

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
Westdeutsche Kieferklinik
Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Direktorin: Univ.-Prof. Dr. P. Gierthmühlen

**Partikelgrößenbestimmung zur Erfassung der
Kauleistung mittels optischem Scanverfahren
(eine klinische Pilotstudie)**

Dissertation

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

vorgelegt von
Katharina Lisa-Maria Schmidt
2026

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

gez.: Katharina Lisa-Maria Schmidt

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

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

Zweitgutachter: Prof. Dr. Egon Wanke

Gender Disclaimer

In der vorliegenden Arbeit wird zur besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Die gewählte Form bezieht sich ausdrücklich sowohl auf die männliche als auch die weibliche sowie andere Geschlechtsidentitäten. Die Formulierungen beziehen sich auf alle Geschlechter gleichermaßen, soweit die Aussagen dies erfordern.

*“If you can dream it,
you can do it.”*

Walt Disney

Zusammenfassung

Die Kauleistung ist ein wichtiger Parameter, um die Kaufähigkeit eines Probanden zu objektivieren und vergleichbar zu machen. Zur Bestimmung der Kauleistung wurde lange eine zeit- und materialaufwendige Siebmethode genutzt und später ein Scanverfahren entwickelt, dessen letzte Weiterentwicklung von einer Heidelberger Arbeitsgruppe um H. J. Schindler beschrieben wurde. Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurde das Analyseprogramm des Scanverfahrens von der Siebmethode losgelöst und für jedermann nachvollziehbar dargestellt. Die Studie sollte die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit der Methode überprüfen, die die individuelle Kauleistung anhand der Zerkleinerung eines künstlichen Kauguts erfasst. Gleichzeitig sollte ein Querschnitt durch die Spannbreite der Ergebnisse verschiedener Probanden dargestellt werden.

Es wurden 55 vollbezahnte, zahn- und funktionsgesunde Probanden (20 Männer, 35 Frauen) herangezogen, die ein künstliches standardisiertes Kaugut über eine definierte Anzahl an Kauzyklen kauen. Es fanden zwei Sitzungen statt und es wurde zwischen freiem Kauen (FK) und angewiesenem Kauen (Rechts- und Linkskauen, RK bzw. LK) unterschieden. Die Kaupartikel wurden nach dem Kauen gescannt und online (www.whhu.de) ausgewertet. Als Vergleichswert wurde der x50-Wert herangezogen, bei dem, bezogen auf das Volumen, 50 % der Kaupartikel in einem Sieb mit genau dieser Maschengröße liegen geblieben wären. Eine Vorprüfung mit 10 Proben, die zehn Mal neu ausgebreitet und gescannt wurden, zeigte eine durchschnittliche Abweichung von 1,09 % und damit eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Bei der Betrachtung des Probandenkollektivs zeigte sich eine große Variabilität unter den Probanden. Das Minimum des x50-Wertes des freien Kauens lag bei 2,67 mm und das Maximum bei 5,79 mm, während der Mittelwert bei 4,4 mm und die Standardabweichung bei 0,8 mm lag. Eine Veränderung der Kauleistung (beim freien sowie beim angewiesenen Rechts- und Linkskauen) sollte bevorzugt intrapersonell betrachtet werden – beispielsweise vor und nach der restaurativ-prothetischen Versorgung.

Insgesamt stellt die Düsseldorfer Methode eine weniger zeit- und materialaufwendige Alternative zur Siebmethode dar und vereinfacht auch die bisher vorgestellte digitale Variante durch die Onlinefunktion und ihre transparente Offenlegung der Berechnungsgrundlagen.

Abstract

Chewing efficiency is an important parameter in dentistry to objectify and compare one's ability of chewing. A material and time-consuming sieving method had been used to determine the chewing efficiency and recently a scanning method has been developed. The last enhancement was described by a research team by H. J. Schindler from the university of Heidelberg. In the course of this thesis the software to analyse the scans was detached from the sieving method and designed more transparently. This study was designed to test the reliability and reproducibility of this method that records the individual chewing efficiency by particle size reduction of an artificial food. Simultaneously the width of the results among participants should be represented.

This study included 55 participants (20 male, 35 female) characterized by a full and healthy dentition. They attended two sessions. The participants were instructed to chew a standardized artificial food for a definite number of chewing cycles. It was differentiated between free chewing (FK) and directed chewing on either the right (RK) or the left side (LK). The chewed particles were spread on a scanner and analysed by an online tool (www.whhu.de). The most important comparative value was the x50 value at which 50 % of the particles (based on their volume/weight) would be retained in an imaginary sieve of this exact mesh size. A preliminary trial with ten samples that were spread and scanned ten times resulted in an average discrepancy of 1,09 % and hence the method appeared to be reproducible. On the basis of the data from this study one can say that there is a large variability between participants. The minimum of the x50 value during chewing freely was 2,67 mm and the maximum was 5,79 mm while the mean value was 4,4 mm. The standard deviation was 0,8 mm. Therefore, a comparison of chewing efficiency should be preferred within one participant, for example before and after receiving dental treatment.

Due to the possibility of using an online evaluation the "Duesseldorf method" is accessible for everyone and also displays less use of materials and expenses. Generally speaking, the "Duesseldorf method" is a reliable alternative to the sieving method and simplifies the existing digital "Heidelberg method" while also disclosing the basis of calculation.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Abstract.....	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis	V
Formelverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	XI
1 Einleitung.....	1
1.1 Grundlagen des kranio-mandibulären Systems.....	1
1.2 Physiologie des Kauens	2
1.3 Stand der Forschung.....	5
1.3.1 Siebmethode.....	5
1.3.2 Weitere Methoden zur Erfassung der Kaufunktion	7
1.3.3 Vorgehen in Studie nach Eberhard et al.	8
1.3.4 Vergleich von Sieb- und Scanmethode.....	11
1.4 Forschungsbedarf	12
2 Problemstellung	13
3 Material und Methoden	14
3.1 Ethikkommission	14
3.2 Probandenkollektiv	14
3.3 Materialien.....	17
3.4 Datenverarbeitung.....	21
3.5 Statistische Auswertung	24
4 Ergebnisse.....	25
4.1 Gesamtes Probandenkollektiv.....	25
4.1.1 Freies Kauen	27
4.1.2 Angewiesenes Kauen	29
4.2 Reproduzierbarkeit der Daten	34
4.3 Vergleich Männer und Frauen.....	38
4.4 Vergleich der x70-, x50- und x30-Werte.....	40

4.5	Vergleich 1. und 2. Sitzung	43
4.5.1	Freies Kauen	43
4.5.2	Freies und angewiesenes Kauen.....	45
4.6	Vergleich bevorzugte Kauseite.....	47
4.7	Vergleich Rechts- und Linkshänder	52
5	Diskussion	53
5.1	Unterschiedliche Methodiken in Studien zu Kaufunktion.....	53
5.2	Diskussion der angewendeten Methoden und Materialien	55
5.2.1	Patientencharakteristika	55
5.2.2	Kaugut	60
5.2.3	Versuchsdurchführung.....	65
5.2.4	Scanvorgang.....	70
5.2.5	Berechnung und Auswertung	73
5.3	Reproduzierbarkeit der Ergebnisse	77
5.4	Vergleich Düsseldorfer und Heidelberger Methode.....	78
5.5	Studien zum Vergleich von Männern und Frauen	79
5.6	Studien zur bevorzugten Kauseite	82
5.7	Anwendbarkeit in der Praxis.....	89
6	Literaturverzeichnis.....	91
7	Anhang	99
8	Danksagung.....	101

Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
Abb.	Abbildung
bit	englisch: <i>binary digit</i> (deutsch wörtlich: Binärzahl, eine Maßeinheit der Informatik für den Informationsgehalt)
bzw.	beziehungsweise
cm	Zentimeter
cm³	Kubikzentimeter
CMD	englisch: <i>Craniomandibular disorder</i> , deutsch: Craniomandibuläre Dysfunktion
DC/TMD	englisch: <i>Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders (DC/TMD)</i> , diagnostische Kriterien bei Forschungen zur Craniomandibulären Dysfunktion (2014, Nachfolger der RDC-TMD)
DMF-Score	englisch: „ <i>Decayed, Missed, Filled (Teeth/Surfaces)</i> “ deutsch: DMF-Index: kariöse, fehlende oder gefüllte Zähne Aufteilung in DMF-T und DMF-S, Großbuchstaben für bleibende Zähne und Kleinbuchstaben (dmf-t bzw. dmf-s-Index) für Milchzähne
dpi	englisch: <i>drops per inch</i> (deutsch: Anzahl der Bildpunkte pro Zoll)
Dr.	Doktor
EMG	Elektromyographie
et al.	et alii / et aliae – „und andere“
FK	freies Kauen
Hz	Hertz
kp	Kilopond (technisches Maßsystem, veraltete, nicht SI-konforme Einheit, die durch Newton ersetzt wurde (1kp ≈ 9,80665 N))
LK	Linkskauen
min	Minute
ml	Milliliter
mm	Millimeter
mm²	Quadratmillimeter
mm³	Kubikmillimeter
n	Anzahl

N	Newton
Prof.	Professor
Q1	erstes Quartil
Q3	drittes Quartil
RDC-TMD	englisch: <i>Research Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders</i> , deutsch: diagnostische Kriterien bei Forschungen zur craniomandibulären Dysfunktion (1992)
RK	Rechtskauen
SHIP	englisch: <i>Study of Health in Pomerania</i> , deutsch: Gesundheitsstudie in der Region Vorpommern im Bundesland Mecklenburg-Vorpommern
SI	französisch: <i>Système international d'unités</i> , deutsch: Internationales Einheitensystem für physikalische Größen
Tab.	Tabelle
TMD	englisch: <i>Temporomandibular Disorder</i> , deutsch: Craniomandibuläre Dysfunktion

Formelverzeichnis

Median wenn die Anzahl der Beobachtungen gerade ist:

$$\tilde{x} = \frac{1}{2} (x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1})$$

wenn die Anzahl der Beobachtungen ungerade ist:

$$\tilde{x} = x_{\frac{n+1}{2}}$$

- \tilde{x} Median
- x Wert aus der Datenreihe
- n Anzahl der Beobachtungen

Mittelwert

$$\bar{x} = \frac{x_1+x_2+x_3+\dots+x_n}{n}$$

- \bar{x} Mittelwert
- x Wert aus der Datenreihe
- n Anzahl der Beobachtungen

Quartil(e) falls $n \cdot p$ ganzzahlig

$$x_p = \frac{1}{2} (x_{n \cdot p} + x_{n \cdot p + 1})$$

$n \cdot p$ nicht ganzzahlig

$$x_p = \frac{1}{2} (x_{n \cdot p} + x_{[n \cdot p] + 1})$$

- p das p -Quartil, also $p=0,25$, $p= 0,5$ oder $p=0,75$
- x Wert aus der Datenreihe
- n Anzahl der Beobachtungen

Rosin-Rammler- Funktion $f(x) = e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b}$
 (Rosin und Rammler 1933)

a = Rosin Rammler Durchmesser $f(a) = e^{-1} = 0,367879$

b = Rosin Rammler Exponent $b_i = \ln \frac{-\ln(y_i)}{\ln\left(\frac{y_i}{a}\right)}$

Standardabweichung $\sigma = \sqrt{\text{VAR}} = \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 * p_i$

σ Standardabweichung

$\sqrt{\text{VAR}}$ Wurzel der Varianz

$\sum_{i=1}^n$ Summe der quadrierten Abweichungen vom Mittelwert wird berechnet

μ Mittelwert, bzw. Erwartungswert

x_i das einzelne Ergebnis des Zufallsexperiments

$(x_i - \mu)^2$ quadratische Abweichung

p_i Gewichtungsfaktor

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Maschengröße der Siebe, Abb. übernommen von Prof. Dr. E. Wanke (Prof. Dr. E. Wanke 2019)	10
Abbildung 2: Metallform zum Pressen der Silikonwürfel.....	17
Abbildung 3: Silikonwürfel mit einer Kantenlänge von 5,6 mm, eigene Darstellung	18
Abbildung 4: Küvettenpresse mit eingespannter Metallform	18
Abbildung 5: 36 Silikonwürfel in der Form nach dem Pressvorgang	19
Abbildung 6: Darstellung eines Partikels mithilfe der Software whhu.de. Der graue Bereich illustriert die zusammenhängende Grundfläche des Partikels eingeschlossen in einem Rechteck. Der Abstand zwischen den beiden parallelen Linien entspricht dem <i>min-feret</i> -Durchmesser. Die eingezeichnete Ellipse hat die Form und Größe einer Ellipse, die die Fläche des Partikels optimal repräsentiert. Die Ellipse ist in dem Bild jedoch nicht optimal positioniert, da das Zeichenprogramm in der verwendeten Bibliothek das rotierte Zeichnen von Ellipsen nicht beherrscht. Die Zahlenwerte im Rechteck sind die Partikelnummer, die Grundfläche, der <i>min-feret</i> -Durchmesser und die Länge der kleinere Ellipsenachse. (Partikel von Proband IR07BN, Rechtskauen, 1. Sitzung)	22
Abbildung 7: Beispiel eines Scans mit einem niedrigen x50-Wert (x50 = 2,67 mm, Proband UH09RN, freies Kauen, 1. Sitzung)	25
Abbildung 8: Beispiel eines Scans mit einem hohen x50-Wert (x50 = 5,79 mm, Proband AR11DG, freies Kauen, 2. Sitzung)	26
Abbildung 9: Abweichung der Düsseldorfer und Heidelberger Methode der zehnmal gescannten Proben von ihrem jeweiligen Mittelwert (in Prozent, auf zwei Nachkommastellen gerundet) (Abszisse: Probe, Ordinate: Abweichung vom Mittelwert in Prozent).....	36
Abbildung 10: Abweichung der Partikelzahl der zehnmal gescannten Proben (in Prozent, auf zwei Nachkommastellen gerundet) (Abszisse: Abweichung in Prozent, Ordinate: Proband).....	37
Abbildung 11: Durchschnittlicher x50-Wert der Männer bzw. Frauen beim freien Kauen in der ersten Sitzung (in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet) (Abszisse: Probandengruppe, Ordinate: x50-Wert).....	38
Abbildung 12: Durchschnittlicher x50-Wert der Männer bzw. Frauen des freien Kauens in der zweiten Sitzung (in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet) (Abszisse: Probandengruppe, Ordinate: x50-Wert).....	39
Abbildung 13: Vergleich der x50-Werte der ersten und zweiten Sitzung (Werte in mm, FK = freies Kauen, RK = Rechtskauen, LK = Linkskauen, Abszisse: Versuchsdurchgang, Ordinate: x50-Wert)	40
Abbildung 14: Vergleich der x30-Werte der ersten und zweiten Sitzung. (FK = freies Kauen, RK = Rechtskauen, LK = Linkskauen, Abszisse: Versuchsdurchgang, Ordinate: x30-Wert)	41
Abbildung 15: Vergleich der x70-Werte der ersten und zweiten Sitzung (FK = freies Kauen, RK = Rechtskauen, LK = Linkskauen, Abszisse: Versuchsdurchgang, Ordinate: x70-Wert)	42

Abbildung 16: Vergleich der x50-Werte bei 1. und 2. Sitzung für freies (FK), Rechts- (RK) und Linkskauen (LK), (Abszisse: Vergleich der Differenzen der x50-Werte aus 1. Und 2. Sitzung, Ordinate: Anzahl der Probanden,) weitere Erläuterungen siehe Text.	46
Abbildung 17: Vergleich der x50-Werte der 1. Sitzung des Rechts- und Linkskauens (Abszisse: Probanden innerhalb der Standardabweichung bzw. Rechts- und Linkskauen, Ordinate: Anteil der Probanden gerundet in Prozent) ...	47
Abbildung 18: Angaben der Probanden nach einer bevorzugten Kauseite (Abszisse: bevorzugte Kauseite laut der Probanden, Ordinate: Anzahl der Probanden).....	48
Abbildung 19: Vergleich der Angaben der Probanden nach einer bevorzugten Kauseite unter Einbeziehen der Standardabweichung (Abszisse: bevorzugte Kauseite laut der Probanden, Ordinate: Anzahl der Probanden, Applikate: besseres Kauergebnis in Studie).....	49
Abbildung 20: Vergleich der 29 Probanden, die eine bevorzugten Kauseite angaben (Abszisse: bevorzugte Kauseite, laut der Probanden, Ordinate: Anzahl der Probanden, Applikate: Übereinstimmung der Probandenangaben mit Studienergebnissen)	50
Abbildung 21: Vergleich der Probanden, die keine bevorzugte Kauseite angaben (Abszisse: Seite der besseren Kaupartikelzerkleinerung, Ordinate: Anzahl der Probanden).....	51
Abbildung 22: Übereinstimmung der von den Probanden angegebenen Händigkeit und der Kauseite, die eine bessere Kaupartikelzerkleinerung aufwies (gerundet in Prozent) (Abszisse: Händigkeit, Ordinate: Anteil der Probanden in Prozent, die auf der jeweiligen Seite die bessere Kaupartikelzerkleinerung zeigten).....	52
Abbildung 23: 17 gescannte Würfel.....	75
Abbildung 24: Fragebogen für Probanden	99
Abbildung 25: mündliche Fragen zum Ausschluss von CMD vor der klinischen Inspektion (Fragen angelehnt an den Fragebogen zu „Beschwerden der Kiefergelenke und der Kaumuskulatur“ der Universität Leipzig und der deutschen Version der DC/TMD (Schierz und Rauch 2018). Eine Bejahung einer dieser Fragen führte zum Ausschluss aus der Studie, weshalb der Fragebogen der DC/TMD nicht vollständig ausgefüllt werden musste.)	100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ein- und Ausschlusskriterien der Studie	15
Tabelle 2: Gewonnene Daten des freien Kauens aller Probanden der ersten und zweiten Sitzung, grau gedruckt sind die Probanden, die zum zweiten Termin nicht erschienen sind (Werte in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet)	27
Tabelle 3: x30-, x50- und x70-Werte des Rechtskauens aller Probanden der ersten und zweiten Sitzung, grau gedruckt sind die Probanden, die zum zweiten Termin nicht erschienen sind (Werte in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet) ..	29
Tabelle 4: x30-, x50- und x70-Werte des Linkskauens aller Probanden der ersten und zweiten Sitzung, grau gedruckt sind die Probanden, die zum zweiten Termin nicht erschienen sind (Werte in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet) ..	31
Tabelle 5: Vergleich der x50-Mittelwerte des freien und angewiesenen Kauens der ersten und zweiten Sitzung (Werte in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet).....	33
Tabelle 6: Vergleich der Standardabweichungen der x30-, x50- und x-70-Werte der 1. und 2. Sitzung (Werte in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet) ..	34
Tabelle 7: Durchschnittliche prozentuale Abweichung der Probanden in der Heidelberger und Düsseldorfer Methode (Werte auf zwei Nachkommastellen gerundet).....	35
Tabelle 8: Vergleich der x50-Werte der ersten und zweiten Sitzung (Werte in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet, FK = freies Kauen, RK = Rechtskauen, LK = Linkskauen, Q1 = erstes Quartil, Q3 = drittes Quartil)	40
Tabelle 9: Vergleich der x30-Werte der ersten und zweiten Sitzung (Werte in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet, FK = freies Kauen, RK = Rechtskauen, LK = Linkskauen, Q1 = erstes Quartil, Q3 = drittes Quartil)	41
Tabelle 10: Vergleich der x70-Werte der ersten und zweiten Sitzung (Werte in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet, FK = freies Kauen, RK = Rechtskauen, LK = Linkskauen, Q1 = erstes Quartil, Q3 = drittes Quartil)	42
Tabelle 11: Veränderung (Differenz) der x30-, x50- und x70-Werte von der 1. zur 2. Sitzung (Werte in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet)	43
Tabelle 12: Standardabweichung der ersten und zweiten Sitzung (Werte in mm und gerundet auf zwei Nachkommastellen, FK = freies Kauen, RK = Rechtskauen, LK = Linkskauen).....	45
Tabelle 13: Ergebnisse eines Scans ohne Partikel	72

