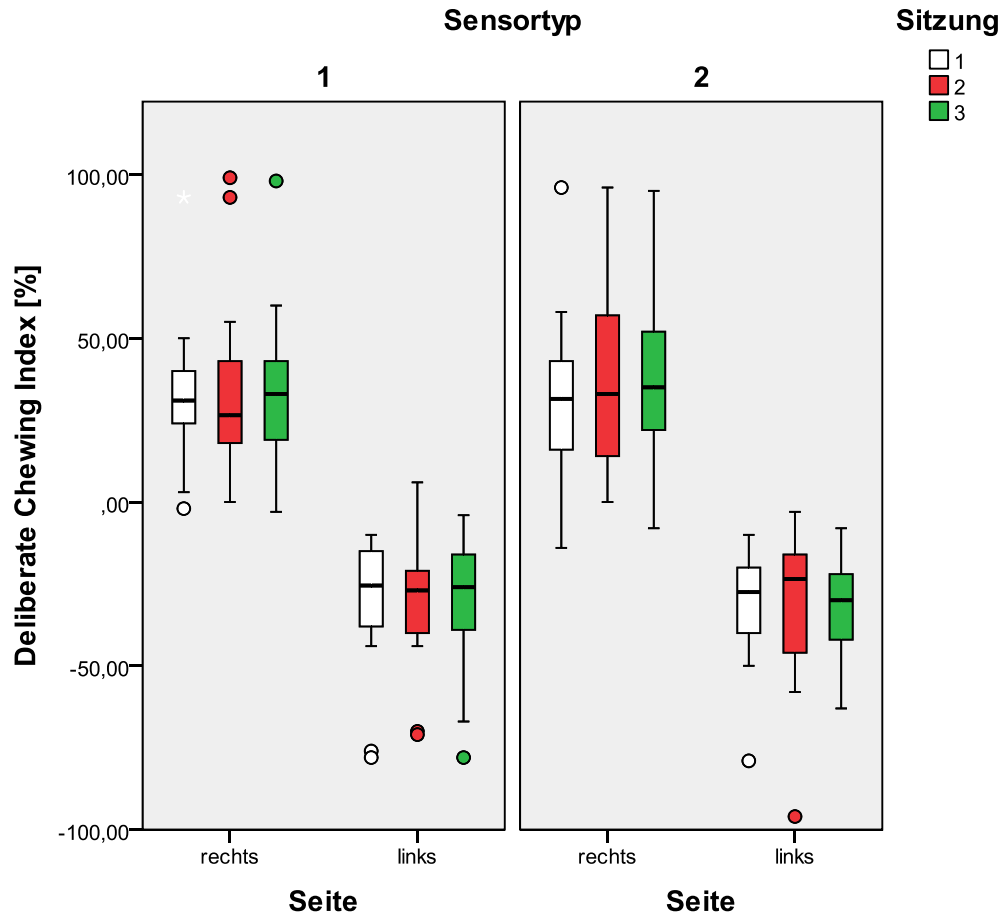


Abb. 17: DCI [%] in Abhängigkeit vom Sensortypen, Sitzung und Kauseite.

Abbildung 17 zeigt die Verteilung der Deliberate Chewing Indices in Abhängigkeit vom Sensortyp, von der Sitzung und der Kauseite. Beim Sensortyp 1 finden sich dreimal mehr Ausreißer und Extremwerte als beim Sensortyp 2. Die Streuung der Werte ist beim Sensortyp 2 auf der rechten Körperseite am größten. Die Werte liegen bei allen 3 Sitzungen für die rechte Kauseite im positiven und für die linke Kauseite im negativen Bereich.

5 Diskussion

5.1 Diskussion der Methode, des Probandenkollektivs und der verwendeten Materialien

Ziel der Studie war es, den Einfluss verschiedener Versuchsbedingungen auf bestimmte Kauparameter zu untersuchen. Bei den untersuchten Kauparametern handelt es sich um den Asymmetrieindex (AI), den Deliberate Chewing Index (DCI), die Anzahl der Kauzyklen, die Dauer der Kausequenz, die Frequenz der Kausequenz und die totale Muskelarbeit des rechten und linken M. masseters. Es wurde der Einfluss, den die Faktoren Sensorgestaltung, Sitzung und Kauaufgabe auf diese Parameter ausüben, untersucht.

Die untersuchten Parameter dienen in Studien oftmals zur Beurteilung der Kaufunktion. Sie variieren individuell und spiegeln die Adaptation des Kausystems an die Beschaffenheit des Kauguts in Größe und physikalischen Eigenschaften wider (Woda et al., 2006).

Die Auswahl des Probandenkollektivs erfolgte nach Einschlusskriterien. Es wurde besonders Wert auf funktionsgesunde Probanden gelegt, um möglichst vergleichbare Messwerte zu erhalten. Aus diesem Grunde wurden die Probanden zu Beginn der Messungen auf ihre Unterkiefergrenzbewegungen hin untersucht. Es wurde darauf geachtet, dass keine Mobilitätseinschränkungen vorhanden waren.

Die Messungen wurden bei jedem Probanden an drei annähernd aufeinanderfolgenden Tagen gemäß dem Versuchsprotokoll durchgeführt. Die Messdurchläufe wurden an jedem der Messtage mit zwei verschiedenen Sensortypen durchgeführt. Bei beiden Sensortypen handelte es sich um Modelle des Jaw Motion Analyzer der Firma Zebris mit den Bezeichnungen CMS JMA V5CS (Sensortyp 1) und CMS 20S A4USB (Sensortyp 2). Bölöni (2002), Verch (2002) und Best (2010) haben in Studien die Reliabilität und Validität der durch das JMA Registriersystems gewonnenen Daten belegt.

Ein paraokklusaler, metallischer Behelf diente dazu, die Sensoren im Unterkieferfrontzahnbereich so anzubringen, dass die uneingeschränkte Bewegungsfreiheit des Unterkiefers gewährleistet war. Lediglich der Lippenschluss war durch die Form des Behelfs geringfügig beeinträchtigt.

Für die Ableitung der Muskelaktivität mittels EMG-Technik wurden handelsübliche und im Praxisalltag gebräuchliche Gel-Elektroden benutzt und vor dem Aufkleben wurde auf eine gründliche Hautreinigung geachtet. Die Position der Elektroden wurde vor dem Aufkleben definiert und auf eine Folie übertragen. Mithilfe dieser Folie konnten die Elektroden in den Folgesitzungen exakt an derselben Stelle repositioniert werden. Dies diente dazu, den Einfluss der Elektrodenposition auf die Ergebnisse in den drei Untersuchungssitzungen so gering wie möglich zu halten und dadurch eine hohe Reproduzierbarkeit der Werte zu gewährleisten (Castroflorio et al., 2008).

Um einen möglichst standardisierten Kauvorgang registrieren zu können, wurde als standardisiertes Kaugut Weingummi (Goldbären, Fa. Haribo, Bonn) eingesetzt. Sie bieten den Vorteil, dass überwiegend ausladende und gleichmäßige Kaubewegungen gewonnen und bis zum finalen Schluckakt aufgenommen werden konnten (Kravchenko, 2011). Alternativ hätten standardisierte artifizielle Kauprüfkörper aus Elastomeren eingesetzt werden können, wie sie z.B. bei van der Bilt (1991) und Mioche (1995) eingesetzt wurden. Da diese nicht essbar sind, wurden die Probanden angewiesen, eine bestimmte Anzahl an Kauschlägen durchzuführen und danach die Proben auszuspucken. Standardisierte artifizielle Kauprüfkörper eignen sich gut zur Messung der Kaueffektivität und Kauleistung (Woda et al., 2006; Olthoff et al., 1984).

Die Probanden führten verschiedene Arten von Kauaufgaben durch. Es wurde dabei unterschieden zwischen freiem Kauen (FK), angewiesenem Rechtskauen (RK) und angewiesenem Linkskauen (LK). Die Weingummis wurden den Probanden mit einer Pinzette auf die Zunge gelegt. Danach wurde die Registrierung gestartet und die Probanden führten die Kauaufgaben aus. Nach dem finalen Schluckakt wurde die Registrierung gestoppt. Die Aufzeichnung der Kaubewegungen und der EMG-Signale erfolgte mithilfe der Software WinJaw.

Eine ergänzende Analysesoftware gab die untersuchten Parameter AI, DCI, Frequenz der Kausequenz, Dauer der Kausequenz, Anzahl der Kauzyklen und Muskelarbeit aus.

Die vorliegende Studie konnte zeigen, dass von den untersuchten Faktoren die Kauaufgabe einen wesentlichen Einfluss auf die gemessenen Kaufunktionsparameter hat. Die Aufgabe wirkte sich signifikant auf alle drei kinematischen Parameter (Anzahl der Kauzyklen $p=0,033$, Dauer der Kausequenz $p=0,034$, Frequenz der Kausequenz $p=0,003$) und auf den Asymmetrieindex ($p<0,001$) aus. Abhängig von der Seite zeigte sich auch eine signifikante Beeinflussung der Muskelarbeit ($p<0,001$): Beim freien Kauen war die Muskelarbeit auf beiden Seiten ausgeglichen, beim Rechtskauen war sie rechts höher und beim Linkskauen auf der linken Seite höher. Lediglich der DCI scheint von der Kauaufgabe unbeeinflusst gewesen zu sein. Der Faktor „Sitzung“ wirkte sich auf die Kauzyklusdauer signifikant aus ($p=0,034$). Es zeigte sich, dass die Kauzyklusdauer der ersten Sitzung signifikant höher war als die der zweiten ($p<0,001$) und dritten Sitzung ($p<0,001$). Der Unterschied der Kauzyklusdauern der zweiten und dritten Sitzung war nicht mehr signifikant ($p=0,142$). Die Kaufrequenz stieg von Sitzung zu Sitzung signifikant an ($p=0,005$). Der Faktor „Sensor“ spielte in dieser Untersuchung eine eher untergeordnete Rolle, jedoch ließ sich eine signifikante Abhängigkeit des AI von der Wechselwirkung der Kauaufgabe und der Sensorgestaltung nachweisen ($p=0,023$). Es zeigte sich außerdem eine Tendenz zur Abhängigkeit des DCI von der Wechselwirkung Seite und Sensor ($p=0,053$).