1 Einleitung

1.1 Grundlagen des kranio-mandibulären Systems

Das Kausystem wird auch als stomatognathes oder mandibulo-maxilläres System bezeichnet. Die wichtigsten Bestandteile sind die Kiefergelenke, die Kaumusculatur, die bezahnten Ober- und Unterkieferalveolarfortsätze und die Zunge. Außerdem gehören auch vaskuläre, lymphatische und nervale Leitungsbahnen, der harte und der weiche Gaumen, die Lippen, die Wangen, die großen und kleinen Kopfspeicheldrüsen, der Bandapparat sowie die Mundschleimhaut dazu (Lehmann et al. 2012). Die Mastikation ist ein komplexer Prozess, der die Aktivität verschiedener Gesichtsmuskeln, der infra- und suprahyoidalen Muskulatur und der Zunge involviert (Pereira et al. 2006, S. 193). Der Speichel erleichtert die Mastikation, indem er die Kaupartikel befeuchtet, einen Bolus formt und beim Schlucken unterstützt. Die Konsistenz der Nahrung modifiziert die Kaukraft, die Bewegung des Unterkiefers, die Kaudauer und die Anzahl der Kauzyklen vor dem ersten Schlucken (Pereira et al. 2006, S. 193). Die Mastikation ist der erste Prozess, den ein Nahrungsmittel während der Nahrungsaufnahme durchläuft. Sie spielt eine Hauptrolle in der Erhaltung des Ernährungszustandes in zweierlei Hinsicht: Zum einen ruft sie während des Kauens und Schluckens die Wahrnehmung der sensorischen Eigenschaften, die die wichtigsten bestimmenden Faktoren des Genusses sind, die uns überhaupt zur Nahrungsaufnahme treiben, hervor und zum anderen werden die Charakteristika des geschluckten Bolus durch die oralen Gegebenheiten beeinflusst. Dies kann die nachfolgende Verdauungsphase verändern (Mioche et al. 2004, S. 43).

1.2 Physiologie des Kauens

"Die Nahrungsaufnahme beginnt mit dem Transport des Nahrungsmittels durch die Mundhöhle in den Schlund. Die Passage der Mundhöhle wird mit dem sogenannten Schluckakt abgeschlossen, der die Nahrung zur weiteren Verdauung in den Magen befördert." (Schindler und Hugger 2006, S. 113) Kauen ist ein synchroner, rhythmischer Prozess, der die gezielte Koordination von Muskelaktivität und die dadurch gesteuerte Bewegungen erfordert. Der Kauakt beginnt mit dem Abbeißen und wird durch den Schluckakt beendet. Er ist der erste Schritt des Verdauungsprozesses, der die Zerkleinerung von Nahrung sowie die Vermengung dieser mit Speichel und der darin enthaltenen Enzyme zum Ziel hat. So wird ein gleit- und schluckfähiger Bolus kreiert (Engelen et al. 2005, S. 740). „Nach dem willkürlichen Abbeißen eines Bissens mit den Frontzähnen, bzw. Einbringen der Nahrung in die Mundhöhle setzt automatisch der meist reflektorisch ablaufende Prozess der Nahrungszerkleinerung ein, welcher auch als Mastikation bezeichnet wird. Das Kaugut wird nach distal, zu den Molaren und Prämolaren transportiert“ (Kravchenko 2011, S. 6). Textur und Geschmack werden während des Kauens wahrgenommen und tragen so zum Genuss bei (Pereira und van der Bilt 2016, S. 630).

Neurone im Hirnstamm generieren einen Grundrhythmus des Kauens (Lucas 2004, S. 33). Sie bestimmen eine Basissequenz der Muskelaktivität, einschließlich der Reihenfolge, der Dauer und des Rhythmus der Muskelkontraktionen (Orachardson und Cadden 2009, S. 391). Trotzdem ist das Kauen kein unwillkürlicher Prozess, denn die Kaumuskulatur gehört zur Skelettmuskulatur, weshalb sie willkürlich über motorische Neuronen im Nucleus motorius nervi trigemini gesteuert werden kann (Orachardson und Cadden 2009, S. 390). Dabei ist die Kaubewegung keine simple Scharnier-, sondern eine komplexe, dreidimensionale, rhythmische Bewegung, die ein Zusammenspiel der Zähne, der Kau-, Wangen- und Mundbodenmuskulatur, der Kiefergelenke, der Zunge, des Gaumens und der Lippen erfordert. Verschiedene Charakteristika des Kausystems, wie die Dentition, die Kaumuskelaktivität, die Kaukraft oder der Speichelfluss beeinflussen den Kauprozess (van der Bilt 2011, S. 754). So wurden auch unterschiedliche Kaumuster, wie eher hackende oder eher mahlende Bewegungen, beobachtet (Soboļeva et al. 2005b, S. 73).

Das Kauen wird von intrinsischen Faktoren des Probanden und extrinsischen Faktoren der Nahrungsmittel beeinflusst. Zu den intrinsischen Faktoren gehören Alter, Geschlecht und dentaler Zustand des Probanden. Zu den am besten untersuchten extrinsischen Faktoren gehören die Charakteristika der Nahrungsmittel, wie Härte, Fließfähigkeit, Elastizität und Größe der Nahrungspartikel. Diese Faktoren bewirken physiologische Adaptionen, die während einzelner Kauzyklen oder der gesamten Kausequenz auftreten (Woda et al. 2006a, S. 28). Die Mastikation wird nicht nur an die Härte der Nahrungsmittel angepasst, sondern die Modulation des mastikatorischen Prozesses ist ein hochkomplexer Vorgang, der von vielen Charakteristika der Textur der Nahrungsmittel abhängt (Foster et al. 2006, S. 3477). Nahrungsmittel können stark, beispielsweise in ihrer Konsistenz, ihrem Fettanteil oder ihrer Feuchtigkeit variieren. Diese Unterschiede werden in der Kraft reflektiert, die benötigt wird, um sie abzubeißen und in der Art, wie diese zerkaut, in einen Bolus geformt und geschluckt werden (Engelen et al. 2005, S. 740). Auch die individuelle Geschwindigkeit der Unterkieferbewegung hängt von der Art des Kaugutes ab. Hartes und "sprödes" Kaugut (zum Beispiel Nüsse oder Möhren) wird schneller gekaut als zähes Kaugut (zum Beispiel Karamellbonbons) (Wöstmann 2006, S. 269) (Foster et al. 2006, S. 3469). Hartes und trockenes Kaugut benötigt mehr Kauzyklen und verbleibt länger im Mund bis es geschluckt werden kann. Nur so kann es ausreichend zerkleinert und durch den Speichel fließfähig werden, um einen Bolus zu formen, der sicher geschluckt werden kann. Die Eigenschaften der Nahrungsmittel, die Speichelmenge, die Dentition und die Kaukraft beeinflussen die Kauleistung (Pereira et al. 2006, S. 193). So wird das motorische Programm während des Kauvorgangs über das sensorische Feedback kontinuierlich an die Charakteristika des Nahrungsmittels (Peyron et al. 2002, S. 41) und somit die Mastikation in Reaktion auf die Textur der Nahrungsmittel angepasst (Foster et al. 2006, S. 3469).

Gleichzeitig ist das Kauen der erste Schritt der Verdauung (Pereira et al. 2006) (van der Bilt 2002, S. 7), durch den die Nahrung für die Weiterverarbeitung im Verdauungssystem vorbereitet wird. Während des Kauens werden die Essenspartikel und der Bolus in ihrer Größe reduziert, Speichel produziert und Aromen freigesetzt. Geschmack und Textur der Nahrung werden wahrgenommen und beeinflussen den Kauprozess (van der Bilt et al. 2006, S. 22)

(Engelen et al. 2005, S. 740). Jeder weiß, wann und wie er schlucken muss, jedoch sind die Kontrollmechanismen und die Kriterien, die den Schluckvorgang auslösen, noch unbekannt. Eine These ist, dass die Fließeigenschaften und die Dehnbarkeit des Bolus den Schluckakt auslösen (Chen und Lolivret 2010, S. 325). Je schwieriger ein Nahrungsmittel zu schlucken ist, desto länger verweilt es in der Mundhöhle (Chen und Lolivret 2010, S. 331). Wenn der Schluckvorgang ausgelöst wird, wird eine Reihe von festgelegten Vorgängen initiiert, die mindestens 25 Muskelpaare in Mund, Oro- und Hypopharynx sowie dem Oesophagus involvieren. Der Schluckvorgang kann nicht gestoppt oder unterbrochen werden, bevor er nicht vollständig beendet wurde (Chen und Lolivret 2010, S. 325).

In der Literatur gibt es keine einheitliche Bezeichnung, um die Kaufunktion zu charakterisieren. Genutzte Begriffe zur Charakterisierung der Kaufähigkeit einer Person sind die Kauleistung, Kaueffizienz und Kaueffektivität. Diese Begriffe werden verwendet, um die Fähigkeit einer Person zu beschreiben, natürliches oder künstliches Kaugut zu zerkleinern (Eberhard et al. 2012, S. 338). Die Kaufunktion kann beschrieben werden als die objektive Fähigkeit einer Person, feste Nahrungsmittel zu zerkleinern oder die subjektive Antwort einer Person auf Fragen hinsichtlich des Kauens von Nahrungsmitteln (van der Bilt 2011, S. 756). Die objektive Kauffunktion, wird auch als Kauleistung (van der Bilt 2011, S. 756) oder im Englischen als "*masticatory performance*" beschrieben. Die "Kauleistung (*performance*) [wird dabei definiert als die] Partikelgrößenverteilung nach einer vorgegebenen Anzahl von Kauzyklen." (Schindler und Hugger 2006, S. 120) Anders als die Kaueffektivität (*efficiency*). Sie beschreibt die „Anzahl der Kauzyklen, die notwendig ist, um die Nahrung bis zu einer bestimmten Partikelgröße zu reduzieren. Beide Verfahren werden zur Bewertung des Kauvermögens eingesetzt, erlauben jedoch im physikalischen Sinne keine Aussage über die vom Kausystem geleistete Arbeit." (Schindler und Hugger 2006, S. 120) Ein dritter, seltener verwendeter Begriff ist die Kaueffizienz. "Unter Kaueffizienz wird der pro Kauzyklus erreichte Zerkleinerungsgrad der Nahrung verstanden." (Kravchenko 2011, S. 10). Paphangkorakit et al. zeigen jedoch, dass Probanden mit einer guten Kauleistung keine "besseren", im Sinne von "effizienteren" oder „effektiveren“ Kauern sein müssen. Sie zeichnen sich nur dadurch aus, dass sie mehr Muskelkraft während des Kauens einsetzen (Paphangkorakit et al. 2008, S. 533).

1.3 Stand der Forschung

1.3.1 Siebmethode

Lange Zeit wurde die Kauleistung über die Siebmethode bestimmt. Sie wurde das erste Mal 1900 von Gaudenz eingeführt (Olthoff et al. 1984, S. 899). Bei dieser Methode wurden die zerkauten Partikel mit Hilfe eines einzelnen Siebes oder mehrerer Siebe mit unterschiedlichen Maschengrößen analysiert, indem das Gewicht des in den Sieben zurückgebliebenen Kauguts bestimmt wurde (van der Bilt und Fontijn-Tekamp 2004). Dabei stieg die Genauigkeit der Ergebnisse mit der Anzahl der Siebe (van der Bilt 2011, S. 756). Manche Forscher nutzten nur ein Sieb, andere mehrere (Olthoff et al. 1984, S. 899).

Als Kaugut dienten Silikonwürfel der Firma Bayer, deren Hauptkomponente das Abformmaterial Optosil für bezahnte Probanden oder Optocal für Träger von herausnehmbarem Zahnersatz war. Nicht nur die Anzahl der Siebe, sondern auch die Größe und Anzahl der Silikonwürfel variierte. So nutzten Olthoff et al. acht Würfel mit einer Kantenlänge von 8 mm (Olthoff et al. 1984, S. 899–900) und Eberhard et al. siebzehn Silikonwürfel mit einer Kantenlänge von 5,6 mm (Eberhard et al. 2012, S. 339).

Die Siebe wurden übereinandergestapelt, wobei maximal zehn Siebe aufeinander gestapelt wurden. Die maximale Zeit für das gestapelte Sieben betrug fünf Minuten. Danach wurde der Vorgang für jedes einzelne Sieb für erneut maximal fünf Minuten wiederholt (Olthoff et al. 1984, S. 900). Das Sieben erfolgte auf einem zahntechnischen Rüttler und wurde anhand der "Standard Siebmethode" (Allen 1990) mit Sieben der DIN ISO 3310 durchgeführt. Die Maschengrößen folgten einem Verhältnis von $2^{1/2}$. Die größte Maschengröße war bei Eberhard et al. identisch zur Kantenlänge der Silikonwürfel mit 5,6 mm. Die Maschengrößen betragen also 5,6 mm, 4,0 mm, 2,8 mm, 2,0 mm, 1,4 mm, 1,0 mm, 0,71 mm, 0,5 mm, 0,355 mm und 0,25 mm (Eberhard et al. 2012, S. 339). Im Gegensatz hierzu nutzten Olthoff et al., deren Würfel eine Kantenlänge von 8 mm aufwiesen, vier weitere Siebe, zwei größere (11,2 mm und 8,0 mm) und zwei kleinere (0,18 und 0,125 mm) (Olthoff et al. 1984, S. 900).

In der Studie von Eberhard et al. wurden nach zweiminütigem trockenem Sieben 500 ml Ethanol durch den Stapel an Sieben geschüttet und das Sieben weitere 5 Minuten fortgesetzt. Die auf jedem der Siebe zurückgebliebenen Partikel wurden anschließend sorgfältig mit einem Schminkpinsel entfernt und gewogen (Eberhard et al. 2012, S. 339). Eine Trocknung im Ofen (3h bei 60°C) wie bei Olthoff und van der Bilt et al. wurde nicht vorgenommen (Olthoff et al. 1984, S. 900).

Anschließend folgte die Verarbeitung der gewonnenen Daten. Anhand der Verteilung der Partikelgrößen, konnte eine mediane Partikelgröße errechnet werden. Die Literatur zeigt, dass die Größenverteilung von Bruchstücken erfahrungsgemäß der Größenverteilung und der Berechnung der Zerkleinerung von Produkten in der Industrie angepasst werden kann (Allen 1990) . Dabei wird die Rosin-Rammler- Funktion angewendet, die aus Experimenten der Feinzerkleinerung fein gemahlener Kohle abgeleitet wurde (Rosin und Rammler 1933) und das Verhalten der Verteilung der Partikelgrößen am besten beschreibt. Jedoch beobachteten Olthoff et al., dass die Partikelgrößenverteilung zu Beginn des Kauprozesses noch nicht von der kurvenförmigen Rosin-Rammler-Funktion beschrieben werden kann, sondern eher einer stufenförmigen Verteilung gleicht, da noch wenige Kaupartikel zerkaut wurden und die meisten Partikel somit dieselbe Größe haben (Olthoff et al. 1984, S. 901). Sie folgerten, dass sich die Siebmethode für zerkleinertes Kaugut, welches Partikelgrößen zwischen 0,1 mm und 10 mm aufweist, als eine geeignete Methode herausstellt, um die erreichte Reduzierung der Partikelgröße zu bestimmen (Olthoff et al. 1984, S. 899).

1.3.2 Weitere Methoden zur Erfassung der Kaufunktion

Im Jahr 2005 fassten Soboleva et al. die Aufzeichnungssysteme der Bewegung der Mandibula zusammen, da sie sich im wissenschaftlichen und klinischen Alltag immer mehr verbreiteten (Soboleva et al. 2005a, S. 67). Zu diesen Systemen gehören mechanische, fotografische, röntgenologische, elektronische, telemetrische, magnetometrische, und opto-elektronische Hilfsmittel. Dabei ist das Ziel meist eine objektive Basis für die Diagnostik muskuloskeletaler Erkrankungen des Kiefers zu liefern, den Therapiefortschritt zu beobachten oder die funktionalen Ergebnisse einer prothetischen Behandlung zu bewerten (Soboleva et al. 2005a, S. 67). Viele Studien beschrieben zunächst die Bewegungen des Unterkiefers, ließen jedoch keine Informationen über die Ergebnisse und Effektivität des Kauens der Probanden zu. Hierfür wurden weitere Methoden, wie die bereits erwähnte Siebmethode, entwickelt. Neben der Siebmethode wird eine Vielzahl an Methoden zur Analyse der Kaufähigkeit genutzt, wie zum Beispiel das Messen des Zuckerverlustes in einem Kaugummi (Health, 1982), eine kolorimetrische Methode oder photometrische Methoden (Gunne, 1983, Nakasime, Higashi und Ichinose, 1989) (van der Bilt et al. 1993a, S. 163), in denen wiederum verschiedene Kaugüter zum Einsatz kommen. Diese können natürlich oder artifiziell sein. Bei der Anwendung der unterschiedlichen Methoden ist es außerdem wichtig, welche Kenngrößen bestimmt werden sollen. So bestimmt beispielsweise die Siebmethode die Zerkleinerung des Kaugutes, während die kolorimetrische Methode die Vermengung eines Probekörpers betrachtet.

Wichtig ist es hierbei zwischen Methoden, die die Zerkleinerung von Kaupartikeln und denen, die die Vermischung eines Kaugutes beschreiben, zu unterscheiden. Bei Vermischungstests sind die wichtigsten Komponenten die Wangen und die Zunge, während bei der Zerkleinerung die Profilierung und die Größe der Kaufläche ausschlaggebend sind.

1.3.3 Vorgehen in Studie nach Eberhard et al.

Um die aufwendige Technik des Siebens zu vereinfachen, führte die Arbeitsgruppe um H. J. Schindler (Eberhard et al. 2012) ein Scanverfahren ein, bei dem das Kaugut mithilfe eines optischen Scans analysiert wurde. So sollte eine Methode entwickelt werden, die mit der bisher meistverwendeten Siebmethode vergleichbar ist (Eberhard et al. 2012, S. 338). Das Ziel der Studie von Eberhard et al. war es folglich, eine Scanmethode zu entwickeln, die in der Lage ist möglichst ähnliche Ergebnisse wie die Siebmethode zu liefern. Dabei war es wichtig zu bestimmen, welcher Partikel in welchem Sieb liegen bleiben würde sowie ein Gewicht von einem zweidimensionalen Bild abzuleiten, da die Siebmethode eine Gewichtsverteilung beschreibt (Eberhard et al. 2012, S. 340). Hierbei ist das Volumen der Partikel ausschlaggebend, da sich dieses kongruent zum Gewicht verhält und ein geringeres Durchschnittsvolumen der Kaupartikel auf eine höhere Kauleistung des Probanden hinweist. Darüber hinaus kann über das Volumen bestimmt werden, in welchem Sieb der Kaupartikel liegen bleiben würde und somit ein Vergleich mit der Siebmethode hergestellt werden.

Zunächst wählten Eberhard et al. zwanzig Probanden aus. Die Probanden waren zahnmedizinische Studenten der Vorklinik (zehn Männer und zehn Frauen, deren mittleres Alter 24 ± 2 Jahre betrug (Eberhard et al. 2012, S. 339). Die Probanden wiesen, abgesehen von den Weisheitszähnen, eine komplette natürliche Dentition ohne Anzeichen, Symptome oder anamnestische Dokumentation craniomandibulärer Erkrankungen anhand der RDC-TMD (englisch für *Research Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders*) auf (Eberhard et al. 2012, S. 339). Die RDC-TMD beschreiben diagnostische Kriterien, die den Rückschluss auf die Diagnose der Craniomandibulären Dysfunktion zulassen. Als Kaugut wählten Eberhard et al. ein künstliches Kaugut, im Gegensatz zu vorherigen Studien, in denen unter anderem Karotten, Erdnüsse, Gummibärchen oder Kaugummi (Schimmel et al. 2015) genutzt wurden. Je Proband und Durchgang wurden siebzehn Silikonwürfel mit einer Kantenlänge von 5,6 mm aus einem standardisierten Kaumaterial, dem Abformmaterial Optosil Comfort der Firma Bayer, hergestellt. Die Probanden führten außerdem fünfzehn Kauzyklen durch bevor sie das Kaugut wieder ausspuckten und dieses anschließend desinfiziert wurde.

Die ersten Kaubewegungen wurden still mitgezählt, um den gewohnten Kaurhythmus nicht zu beeinflussen. Die dreizehnte bis fünfzehnte Kaubewegung wurde laut mit angepasster Geschwindigkeit an die des Probanden mitgezählt (Eberhard et al. 2012, S. 339). Die zerkauten Würfel wurden in einem Kaffeefilter gesammelt und die Probanden spülten den Mund mit circa hundert Millilitern Wasser aus, um die verbliebenen Partikel zu erreichen (Eberhard et al. 2012, S. 339). Die luftgetrockneten Proben wurden mit reinem Alkohol in demselben Filter desinfiziert. Später wurden die Partikel mithilfe eines Schminkpinsels vom Filter entfernt (Eberhard et al. 2012, S. 339).

Der Scan wurde mit einem konventionellen Flachbettscanner mit einer Auflösung von 1200 dpi (*drops per inch*) vorgenommen und ein Graustufenscan mit acht bit eingestellt. Acht bit bedeuten 2^8 , also 256 Abstufungen, die innerhalb eines Farbkanals dargestellt werden. Je höher die Anzahl der Farbkanäle ist, desto höher ist die Anzahl der Helligkeitsstufen, die dargestellt werden können. Außerdem wurde auf Filter verzichtet. Die zu scannenden Partikel wurden anschließend auf einer zwanzig mal dreißig Zentimeter großen Glasplatte ausgebreitet. Um Gruppenbildungen zu verhindern, wurden die Partikel per Hand mit einem Malpinsel verteilt. Dabei wurde keine Ausrichtung der Partikel vorgenommen, sondern sie wurden willkürlich verteilt. Über die Glasplatte wurde eine dreißig mal vierzig Zentimeter große, schwarze, mit Velours ausgekleidete Box platziert, um Reflexionen im Hintergrund zu minimieren. Vor jedem Scanprozess wurde die Glasplatte mit einem fusselfreien Stoff und purem Alkohol gereinigt und desinfiziert. Die Box wurde mit einem Fusselentferner gereinigt. Abschließend wurden die Partikel mit einem Schminkpinsel von der Glasplatte entfernt, gesammelt und gewogen (Eberhard et al. 2012, S. 340). Die gescannten Bilder wurden als jpeg-Dateien gespeichert und mit einer Grafikverarbeitungssoftware und der Bildbearbeitungssoftware „Image J++“ verarbeitet (Eberhard et al. 2012, S. 340). Dieses Vorgehen gab Aufschluss über verschiedene Parameter, wie die Fläche und die am besten zu dem jeweiligen Partikel passende Ellipse (Eberhard et al. 2012, S. 338). Die Helligkeit und der Kontrast wurden automatisch angepasst und auf schwarz/weiß mit einem grauen Schwellenwert von 128 eingestellt (Eberhard et al. 2012, S. 340).

Auf Grundlage des zweidimensionalen Scans wurde anschließend ein Volumen für jeden Partikel angenommen, das dann in ein Gewicht umgerechnet wurde (Eberhard et al. 2012, S. 338). Die Ergebnisse wurden im Dateiformat TXT (eine unformatierte Textdatei) gespeichert und die gewonnenen Daten in Excel importiert (Eberhard et al. 2012, S. 340). Mit dem Ziel eine separate Verteilung der Partikelgrößen zu erhalten, die vergleichbar mit der Siebmethode ist, wurden fünf Kauproben genutzt, um einen größenabhängigen Faktor zu ermitteln, der eine Umwandlung von einer Fläche auf ein Volumen zuließ (Eberhard et al. 2012, S. 338). Das kumulierte Gewicht der jeweiligen Methode wurde mithilfe der Rosin-Rammler-Funktion an eine Kurve angepasst, um die mediane Partikelgröße, den x50-Wert, zu bestimmen (Eberhard et al. 2012, S. 338). Die Rosin-Rammler-Funktion (Rosin und Rammler 1933) wurde bereits bei der Siebmethode genutzt, da die in Studien erzielten Verteilungen am besten mit ihrer Hilfe beschrieben werden können. Danach wurden die Partikel auf die korrespondierenden Siebe verteilt und anhand dessen ihr Gewicht errechnet. Die Größe der Siebe war bei dem Material Optosil, das für bezahnte Probanden genutzt wird, wie folgt aufgeteilt:

Mesh size	min feret condition	area size condition
0.00 mm	min feret \leq 0.2117 mm	area \leq 4.130 mm ²
0.25 mm	0.2117 mm < min feret \leq 0.4233 mm	area \leq 4.130 mm ²
0.35 mm	0.4233 mm < min feret \leq 0.5778 mm	area \leq 4.130 mm ²
0.50 mm	0.5778 mm < min feret \leq 0.8674 mm	area \leq 4.130 mm ²
0.71 mm	0.8674 mm < min feret \leq 1.169 mm	area \leq 4.130 mm ²
1.0 mm	1.169 mm < min feret \leq 1.594 mm	area \leq 4.130 mm ²
1.4 mm	1.594 mm < min feret	area \leq 4.130 mm ²
2.0 mm	1.594 mm < min feret	4.130 mm ² < area \leq 11.13 mm ²
2.8 mm	1.594 mm < min feret	11.13 mm ² < area \leq 18.84 mm ²
4.0 mm	1.594 mm < min feret	18.84 mm ² < area \leq 36.99 mm ²
5.6 mm	1.594 mm < min feret	36.99 mm ² < area

Abbildung 1: Maschengröße der Siebe, Abb. übernommen von Prof. Dr. E. Wanke (Prof. Dr. E. Wanke 2019)

1.3.4 Vergleich von Sieb- und Scanmethode

Eberhard et al. erkannten, dass die Rosin-Rammler-Funktion (Eberhard et al. 2012, S. 338) beziehungsweise die Partikelgrößenverteilung des Scannens und Siebens einander ähnelten. Es gab eine große Übereinstimmung zwischen dem Gewicht der Siebe mit den Maschengrößen von 4,1 mm. Für kleine und größere Partikel war die Differenz größer (Eberhard et al. 2012, S. 340). Die Verteilung der Partikelgrößen war 20 % größer als die, die mit der Siebmethode bestimmt wurde (Eberhard et al. 2012, S. 339).

Eberhard et al. waren jedoch nicht die Ersten, die ein digitales oder ein Scanverfahren nutzten. Bereits Wilding bestimmte die Kauleistung digital anhand der Größe der zerkauten Partikel nach einer festgelegten Anzahl an Kauzyklen. Die Partikel wurden über ein Bildanalyseprogramm analysiert und eine mediane Größe kalkuliert (Wilding 1993, S. 589). Es wurde jedoch kein Vergleich mit der Siebmethode vorgenommen.

Die erste wichtige Vergleichsstudie wurde 1993 von van der Bilt et al. publiziert. Ziel war es, die durch die Sieb- und durch die Scanmethode erzielten Ergebnisse zu vergleichen, indem Partikel mit bekannten Maßen verschiedener Größen gesammelt wurden. Dafür wurden zwei Mischungen (grob und fein) von halben Würfeln aus Silikon (Optosil) mit beiden Methoden analysiert. Die Form und das Volumen jedes Partikels dieser beiden Mischungen waren bekannt, sodass die Ergebnisse exakt verifiziert werden konnten. Daraus konnte geschlossen werden, dass bei Partikeln einer bekannten Form eine vollständige Übereinstimmung mit beiden Methoden erreicht wurde (van der Bilt et al. 1993b, S. 161). Zusätzlich wurden gekaute Partikel (grob, mittel, fein) genutzt, um die Partikelgrößenverteilung darzustellen. Beide Methoden wurden so ausgewertet, dass sie verglichen werden konnten. Eine mediane Partikelgröße aufgrund der Volumenverteilung wurde so determiniert (van der Bilt et al. 1993b, S. 159). Abschließend konnte festgestellt werden, dass [...] sowohl die Sieb- als auch die Scanmethode adäquate Methoden waren, um Mischungen von gekauten Partikeln zu analysieren und beide zu ähnlichen Ergebnissen bezüglich der Reduzierung der Partikelgrößen kamen (van der Bilt et al. 1993b, S. 159).

Trotzdem wies die Scanmethode auch Schwächen auf. Diese beschrieben Eberhard et al. und stellten klar, dass die Methode einer Bildanalyse, die auf einem Video oder optischen Scan basiert, den Vorgang zu vereinfachen scheint, aber an Genauigkeit einbüßen könne, da von einem zweidimensionalen Bild auf die dritte Dimension geschlossen wurde (Eberhard et al. 2012, S. 339).

1.4 Forschungsbedarf

Solange die Kauleistung mit einer Vielzahl verschiedener Methoden, die in der Literatur beschrieben werden, erhoben wird, wird es nicht möglich sein, sie fundiert zu vergleichen. Um dies zu ermöglichen, ist die Verwendung einer standardisierten Analyse der Partikelgröße und ein standardisiertes Kaugut nötig (Olthoff et al. 1984, S. 902).

Mit Optosil ist mittlerweile ein häufig verwendetes artifizielles Kaugut verfügbar. Außerdem zeigte die Scanmethode eine deutliche Aufwands-, Material- und Zeitersparnis im Vergleich zur Siebmethode. In der Studie von Eberhardt et al. dauerte das Sieben, um eine Kauprobe zu analysieren, fünfzig Minuten, während die Scanmethode (inklusive der Bildanalyse bis zum Erhalt der analogen Gewichte) pro Probe nur zehn Minuten dauerte (Eberhard et al. 2012, S. 341). Das Potenzial der Studie von Eberhard et al. liegt darin, dass diese Methode so gestaltet wurde, dass sie möglichst nah an die Ergebnisse der Siebmethode heranreichte (Eberhard et al. 2012, S. 341). Dabei setzte sie die Siebmethode als „Goldstandard“ und blendete ihre Schwächen aus, während sie mit allen Mitteln versuchte, dieselben Ergebnisse zu erreichen.

Um die Ergebnisse einzelner Probanden zu vergleichen, wird in vielen Studien die mediane Partikelgröße, auch x50-Wert (Eberhard et al. 2012, S. 341) genannt, herangezogen. Dieser Wert bestimmt die Partikelgröße, bei der 50 % des Kauguts (bezogen auf das Volumen bzw. Gewicht des Kauguts) in einem theoretischen Sieb mit exakt dieser Maschengröße liegen geblieben wären. In der vorliegenden Studie soll geprüft werden, ob dieser Wert am aussagekräftigsten ist oder ob beispielsweise ein x30- oder ein x70-Wert eine geringere Streuung aufweisen.

2 Problemstellung

Ziel dieser Arbeit war es, mit zahn- und funktionsgesunden Probanden die Methodik der Erfassung der Kauleistung zu vereinfachen und onlinefähig zu machen. Dies sollte mithilfe einer deutlich weiterentwickelten Softwarearchitektur zur Kaupartikelgrößenmessung klinisch-praktisch überprüft werden. Auf diese Weise sollte die Methodik stabil für den Praxisgebrauch und in wissenschaftlichen Studien einsetzbar werden.

3 Material und Methoden

3.1 Ethikkommission

Vor Durchführung der randomisierten monozentrischen klinischen Pilotstudie (Medizinische Forschung in Verbindung mit ärztlicher Versorgung) erfolgte die Genehmigung durch die Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (Studiennummer: 2020-869) am 18. Mai 2020. Außerdem wurden die Richtlinien der Deklaration von Helsinki befolgt.

3.2 Probandenkollektiv

Die an der Studie teilnehmenden 55 Probanden waren zwischen achtzehn und vierzig Jahren alt (Mittelwert = 26,9, Median = 25) sowie vollbezahnt (oder nahezu vollbezahnt), zahn- und funktionsgesund. Vollbezahnt bzw. nahezu vollbezahnt bedeutete in diesem Fall, dass die Weisheitszähne und/oder ein Set an Prämolaren fehlen durften, solange die Zahnreihe geschlossen blieb und die Anzahl an 24 Zähnen nicht unterschritten wurde. Molaren durften nicht fehlen. Die Probanden sollten frei von Anzeichen, Symptomen oder anamnestischer Dokumentation craniomandibulärer Erkrankungen anhand der DC/TMD (*Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders*) sein. Der vollständige DC/TMD-Fragebogen musste nicht ausgefüllt werden, da dort auch auf die Schmerzqualität und -stärke eingegangen wird, ein Anzeichen auf eine CMD jedoch zum sofortigen Ausschluss aus der Studie geführt hätte. Aus diesem Grund wurde eine reduzierte mündliche Abfrage durchgeführt. Der Fragebogen hierzu befindet sich im Anhang. Sie gaben sowohl mündlich als auch schriftlich ihr Einverständnis zur Studienteilnahme und konnten die Untersuchung jederzeit ohne Angabe von Gründen abbrechen. Es bestand vorab außerdem ausreichend Zeit für Rückfragen. Auch bei einem Verdacht auf eine allergische Reaktion auf das künstliche Kaumaterial (Silikon), beispielweise bei einer auftretenden Rötung, einer Schwellung oder eines Juckreizes, wäre die Untersuchung sofort abgebrochen worden. Zunächst wurden die Ein- bzw. Ausschlusskriterien über einen Fragebogen zu möglichen Allgemeinerkrankungen und Kaugewohnheiten überprüft. Diese lauteten wie folgt:

Tabelle 1: Ein- und Ausschlusskriterien der Studie

Einschlusskriterien	<ul style="list-style-type: none"> • vollbezahlte (oder nahezu vollbezahlte) Personen • Alter zwischen 18 und 40 Jahren • ausreichende Deutschkenntnisse
Ausschlusskriterien	<ul style="list-style-type: none"> • Bezahlung mit weniger als 24 Zähnen, verkürzte Zahnreihe (Fehlen von Molaren) • unversorgtes Lückengebiss bzw. prothetisch versorgtes Lückengebiss mit herausnehmbarem oder feststehend-herausnehmbarem Zahnersatz • faziale oder zervikale Traumata oder Kiefergelenksoperationen • Schmerzen/Beschwerden dentogener oder parodontaler Ursache • Erkrankungen mit Beteiligung des Zentralnervensystems/peripheren Nervensystems • Alzheimer • Down Syndrom • Erkrankungen des rheumatischen Formenkreises sowie Fibromyalgie • Vigilanzstörungen • schwere psychische/psychiatrische Erkrankungen (wie endogene Depression, schizophrene Störungen, schwere Zwangs- bzw. Angststörungen) • Drogen-, Alkohol- oder Medikamentenabusus • sedierende Medikation • Schwangerschaft, Stillzeit • Allergie auf Silikone • Alter unter 18 Jahre bzw. über 40 Jahre • fehlende Deutschkenntnisse

Zudem gaben die Probanden ihre Händigkeit an. Anschließend erfolgte eine klinische Inspektion, bei der noch einmal geprüft wurde, ob die vorher festgelegten Einschlusskriterien erfüllt werden. Dies bedeutet, dass die Probanden mindestens vierundzwanzig Zähne aufweisen mussten, wobei die Weisheitszähne und gegebenenfalls vier der Prämolaren fehlen, die Zahnreihen jedoch keine Lücken, Brücken, Implantate, insuffiziente Füllungen oder kariöse Läsionen aufweisen durften. Suffizient überkronte Zähne galten als zahngesund. Außerdem wurde durch eine Palpation der Kaumuskulatur sowie eine funktionelle Überprüfung eine Beeinträchtigung des Kauakts ausgeschlossen.