5.2 Studien zum Einfluss der Messsitzung

Lassauzay et al. veröffentlichten 2000 eine Studie mit dem Ziel, die Variabilität individueller Kaumuster anhand von Testnahrung aus Weingummi vier verschiedener Härtegrade zu untersuchen. 15 Probanden wurden in vier Sitzungen mit einwöchigem Abstand untersucht. Die vier verschiedenen Testnahrungen wurden jeweils dreimal pro Sitzung präsentiert. Es wurden, wie auch in der vorliegenden Studie, sowohl kinematische als auch EMG-Daten

aufgezeichnet. Die EMG-Aktivität wurde beidseits am M. temporalis und M. masseter mit jeweils zwei Oberflächen-Gel-Elektroden aufgezeichnet. Die kinematischen Daten wurden mit dem Articulograph AG100 der Firma Carstens, Göttingen, registriert. Es wurden sowohl Unterschiede zwischen den Kaumustern der verschiedenen Individuen untereinander untersucht als auch die Variabilität der Kaumuster beim einzelnen Individuum. Folgende Parameter wurden untersucht: die Anzahl der Kauzyklen, die Muskelarbeit, die Kaufrequenz, die Dauer der Öffnungs-, Schließ- und Okklusalkontaktphase des Kauzyklus, die Öffnungs- und Schließgeschwindigkeit sowie die vertikale und laterale Amplitude als Größe für die Auslenkung des Inzisalpunktes während der Kaubewegungen. Die Autoren stellten eine große Variabilität der Kaumuster zwischen den Probanden fest. Die größte Variabilität zeigte sich bezüglich der Anzahl der Kauzyklen, der Frequenz der Kausequenzen, der Öffnungs- und Schließgeschwindigkeiten sowie der lateralen Amplitude. Die Variabilität bei diesen Parametern lag bis zu 8-fach höher als für die Variabilität der Kauzyklen innerhalb einer Kausequenz. Die Variabilität der Kaumuster zwischen den einzelnen Sitzungen wurde nur für das härteste Produkt angegeben. Die größte Variabilität zwischen den Sitzungen wurde bei der vertikalen Amplitude, der Öffnungs- und der Schließgeschwindigkeit gefunden. Es war ein Anstieg der Werte im Verlauf der Sitzungen feststellbar. Für die Kauzyklusanzahlen fanden die Autoren einen Anstieg von der ersten zur zweiten Sitzung. Es war eine signifikante Korrelation im Verlauf der zweiten und dritten Sitzung zwischen der Schließdauer und der Frequenz der Kausequenz erkennbar. Die Öffnungsdauer und die laterale Amplitude veränderten sich nicht. Die Frequenz der Kausequenz wurde in der vorliegenden Studie durch die Messsitzung signifikant beeinflusst, was mit den Ergebnissen von Lassauzay et al. (2000) übereinstimmt. Während in der vorliegenden Studie die Dauer des gesamten Kauzyklus gemessen wurde, unterteilen Lassauzay et al. (2000) die Kauzyklusdauer in drei Phasen, nämlich die Öffnungsphase, die Schließphase, sowie die Phase okklusaler Kontakte. Wie auch in der vorliegenden Studie stellten die Autoren fest, dass die Messwerte der ersten Sitzung deutlich von den Werten der folgenden Sitzungen abwichen, da psychoemotionale Faktoren die Probanden in der ersten Sitzung stark beeinflussten. Zu diesen Faktoren zählen der unbekannte Experimentaufbau und die ungewohnte Situation.

Lassauzay et al. (2000) empfehlen daher, die Werte der ersten Messsitzung auszuschließen.

Peyron et al. veröffentlichten 2002 eine Studie, welche den Effekt unterschiedlicher Härtegrade auf die Kieferbewegungen und Muskelaktivität beim Kauen von viskos-elastischer Testnahrung untersuchte. Die Motivation zur Durchführung dieser Studie entstand aus dem bisher geringen Wissensstand über die Beziehung zwischen physikalischen Eigenschaften verschiedener Testnahrungen und der daraufhin entstehenden motorischen Antwort. Peyron et al. (2002) wählten ein Probandenkollektiv von 15 männlichen Probanden mit dem Durchschnittsalter von $22,6 \pm 1,3$ Jahren. Wie auch in der zuvor beschriebenen Studie wurden vier Messsitzungen mit einwöchigem Abstand durchgeführt, in denen jeweils EMG-Daten und kinematische Daten registriert wurden. Die EMG-Aktivität wurde wiederum am M. temporalis und am M. masseter auf beiden Seiten nach gründlicher Hautoberflächenvorbereitung abgeleitet. Als Testnahrung dienten wieder viskos-elastische Testnahrungsproben aus Weingummi vier verschiedener Härtegrade. Die Daten der ersten Sitzung wurden nicht für die Auswertung genutzt. Die Sitzung diente lediglich zur Gewöhnung der Probanden an die Versuchsbedingungen. Die Messwerte der zweiten, dritten und vierten Sitzung wurden jeweils gemittelt und anschließend statistisch ausgewertet. Die Studie belegt, dass die Anzahl der Kauzyklen und die Dauer der Kausequenz mit der Härte der Testnahrung ansteigen. Dieser Umstand wurde auch schon durch verschiedene andere Studien belegt. Des Weiteren bestätigen die Ergebnisse, dass die EMG-Aktivität der Kaumuskeln bei härteren Produkten höher ist als bei weicheren Produkten (Stohler, 1986; Ferraio und Sforza, 1996). In Bezug auf die kinematischen Daten fanden sich lediglich bei der vertikalen Amplitude und bei der Dauer der okklusalen Kontakte signifikante härtegradabhängige Veränderungen. Zuvor durchgeführte Studien anderer Autoren zeigten, dass mit ansteigender Härte ein Anstieg (Horio und Kawamura, 1989; Duizer et al., 1996; Peyron et al., 1997), ein Abfall (Pröschel und Hofmann, 1988; Karlsson und Carlsson, 1989) oder gar kein Effekt (Plesh et al., 1986; Bishop et al., 1990) der vertikalen Amplitude zu verzeichnen war. Diese Autoren nutzten allerdings im Gegensatz zu Peyron et al. (2002) keine standardisierte Testnahrung definierter Härtegrade. Bei der Analyse der einzelnen Kauzyklen

stellte sich heraus, dass die vertikale Amplitude und die Dauer der einzelnen Phasen des Kauzyklus im Verlauf des Kauzyklus kleiner wurden. Diese Beobachtung bestätigt die Ergebnisse anderer Autoren (Schindler et al., 1998; Jemt et al., 1979). Peyron et al. geben an, dass die Muskelarbeit und die vertikale Amplitude die signifikantesten Unterschiede zwischen Produkten unterschiedlicher Härte liefern und dass sich dabei die Werte des zweiten, dritten, vierten und fünften Kauzyklus am besten zur statistischen Auswertung eignen. Auch die Studie von Peyron et al. (2002) empfiehlt, mindestens zwei Messsitzungen für die Untersuchung von Kauparametern zu wählen und die Werte der ersten Messsitzung nicht mit in die statistische Auswertung einzubeziehen, wenn der Versuchsaufbau eine psychoemotionale Auswirkung auf die Probanden haben könnte. Diese Beobachtung stimmt mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie überein. Anders als bei der vorliegenden Studie, in der die Werte von M. masseter auf der rechten und linken Seite getrennt ermittelt und ausgewertet wurden, mittelten Peyron et al. (2002) die EMG-Aktivität von M. masseter und M. temporalis beider Seiten. Dadurch war eine direkte Vergleichbarkeit der Studien in Bezug auf die absoluten Zahlenwerte nicht möglich.

Eine Studie von Piancino et al. (2005) hat sich mit dem Adaptationsprozess von Kaumustern an neue Totalprothesen beschäftigt, wobei ebenfalls EMG-Aktivität und kinematische Daten ausgewertet wurden. Es wurden vier Messsitzungen durchgeführt: mit der alten Totalprothese, am Tag des Einsetzens der neuen Totalprothesen, einen Monat und drei Monate nach Einsetzen. Das Probandenkollektiv umfasste 7 männliche Totalprothesenträger im Alter von $63,2 \pm 6,9$ Jahren. Die neuen Totalprothesen wurden mittels der Gerber-Technik angefertigt. Jede Kauaufgabe wurde sechsmal wiederholt und für 10 Sekunden auf beiden Seiten aufgezeichnet. Für die kinematischen Registrierungen wurde der Kinesiograph K6 benutzt, zusätzlich wurden EMG-Elektroden auf M. masseter und M. temporalis ant. beider Seiten angebracht. Es wurden durchschnittliche Werte für die Kauzyklen berechnet, wobei die Werte des ersten Kauzyklus außer Acht gelassen wurden. Verschiedene kinematische Parameter und die EMG-Aktivität wurden auf Beeinflussung durch die Faktoren Kauaufgabe, Kauseite, Sitzung und registrierte Seite hin untersucht. Piancino et al. (2005) fanden für M. masseter signifikante Interaktionen zwischen der

Kauseite und der aufgenommenen Seite ($p < 0,05$), sowie für Kauseite, der registrierten Seite und der Sitzung ($p < 0,05$). Für M. temporalis ant. fanden sich signifikante Interaktionen zwischen der Kauaufgabe, der Kauseite und der Sitzung ($p < 0,05$). Die EMG-Aktivität des M. temporalis ant. war auf der Kauseite höher als auf der Balanceseite ($p < 0,05$) und das Kaumuster wurde signifikant durch die Sitzung beeinflusst ($p < 0,05$). Bei der ersten Messung mit den neuen Prothesen zeigten sich kleinere Kaumusterbreiten als mit der alten Prothese und als nach einem Monat. In der Messung nach drei Monaten Tragezeit war die Kaumusterbreite größer als mit dem alten Zahnersatz. Die laterale Exkursion des Unterkiefers war abhängig von der Sitzung ($p < 0,05$) und zeigte höhere Werte nach ein und drei Monaten Tragezeit als zum Zeitpunkt des Einsetzens der neuen Totalprothesen. Für die Öffnungs- und Schließgeschwindigkeiten zeigten sich keine Veränderungen und auch keine signifikanten Einflussfaktoren durch die untersuchten Faktoren. Die Studie belegt, dass der M. masseter der Kauseite mit einer über lange Zeit getragenen Totalprothese mehr Aktivität aufweist als der M. masseter auf der Balanceseite. In der vorliegenden Studie zeigt sich dieser Umstand anhand des DCI. Die Muskelaktivität der Kauseite war signifikant höher ($p < 0,001$) als die Muskelaktivität der Balanceseite.

Po et al. (2011) untersuchten 21 Patienten im Alter von $29,2 \pm 9,1$ Jahren auf die Variabilität des Kauverhaltens hin. Die Besonderheit dieser Studie lag darin, dass die Probanden in ihrer gewohnten und natürlichen Umgebung untersucht wurden. Eine erste Sitzung wurde in den Räumlichkeiten einer Klinik durchgeführt. Bei dieser Sitzung wurden von den Probanden bestimmte Aufgaben erfüllt: Sie sollten Brot, Möhren und Weingummi auf ihre gewohnte Weise kauen. Danach sollten sie mit maximaler Kraft in Interkuspitation pressen. Die zweite, dritte und vierte Messung erfolgte in der natürlichen Umgebung der Probanden. Dafür wurden sie mit portablen EMG-Messgeräten ausgestattet, welche die Probanden selber anlegten. Die entsprechenden Instruktionen erhielten sie in der ersten klinischen Sitzung. Die zweite, dritte und vierte Messung erfolgte an drei verschiedenen Tagen. Die Probanden legten die Messgeräte für jeweils drei Stunden pro Tag an, so dass eine Mahlzeit mit in die Messung eingeschlossen war. Zusätzliche wurden detaillierte Mahlzeiten-Tagebücher geführt. Die Dauer der Kausequenz und die

Frequenz der Kauepisoden wurden nicht wie in der vorliegenden Studie durch ein Registriergerät zur Erfassung kinematischer Daten ermittelt, sondern anhand der Muskelaktivität aus dem Elektromyogramm ausgewertet. Es zeigte sich eine große inter- und intraindividuelle Variabilität der verzehrten Lebensmittel und Mengen. Die durchschnittliche Kausequenzdauer lag bei 13,0 s. Die durchschnittliche Frequenz aller Kauepisoden lag bei 1,57 Hz (Median 1,58 Hz). Die durchschnittliche Frequenz schwankte während der Aufnahmetage nicht und war unabhängig vom Geschlecht. Eine deutliche interindividuelle Variabilität fanden Po et al. (2011) bei der Kaufrequenz ($p < 0,001$). Sie korrelierte stark mit der aus den standardisierten Übungen der ersten Sitzung geschätzten Frequenz ($ICC = 0,88$). In der Studie von Po et al. (2011) wurden erstmalig Daten ausgewertet, welche in der natürlichen Umgebung des Probanden aufgezeichnet wurden. Die auf diese Art und Weise gewonnenen Kausequenzdauern waren niedriger als diejenigen aus den kontrollierten Klinik-Versuchsbedingung der ersten Sitzung. Dabei stellt sich die Frage, ob die niedrigeren Werte der zweiten, dritten und vierten Sitzung durch Trainingseffekte (Hellmann et al., 2011), durch psychologische Faktoren oder durch den Umgebungswechsel hervorgerufen wurden. Des Weiteren ergibt sich die Frage, ob Messwerte von im Labor gemessenen Kauparametern generell höher sind als solche, die in der natürlichen Umgebung des Probanden gewonnen werden und inwieweit Messwerten aus klinischen Laborbedingungen vertraut werden kann, um die Kaufunktion von Patienten mit pathologischen Befunden zu untersuchen. Da die Versuchsbedingungen der Studie von Po et al. (2011) sich von den Rahmenbedingungen der vorliegenden Studie unterscheidet, ist sie nur bedingt vergleichbar. Jedoch stützt sie die Ergebnisse der vorliegenden Studie dahingehend, dass sich eine große interindividuelle Variabilität für die Kaufrequenzen der Probanden zeigt, während sich die intraindividuellen Werte als stabil herausstellten.

5.3 Studien zum Einfluss der Kauaufgabe

Farella (2008) führte eine Untersuchung der Kaumuskelaktivität des M. temporalis ant. und M. masseter der bevorzugten Kauseite während der

Ausübung verschiedener funktionaler und nicht funktionaler Bewegungen durch. Es wurden zwei Sitzungen im Abstand von drei bis sieben Tagen durchgeführt. Insgesamt wurden 30 verschiedene Kaubewegungsübungen von den Probanden ausgeübt. Die 11 Probanden (Durchschnittsalter $34,6 \pm 10,8$ Jahre) gaben zunächst ihre bevorzugte Kauseite an, welche dann als die ipsilaterale Seite bezeichnet wurde. Auf dieser Seite wurden in der zweiten Sitzung dann EMG-Oberflächenelektroden im Bereich des M. temporalis ant., M. masseter und der suprahyoidealen Muskulatur angebracht. Während der ersten Sitzung wurde das Versuchsprotokoll erklärt und die Patienten wurden angewiesen, die Übungen, die in der Messsession registriert werden sollten, mindestens dreimal zuhause durchzuführen. In der zweiten Sitzung bekamen die Probanden softwaregesteuert audiovisuelle Anweisungen für die Bewegungsaufgaben. Das eigens für diese Studie geschriebene Programm OTC (Oral task collector) randomisierte die unterschiedlichen Aufgaben. Neben der EMG-Messung wurden auch Videos von den Messsessionen mit einer Digitalkamera aufgezeichnet. Die Aufgaben ließen sich in sechs Gruppen einteilen. Das Beißen mit Maximalkraft führte zu moderater Aktivität der suprahyoidealen Muskeln. Beim Gähnen zeigten die suprahyoidealen Muskeln höchste Aktivierung verbunden mit relativ niedriger Aktivität der Elevatoren. Beim Kauen von harten Speisen und Kaugummi zeigten alle Muskeln eine hohe Aktivität. Moderate Aktivierung beider Elevatoren sowie der suprahyoidealen Muskeln wurde durch ipsilaterales Eckzahnknirschen, Klappern mit den Molaren, rhythmisches Pressen und statisches Beißen auf den Inzisalkanten der Frontzähne hervorgerufen. Bei Aufgaben wie Husten, Lesen, Trinken, Knirschen auf der kontralateralen Seite, rhythmischem Beißen auf die Inzisalkanten, Kopfbeugen und laterotrudierten und protrudierten Positionen zeigten die Elevatoren eine sehr geringe Aktivität, während die suprahyoidealen Muskeln eine moderate Aktivierung aufwiesen. Bei den verbleibenden funktionalen und nicht funktionalen Aufgaben war die Aktivität aller registrierter Muskeln gering. Die durchschnittlichen Aktivitätslevels aller Muskeln waren beim Kauen und auch teilweise bei nicht funktionalen angewiesenen Aufgaben am höchsten. Diese Aufgaben waren statisches und dynamisches Beißen auf der Inzisalkante, rhythmisches Pressen und das Klappern der Molaren. Die höchsten EMG-Werte wurden bei mehr als der Hälfte der Probanden beim Kauen harter Speisen (Bündnerfleisch und Lakritz) gemessen. Dabei zeigten

sich größere Unterschiede beim M. masseter als beim M. temporalis. M. masseter war beim inzisalen Beißen aktiver, M. temporalis ant. zeigte mehr Aktivität beim Pressen und rhythmischen funktionalen und nicht-funktionalen Aufgaben. Farella (2008) zeigte mit dieser Studie, dass die Muskelaktivität der verschiedenen Kaumuskeln davon abhing, ob es sich um funktionale oder nicht funktionale Beanspruchung handelte.