Anschließend folgte die Randomisierung der Probanden mithilfe einer Versuchspersonennummer. So konnte sichergestellt werden, dass die Daten im Falle eines Wunsches nach einem Ausscheiden aus der Studie gelöscht werden können.

Es waren zwei Untersuchungstermine geplant. Vier der 55 Probanden erschienen jedoch nicht zu ihrem zweiten Termin und zwei konnten aufgrund einer nicht auszuschließenden Schwangerschaft nicht an der zweiten Sitzung teilnehmen. Die Daten der ersten Sitzung dieser Teilnehmer wurden trotzdem in die Berechnungen, die ausschließlich die erste Sitzung betrafen, einbezogen.

3.3 Materialien

Das künstliche Kaugut wurde aus dem Abformmaterial Optosil P Plus der Firma Bayer hergestellt. Dieses wurde mit Xantopren im Verhältnis 10:0,3 vermischt, das bedeutet, dass 10 g Optosil P Plus mit 0,3 g Xantopren als Aktivator vermischt und in eine eigens dafür hergestellten Metallform eingebracht wurden.

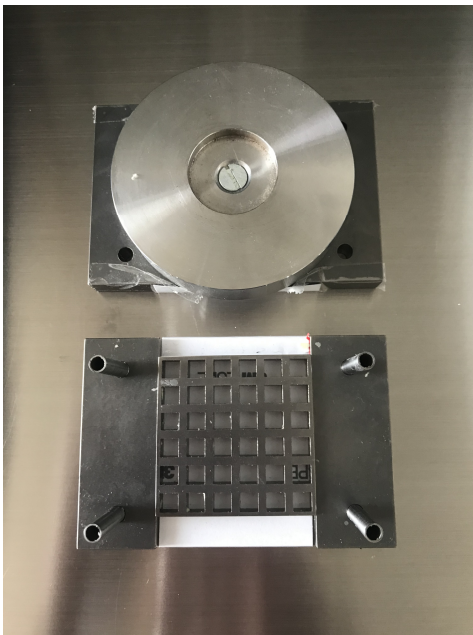


Abbildung 2: Metallform zum Pressen der Silikonwürfel

Mithilfe dieser Metallform (Abb. 2) wurden pro Pressvorgang 36 Silikonwürfel mit einer Kantenlänge von 5,6 Millimetern hergestellt. Diese Kantenlänge wurde von der Arbeitsgruppe um H. J. Schindler übernommen (Eberhard et al. 2012, S. 339) Die entstandene Mischung aus Optosil P Plus und Xantopren wurde auf das Gitter der Pressform verteilt. Die Verarbeitungszeit beträgt, laut Gebrauchsanweisung eine Minute.

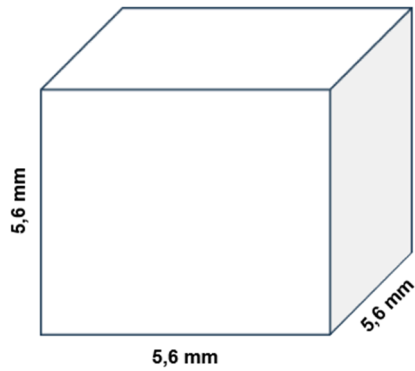


Abbildung 3: Silikonwürfel mit einer Kantenlänge von 5,6 mm, eigene Darstellung

Anschließend wurde die Metallform zusammengesetzt und in eine hydraulische Küvettenpresse eingespannt. Die Kraft wurde auf 3000 kp (Kilopond, veraltete Einheit der Kraft, 1 kp entspricht etwa 9,80665 Newton) erhöht und 4 Minuten abgewartet. Auch dies folgt den Angaben der Gebrauchsanweisung.



Abbildung 4: Küvettenpresse mit eingespannter Metallform

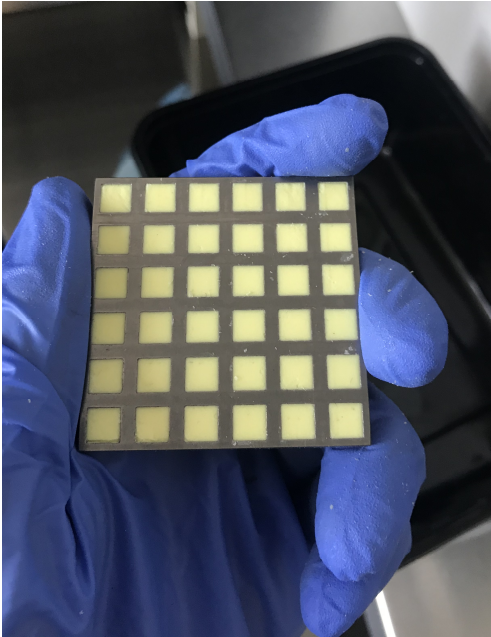


Abbildung 5: 36 Silikonwürfel in der Form nach dem Pressvorgang

Beim ersten Untersuchungstermin kauten die Probanden zur Eingewöhnung mit zehn Silikonwürfeln (künstliches standardisiertes Kaugut, Material: Optosil P Plus), zunächst ohne vorherige Festlegung des Kauablaufs. Sie wurden nur instruiert in einer komfortablen aufrechten Position zu stehen und beim Kauen fest zuzubeißen. Anschließend sollten sie die zerkauten Würfel in einen Kaffeefilter ausspucken und mit 100 ml Wasser umspülen. Auch das Wasser wurde in den Kaffeefilter gespuckt, um auch alle verbliebenen Silikonbruchstücke erfassen zu können. Diese erste Probe mit geringerer Würfelzahl wurde später verworfen.

Danach wurde den Probanden ein Becher mit siebzehn Würfeln gereicht und sie wurden erneut angewiesen in derselben komfortablen Position zu stehen und fest zu kauen. Sie sollten das Kaugut nach fünfzehn Kauzyklen in einen Kaffeefilter spucken, anschließend wieder zur Reinigung der Mundhöhle mit 100 ml Wasser umspülen und auch dieses Gemisch, um die verbliebenen Partikeln zu gewinnen, in den Kaffeefilter spucken. Der Untersuchungsleiter zählte die letzten drei Kauzyklen laut mit, damit sich die Probanden nicht auf das Zählen konzentrieren mussten, aber gleichzeitig zunächst ihr eigenes Kautempo finden konnten.

Es wurden an beiden Untersuchungsterminen drei Proben genommen. Vor dem Kauen der ersten Probe bekamen die Probanden die Instruktion zu gewohnheitsmäßigem (freien) Kauen. Bei der zweiten Probe sollten die Probanden nur rechts, bei der dritten nur links kauen (angewiesenes Kauen). Die Anzahl der Kauzyklen und der Gesamtablauf blieben gleich.

Nach circa 14 Tagen wurden die Probanden zu einem zweiten Termin eingeladen. Hier entfiel das Probekauen zur Eingewöhnung und die Probanden gaben erneut drei Proben ab: eine Probe für „freies Kauen“ und zwei Proben für angewiesenes Kauen. Dabei kauten die Probanden einmal nur auf der rechten und einmal nur auf der linken Seite.

An die Gewinnung der Proben schloss sich eine Reinigung des gewonnenen Materials mit Wasser an, indem die Proben in einem Kaffeefilter mit 100 ml Leitungswasser vollständig übergossen wurden. Nach vollständigen Trocknen schloss sich eine fachgerechte Desinfektion der Partikel mit 20 ml 99-prozentigem Ethanol sowie erneutes Trocknen an. Das Trocknen geschah an der Luft, indem die Filter staubgeschützt und verschlossen stehen gelassen wurden. Vor und nach Gebrauch wurden sowohl der Scanner als auch die Glasscheibe mit einem fusselfreien Tuch und 99-prozentigem Alkohol gereinigt. Die Veloursbox wurde mit einem Fusselentferner gereinigt. Sodann wurden die gesammelten Partikel auf einer zwanzig auf dreißig Zentimeter großen Glasscheibe verteilt und falls nötig mit einer Pinzette sorgsam ausgebreitet, sodass es zu keinen Überlappungen kam. Darüber wurde eine auf die Glasscheibe angepasste, mit Velours ausgekleidete Box gestülpt und hochauflösend gescannt. Der Scanner war ein 2D Flachbild-Scanner mit 8 bit und einer Auflösung von 1200 dpi. Es wurde kein Filter eingesetzt und in Farbe gescannt. Die Scandauer betrug etwa anderthalb Minuten und die Bilder wurden als jpeg-Datei gespeichert. Anschließend wurden die Partikel mit einem Stück Kartonpapier zusammengeschieben und in beschrifteten verschließbaren Plastiktüten aufbewahrt. In vorangegangenen Testscans zeigte sich, dass sich sehr kleine Partikel statisch aufladen und in den Haaren des Schminkpinsels hängen bleiben. Stattdessen wurde zunächst ein Silikonschaber getestet, der jedoch aufgrund der Reibung auf der Glasplatte teilweise hängen blieb und so kein kontrolliertes Zusammenschieben ermöglichte. Aus diesen Gründen wurde ein Kartonpapier verwendet, das nach jedem Probanden ausgewechselt wurde.

3.4 Datenverarbeitung

Die erzeugte Scandatei wurde online in die von Prof. Dr. Egon Wanke vom Institut für Informatik der HHU entwickelte Software hochgeladen. Sie ist unter der Webadresse www.whhu.de erreichbar. Bei der Auswertung wurde aus einem Scan in Farbe zunächst ein Bild in Graustufen und anschließend ein Schwarzweißbild erzeugt, wobei Werte zwischen 0 und 255 erzielt wurden. 255 bedeutete weiß und 0 tief schwarz. Um das Bild in Graustufen in ein Schwarzweißbild umzuwandeln, wurden alle Werte, die über 128 lagen, als weiß erkannt, alles darunter als schwarz. Somit gab es nun keine Graustufen mehr. Partikel, die eine Größe von unter $0,01 \text{ mm}^2$ aufwiesen, wurden aus der Berechnung exkludiert, um die Kaupartikel von Staub zu unterscheiden. Die Größe, die als Staub exkludiert werden soll, wurde als „*minimum area size*“ angegeben. Dieser Wert war einstellbar. Anschließend analysierte die Software die einzelnen Pixel und daraus resultierenden Partikel. Zusammenhängende Pixel wurden von der Software als ein Kaugutpartikel erkannt und die Partikel wurden durchnummeriert. Zudem wurden für jeden einzelnen Partikel die Kenngrößen für die Beurteilung der Kaupartikel-Größenverteilung berechnet und ausgegeben. Da die Pixelgröße bekannt war, ließ sich nun die zweidimensionale Fläche dieser Partikel in Quadratmillimetern berechnen. Außerdem wurde der „*min feret diameter*“, der kleinste „Rohrdurchmesser“ durch den man dieses definierte Partikel schieben könnte, wenn man es richtig positioniert, in Millimeter bestimmt. Dieser wurde in der grafischen Darstellung, wie in der nachfolgenden Abbildung 6 zu sehen, durch zwei parallele Linien, dargestellt. Der *min-feret*-Durchmesser war also der kleinste Abstand zwischen zwei parallelen Linien bei denen die Fläche des Partikels komplett dazwischen lag. Des Weiteren wurde eine Ellipse berechnet, die den Flächenrand des Partikels am besten überdeckte. Diese Annäherungen nutzten bereits Eberhard et al. (Eberhard et al. 2012, S. 342). Bei der Berechnung wurden die Quadrate der kleinsten Abstände zwischen der Ellipse und dem Flächenrand des Partikels minimiert. Anschließend wurde die Fläche des Partikels mit der halben Länge der kleineren Achse der Ellipse („*minor axis length*“) multipliziert. Das Ergebnis war eine Abschätzung für das durchschnittliche dreidimensionale Volumen eines Partikels mithilfe der zweidimensionalen Grundfläche. Diese Abschätzung des Volumens war identisch mit der Vorgehensweise in der Heidelberger Methode der Arbeitsgruppe um H. J. Schindler.

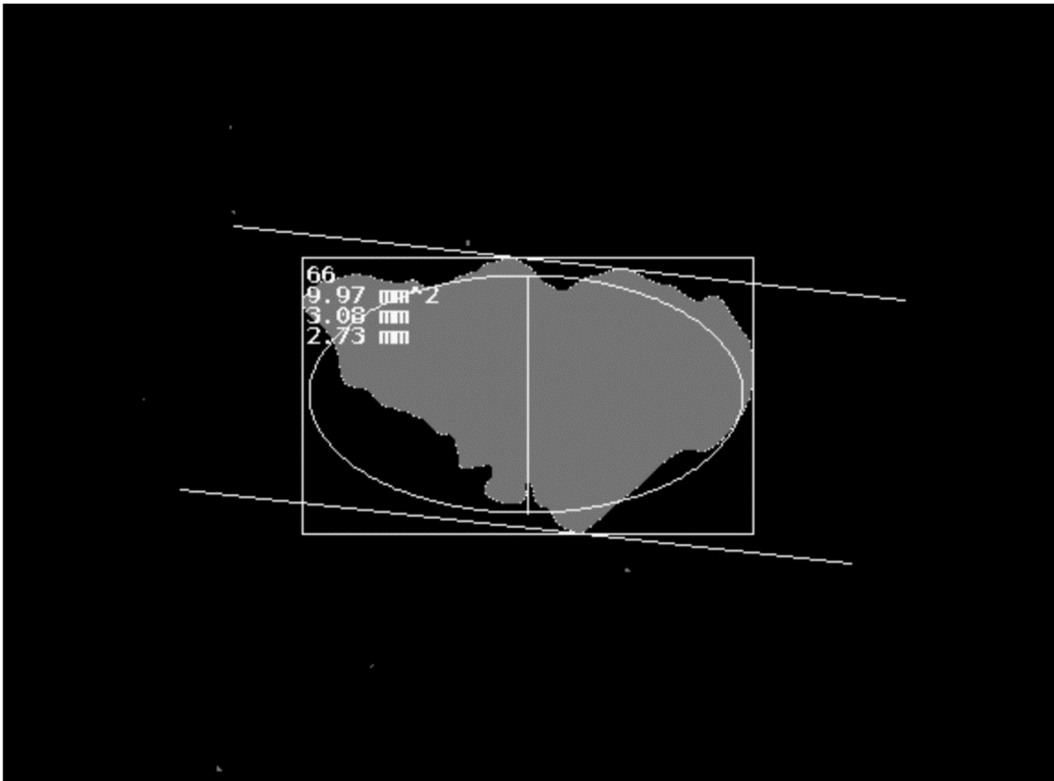


Abbildung 6: Darstellung eines Partikels mithilfe der Software whhu.de. Der graue Bereich illustriert die zusammenhängende Grundfläche des Partikels eingeschlossen in einem Rechteck. Der Abstand zwischen den beiden parallelen Linien entspricht dem *min-feret*-Durchmesser. Die eingezeichnete Ellipse hat die Form und Größe einer Ellipse, die die Fläche des Partikels optimal repräsentiert. Die Ellipse ist in dem Bild jedoch nicht optimal positioniert, da das Zeichenprogramm in der verwendeten Bibliothek das rotierte Zeichnen von Ellipsen nicht beherrscht. Die Zahlenwerte im Rechteck sind die Partikelnummer, die Grundfläche, der *min-feret*-Durchmesser und die Länge der kleinere Ellipsenachse. (Partikel von Proband IR07BN, Rechtskauen, 1. Sitzung)

Schließlich wurden die Partikel nach Größe des *min-feret*-Durchmessers sortiert und analysiert. Separat wurde außerdem der zurückgebliebene Anteil der Partikel („*retained*“), die in einem Sieb der Maschengröße des jeweiligen *min-feret*-Durchmessers liegen geblieben wären, in Prozent bestimmt. Zudem wurden noch einmal die x10- bis x90-Werte für die ermittelten Partikelgrößen ausgegeben. Der x10-Wert war dabei der Wert, bei dessen *min-feret*-Durchmessers 10 % der Partikel, bezogen auf ihr Volumen bzw. Gewicht, in einem theoretischen Sieb mit exakt dieser Maschengröße liegen geblieben wären. Im Gegenzug wären 90 % der Partikel durch dieses Sieb hindurch gefallen.