Pröschel und Morneburg (2002) beschäftigten sich in einer Studie mit der Beziehung von EMG-Aktivität zu Beißkräften beim unilateralen Kauen und isometrischen Beißen. Des Weiteren verglichen sie die EMG-basierte Kraftabschätzung mit tatsächlich gemessenen Kaukräften bei verschiedenen Kauaufgaben. Das Probandenkollektiv bestand aus 8 weiblichen und 1 männlichen Probanden im Alter von 52 ± 8 Jahren. Alle Probanden trugen in einem Quadranten dreigliedrige, auf zwei Implantaten getragene Brücken im Seitenzahnbereich, welche sich sechs Monate *in situ* befanden. Für die Untersuchung wurden die Abutments gegen spezielle Abutments ausgetauscht, in welche Kraftmessungs-Module eingebaut wurden, so dass eine intraorale Kaukraftmessung erfolgen konnte. Auf den Abutments wurden Duplikate der Brücken provisorisch befestigt. Die EMG-Aktivität wurde mit Oberflächen-Gel-Elektroden beidseits am M. masseter und M. temporalis ant. aufgezeichnet. Zuerst wurde Weingummi (Haribo Goldbären) auf der Seite der Brücke gekaut und die Aktivität wurde für 20 s aufgezeichnet. Dabei wurden die Kraftsignale beider Abutments addiert. Die zweite Kauaufgabe bestand aus isometrischem Beißen auf eine elektronische Bissgabel mit 6 mm Höhe. Die Probanden wurden dabei angewiesen, die Zähne immer in Kontakt zur Bissgabel zu halten. Anschließend sollten sie dann in kauähnlichem Rhythmus bis zur maximalen Beißkraft kontrahieren und loslassen. Die gemessenen Kraftwerte der Abutments und der Bissgabel differierten um $\pm 4\%$. Die mit der Bissgabel gewonnenen Werte wurden aus der Auswertung ausgeschlossen, da sie lediglich der Vergleichbarkeit mit anderen Studien der Autoren dienen sollten. Für die Auswertung der Beziehung zwischen Muskelaktivität und maximaler Beißkraft wurde der *activity/bite-force ratio* eingeführt. Dieser berechnete sich aus dem Quotienten aus durchschnittlicher Aktivität des Muskels und der durchschnittlich pro Kauaufgabe aufgebrauchten Kraft. Für den Vergleich von EMG-basierten Krafteinschätzungen und tatsächlich gemessenen Kraftwerten

wurden Regressionsfunktionen anhand der EMG-Daten erstellt und mit den durch die Kraftmesser gewonnenen Kraftwerten verglichen. Die *activity/bite-force ratio* von M. masseter und M. temporalis ant. der Arbeitsseite waren doppelt so hoch beim Kauen wie beim Pressen ($p < 0,01$), während die Aktivität auf der Balanceseite nicht signifikant um den Faktor 1,2 erhöht war. Die Aktivität des M. temporalis ant. war 1,4- bis 1,9-mal höher ($p < 0,01$) beim Kauen als beim Pressen. Die EMG-basierten Schätzungen waren in den meisten Fällen deutlich höher als die tatsächlich gemessenen Kräfte. Außer für den M. masseter der Balanceseite waren alle Unterschiede zwischen den EMG-basierten Kraftabschätzungen und den gemessenen Kraftwerten signifikant. Pröschel und Morneburg (2002) diskutierten die schwache Korrelation von Aktivität und Beißkraft durch die Aktivierung von tieferen Muskelschichten, deren EMG-Aktivität sich durch die Oberflächen Elektroden nicht ableiten lässt (Hylander und Johnson, 1989). Sie wiesen darauf hin, dass EMG-basierte Kaukraftabschätzungen weniger brauchbare Werte liefern als der *activity/bite-force ratio*. Die Vorhersage von Kaukräften anhand von EMG-basierten Regressionsgraden führte zu überschätzten Werten. Kräfte, die beim Kauen entstanden, gingen mit höherer Aktivität einher als Kräfte, die beim isometrischen Beißen entstanden. Der Mehrbetrag variierte bei den Muskeln und war am geringsten beim M. masseter der Balanceseite. Sowohl die Studie von Pröschel und Morneburg (2002) als auch die vorliegende Studie belegen, dass das Verhältnis von Muskelarbeit der Arbeitsseite und Muskelarbeit der Balanceseite abhängig von der Kauaufgabe ist.

Blanksma und van Eijden (1995) untersuchten in einer Studie an 5 männlichen Probanden zwischen 37 und 43 Jahren, ob es bei dynamischen Kauaufgaben eine ähnliche regionale Spezialisierung von Muskelfasern des M. temporalis und M. masseter gibt, wie sie schon in früheren Studien für statische Beißübungen gefunden wurden (Blanksma und van Eijden, 1990; Blanksma et al., 1992). Es wurden gleichzeitig die EMG-Aktivität mit jeweils sechs unterschiedlich tief inserierten Feindrahtelektroden im rechten M. temporalis und M. masseter gemessen und zusätzlich die Unterkieferbewegungen mit dem elektronischen Registriersystem Sirognathograph (Siemens) aufgezeichnet. Vor Beginn des Experiments wurden mit den Probanden verschiedene Öffnungs- und Schließbewegungen in habitueller und schneller Geschwindigkeit geübt.

Während der Messung umfasste jede Sequenz mindestens 20 Kauzyklen. Dabei wurde die rechte Seite als Arbeitsseite und die linke als Balanceseite definiert. Testnahrung für die Kauaufgaben waren Kaugummis und Lakritz in standardisierten Größen. Zum Schluss wurden die Probanden angewiesen, in Interkuspidation und auch in Inzisalkontakt der Frontzähne mit maximaler Kraft zusammenzubeißen. Für den M. masseter zeigte sich in den tiefen Regionen eine deutliche anteroposteriore Differenzierung, welche in den oberflächlichen Kompartimenten ausblieb. Der oberflächliche Muskelanteil unterschied sich vom tiefen Teil in Amplitude und Auftreten der EMG-Aktivität bei fast allen Aufgaben. McMillan und Hannam (1992) beschrieben bereits, dass Kompartimente motorischer Einheiten unterschiedlicher Masseterregionen für unterschiedliche Aufgaben zuständig sind, was durch die Ergebnisse von Blanksma und van Eijden (1995) gestützt wird. Beim inzisalen maximalen Zusammenbeißen ergab sich eine niedrigere EMG-Aktivität als in Interkuspidation. Ferner zeigte sich bei maximalem Zusammenbeißen in Frontzahnkontakt eine geringere Aktivität im M. temporalis als im M. masseter. Der M. masseter wies höhere Aktivität auf als der M. temporalis, wie auch schon durch andere Studien (Møller, 1966; McDonald und Hannam, 1984; Wood, 1987) gezeigt wurde. Belser und Hannam (1986) fanden heraus, dass der M. masseter bei maximalem Zusammenbeißen in Frontzahnkontakt höhere Aktivität in der oberflächlichen als in der tiefen Region zeigt. Die tiefen Masseterschichten und M. temporalis wiesen bei maximalem Zusammenbeißen in Frontkontakt geringere Aktivitätswerte auf als der oberflächliche Anteil des M. masseter. Während der Kauaufgaben mit Kaugummi und Lakritz fanden sich höhere Aktivitäten im M. temporalis und im oberflächlichen M. masseter der Arbeitsseite. In posterioren Regionen des M. Masseter war die Aktivität von Arbeits- und Balanceseite ausgeglichen. Während des Kaugummikauens waren die Unterschiede in der Aktivität zwischen Balanceseite und Arbeitsseite beim oberflächlichen M. masseter groß, beim M. temporalis mittelmäßig und in tiefen Schichten des M. masseter klein. Blanksma und van Eijden (1995) fanden weiterhin heraus, dass der Quotient aus Aktivität der Arbeitsseite und Aktivität der Balanceseite für M. masseter beim Lakritzkauen sinkt. Daraus schlossen sie, dass bei harter Nahrung mehr Arbeit der Balanceseite gefordert ist, um mehr Kraft zusammen mit der Arbeitsseite zu generieren. Ähnliche Erkenntnisse gewannen bereits andere Studien (Weijs et al., 1989; Hylander et

al., 1992; van Eijden et al., 1993). Zusammenfassend schlossen die Autoren, dass abhängig von der Kauaufgabe verschiedene Kompartimente von M. temporalis und M. masseter unterschiedlich starke Aktivitäten aufweisen. Anders formuliert beeinflusst die Kauaufgabe die Aktivierung verschiedener Kompartimente der Kaumuskulatur und der Härtegrad der Testnahrung sorgt für unterschiedliche Aktivierungsverhältnisse auf Arbeits- und Balanceseite.

Mioche et al. (1999) untersuchten in einer Studie Unterschiede von Aktivierungsmustern des M. masseter und M. temporalis in Abhängigkeit von Materialeigenschaften bestimmter Nahrungsmittel während freiem und angewiesenem Kauen auf der rechten und linken Seite. Das Probandenkollektiv bestand aus 36 funktionsgesunden Zahnmedizinstudenten (19 männliche, 17 weibliche) zwischen 19 und 22 Jahren. Als Testnahrung wurden Produkte gewählt, die unterschiedliche rheologische Eigenschaften und Härtegrade aufwiesen: Wiener Würstchen ohne Haut aus der Konserve, frische Kokosnuss, Toffee, Erdnuss, französischer Comté und Schweizer Sbrinz. Die Produkte wurden in gleichgroße zylindrische Stücke geteilt (1,5 cm Durchmesser, 1 cm Länge). Es fand pro Proband eine Messsitzung statt, bei der zunächst zwei Testläufe mit Weingummi durchgeführt wurden. Es wurden EMG-Elektroden auf dem rechten und linken M. masseter und M. temporalis platziert. Die Aufzeichnung erfolgte bei jedem Durchgang vom Platzieren auf der Zunge bis zum Herunterschlucken. So wurde jedes Produkt dreimal frei gekaut, dreimal auf der rechten und dreimal auf der linken Seite. Insgesamt ergaben sich also 45 Messungen pro Teilnehmer. Es wurde die Kausequenzdauer, die mittlere Dauer eines einzigen *Bursts*, die maximale und mittlere Spannung eines *Bursts*, die totale Muskelarbeit und die Muskelarbeit pro Kauzyklus ermittelt. Die Aktivität beider Muskeln wurde einerseits verglichen und andererseits addiert, um die totale Muskelarbeit zu ermitteln. Die Auswertung der Daten ergab, dass die Muskelarbeit mit der Härte der Nahrung signifikant stetig anstieg und die Muskelarbeit beim freien Kauen immer signifikant niedriger war als beim angewiesenen Kauen auf einer Seite ($p=0,0036$). Die Autoren schreiben die niedrigere totale Muskelarbeit beim freien Kauen der höheren Kaeffizienz zu. Ursache hierfür war die optimale Bolusplatzierung während der Öffnungsphase des Kauzyklus und die dadurch erleichterte Zerkleinerung im weiteren Verlauf der Kausequenz. Beim angewiesenen unilateralen Kauen entwickelten die