Zusätzlich wurden die Analyseergebnisse auch nach der Heidelberger Methode, hier anhand der Namen der Autoren L. Eberhard, H.J. Schindler, D. Hellmann, M. Schmitter, P. Rammelsberg, N.N. Giannakopoulos als „[ESHSRG12]“ bezeichnet, ausgegeben. Hierfür wurde die Partikelgrößenverteilung mithilfe der Rosin-Rammler-Funktion und des Gewichts, beziehungsweise Volumens, berechnet. Da das Gewicht sich proportional zum Volumen verhält, kann es dementsprechend ohne Umrechnung für die Berechnung mithilfe der Heidelberger Methode verwendet werden. Die x10- bis x90-Werte für Optosil und Optocal wurden separat ausgegeben. In der vorliegenden Studie wurde kein Optocal verwendet, da dies für Probanden mit herausnehmbarem Zahnersatz indiziert ist. Durch die Ausgabe dieser Werte ist die Software jedoch auch für Optocal anwendbar. Außerdem wurden die a und b-Werte für die Rosin-Rammler-Funktion angegeben, die diese Verteilung am besten beschrieben.

Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgte sowohl als einfache, lesbare Textdatei, als auch als Textdatei mit kommagetrennten Werten zur einfachen Weiterverarbeitung mit Tabellenkalkulationsprogrammen.

3.5 Statistische Auswertung

Die vorliegende Studie zielt besonders darauf ab, die Vielfältigkeit und Bandbreite der Kauleistung einer zahn- und funktionsgesunden Probandengruppe zu beleuchten. Aus diesem Grund waren für die statistische Auswertung vor allem Mittelwerte, Maxima, Minima und die Standardabweichung von Bedeutung.

- Mittelwert: Dieser wird auch als arithmetisches Mittel bezeichnet. Er ist ein Quotient aus der Summe aller erhobenen Werte und der Anzahl der Werte.
- Standardabweichung: Diese gibt den Streubereich der Werte einer Variablen um ihren Erwartungswert an.
- Minimum und Maximum: Diese sind der niedrigste und der höchste Wert des Datensatzes der Stichprobe.

Die dazugehörigen Formeln sind im Formelverzeichnis hinterlegt.

Die erhobenen Werte wurden in Microsoft Excel manuell übertragen und mehrmals auf ihre Richtigkeit überprüft. Anschließend wurden die Daten nach unterschiedlichen Gesichtspunkten, wie zum Beispiel erste und zweite Sitzung oder Männer und Frauen, gruppiert und unter Betrachtung der oben genannten Kennwerte verglichen. Diese wurden, wie im Kapitel Ergebnisse dargestellt, in Tabellen zusammengefasst und grafisch mithilfe verschiedener Diagramme aufbereitet.

Für die Darstellung mithilfe von Boxplot-Diagrammen wurden bei den zu analysierenden Datenreihen außerdem der Median und die Quartile berechnet.

- Median: Dieser teilt den Datensatz einer Stichprobe in zwei Hälften, sodass die Werte in der einen Hälfte kleiner gleich und in der anderen Hälfte größer gleich des Medianwerts sind.
- Quartil: Ein Quartil teilt die sortierte Datenreihe in vier gleich große Klassen auf.

Auf die herangezogenen Werte und die Berechnungen zum Vergleich der jeweiligen Vergleichsgruppen wird unter den verschiedenen zu analysierenden Gesichtspunkten für eine bessere Übersicht noch einmal in deren jeweiligen Unterkapiteln im nachfolgenden Kapitel Ergebnisse eingegangen.

4 Ergebnisse

4.1 Gesamtes Probandenkollektiv

An der Studie nahmen 20 Männer und 35 Frauen teil. Nach Angaben der Probanden waren davon 49 Rechts- und sechs Linkshänder.

Die Ergebnisse zeigten eine große Spannweite an x50-Werten. Dabei lag das kleinste Minimum des freien Kauens beider Sitzungen bei 2,67 mm (Abb. 7, Tab. 2) und das höchste Maximum des freien Kauens bei 5,79 mm (Abb. 8, Tab. 2). Das kleinste Minimum des angewiesenen Kauens (Rechts- und Linkskauen) lag bei 2,34 mm (Rechtskauen der zweiten Sitzung) und das höchste Maximum bei 5,84 mm (Rechtskauen der ersten Sitzung) (Tab. 3 und 4).

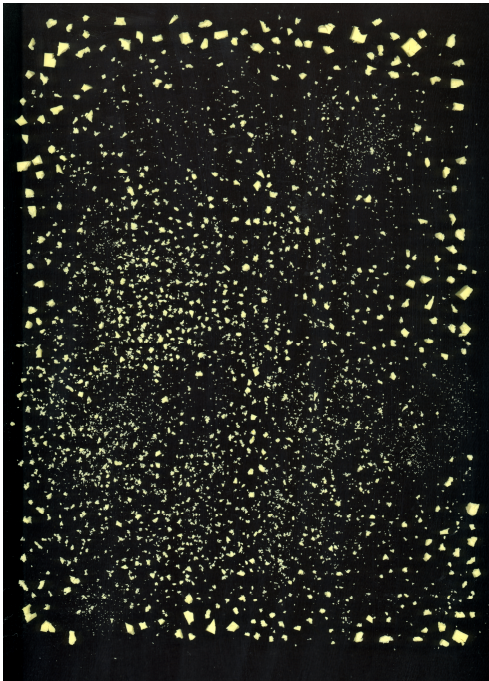


Abbildung 7: Beispiel eines Scans mit einem niedrigen x50-Wert (x50 = 2,67 mm, Proband UH09RN, freies Kauen, 1. Sitzung)



Abbildung 8: Beispiel eines Scans mit einem hohen x50-Wert (x50 = 5,79 mm, Proband AR11DG, freies Kauen, 2. Sitzung)

Wie man in den beiden vorangehenden Abbildungen (Abb. 7 und 8) sieht, war der Unterschied zwischen den einzelnen Proben bereits im Scan deutlich zu erkennen.

4.1.1 Freies Kauen

Zunächst wurden die Werte des Gesamtkollektives dargestellt. Da in vorherigen Studien meist die x50-Werte verglichen wurde, wurden zunächst die x50-Werte der ersten und zweiten Sitzung bei freiem und angewiesenem Kauen analysiert. Zum Vergleich wurden außerdem die x30- und x70-Werte hinzugezogen. Das angewiesene Kauen unterschied dabei zwischen Rechts- und Linkskauen. Die Probanden, die nur zum ersten Termin erschienen, wurden in der nachfolgenden Tabelle grau dargestellt. Die Ergebnisse ihrer ersten Sitzung sind trotzdem in die Berechnungen, die nur diese Sitzung betrafen, eingegangen. Für die gewonnenen Daten wurden außerdem für jeden Versuchsdurchgang der jeweilige Mittelwert, das Minimum, das Maximum und die Standardabweichung berechnet.

Tabelle 2: Gewonnene Daten des freien Kauens aller Probanden der ersten und zweiten Sitzung, grau gedruckt sind die Probanden, die zum zweiten Termin nicht erschienen sind (Werte in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet)

	x30-Wert		x50-Wert		x70-Wert	
	1. Sitzung	2. Sitzung	1. Sitzung	2. Sitzung	1. Sitzung	2. Sitzung
BL30TN	4,73	5,66	3,6	5,00	2,68	3,68
SR18HN	5,67	5,51	5,53	4,21	4,05	3,13
FS19WZ	5,35	-	4,12	-	3,49	-
PG28DG	4,78	4,92	3,85	3,84	3,17	2,92
JJ30MS	5,67	5,78	4,5	4,88	3,65	4,32
NS03KJ	5,67	5,73	5,29	5,01	3,96	3,87
HA27MN	5,41	4,80	4,44	4,01	3,38	3,29
EJ27MS	4,51	5,02	3,32	3,84	2,26	2,69
SH17MS	5,48	5,92	4,19	5,74	3,47	4,76
IM01DG	4,91	4,99	3,57	3,77	2,62	2,87
SD22MS	5,14	5,54	3,79	4,19	2,97	2,75
IR07BN	5,72	5,79	5,43	5,12	4,49	4,36
HH04KD	5,76	5,72	4,87	4,56	3,58	3,36
AR11DG	5,90	5,88	5,75	5,79	5,01	4,97
IZ10MS	5,69	5,68	5,48	4,92	4,53	4,01
TR01DG	5,28	4,19	3,87	3,62	3,04	2,79
CR30DG	5,73	-	4,07	-	3,15	-
PF02DG	5,71	5,78	5,49	5,21	4,74	4,39
MF07BM	5,70	5,95	4,58	5,68	3,36	4,21

Ergebnisse

HG15WE	5,85	5,78	5,72	5,67	5,53	5,21
AK03VT	5,53	5,16	4,39	4,25	3,73	3,58
CD17RN	5,66	4,78	4,51	3,88	3,33	2,84
HB21RN	4,00	-	3,35	-	2,74	-
MK29RN	4,35	3,91	3,72	2,78	2,84	2,03
PK11RN	5,61	-	4,46	-	3,48	-
KF18DG	5,71	4,74	5,05	4,14	3,84	3,19
BH11RN	5,69	4,42	5,62	3,42	4,7	2,6
GD15BL	5,59	5,61	4,48	4,85	3,66	4,05
BL08BN	5,68	5,83	5,5	4,95	4,01	3,87
MK31MS	5,90	5,13	5,63	4,46	4,55	3,87
AM13MS	4,52	5,29	3,76	4,29	3,18	3,51
BJ12DG	5,83	5,49	5,66	4,40	4,23	3,45
AS10MS	4,69	-	4,10	-	3,03	-
KR12VN	5,70	5,87	5,15	4,89	3,90	3,89
SS24VT	5,68	5,73	5,01	5,21	4,13	3,99
SW14DG	5,24	5,80	4,29	5,30	3,39	4,21
CA04EN	5,70	5,13	4,78	4,27	3,69	3,48
KA19EN	3,55	4,30	2,91	3,61	2,24	2,72
DS24EN	5,66	5,03	4,28	4,06	3,17	3,38
JM06MR	5,15	5,94	4,51	5,21	3,67	4,19
SK03HE	4,43	4,81	3,73	3,78	2,88	3,02
SS11EN	3,86	4,23	3,10	3,20	2,36	2,55
IK16VN	4,61	4,00	3,89	3,24	2,82	2,53
IK12VN	5,21	4,90	3,73	3,75	2,82	2,41
EH26DG	4,67	4,02	3,51	3,10	2,48	2,32
VM19ON	4,30	4,37	3,67	3,66	2,99	2,87
UH19BP	5,28	5,54	4,12	4,32	3,11	3,61
MD06KN	5,71	5,80	4,74	5,49	3,91	4,17
MR18KE	5,86	5,69	5,70	4,91	5,2	4,10
SF13HN	5,28	5,70	4,44	4,61	3,56	3,64
MM18DF	5,81	5,75	5,76	5,69	5,59	5,58
IP21HM	5,48	4,38	4,26	3,62	3,55	2,86
UH09RN	3,28	4,58	2,67	3,55	1,96	2,65
PH26DG	5,01	-	4,19	-	3,46	-
CD17KZ	5,39	4,73	4,46	3,70	3,25	2,92
Mittelwert	5,24	5,21	4,45	4,40	3,54	3,50
Minimum	3,28	3,91	2,67	2,78	1,96	2,03
Maximum	5,90	5,95	5,76	5,79	5,59	5,58
Standardabweichung	0,63	0,62	0,81	0,79	0,81	0,79

Die Tabelle 2 zeigt einen von x30- bis x70-Werten sinkenden Mittelwert. Dieser lag in der zweiten Sitzung jeweils niedriger als in der ersten. Auch die Minima sanken von den x30- zu den x50- und den x70-Werten.

Sie waren in der zweiten Sitzung jedoch jeweils größer als in der ersten. Auch die Maxima der x30 und der x50-Werte verhielten sich in derselben Weise. Das x70-Maximum lag in der zweiten Sitzung 0,1 mm niedriger als in der ersten. Außerdem sanken die Minima von den x30- zu den x70-Werten stärker als die Maxima. Die Standardabweichung lag bei den x30-Werten niedriger als bei den x50- und den x70-Werten.

4.1.2 Angewiesenes Kauen

In vorherigen Arbeiten wurden zur Auswertung der Ergebnisse meist die x50-Werte herangezogen. Um zu überprüfen, ob diese dafür am besten geeignet sind, wurden in dieser Arbeit zusätzlich die x30- und x70-Werte bestimmt. In den nachfolgenden Tabellen werden sowohl die Ergebnisse der x50-Werte, als auch die der x30- und x70-Werte des Rechts- und des Linkskauens dargestellt. Die Probanden, bei denen nur Daten für die erste Sitzung erhoben werden konnten, sind hellgrau gedruckt, jedoch in den Berechnungen, die ausschließlich die erste Sitzung betrafen, berücksichtigt.

Tabelle 3: x30-, x50- und x70-Werte des Rechtskauens aller Probanden der ersten und zweiten Sitzung, grau gedruckt sind die Probanden, die zum zweiten Termin nicht erschienen sind (Werte in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet)

Rechtskauen						
	x30-Wert		x50-Wert		x70-Wert	
	1. Sitzung	2. Sitzung	1. Sitzung	2. Sitzung	1. Sitzung	2. Sitzung
BL30TN	5,81	4,82	5,57	3,91	4,67	3,19
SR18HN	6,04	6,07	5,83	5,13	5,74	4,00
FS19WZ	5,35	-	4,18	-	3,50	-
PG28DG	5,50	4,28	4,08	3,57	2,91	3,01
JJ30MS	5,63	5,79	4,93	4,83	3,87	3,69
NS03KJ	5,89	5,90	5,52	5,70	4,49	4,87
HA27MN	4,97	5,28	4,31	4,04	3,50	3,41
EJ27MS	4,27	4,87	3,42	3,24	2,53	2,27
SH17MS	5,45	5,87	4,52	5,75	3,71	5,32
IM01DG	5,77	4,37	4,02	3,38	2,95	2,51
SD22MS	5,92	4,33	4,48	3,47	3,71	2,56
IR07BN	5,82	5,85	5,39	5,49	4,55	4,27

Ergebnisse

HH04KD	5,68	5,73	4,54	4,90	3,36	3,76
AR11DG	5,86	5,83	5,72	5,63	5,58	5,04
IZ10MS	5,99	5,87	5,57	5,21	4,2	4,00
TR01DG	4,62	4,91	3,55	3,73	2,76	2,61
CR30DG	4,87	-	3,61	-	2,66	-
PF02DG	5,83	5,78	5,43	5,35	4,32	3,94
MF07BM	6,06	5,88	5,82	5,70	5,52	5,46
HG15WE	5,93	5,81	5,71	5,68	5,50	4,53
AK03VT	5,73	5,65	4,36	4,21	3,40	3,19
CD17RN	5,30	5,14	4,32	4,00	3,54	2,82
HB21RN	5,32	-	4,58	-	3,78	-
MK29RN	4,17	4,48	3,44	3,77	2,76	2,76
PK11RN	5,59	-	4,43	-	3,55	-
KF18DG	5,90	5,74	5,54	5,24	3,39	4,05
BH11RN	5,85	4,34	5,71	3,70	4,81	3,14
GD15BL	5,59	5,76	4,14	5,27	3,10	4,05
BL08BN	5,81	5,62	4,67	4,00	3,07	2,97
MK31MS	5,73	5,67	5,48	5,03	4,35	3,93
AM13MS	5,02	5,12	3,92	4,69	3,02	3,72
BJ12DG	5,57	5,44	4,91	4,20	3,89	3,28
AS10MS	5,86	-	5,63	-	4,43	-
KR12VN	5,67	5,66	4,75	4,30	3,69	3,70
SS24VT	5,66	5,70	4,52	5,09	3,57	3,69
SW14DG	5,76	5,73	5,53	4,74	4,42	3,93
CA04EN	5,62	4,70	4,54	3,84	3,62	3,16
KA19EN	3,76	3,62	2,95	3,06	2,28	2,37
DS24EN	4,94	5,64	4,02	4,71	3,10	3,67
JM06MR	5,78	4,91	4,78	3,68	3,68	2,88
SK03HE	5,17	4,35	4,33	3,47	3,11	2,74
SS11EN	4,47	4,31	3,51	3,56	2,73	2,80
IK16VN	5,34	4,60	3,87	3,84	2,97	3,01
IK12VN	5,18	4,49	3,58	3,2	2,52	2,28
EH26DG	3,55	3,17	2,47	2,34	1,77	1,68
VM19ON	4,58	5,00	3,81	3,54	2,81	2,61
UH19BP	5,65	5,36	4,83	4,11	3,76	3,56
MD06KN	5,75	5,72	5,63	5,26	4,11	4,20
MR18KE	5,95	5,60	5,84	4,66	4,50	3,91
SF13HN	5,70	5,61	4,36	4,25	3,38	3,39
MM18DF	5,77	5,75	5,72	5,43	5,40	4,27
IP21HM	5,33	4,95	4,31	3,64	3,40	2,94
UH09RN	4,31	4,63	3,41	3,44	2,51	2,65
PH26DG	5,72	-	4,66	-	3,80	-
CD17KZ	5,38	4,82	4,32	3,75	3,54	2,72
Mittelwert	5,41	5,19	4,6	4,34	3,67	3,44
Minimum	3,55	3,17	2,47	2,34	1,77	1,68
Maximum	6,06	6,07	5,84	5,75	5,74	5,46

Bei den Ergebnissen des Rechtskauens (Tab. 3) zeigte sich, dass die Mittelwerte von den x30- bis zu den x70-Werten sanken. Der Mittelwert der zweiten Sitzung lag jeweils niedriger als der der ersten Sitzung. Auch die Minima der zweiten Sitzung waren jeweils geringer als die der ersten Sitzung. Bei den Maxima lag nur der x30-Wert 0,1 mm über dem Maximum der zweiten Sitzung. Die x50- und x70-Werte verhielten sich wie die Mittelwerte und Minima und lagen in der zweiten Sitzung jeweils niedriger als in der ersten.

Zur Gegenüberstellung und Vervollständigung der Datenlage der angewiesenen Kauvorgänge werden in Tabelle 4 abschließend auch die Ergebnisse der x30-, x50- und x70-Werte des Linkskauens dargestellt.

Tabelle 4: x30-, x50- und x70-Werte des Linkskauens aller Probanden der ersten und zweiten Sitzung, grau gedruckt sind die Probanden, die zum zweiten Termin nicht erschienen sind (Werte in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet)

Linkskauen						
	x30		x50		x70	
	1. Sitzung	2. Sitzung	1. Sitzung	2. Sitzung	1. Sitzung	2. Sitzung
BL30TN	5,77	4,62	5,19	3,5	3,65	2,76
SR18HN	6,00	4,64	5,78	3,84	5,19	3,02
FS19WZ	5,24	-	4,26	-	3,49	-
PG28DG	5,77	4,59	4,83	3,63	3,73	2,86
JJ30MS	5,71	5,96	4,72	5,66	3,87	4,62
NS03KJ	5,89	5,88	5,47	4,61	3,97	3,28
HA27MN	4,90	5,08	4,16	4,16	3,28	3,33
EJ27MS	5,32	5,71	3,96	4,18	2,77	2,66
SH17MS	4,22	5,81	3,67	5,60	3,06	4,17
IM01DG	4,24	4,09	3,22	3,22	2,50	2,43
SD22MS	4,89	4,33	4,00	3,30	3,13	2,51
IR07BN	5,82	5,83	5,57	5,52	4,85	3,86
HH04KD	4,44	5,63	3,82	4,73	3,30	3,44
AR11DG	5,88	6,00	5,73	5,75	5,04	4,88
IZ10MS	5,90	5,90	5,68	5,52	5,13	4,53
TR01DG	4,18	4,22	3,44	3,45	2,66	2,59
CR30DG	5,29	-	4,21	-	3,28	-
PF02DG	5,75	5,75	5,02	5,01	3,92	3,77
MF07BM	5,76	5,7	4,94	4,81	3,75	3,69

Ergebnisse

HG15WE	5,85	5,89	5,74	5,82	5,61	5,73
AK03VT	5,39	5,23	4,27	4,52	3,40	3,62
CD17RN	5,1	5,25	4,30	3,69	3,16	2,74
HB21RN	4,81	-	4,25	-	3,61	-
MK29RN	4,62	5,07	3,43	4,06	2,55	2,91
PK11RN	5,78	-	4,42	-	3,45	-
KF18DG	5,12	5,25	4,33	4,53	3,48	3,41
BH11RN	5,67	3,81	4,85	3,21	4,14	2,52
GD15BL	5,82	5,71	5,46	5,54	4,15	3,81
BL08BN	5,97	5,59	5,78	4,75	4,09	3,23
MK31MS	5,78	5,87	5,70	5,11	4,98	4,32
AM13MS	4,67	5,33	3,86	4,21	3,07	3,39
BJ12DG	5,26	5,69	4,32	4,55	3,49	3,55
AS10MS	5,85	-	5,57	-	4,39	-
KR12VN	5,58	5,19	4,60	4,23	3,5	3,36
SS24VT	5,73	5,83	5,64	5,71	4,99	4,93
SW14DG	5,78	5,86	5,64	5,65	4,49	4,24
CA04EN	5,60	5,22	4,58	3,95	3,40	3,22
KA19EN	3,54	3,60	2,85	2,74	2,14	2,01
DS24EN	5,46	4,77	4,82	3,96	3,79	3,21
JM06MR	5,25	5,64	4,22	4,78	3,60	3,77
SK03HE	5,17	5,52	4,52	4,52	3,54	3,42
SS11EN	4,23	4,01	3,11	3,23	2,36	2,36
IK16VN	4,19	4,28	3,29	3,29	2,58	2,40
IK12VN	5,18	4,54	3,43	3,49	2,33	2,47
EH26DG	3,68	3,06	2,71	2,38	1,90	1,70
VM19ON	4,01	4,48	3,18	3,37	2,35	2,47
UH19BP	5,64	5,6	4,15	4,14	3,35	3,05
MD06KN	5,77	5,78	5,61	5,58	4,46	4,65
MR18KE	5,89	5,69	5,50	5,19	4,38	4,12
SF13HN	5,58	4,90	4,62	4,00	3,20	3,12
MM18DF	5,79	5,68	5,73	5,23	5,65	4,45
IP21HM	4,49	5,04	3,92	4,13	3,27	3,31
UH09RN	4,35	4,59	3,38	3,22	2,52	2,13
PH26DG	4,38	-	3,42	-	2,57	-
CD17KZ	4,67	4,53	3,54	3,53	2,71	2,59
Mittelwert	5,21	5,15	4,48	4,34	3,59	3,36
Minimum	3,54	3,06	2,71	2,38	1,90	1,70
Maximum	6,00	6,00	5,78	5,82	5,65	5,73

Die Tabelle 4 zeigt, dass die Mittelwerte, Minima und Maxima von den x30- bis zu den x70-Werten kontinuierlich sanken. Dabei lagen die Mittelwerte der zweiten Sitzung stets etwas niedriger als die der ersten Sitzung. Auch bei den Minima lag der Wert der zweiten Sitzung jeweils unter dem der ersten. Die Maxima der x30-Werte waren in der ersten und zweiten Sitzung identisch und bei den x50- und x70-Werten in der zweiten Sitzung sogar leicht höher als in der ersten.

Auf der Grundlage der ermittelten Daten wird in der nachfolgenden Tabelle zusammenfassend dargestellt, dass die Mittelwerte des x50-Werts des freien Kauens in der 1. Sitzung bei 4,45 mm und in der 2. Sitzung bei 4,4 mm lagen. Beim Rechtskauen lagen die Mittelwerte bei 4,6 mm in der ersten und 4,34 mm in der 2. Sitzung, beim Linkskauen bei 4,48 mm in der ersten und 4,34 mm in der zweiten Sitzung.

Tabelle 5: Vergleich der x50-Mittelwerte des freien und angewiesenen Kauens der ersten und zweiten Sitzung (Werte in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet)

		x50	
		1. Sitzung	2. Sitzung
freies Kauen		4,45	4,40
angewiesenes Kauen	Rechtskauen	4,60	4,34
	Linkskauen	4,48	4,34

Wenn man nun die jeweiligen Standardabweichungen vergleicht, zeigte sich, dass die der x30-Werte niedriger lagen als die der x50- und x70-Werte (Tab. 6). Die Standardabweichungen wurden für jeden Versuchsdurchgang separat berechnet.

Tabelle 6: Vergleich der Standardabweichungen der x30-, x50- und x-70-Werte der 1. und 2. Sitzung (Werte in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet)

	x30		x50		x70	
	1. Sitzung	2. Sitzung	1. Sitzung	2. Sitzung	1. Sitzung	2. Sitzung
freies Kauen	0,63	0,62	0,81	0,79	0,81	0,79
Rechtskauen	0,59	0,67	0,84	0,86	0,89	0,82
Linkskauen	0,67	0,72	0,90	0,91	0,90	0,86

4.2 Reproduzierbarkeit der Daten

Hinsichtlich der Vermeidung von Fehlerquellen und zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit der Daten, wurde ein Sicherungsverfahren durchgeführt. Hierzu wurden zehn per Losverfahren beliebig ausgewählte Scandateien unter einem anderen Dateinamen hochgeladen und analysiert. Da die Bilder weiterhin identisch waren, war die Annahme, dass auch die Ergebnisse identisch sein werden. Die bestätigte sich. Die ermittelten Ergebnisse waren identisch, sodass eine Fehlerquelle in diesem Vorgang gezielt ausgeschlossen werden konnte.

Um die Reproduzierbarkeit der Scans und der daraus gewonnenen Daten zu überprüfen, wurden per Losverfahren zehn Probanden und damit deren Proben aus der ersten Sitzung des freien Kauens ausgewählt. Diese zehn Proben wurden auf dem Scanner ausgebreitet, gescannt, wieder zusammengeschoben und erneut ausgebreitet.

Dieser Vorgang wurde für zehn Scanvorgänge wiederholt. Anschließend wurden für jeden Probanden separat die zehn gewonnenen x50-Werte verglichen und ihre jeweilige Abweichung vom gemeinsamen Mittelwert in Prozent berechnet. Von diesen Abweichungen wurde außerdem die gemeinsame durchschnittliche Abweichung in Prozent berechnet (Abb. 9, Tab. 7). Diese Berechnung wurde sowohl für die Düsseldorfer als auch Heidelberger Methode vorgenommen.

Tabelle 7: Durchschnittliche prozentuale Abweichung der Probanden in der Heidelberger und Düsseldorfer Methode (Werte auf zwei Nachkommastellen gerundet)

Proband	Heidelberger Methode	Düsseldorfer Methode
NS03KJ	1,71 %	1,22 %
IR07BN	1,78 %	1,76 %
IZ10MS	1,87 %	1,30 %
PF02DG	2,09 %	0,78 %
GD15BL	0,96 %	0,82 %
BL08BN	1,40 %	0,33 %
BJ12DG	1,32 %	0,73 %
SW14DG	1,72 %	0,92 %
DS24EN	1,11 %	1,58 %
JM06MR	1,22 %	1,46 %
durchschnittliche Abweichung	1,52 %	1,09 %

Bei acht Probanden war die Abweichung nach der Düsseldorfer, bei zwei Probanden die Abweichung nach der Heidelberger Methode geringer. Wie in Abbildung 9 dargestellt, lag die durchschnittliche Abweichung der Heidelberger Methode mit 1,52 % leicht höher als die der Düsseldorfer Methode mit 1,09 %.

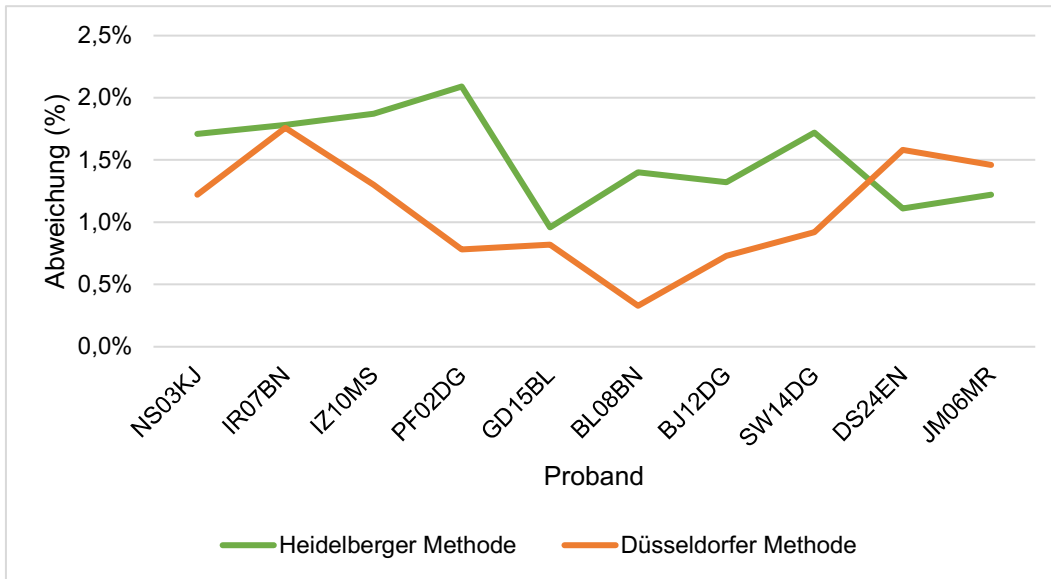


Abbildung 9: Abweichung der Düsseldorfer und Heidelberger Methode der zehnmal gescannten Proben von ihrem jeweiligen Mittelwert (in Prozent, auf zwei Nachkommastellen gerundet) (Abszisse: Probe, Ordinate: Abweichung vom Mittelwert in Prozent)

In Ergänzung wurde die Differenz der Anzahl der gescannten Partikelzahl ausgewertet und auch hier die Abweichung in Prozent bestimmt. Hierbei wurde die Anzahl der gescannten Partikel je Probe tabellarisch erfasst und der Mittelwert der gescannten Partikel errechnet. Von diesem wurde eine Abweichung sowohl für jeden Scan als auch eine durchschnittliche Abweichung in Prozent berechnet. Letztere wird in Abb. 10 dargestellt.

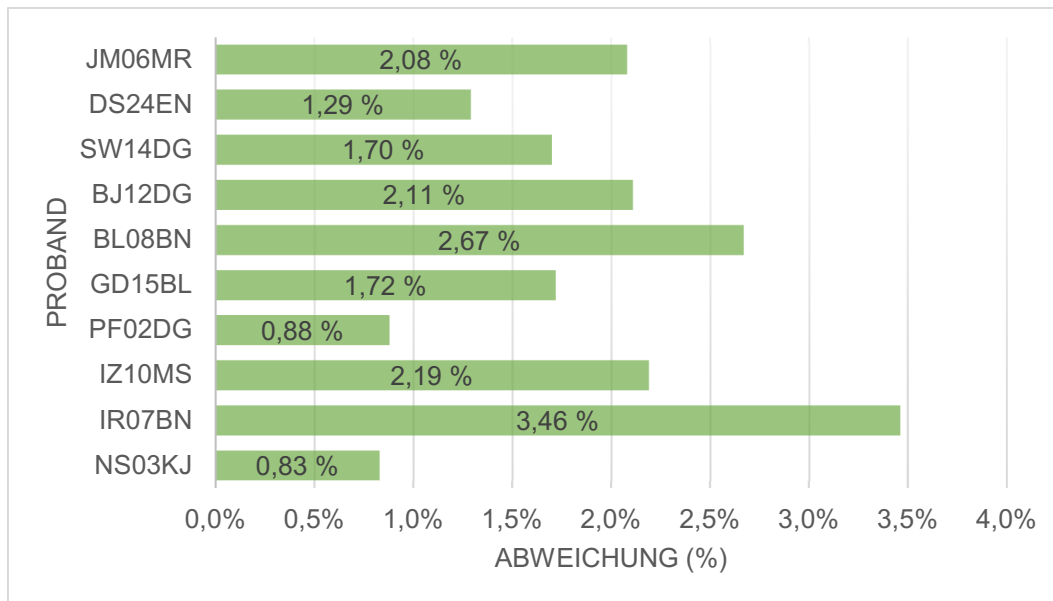


Abbildung 10: Abweichung der Partikelzahl der zehnmal gescannten Proben (in Prozent, auf zwei Nachkommastellen gerundet) (Abszisse: Abweichung in Prozent, Ordinate: Proband)

Da die Scans, die der Berechnung als Grundlage dienten, identisch waren, gab es hier keinen Unterschied in der Partikelanzahl zwischen der Heidelberger und der Düsseldorfer Methode. Durchschnittlich betrug die Abweichung der in Abb. 10 dargestellten Partikelanzahl 1,89 %.

4.3 Vergleich Männer und Frauen

An der Studie nahmen 20 Männer und 35 Frauen teil. Zur zweiten Sitzung erschienen noch 18 Männer und 31 Frauen.

Dabei lag der x50-Wert beim freien Kauen der ersten Sitzung bei den Männern mit 3,9 mm niedriger als der der Frauen mit 4,76 mm (Abb. 11).

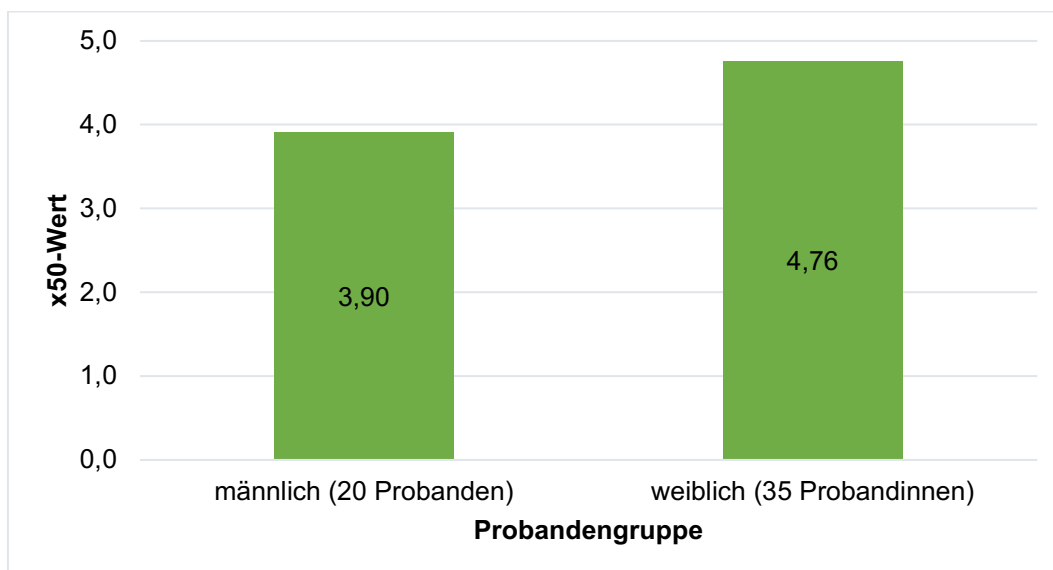


Abbildung 11: Durchschnittlicher x50-Wert der Männer bzw. Frauen beim freien Kauen in der ersten Sitzung (in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet) (Abszisse: Probandengruppe, Ordinate: x50-Wert)

Auch in der zweiten Sitzung lag der x50-Wert des freien Kauens mit 3,82 mm bei den Männern niedriger als bei den Frauen mit 4,75 mm. Im Vergleich zur ersten Sitzung war der Mittelwert der Männer 0,08 mm niedriger und der Mittelwert der Frauen 0,01 mm niedriger (Abb. 12).