ipsilateralen Muskeln die meiste Muskelarbeit, wobei der M. masseter dabei den größten Anteil leistete. Dies zeigte sich vor allem bei harten Speisen. Der kontralaterale M. masseter entwickelte weniger Muskelarbeit als der kontralaterale M. temporalis. Insgesamt zeigte sich, dass die Eigenschaften der Nahrungsmittel mehr Einfluss auf die Muskelaktivität des M. temporalis als auf den M. masseter hatten. Beim einseitigen Kauen wurde auf der Arbeitsseite eine höhere Aktivität gefunden. Bei manchen Probanden zeigte sich zusätzlich eine starke Aktivitätsabnahme auf der Balanceseite. Bei 15 von 36 Probanden (41%) war die Muskelarbeit bei allen Kauaufgaben ähnlich, bei 20 Probanden (55%) wurde die Muskelarbeit deutlich von der Art der Kauaufgabe beeinflusst. Auch in der vorliegenden Studie war die Muskelarbeit beim unilateralen Kauen auf der Arbeitsseite höher als auf der Balanceseite. Die Muskelarbeit der linken Seite als Arbeitsseite war höher als die Muskelarbeit der rechten Seite als Arbeitsseite. Dies spiegelte sich auch im Asymmetrieindex wider. Mioche et al. (1999) unterschieden während der Messsitzungen nicht zwischen den Werten der rechten und linken Seite. Es konnte daher keine genaue Aussage getroffen werden, welche Seite bei dem Probandenkollektiv die höhere Muskelarbeit leistete. Somit ist ein Vergleich der beiden Studien im Hinblick auf die Verteilung zwischen der Muskelarbeit der rechten und linken Seite nicht möglich. Die Autoren weisen darauf hin, dass die über alle Probanden gemittelten Werte für die Muskelarbeit signifikant niedrigere Muskelarbeit beim freien Kauen ergaben, dass aber durch diese statistische Mittelung individuelle Variabilitäten verdeckt werden. Dieses Phänomen zeigt sich auch bei der vorliegenden Studie: Die Werte der Muskelarbeit wurden nach Sensor, Kauaufgabe und Muskelseite aufgeschlüsselt, aber für alle 18 Probanden gemittelt erhoben. Individuelle Unterschiede lassen sich daher in Bezug auf die Muskelarbeit nicht feststellen. Jedoch zeigt die Anzahl der Kauzyklen einen ähnlichen Effekt: Bei 10 Probanden (55%) lag die Anzahl der Kauzyklen beim angewiesenen Kauen auf der bevorzugten Kauseite näher an der Anzahl der Kauzyklen beim freien Kauen. Man kann vermuten, dass die Anzahl der Kauzyklen beim freien Kauen geringer war. Der Bolus konnte durch die Zunge optimal platziert werden und damit wurde eine höhere Kaueffizienz ermöglicht.

5.4 Studien zum Einfluss der Sensorgestaltung

Es ließen sich in der vorliegenden Studie keine direkten signifikanten Korrelationen zwischen der Anordnung und Gestaltung der Sensoren und den Kaufunktionsparametern feststellen. Es zeigte sich eine schwache, nicht signifikante Korrelation zwischen Sensortyp und Körperseite und dem DCI ($p=0,053$). Weiterhin gab es eine signifikante Korrelation von Kauaufgabe und Sensor, die zusammen den AI signifikant beeinflussten ($p=0,023$). Vergleichsstudien, die diesen Sachverhalt unterstützen, ließen sich nicht finden.

5.5 Studien zu anderen Faktoren mit Einfluss auf die Kausequenz

Eine Studie von Engelen et al. (2005) untersuchte den Einfluss des zu kauenden Produktes und oraler Eigenschaften auf das Schlucken. Bei 266 gesunden Probanden wurde beim Kauen verschiedener Nahrungsmittel die Anzahl der Kauzyklen bis zum Herunterschlucken mithilfe eines optischen Bewegungsanalysesystems (Northern Digital Optotrak) registriert. 87 Probanden des Gesamtkollektivs kauten Frühstückskuchen, Melba Toast (eine sehr dünne und knusprige Toastbrot-Art), Brot und Toastbrot in ungebutterter und gebutterter Form sowie Karotten, Erdnüsse und Käse. Der Rest des Probandenkollektivs bekam ausschließlich ungebuttertes Melba Toast und Brot. Des Weiteren wurde die Kauleistung aller Probanden ermittelt, indem der Grad der Zerkleinerung einer Testnahrung (Optocal Plus) mithilfe einer Siebmethode ermittelt wurde. Zusätzlich wurde die maximale Beißkraft mithilfe eines Kraftmessers ermittelt. Die stimulierte und unstimulierte Speichelflussrate wurde ebenso ermittelt wie die α -Amylase-Aktivität. Die Studie zeigte, dass signifikant mehr Kauzyklen bis zum Schlucken der harten und ungebutterten, also trockenen, Produkte benötigt wurden als für die weichen Produkte. Dies lässt sich laut der Studie vor allem darauf zurückführen, dass es aufwändiger war, den schluckfertigen Bolus zu produzieren, da Feuchtigkeit in Form von Speichel hinzugefügt und das Produkt zerkleinert werden musste. Es wurden im Schnitt 17 Kauzyklen für Kuchen und 63 für Karotten benötigt. Weiterhin zeigte die Studie, dass die Speichelflussrate signifikant negativ mit der Anzahl

der Kauzyklen von Melba Toast und Frühstückskuchen korrelierte (Korrelationskoeffizient -0,13). Der Effekt der Speichelflussrate auf die Anzahl der Kauzyklen ist demnach in dieser Studie sehr gering, was die Autoren darauf zurückführen, dass Probanden ihren eigenen Speichelfluss gewöhnt sind und dieser nicht als beeinflussender Faktor ins Gewicht fällt. Der Effekt der maximalen Beißkraft und Kauleistung auf die Anzahl der Kauzyklen bis zum Herunterschlucken war nur bei Karotten und Erdnüssen signifikant. Eine höhere Beißkraft und eine höhere Kauleistung in Form einer geringeren mittleren Partikelgröße korrelierte mit einer geringeren Anzahl an Kauzyklen bis zum Herunterschlucken. Insgesamt lag der Beitrag, den orale Eigenschaften an der Anzahl der Kauzyklen bis zum Schlucken von Karotten und Erdnüssen leisteten, bei unter 10% (Pearson Korrelationskoeffizient zwischen 0,20 und 0,28). Für andere Produkte wurden keine Korrelationen gefunden. Die Autoren geben an, dass „gute Kauer“ (gemessen an der Kauleistung) nicht zwingend weniger Kauzyklen benötigten als Probanden mit geringerer Kauleistung, aber sie fanden eine signifikante Korrelation zwischen der Kauleistung und der maximalen Beißkraft, so dass Probanden mit höherer maximaler Beißkraft auch kleinere Partikelgrößen produzierten. Weiterhin berichten die Autoren von einem hochsignifikanten Zusammenhang zwischen der Anzahl der Kauzyklen und der Produktwahl. Probanden, die für ein Produkt überwiegend wenige Kauzyklen benötigten, nutzten für alle anderen Produkte ebenfalls wenige Kauzyklen bis zum Schlucken, so dass die Autoren hier von Menschen mit kürzeren und längeren Schluckzeiten sprechen. In der vorliegenden Studie lag die Anzahl der Kauzyklen bis zum Herunterschlucken des Weingummis zwischen 11 Kauzyklen beim freien Kauen bei Proband 16 und 67,58 Kauzyklen beim freien Kauen bei Proband 8. Auch in der Studie von Engelen et al. (2005) lag eine breite Streuung von Kauzyklusanzahlen zwischen 17 für Kuchen und 63 Kauzyklen für Karotten vor. Sowohl die vorliegende Studie als auch die Studie von Engelen et al. (2005) zeigten, dass es Probanden mit konsistent niedrigen und konsistent höheren Kauzyklusanzahlen bis zum Herunterschlucken gibt. Engelen et al. (2005) belegten mit Ihrer Studie, dass der Speichelfluss und auch das Geschmeidigmachen durch Zufuhr von Butter auf trockene Speisen die Kauzyklusanzahl reduzieren können. Inwieweit die Anzahl der Kauzyklen bis zum Herunterschlucken des Weingummis bei der vorliegenden Studie von der Speichelflussrate abhängt, ist nicht untersucht

worden und könnte möglicherweise Gegenstand einer weiteren Untersuchung sein.

Eine Studie von Bourdiol und Mioche (2000), welche sich auf dasselbe Probandenkollektiv bezog wie die Vorläuferstudie von Mioche et al. (1999), untersuchte Korrelationen zwischen funktionalen Kontaktflächen und okklusalen Zahnoberflächen und Nahrungsmiteleigenschaften bei natürlichen Kausequenzen. Von den 36 Probanden konnten 31 in diese Studie eingeschlossen werden. Die Bestimmung der funktionalen und okklusalen Kontaktflächen erfolgte anhand von Situationsmodellen, wobei nur Eckzähne, Prämolaren und Molaren einbezogen wurden. Mithilfe eines optischen Verfahrens wurden die funktionalen und die an der Okklusion beteiligten Kontaktflächen ermittelt. Die Patienten wurden angewiesen die schon unter 5.3 erwähnten Produkte zu kauen: Wiener Würstchen, Toffee, Kokosnuss, Erdnuss, Sbrinz und Comté. Die Auswertung ergab, dass bei der Zerkleinerung weicher Speisen vornehmlich die an der Okklusion beteiligten Kontaktflächen beansprucht wurden, wohingegen bei harten Speisen vor allem die funktionalen Flächen in Anspruch genommen wurden. Außerdem zeigte sich eine negative Korrelation zwischen der Anzahl der Kauzyklen und der funktionellen Kontaktfläche. Das bedeutet, je größer die funktionell genutzte Zahnoberfläche war, umso weniger Kauzyklen wurden auf dieser Seite durchgeführt. Die Autoren ermittelten die funktionell genutzten Kauflächen anhand einer Modellanalyse, bei der die Modelle gegeneinander verschoben wurden. Es bleibt zu überprüfen, ob die so ermittelten Flächen tatsächlich mit der Patientensituation im Mund übereinstimmen. Des Weiteren wurden dynamische Frontzahnkontakte außer Acht gelassen. Es könnte ein Anlass für weitere Studien sein, ob ein erhöhter Grad an Abnutzung auf einer Seite für die Bevorzugung dieser Kauseite spricht.

In einer Studie aus dem Jahr 2007 untersuchten Palmer et al. den Einfluss von willentlicher Steuerung des Schluckaktes auf den Transport und die Formung des Speisebolus. Das Probandenkollektiv umfasste 8 Probanden (4 weibliche, 4 männliche, 21-25 Jahre alt). Mithilfe eines videofluorographischen Systems wurden die Kau- und Schluckbewegungen beim Kauen eines mit Bariumsulfat gepuderten Kekses aufgezeichnet. Zunächst kauten die Probanden ohne

Anweisung und schluckten dann den Bolus. In einem weiteren Schritt kauten sie den Keks, gaben per Handzeichen bekannt, dass sie bereit zum Herunterschlucken waren und schluckten dann auf Anweisung des Studienleiters den Bolus herunter. Es stellte sich heraus, dass die Kausequenzdauer beim Kauen mit Anweisung ($23,2 \pm 5,0$ s) signifikant länger war ($7,7$ s; $p=0,02$) als beim natürlichen Kauen ($15,5 \pm 4,3$ s). Diese Verlängerung der Kausequenzdauer spiegelte sich auch in einer signifikant ($p=0,02$) erhöhten Kauzyklusanzahl wider: Ohne Anweisung wurden 20-25 Kauzyklen (Median 23) gebraucht, mit Anweisung 24,5-34 Kauzyklen (Median 31). Die Kauzyklen selber waren nicht verlängert (ohne Anweisung $0,76 \pm 0,13$ s, mit Anweisung $0,74 \pm 0,2$ s; $p=0,42$). Die Autoren vermuten, dass die reduzierte Kaueffektivität auf die Erwartungshaltung auf eine Unterbrechung beim Essen sowie durch die gesteigerte Aufmerksamkeit des Probanden auf den Kau- und Schluckvorgang zurückzuführen ist.

Lepley et al. (2010) untersuchten Unterschiede kinematischer Kauzyklusparameter zwischen Probanden mit höherer und niedrigerer Kaueffizienz. Es wurden 30 Probanden (15 weibliche und 15 männliche) im Alter von 22 bis 32 Jahren mit Angle-Klasse I in die Studie eingeschlossen. Als Testnahrung diente Cuttersil. Es wurde die mediane Partikelgröße mithilfe einer Siebmethode ermittelt. Gleichzeitig wurden mit einem optoelektronischen System (Optotrak 3020, Northern Digital, Waterloo, Ontario, Kanada) die Kauzyklen aufgezeichnet. Pro Durchgang von insgesamt 7 Durchgängen wurden die jeweils 10 aus 30 repräsentativsten Zyklen ausgewählt, so dass 70 auswertbare Zyklen pro Proband zur Verfügung standen. Die Auswertung erfolgte hinsichtlich der Zyklusdauer (totale Kauzyklusdauer, Öffnungsphase und Schließphase), maximaler Exkursion, totaler räumlicher Exkursion und maximaler Geschwindigkeit. Probanden, die unterhalb der medianen Partikelgröße von 1,6 mm lagen, wurden als „schwache Kauer“ (9 männliche, 6 weibliche) bezeichnet, während die andere Hälfte des Kollektivs (6 männliche, 9 weibliche), die Partikelgrößen über 1,6 mm lieferte als „starke Kauer“ bezeichnet wurden. Hinsichtlich der Kauzyklusdauern zeigte sich, dass Männer eine signifikant längere Öffnungsphase hatten ($p<0,05$), während Frauen eine signifikant längere Schließphase ($p<0,05$) aufwiesen. Beim Gruppenvergleich zeigte sich, dass die Öffnungsphase bei den schwächeren Kauern $0,051$ ms

länger war. Die schwächere Gruppe zeigte insgesamt größere Unterschiede der Kauzyklusdauern und der exkursiven Bewegungen als die stärkere Gruppe. Bei der stärkeren Gruppe waren die Bewegungen und auch die Kauzyklusdauern stereotyper. Dabei ist zu erwähnen, dass das Versuchsprotokoll vorgab, dass alle Probanden ausschließlich auf der rechten Seite kauen sollten. Im Vorfeld wurde nicht erhoben, ob die Probanden vorwiegend auf der rechten Seite kauten, so dass ggf. Probanden als schwächere Kauer eingestuft wurden, da ihre starke Kauseite unberücksichtigt blieb. Forschungsbedarf ergibt sich an dieser Stelle hinsichtlich der Frage, ob sich dieselben Ergebnisse zeigen würden, wenn ausschließlich Probanden ausgewählt würden, welche bevorzugt rechts kauen oder wenn man alle Probanden auf ihrer stärkeren Seite untersuchen würde.

Grigoriadis et al. (2011) zeigten in einer Studie Unterschiede in der Adaptationsfähigkeit des Kaugorgangs zwischen voll bezahnten Probanden und Versuchsteilnehmern mit rein implantatgetragenen Versorgungen auf. Es gab zwei Teilnehmergruppen, von denen eine Gruppe aus ausschließlich voll bezahnten (28 Zähne) Probanden bestand (5 weibliche, 8 männliche, 59-79 Jahre alt, Durchschnittsalter 66,4 Jahre) und eine Gruppe aus rein mit implantatgetragenen Brücken (Oberkiefer: 6 Implantate, Unterkiefer: 4-5 Implantate) versorgten Probanden (5 weibliche, 8 männliche, 58-83 Jahre, Durchschnittsalter 71,1 Jahre). Es wurden zwei Sitzungen durchgeführt und nur die Werte der zweiten Sitzung wurden in die Datenanalyse aufgenommen. Außerdem kauten die Probanden Testnahrung zweier Härtegrade. Es wurden kinematische Daten und die EMG-Aktivität des M. masseter und M. temporalis gemessen. Es stellte sich heraus, dass die Kauzyklusanzahl und die Kausequenzdauer abhängig vom Härtegrad der Testnahrung waren, jedoch gab es dabei keine signifikanten Unterschiede zwischen der Implantat-Gruppe und der voll bezahnten Gruppe. In der Implantat-Gruppe nahm die EMG-Aktivität in Abhängigkeit von der Härte der Testnahrung signifikant schwächer zu als bei der voll bezahnten Gruppe. Im Verlauf der Kausequenz nahm die Aktivität signifikant schwächer ab, als bei den voll bezahnten Patienten. Die Probanden der Implantat-Gruppe schluckten zudem signifikant größere Partikel. Die Autoren schreiben diese Phänomene dem Fehlen von parodontalen Mechanorezeptoren zu. Obwohl die Kaueffektivität geringer war als bei den voll

bezahnten Patienten, so fühlte sich das Kauen dennoch für alle Probanden natürlich und angenehm an.

Veyrone et al. (2007) stellten Unterschiede in der Adaptationsfähigkeit von 9 voll bezahnten Patienten und 15 Totalprothesenträgern an unterschiedliche Härtegrade von Kautestprodukten heraus. Es zeigte sich sehr deutlich, dass Totalprothesenträger eine höhere Anzahl an Kauzyklen ($p < 0,05$) und eine längere Kausequenzdauer ($p < 0,001$) aufbringen mussten. Außerdem war die Anpassungsfähigkeit der EMG-Aktivität auf die unterschiedlichen Härtegrade eingeschränkt im Vergleich zur Kontrollgruppe. Auch die Kaufrequenz war signifikant geringer ($p < 0,01$). Während die Werte in der Kontrollgruppe zwischen $1,31 \pm 0,19$ und $1,35 \pm 0,24$ Hz lagen, betrug die Kaufrequenz in der Totalprothesenträgergruppe zwischen $1,21 \pm 0,24$ und $1,30 \pm 0,2$ Hz.

5.6 Studien zur bevorzugten Kauseite

Pond et al. (1986) fanden in einer Studie mit 99 Probanden heraus, dass die Seite des initialen Kauzyklus stark mit der Seite der folgenden Kauzyklen korreliert ($r = 0,72$; $p < 0,0001$). Weiterhin fanden sie heraus, dass okklusale und zahnbezogene Faktoren (Kreuzbiss, Brückenversorgungen, Molaren ohne Okklusionskontakte in Zentrik, Balancekontakte, Lockerungsgrade, Kälteempfindlichkeit, Perkussionsempfindlichkeit) bei dem von ihnen gewählten Probandenkollektiv nicht in Bezug zu einer bevorzugten Kauseite standen. Von den 77,8% der Probanden mit Kauseitenpräferenz zeigten 39,4% eine Präferenz der linken Seite. 38,4% kauten bevorzugt rechts.