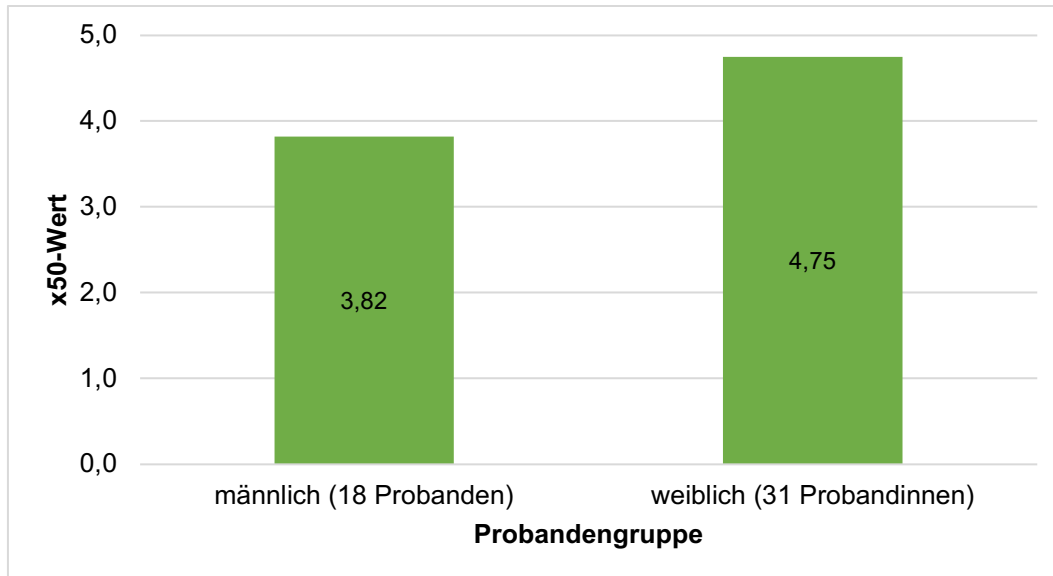


Abbildung 12: Durchschnittlicher x50-Wert der Männer bzw. Frauen des freien Kauens in der zweiten Sitzung (in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet) (Abszisse: Probandengruppe, Ordinate: x50-Wert)

4.4 Vergleich der x70-, x50- und x30-Werte

Es wurden die x30-, x50- und x70-Werte aller Probanden, die an der jeweiligen Sitzung teilgenommen haben, ausgewertet und anschließend mithilfe des Minimums, Maximums, des Medians und des ersten und dritten Quartils grafische Boxplot-Diagramme erstellt (Tab. 8, Abb. 13).

Tabelle 8: Vergleich der x50-Werte der ersten und zweiten Sitzung (Werte in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet, FK = freies Kauen, RK = Rechtskauen, LK = Linkskauen, Q1 = erstes Quartil, Q3 = drittes Quartil)

X50-Werte	1. Sitzung			2. Sitzung		
	FK	RK	LK	FK	RK	LK
Minimum	2,67	2,47	2,71	2,78	2,34	2,38
Q1	3,79	4,02	3,82	3,77	3,68	3,53
Median	4,46	4,52	4,52	4,29	4,20	4,21
Q3	5,29	5,52	5,47	5,00	5,13	5,11
Maximum	5,76	5,84	5,78	5,79	5,75	5,82

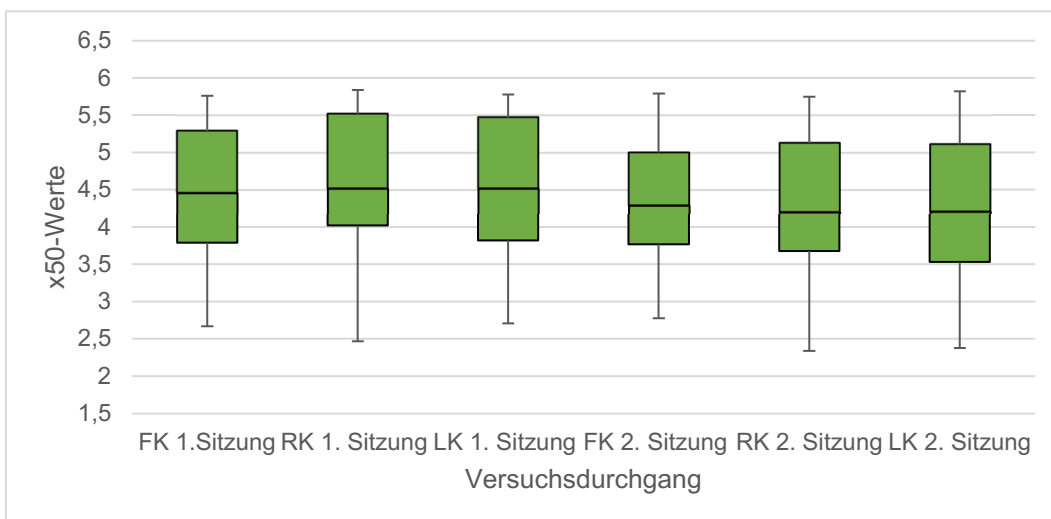


Abbildung 13: Vergleich der x50-Werte der ersten und zweiten Sitzung (Werte in mm, FK = freies Kauen, RK = Rechtskauen, LK = Linkskauen, Abszisse: Versuchsdurchgang, Ordinate: x50-Wert)

Dabei zeigte sich, dass der Median in der zweiten Sitzung 0,17 mm bis 0,32 mm niedriger lag als in der ersten Sitzung. Bei der Analyse der Gesamtheit der Probanden lagen die Minima maximal 0,33 mm und die Maxima 0,09 mm auseinander. Es gab keine starken Ausreißer.

Zusätzlich wurden sowohl die x30- und die x70-Werte verglichen, um herauszufinden, ob mit den kleiner werden der Partikeln die Genauigkeit steigt.

Die x30-Werte verteilten sich wie folgt (Tab. 9, Abb. 14):

Tabelle 9: Vergleich der x30-Werte der ersten und zweiten Sitzung (Werte in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet, FK = freies Kauen, RK = Rechtskauen, LK = Linkskauen, Q1 = erstes Quartil, Q3 = drittes Quartil)

X30-Werte	1. Sitzung			2. Sitzung		
	FK	RK	LK	FK	RK	LK
Minimum	3,28	3,55	3,54	3,91	3,17	3,06
Q1	4,91	5,18	4,67	4,78	4,70	4,59
Median	5,53	5,66	5,46	5,49	5,44	5,25
Q3	5,70	5,81	5,77	5,75	5,74	5,71
Maximum	5,90	6,06	6,00	5,95	6,07	6,00

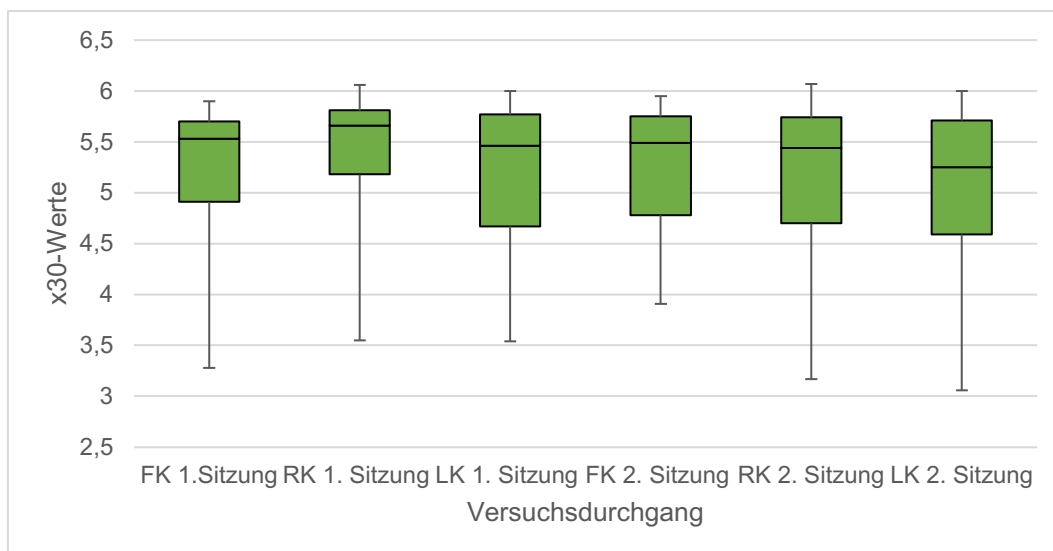


Abbildung 14: Vergleich der x30-Werte der ersten und zweiten Sitzung (FK = freies Kauen, RK = Rechtskauen, LK = Linkskauen, Abszisse: Versuchsdurchgang, Ordinate: x30-Wert)

Der Median in der zweiten Sitzung lag bei den x30-Werten 0,4 mm bis 0,22 mm, die Minima maximal 0,63 mm und die Maxima maximal 0,5 mm auseinander. Es gab keine starken Ausreißer.

Zum Vergleich wurden anschließend die x70-Werte verglichen. (Tab. 10, Abb. 15)

Tabelle 10: Vergleich der x70-Werte der ersten und zweiten Sitzung (Werte in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet, FK = freies Kauen, RK = Rechtskauen, LK = Linkskauen, Q1 = erstes Quartil, Q3 = drittes Quartil)

X70-Werte	1. Sitzung			2. Sitzung		
	FK	RK	LK	FK	RK	LK
Minimum	1,96	1,77	1,90	2,03	1,68	1,70
Q1	2,99	3,02	3,30	3,18	3,11	3,10
Median	3,55	3,54	3,69	3,66	3,69	3,42
Q3	4,01	4,32	4,40	4,18	4,01	4,13
Maximum	5,59	5,74	5,65	5,58	5,46	5,73

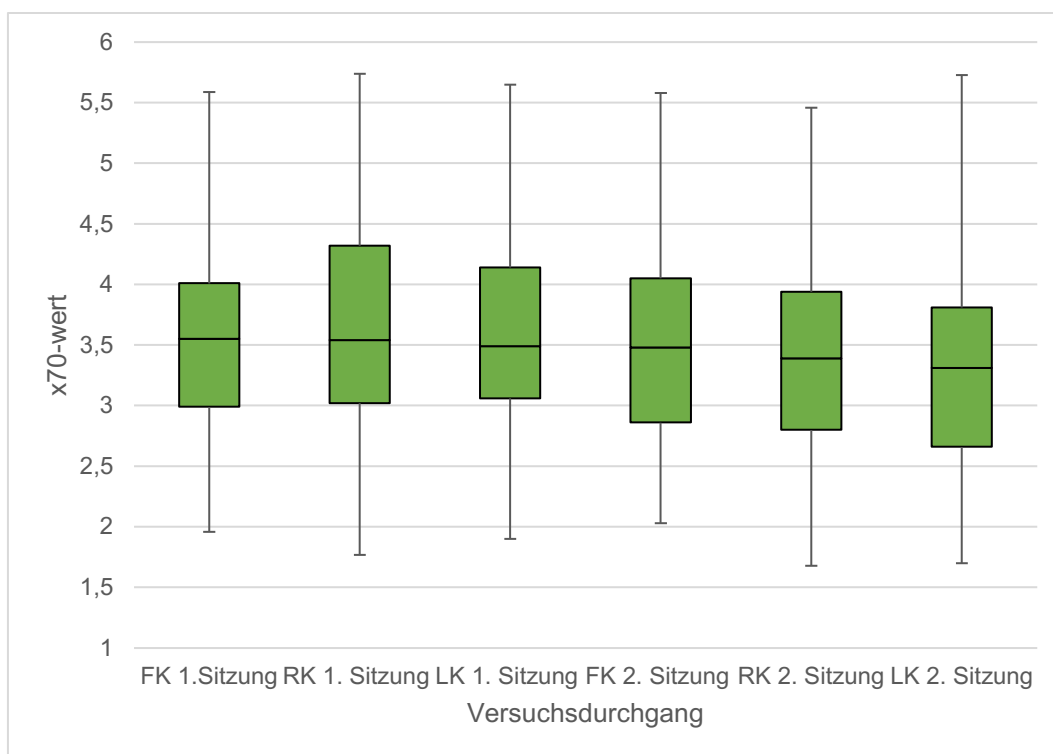


Abbildung 15: Vergleich der x70-Werte der ersten und zweiten Sitzung (FK = freies Kauen, RK = Rechtskauen, LK = Linkskauen, Abszisse: Versuchsdurchgang, Ordinate: x70-Wert)

Hier lagen die Mediane in der zweiten Sitzung 0,11 mm bis 0,27 mm und die Minima 0,07 mm bis 0,2 mm auseinander. Es fiel jedoch auf, dass der Wert des Rechtskauens in der zweiten Sitzung geringfügig höher (0,15 mm) war als in der ersten. Alle anderen Medianwerte waren wie bei den x30- und x50-Werten in der zweiten Sitzung niedriger. Auch bei den x70-Werten gab es keine starken Ausreißer.

4.5 Vergleich 1. und 2. Sitzung

4.5.1 Freies Kauen

Um die Ergebnisse des freien Kauens zu vergleichen, wurden die Probanden, die nicht zur zweiten Sitzung erschienen waren oder nicht teilnehmen konnten, aus der Übersicht entfernt und bei den verbliebenen 49 Probanden zunächst die Differenzen der x30-, x50- und x70-Werte der ersten und zweiten Sitzung gebildet. Ein negativer Wert war hierbei gleichbedeutend mit einer Verschlechterung, ein positiver Wert mit einer Verbesserung des Kauergebnisses. In Tabelle 11 sind die Ergebnisse und die daraus resultierenden Differenzen zusammengestellt:

Tabelle 11: Veränderung (Differenz) der x30-, x50- und x70-Werte von der 1. zur 2. Sitzung (Werte in mm und auf zwei Nachkommastellen gerundet)

	x30			x50			x70		
	1. Sitzung	2. Sitzung	Differenz	1. Sitzung	2. Sitzung	Differenz	1. Sitzung	2. Sitzung	Differenz
BL30T N	4,73	5,66	-0,93	3,60	5,00	-1,40	2,68	3,68	-1,00
SR18H N	5,67	5,51	0,16	5,53	4,21	1,32	4,05	3,13	0,92
PG28D G	4,78	4,92	-0,14	3,85	3,84	0,01	3,17	2,92	0,25
JJ30MS	5,67	5,78	-0,11	4,50	4,88	-0,38	3,65	4,32	-0,67
NS03K J	5,67	5,73	-0,06	5,29	5,01	0,28	3,96	3,87	0,09
HA27M N	5,41	4,80	0,61	4,44	4,01	0,43	3,38	3,29	0,09
EJ27M S	4,51	5,02	-0,51	3,32	3,84	-0,52	2,26	2,69	-0,43
SH17M S	5,48	5,92	-0,44	4,19	5,74	-1,55	3,47	4,76	-1,29
IM01DG	4,91	4,99	-0,08	3,57	3,77	-0,20	2,62	2,87	-0,25
SD22M S	5,14	5,54	-0,40	3,79	4,19	-0,40	2,97	2,75	0,22
IR07BN	5,72	5,79	-0,07	5,43	5,12	0,31	4,49	4,36	0,13
HH04K D	5,76	5,72	0,04	4,87	4,56	0,31	3,58	3,36	0,22
AR11D G	5,90	5,88	0,02	5,75	5,79	-0,04	5,01	4,97	0,04
IZ10MS	5,69	5,68	0,01	5,48	4,92	0,56	4,53	4,01	0,52

Ergebnisse

TR01D G	5,28	4,19	1,09	3,87	3,62	0,25	3,04	2,79	0,25
PF02D G	5,71	5,78	-0,07	5,49	5,21	0,28	4,74	4,39	0,35
MF07B M	5,70	5,95	-0,25	4,58	5,68	-1,10	3,36	4,21	-0,85
HG15W E	5,85	5,78	0,07	5,72	5,67	0,05	5,53	5,21	0,32
AK03V T	5,53	5,16	0,37	4,39	4,25	0,14	3,73	3,58	0,15
CD17R N	5,66	4,78	0,88	4,51	3,88	0,63	3,33	2,84	0,49
MK29R N	4,35	3,91	0,44	3,72	2,78	0,94	2,84	2,03	0,81
KF18D G	5,71	4,74	0,97	5,05	4,14	0,91	3,84	3,19	0,65
BH11R N	5,69	4,42	1,27	5,62	3,42	2,20	4,70	2,60	2,10
GD15B L	5,59	5,61	-0,02	4,48	4,85	-0,37	3,66	4,05	-0,39
BL08B N	5,68	5,83	-0,15	5,50	4,95	0,55	4,01	3,87	0,14
MK31M S	5,90	5,13	0,77	5,63	4,46	1,17	4,55	3,87	0,68
AM13M S	4,52	5,29	-0,77	3,76	4,29	-0,53	3,18	3,51	-0,33
BJ12D G	5,83	5,49	0,34	5,66	4,40	1,26	4,23	3,45	0,78
KR12V N	5,70	5,87	-0,17	5,15	4,89	0,26	3,90	3,89	0,01
SS24VT	5,68	5,73	-0,05	5,01	5,21	-0,20	4,13	3,99	0,14
SW14D G	5,24	5,80	-0,56	4,29	5,30	-1,01	3,39	4,21	-0,82
CA04E N	5,70	5,13	0,57	4,78	4,27	0,51	3,69	3,48	0,21
KA19E N	3,55	4,3	-0,75	2,91	3,61	-0,70	2,24	2,72	-0,48
DS24E N	5,66	5,03	0,63	4,28	4,06	0,22	3,17	3,38	-0,21
JM06M R	5,15	5,94	-0,79	4,51	5,21	-0,70	3,67	4,19	-0,52
SK03H E	4,43	4,81	-0,38	3,73	3,78	-0,05	2,88	3,02	-0,14
SS11E N	3,86	4,23	-0,37	3,10	3,2	-0,10	2,36	2,55	-0,19
IK16VN	4,61	4,00	0,61	3,89	3,24	0,65	2,82	2,53	0,29
IK12VN	5,21	4,90	0,31	3,73	3,75	-0,02	2,82	2,41	0,41
EH26D G	4,67	4,02	0,65	3,51	3,10	0,41	2,48	2,32	0,16
VM19O N	4,30	4,37	-0,07	3,67	3,66	0,01	2,99	2,87	0,12
UH19B P	5,28	5,54	-0,26	4,12	4,32	-0,20	3,11	3,61	-0,5
MD06K N	5,71	5,80	-0,09	4,74	5,49	-0,75	3,91	4,17	-0,26
MR18K E	5,86	5,69	0,17	5,70	4,91	0,79	5,20	4,10	1,10
SF13H N	5,28	5,70	-0,42	4,44	4,61	-0,17	3,56	3,64	-0,08
MM18D F	5,81	5,75	0,06	5,76	5,69	0,07	5,59	5,58	0,01
IP21HM	5,48	4,38	1,10	4,26	3,62	0,64	3,55	2,86	0,69
UH09R N	3,28	4,58	-1,30	2,67	3,55	-0,88	1,96	2,65	-0,69
CD17K Z	5,39	4,73	0,66	4,46	3,70	0,76	3,25	2,92	0,33

Mit den zuvor ermittelten Daten wurde im Anschluss die Analyse durchgeführt. Der Fokus lag hierbei erneut auf dem x50-Wert.