Barcellos et al. (2012) untersuchten in einer Studie mit 300 Probanden, welche sich auf drei Gruppen aufteilten, ob man in bestimmten Gebissphasen von der Händigkeit auf eine Kauseitenpräferenz schließen kann. Eine Gruppe bestand aus 100 Kindern zwischen 3 und 5 Jahren, eine weitere aus 100 Kindern zwischen 6 und 12 Jahren mit Wechselgebiss und eine dritte Gruppe bestand aus 100 18- bis 47-jährigen Erwachsenen mit ausschließlich bleibender Dentition. Zunächst wurden Lateralitätstests durchgeführt, um herauszufinden,

welche Seite in Bezug auf Hände, Füße, Ohren und Augen von den Probanden bevorzugt wird. Die Probanden wurden in einem weiteren Schritt aufgefordert Kaugummi zu kauen und wurden dabei insgesamt 7 Mal gestoppt: zum ersten Mal nach 15 Sekunden, danach alle 5 Sekunden. Es wurde die Seite, auf der sich das Kaugummi befand, notiert. Sobald das Kaugummi mindestens 5 Mal auf einer Seite zu sehen war, wurde die Seite als bevorzugte Kauseite bezeichnet. Es zeigten sich nur schwache signifikante Korrelationen zwischen der ersten Dentition und dem bevorzugten Ohr, dem Wechselgebiss und der bevorzugten Hand- und Fußseite und zwischen der bleibenden Dentition und der Händigkeit und dem bevorzugten Fuß und Ohr.

Jiang et al. (2010) wiesen in einer Studie, in der funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT) angewandt wurde, nach, dass es beim Aufeinanderpressen der Zähne einen Zusammenhang zwischen der dominanten Hemisphäre und einer Kauseitenpräferenz gibt. Das Probandenkollektiv umfasste 16 rechtshändige Probanden (8 weibliche, 8 männliche), von denen jeweils 8 Probanden die rechte Seite als bevorzugte Kauseite angaben und 8 die linke Seite. Bei der fMRT-Untersuchung wurden die Probanden aufgefordert, alternierend 30 Sekunden lang zu pressen und danach 30 Sekunden lang zu ruhen. Es stellte sich heraus, dass in den Press-Phasen im kontralateralen sensomotorischen Kortex eine signifikant erhöhte ($p \leq 0,001$) Aktivität vorlag. Bei 5 von 8 Probanden mit linksseitiger Kauseitenpräferenz wurde zusätzlich eine signifikant erhöhte ($p \leq 0,001$) Aktivierung im Gyrus parahippocampalis gefunden. Ebenfalls wurde bei den Probanden mit linksseitiger Kauseitenpräferenz Aktivität im prämotorischen Kortex gefunden ($p \leq 0,001$), während bei den Probanden mit rechtsseitiger Kauseitenpräferenz die Aktivierung im Gyrus frontalis inferior und im inferioren Schläfenlappen etwas größer war ($p \leq 0,001$).

Farias Gomes et al. (2010) fanden in einer Studie mit 78 Probanden heraus, dass bilaterales Kauen zu einer höheren Kaeffektivität als einseitiges Kauen führt. Die Probanden wurden in unilaterale (29 Probanden, 37,3%) und bilaterale Kauer (49 Probanden, 62,8%) eingeteilt. Probanden, die mehr als 80% der Kauzyklen auf einer Seite durchführten, wurden als unilaterale Kauer bezeichnet. Zusätzlich wurde nach einer Kauseitenpräferenz gefragt. Bei 47,4%

der Probanden stimmte die eigene Aussage mit den kinesiographisch ermittelten Werten überein. 16 Probanden kauten bevorzugt rechts, 13 Probanden kauten bevorzugt links. Aufgrund dieses Ergebnisses weisen sie darauf hin, dass die Patientenaussage zur Kauseitenpräferenz kritisch gesehen werden sollte.

Diernberger et al. (2008) untersuchten das Probandenkollektiv der Studie zur Gesundheit in Mecklenburg-Vorpommern (SHIP-0) hinsichtlich der Zusammenhänge von selbstberichteter Kauseitenprävalenz und okklusalen, temporomandibulären und prothetischen Faktoren. Von 4068 Probanden gaben 1855 (45,4%) an, eine Kauseite zu bevorzugen. Davon bevorzugten 1188 (65%) Teilnehmer die rechte Seite. Die Kauseitenpräferenz lag häufiger bei Frauen zwischen 40 und 69 Jahren vor. Kauseitenpräferenzen kamen signifikant gehäuft dann vor, wenn bestimmte asymmetrische Faktoren vorlagen: unilateraler Schmerz in Gesichtsmuskeln oder dem Kiefergelenk, subjektiv berichtetes Gelenkknacken und asymmetrischer Zahnverlust im Sinne von Stützzonenverlust. Ein weiterer signifikanter Faktor, der das Auftreten einer Kauseitenbevorzugung begünstigte, war das Vorhandensein von herausnehmbaren kunststoffbasierten Teilprothesen und von nicht durch Teleskope und Klammern befestigten Teilprothesen (z.B. Geschiebe). Probanden mit höherem Bildungsgrad wiesen signifikant seltener eine bevorzugte Kauseite auf. Die Autoren interpretieren diesen Umstand so, dass durch einen niedrigeren Bildungsgrad auch das Einkommen der untersuchten Probanden geringer war und damit weniger Geld in hochwertige und stabile prothetische Versorgung investiert werden konnte.

Zamanlu et al. (2012) verglichen Kauseitenpräferenzen des ersten Kauzyklus und sämtlicher Kauzyklen einer Sequenz beim Kauen von harten (Walnuss) und weichen (Kuchen) Speisen. Das Probandenkollektiv umfasste 19 Probanden (12 weibliche, 7 männliche, Durchschnittsalter $19,42 \pm 2,27$ Jahre). Dabei ergab sich eine signifikante Korrelation zwischen der bevorzugten Kauseite des ersten Kauzyklus bei der harten und weichen Nahrung sowie eine signifikante Korrelation zwischen dem ersten Kauzyklus und der während der gesamten Sequenz präferiert genutzten Kauseite. Die rechte Seite wurde bei beiden Testnahrungen signifikant öfter genutzt. Weiterhin stellten sie fest, dass

die Ergebnisse reliabler sind, wenn alle Kauzyklen in die Ermittlung einer bevorzugten Kauseite einbezogen werden, als wenn nur der erste Kauzyklus herangezogen wird.

6 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie zeigt, dass sich die Kauaufgabe (freies Kauen oder angewiesenes Rechts- bzw. Linkskauen) signifikant auf die untersuchten Parameter *Anzahl der Kauzyklen*, *Dauer der Kausequenz*, *Frequenz der Kausequenz*, *Muskelarbeit* und *Asymmetrieindex* auswirkt.

Die Gestaltung der Sensoren zur Registrierung der Unterkieferbewegungen übt keinen signifikanten Einfluss auf die untersuchten Parameter aus.

Hinsichtlich der Reliabilität der Messwerte sind größere Übereinstimmungen zwischen der zweiten und dritten Sitzung festzustellen. Signifikante Unterschiede bestehen sowohl zwischen der ersten und zweiten Sitzung als auch zwischen der ersten und dritten Sitzung. Daraus lässt sich schließen, dass es sinnvoll ist, bei zukünftigen Untersuchungen die erste Sitzung als Eingewöhnungssitzung zu nutzen und zur Auswertung die Werte der zweiten Sitzung heranzuziehen.

7 Literaturverzeichnis

Barcellos DC, da Silva MA, Batista GR, Pleffken PR, Pucci CR, Borges AB, Rocha Gomes Torres C, Gonçalves SE: Absence or weak correlation between chewing side preference and lateralities in primary, mixed and permanent dentition. Arch Oral Biol. **2012**;57(8):1086-92.

Belser UC, Hannam AG. The contribution of deep fibers of the masseter muscle to selected tooth clenching and chewing tasks. J Prosthet Dent **1986**;56(5):629-35.

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

Bishop B, Plesh O, McCall JR WD: Effects of chewing frequency and bolus hardness on human incisor trajectory and masseter muscle activity. J Dent Res **1990**;35(4):311-318.

Blanksma NG, van Eijden TM: Electromyographic Heterogeneity in the Human Temporalis and Masseter Muscles during Static Biting, Open/Close Excursions, and Chewing. J Dent Res **1995**;74(6):1318-1327.

Blanksma NG, van Eijden TMGJ: Electromyographic heterogeneity in the human temporalis muscle. J Dent Res **1990**;69:1686-1690.

Blanksma NG, Van Eijden TMGJ, Weijs WA: Electromyographic heterogeneity in the human masseter muscle. J Dent Res **1992**;71:47-52.

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

Bourdiol P, Mioche L: Correlations between functional and occlusal tooth-surface areas and food texture during natural chewing sequences in humans. Arch Oral Biol. **2000**;45(8):691-9.

Casas MJ, Kenny DJ, Macmillan RE: Buccal and lingual activity during mastication and swallowing in typical adults. J Oral Rehabil **2003**;30(1):9-16.

Castroflorio T, Icardi K, Torsello F, Deregibus A, Debernardi C, Bracco P: Reproducibility of surface EMG in the human masseter and anterior temporalis muscle areas. Cranio. **2005**;23(2):130-7.

Castroflorio T, Bracco P, Farina D: Surface electromyography in the assessment of jaw elevator muscles. Review Article. J Oral Rehab. **2008**;35(8):638-45.

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.

Duizer LM, Gullett EA, Findlay CJ: The relationship between sensory time-intensity, physiological electromyography and instrumental texture profil analysis measurements of beef tenderness. Meat Sci **1996**;42(2):215-24.

Engelen L, Fontijn-Tekamp A, van der Bilt A: The influence of product and oral characteristics on swallowing. Arch Oral Biol. **2005**;50(8):739-46. Epub **2005** Feb 26.

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.

Farella M, Palla S, Erni S, Michelotti A, Gallo LM: Masticatory muscle activity during deliberately performed oral tasks. Physiol. Meas. **2008**;29(12):1397–1410.

Farias Gomes SG, Custodio W, Moura Jufer JS, Del Bel Cury AA, Rodrigues Garcia RCM: Correlation of Mastication and Masticatory Movements and Effect of Chewing Side Preference. *Braz Dent J* **2010**;21(4):351-355.

Ferraio VF, Sforza C: Coordinated electromyographic activity of human masseter and temporalis anterior muscles during mastication. *Eur J Oral Sci* **1996**;104(5.6):511-517.

Grigoriadis A, Johansson RS, Trulsson M: Adaptability of mastication in people with implant-supported bridges. *J Clin Periodontol* 2011; 38: 395–404.

Hellmann D, Giannakopoulos NN, Blaser R, Eberhard L, Rues S, Schindler HJ: Long-term training effects on masticatory muscles. *J Oral Rehabil.* **2011**;38(12):912-20.

Hennequin M, Allison PJ, Faulks D, Orliaguet T, Feine J: Chewing indicators between adults with Down syndrome and controls. *Journal of Dental Research* **2005**;84(11):1057-1061.

Hennequin M, Allison PJ, Veyrune JL, Faye M, Peyron M: Clinical evaluation of mastication: validation of video versus electromyography. *Clin Nutr* **2005**;24(2):314-320.

Horio T, Kawamura Y: Effects of texture of food on chewing patterns in the human subject. *J Oral Rehab* **1989**;16(2):177-183.

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.

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

Hylander WL, Johnson KR, Crompton AW: Muscle force recruitment and biomechanical modeling: an analysis of masseter muscle function during mastication in *Macaca fascicularis*. Am J Anthropol. **1992**;88:365-387.

Hylander WL, Johnson KR: The relationship between masseter force and masseter electromyogram during mastication in the monkey *Macaca fascicularis*. Arch Oral Biol **1989**;34(9):713-722.

Jemt T, Karlsson S, Hedegard B: Mandibular movements of young adults recorded by intraorally placed light-emitting diodes. J Prosthet Dent **1979**;42(6):669-673.

Jiang H, Liu H, Liu G, Jin Z, Liu X: The effects of chewing-side preference on human brain activity during tooth clenching: an fMRI study. Journal of Oral Rehabilitation **2010**;37:877-883.

Karlsson S, Carlsson GE: Recording of masticatory mandibular movements and velocity by an optoelectronic method. Int J Prosthodont **1989**;2(5):490-496.

Klett R: Die elektronische Kiefergelenkregistrierung. In: www.freecorder.de, **2007**. Zugriffsdatum: 01.07.2013.

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

Kravchenko, A: Reproduzierbarkeit von Kaufunktionsdaten in einer klinischen Studie. Med Diss, Düsseldorf **2011**.

Krentz, H: Statistische Analysen mit SPSS in der Medizin. Shaker Verlag, **2005**, Band 1 und 2.

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):484-92.

Lepley C, Throckmorton G, Parker S, Buschang PH: Masticatory performance and chewing cycle kinematics – are they related? *Angle Orthod.* **2010**;80(2):295-301.

Lund JP, Kolta A: Adaption of the central masticatory pattern to the biomechanical properties of food. *International Congress Series* **2005**;1284:11-22.

MacDonald JW, Hannam AG: Relationship between occlusal contacts and jaw-closing muscle activity during tooth clenching: part I. *J Prosthet Dent* **1984**;52(5):718-728.

McMillan AS, Hannam AG: Task-related behaviour of motor units in different regions of the human masseter muscle. *Arch Oral Biol* **1992**;37(10):849-857.

Mioche L, Bourdiol P, Martin J-F, Noël Y: Variations in human masseter and temporalis muscle activity related to food texture during free and side-imposed mastication. *Arch Oral Biol.* **1999**;44(12):1005-12.

Mioche L, Hiimeae KM, Palmer JB: A postero-anterior videofluorographic study of the intra-oral management of food in man. *Arch Oral Biol* **2002**;47(4):267-280.

Mioche L, Peyron MA: Bite force displayed during assessment of hardness in various texture contexts. *Arch Oral Biol.* **1995**;40(5):415-23.

Møller E: The chewing apparatus. An electromyographic study of the action of the muscles of mastication and its correlation to facial morphology. *Acta Physiol Scand Suppl.* **1966**;280:1-229.

Naeije M, McCarroll RS, Weijs WA: Electromyographic activity of the human masticatory muscles during submaximal clenching in the inter-cuspal position. *J Oral Rehabil.* **1989**;16(1):63-70.

Olthoff LW, van der Bilt A, Bosman F, Kleizen HH: Distribution of particle sizes in food comminuted by human mastication. *Arch Oral Biol.* **1984**;29(11):899-903.

Palmer JB, Hiiemae KM, Matsuo K, Haishima H: Volitional Control of Food Transport and Bolus Formation during Feeding. *Physiol Behav.* **2007**;16;91(1): 66–70.

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.

Peyron MA, Maskawi K, Woda A, Tanguay R, Lund JP: Effect of food texture and sample thickness on mandibular movement and hardness assessment during biting in man. *J Dent Res* **1997**;76(3):789-95.

Piancino MG, Farina D, Talpone F, Castroflorio T, Gassino G, Margarino V, Bracco P: Surface EMG of jaw-elevator muscles and chewing pattern in complete denture wearers. *Journal of Oral Rehabilitation* **2005**;32(12):863–870.

Plesh O, Bishop B, McCall WD: Effect of gum hardness on chewing pattern. *J Exp Neurol* **1986**;92(3):502-512.

Po JM, Kieser JA, Gallo LM, Tésenyi AJ, Herbison P, Farella M: Time-Frequency Analysis of Chewing Activity in the Natural Environment. *J Dent Res* **2011**;90(10):1206-10.

Pond LH, Barghi N, Barnwell GM: Occlusion and chewing side preference. J Prosthet Dent. **1986** Apr;55(4):498-500.

Pröschel P, Hofmann M: Frontal chewing patterns of the incisor point and their dependence on resistance of food and type of occlusion. J Prosthet Dent **1988**;59(5):617-624.

Pröschel P, Morneburg T: 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.

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

Schindler HJ, Stengel ES, Spiess WEL: Feedback control during mastication of solid food texture – a clinical-experimental study. J Prosthet Dent **1998**;80(3):330-336.

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

Stohler CS: A comparative electromyographic and kinesiographic study of deliberate and habitual mastication in man. Arch Oral Bio **1986**;31(10):669-78.

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.

van der Bilt A, Olthoff LW, van der Glas HW, van der Weelen K, Bosman F: A mathematical description of the comminution of food during mastication in man. Arch Oral Biol. **1987**;32(8):579-86.

van der Bilt A., van der Glas HW, Olthoff LW, Bosman F: The effect of particle size reduction on the jaw gape in human mastication. J Dent Res. **1991**;70(5):931-937.

Van Eijden TMGJ, Blanksma NG, Brugman P: Amplitude and timing of EMG activity in the human masseter muscle during selected motor tasks. J Dent Res **1993**;72(3):599-606.

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 saggitalen Kondylenbahnneigung und des Bennettwinkels dreier Registrierverfahren. Med Diss, Berlin **2002**.

Veyrune 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.

Weijjs WA, Brugman P, Grimbergen CA: Jaw movements and muscle activity during mastication in growing rabbits. Anat Rec **1989**;224(3):407-16.

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.

Wood WW: A review of masticatory muscle function. J Prosthet Dent **1987**;57(2):222-32.

Zamanlu M, Khamnei S, SalariLak S, Oskoe SS, Shakouri SK, Houshyar Y, Salekzamani Y: Chewing side preference in first and all mastication cycles for hard and soft morsels. Int J Clin Exp Med **2012**;5(4):326-331.

Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Professor Dr. Ulrich Stüttgen für die Möglichkeit, meine Promotionsarbeit in der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Uniklinik Düsseldorf durchzuführen.

Ich bedanke mich vielmals bei Herrn Prof. Dr. Alfons Hugger für die Überlassung des Promotionsthemas sowie vor allem die umfassende und geduldige Unterstützung bei meinem Promotionsvorhaben.

Prof. Dr. Egon Wanke aus dem Institut für Informatik danke ich herzlich für die Unterstützung bei der Auswertung der gesammelten Daten.

Meiner ehemaligen Kommilitonin und lieben Freundin Frau Dr. Alexandra Kravchenko danke ich für ihre Hilfe bei der Durchführung der Untersuchung und für die freundschaftliche Unterstützung.

Allen Probanden danke ich herzlich für die zeitintensive Teilnahme an der Studie. Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle Bine.

Ich bedanke mich bei meiner Familie für die Unterstützung während meines Studiums.

Ich bedanke mich bei allen meinen Freunden, die mir während des Studiums und während der Arbeit an meinem Promotionsthema zur Seite gestanden haben. Ganz besonders möchte ich Lea, Bijan, Charly, Julia, Cristian, Ralph, Stefan und meine Freunde von „Schmierers Spätzle“ erwähnen.

Dr. Daniel Hellmann danke ich ganz herzlich für die vielen fachlichen und freundschaftlichen Gespräche während unserer gemeinsamen Zeit in Heidelberg.

Mein besonderer Dank gilt meinem Lebenspartner Alexander Freihaut für seine immerwährende Geduld und seine ermutigenden, liebevollen Worte.

Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere an Eides statt, dass die Dissertation selbständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erstellt worden ist und die hier vorgelegte Dissertation nicht von einer anderen medizinischen Fakultät abgelehnt worden ist.

Datum, Vor- und Nachname

Unterschrift