4.5.2 Freies und angewiesenes Kauen

Die Berechnung der Standardabweichung erfolgte sitzungsbezogen für die x50-Werte und es wurden alle Probanden berücksichtigt, die zu dem jeweiligen Termin erschienen waren.

Tabelle 12: Standardabweichung der ersten und zweiten Sitzung (Werte in mm und gerundet auf zwei Nachkommastellen, FK = freies Kauen, RK = Rechtskauen, LK = Linkskauen).

	Standardabweichungen (gerundet auf 2 Nachkommastellen)	
1. Sitzung	FK	0,81
	RK	0,84
	LK	0,90
2. Sitzung	FK	0,79
	RK	0,86
	LK	0,91

Anschließend wurden diese Werte als Maßstab genommen, um auf individueller Ebene Veränderungen zu beurteilen. Da hierfür jedoch beide Sitzungen betrachtet werden mussten, wurden nur noch die 49 Probanden inkludiert, die zu beiden Sitzungen erschienen waren. Um sowohl freies als auch Rechts- und Linkskauen beider Sitzungen vergleichen zu können, wurden die x50-Werte verglichen und für die Einordnung die einfachen Standardabweichungen der jeweiligen 1. Sitzung herangezogen.

Lag der Betrag der Differenz der Kauergebnisse probandenspezifisch innerhalb der Standardabweichung der ersten Sitzung des jeweiligen Versuchsdurchgangs, wurde dies als keine Veränderung gewertet. Eine positiver Differenzwert außerhalb der Standardabweichung entsprach auch hier einer Verbesserung und eine negativer Differenzwert einer Verschlechterung.

Dieser Vergleich wird in der nachfolgenden Abbildung (Abb. 16) dargestellt.

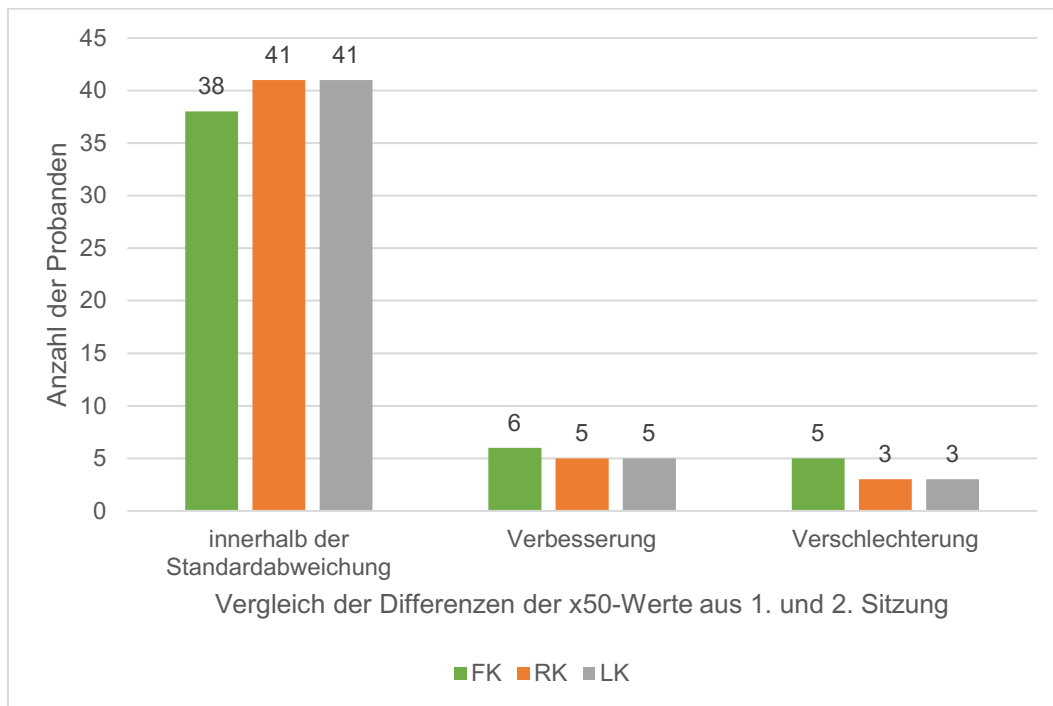


Abbildung 16: Vergleich der x50-Werte bei 1. und 2. Sitzung für freies (FK), Rechts- (RK) und Linkskauen (LK), (Abszisse: Vergleich der Differenzen der x50-Werte aus 1. und 2. Sitzung, Ordinate: Anzahl der Probanden,) weitere Erläuterungen siehe Text.

Es zeigte sich, dass beim freien Kauen 38 Probanden und beim Rechts- und Linkskauen jeweils 41 Probanden innerhalb der Standardabweichung lagen. Bei den restlichen Probanden zeigte sich eine Veränderung, dieser Wert konnte sowohl negativ als auch positiv ausfallen. Beim freien Kauen zeigte sich bei insgesamt elf Probanden eine Veränderung außerhalb des Betrages der einfachen Standardabweichung, beim Rechts- und Linkskauen bei jeweils acht Probanden. Diese Veränderungen wurden, wie vorangehend bereits erläutert, noch einmal detaillierter in eine Verbesserung, im Sinne einer größeren Kaupartikelgrößenreduzierung, und Verschlechterung, im Sinne einer geringeren Kaupartikelgrößenreduzierung, gegliedert. Sechs Probanden verbesserten sich in der zweiten Sitzung in ihrem Kauergebnis beim freien Kauen, je fünf Probanden beim Rechts- oder Linkskauen. Beim freien Kauen verschlechterten sich jedoch auch fünf Probanden und je drei Probanden beim Rechts- oder Linkskauen.

4.6 Vergleich bevorzugte Kauseite

Sowohl bei den Männern, mit 55,00 %, als auch bei den Frauen, mit 51,43 %, gab etwa die Hälfte an, eine bevorzugte Kauseite zu haben. Zum Vergleich, ob und wenn ja wie viele Probanden beim Rechts- oder Linkskauen ein besseres Kauergebnis aufwiesen, wurden die x50-Werte der ersten Sitzung sowie die sitzungsbezogene Standardabweichung des Rechtskauens der ersten Sitzung herangezogen, welche 0,84 entsprach. Acht Probanden befanden sich außerhalb der Standardabweichung, fünf Probanden wiesen rechts und drei Probanden links einen kleineren Wert außerhalb der Standardabweichung auf. Diese Veränderung ist gleichbedeutend mit einer Verbesserung des Kauergebnisses auf dieser Seite.

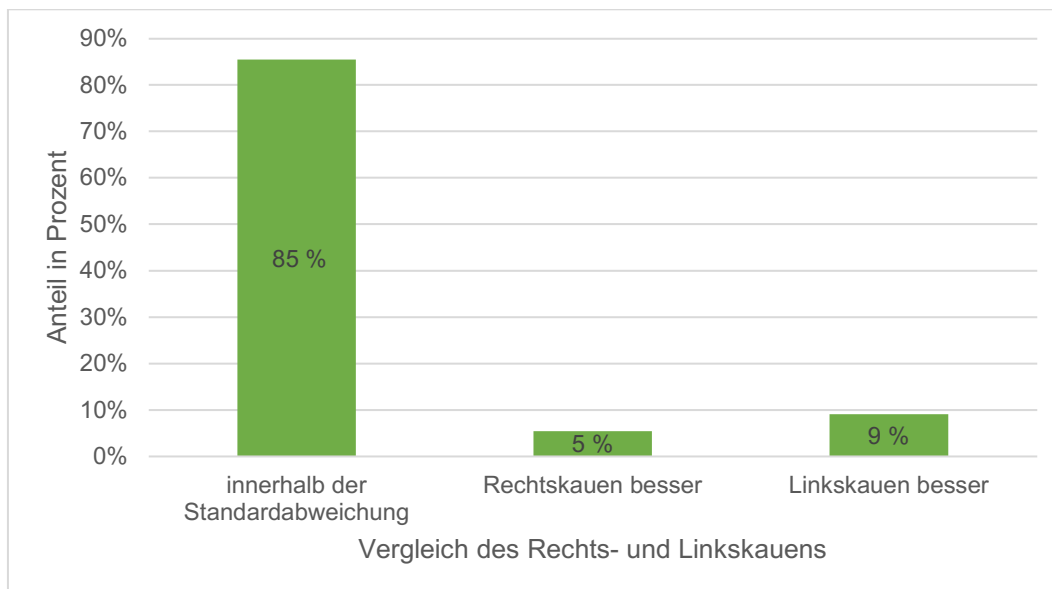


Abbildung 17: Vergleich der x50-Werte der 1. Sitzung des Rechts- und Linkskauens (Abszisse: Probanden innerhalb der Standardabweichung bzw. Rechts- und Linkskauen, Ordinate: Anteil der Probanden gerundet in Prozent)

Zusätzlich wurden die Probanden vorab befragt, ob sie sich deutlich als rechts- oder linksseitig kauend einstufen. Diese Angaben werden in der nachfolgenden Abbildung (Abb. 18) dargestellt.

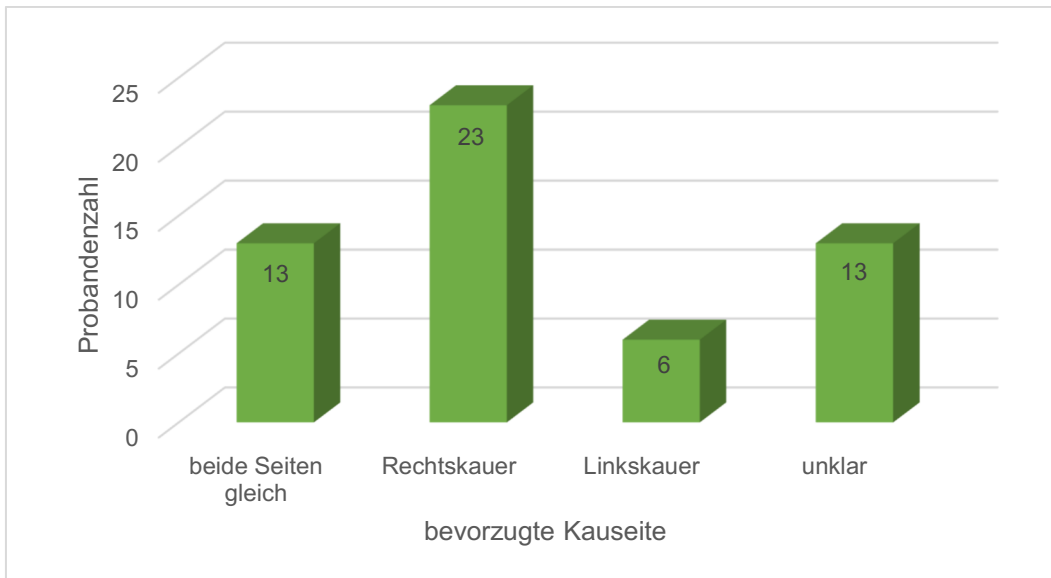


Abbildung 18: Angaben der Probanden nach einer bevorzugten Kauseite (Abszisse: bevorzugte Kauseite laut der Probanden, Ordinate: Anzahl der Probanden)

29 Probanden gaben eine bevorzugte Kauseite an. Diese Personen wurden mit den ermittelten x50-Werten der ersten Sitzung verglichen. Dabei wurde eine Differenz gebildet (Rechtskauen – Linkskauen). War diese positiv wiesen die Probanden links, war die Differenz negativ wiesen die Probanden rechts eine höhere Kaupartikelreduzierung auf. Insgesamt befanden sich nur die Ergebnisse von sieben Probanden außerhalb der Standardabweichung. Diese werden in der nachfolgenden Abbildung (Abb. 19) veranschaulicht.

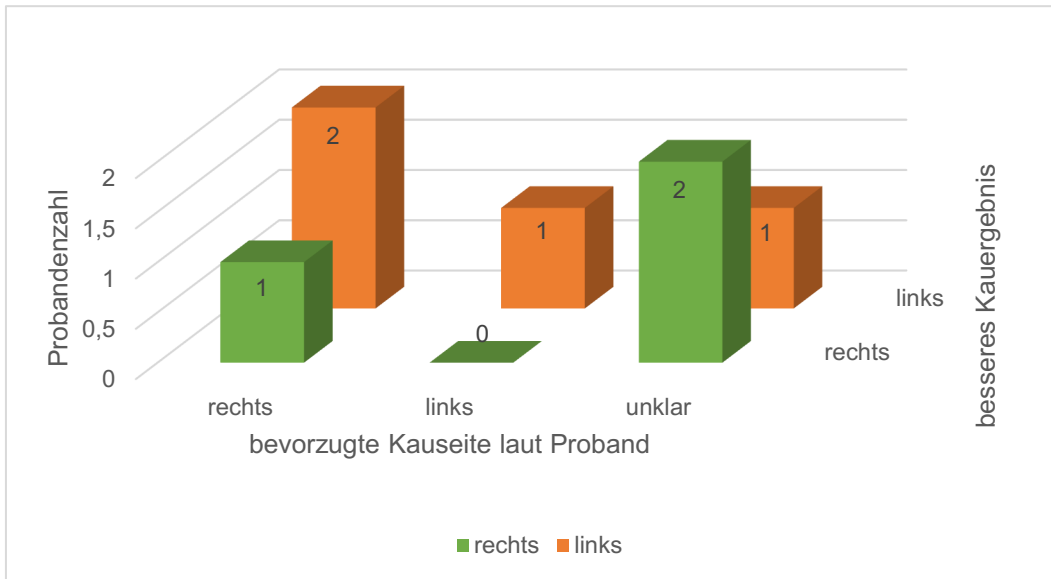


Abbildung 19: Vergleich der Angaben der Probanden nach einer bevorzugten Kauseite unter Einbeziehen der Standardabweichung (Abszisse: bevorzugte Kauseite laut der Probanden, Ordinate: Anzahl der Probanden, Applikate: besseres Kauergebnis in Studie)

In Abbildung 19 wird ersichtlich, dass von den sieben Probanden, deren Ergebnisse sich außerhalb der Standardabweichung befanden, vier links und drei rechts ein besseres Kauergebnis aufwiesen. Von den drei Probanden, die angaben, rechts besser zu kauen, stimmte dies bei einem Probanden überein, während zwei Probanden auf der linken Seite ein besseres Kauergebnis außerhalb der Standardabweichung zeigten. Die Angabe des Probanden, der links als seine bevorzugte Kauseite angab, stimmte mit den Studienergebnissen überein. Von den Probanden, die nicht wussten, ob sie eine bevorzugte Kauseite haben, zeigte ein Proband links und zwei Probanden rechts ein besseres Kauergebnis.

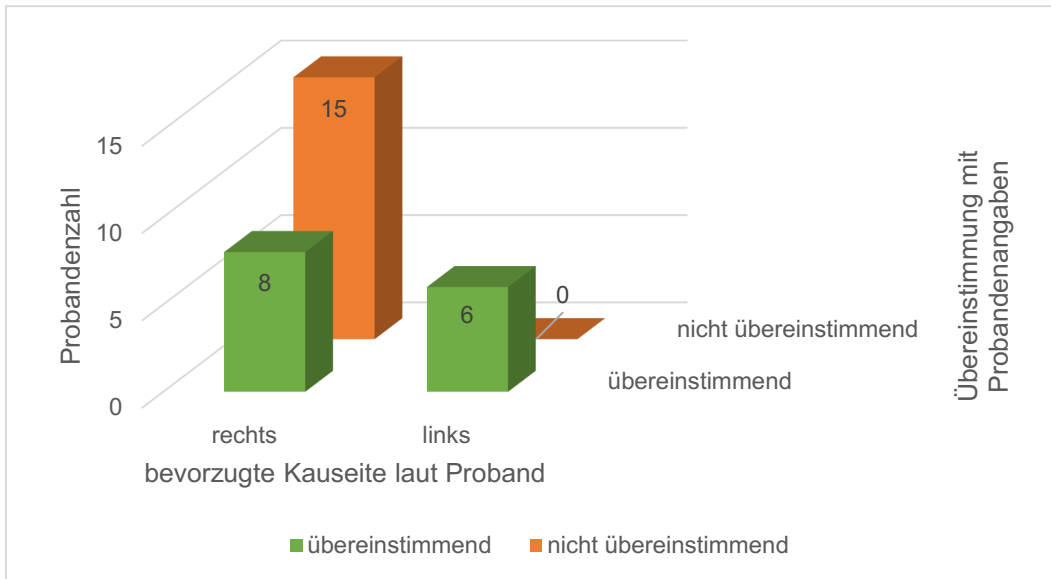


Abbildung 20: Vergleich der 29 Probanden, die eine bevorzugten Kauseite angaben (Abszisse: bevorzugte Kauseite, laut der Probanden, Ordinate: Anzahl der Probanden, Applikate: Übereinstimmung der Probandenangaben mit Studienergebnissen)

Da die Ergebnisse unter Berücksichtigung der einfachen Standardabweichung nur wenige Probanden einschlossen, wurde noch einmal ein Diagramm ohne Berücksichtigung der Standardabweichung erstellt (Abb. 20). Hierbei wurden zunächst nur die 29 Probanden betrachtet, die eine bevorzugte Kauseite angaben.

Bei den Probanden, die rechts als ihre bevorzugte Kauseite angaben, stimmte dies bei acht (34,78 %) überein und bei 15 (65,22 %) nicht. Bei den Probanden, die links als ihre bevorzugte Kauseite angaben, gaben die Ergebnisse allen sechs Probanden (100 %) Recht.

Als nächstes wurde eine indifferente Probandengruppe gebildet, die die Probanden einschloss, die angaben, auf beiden Seiten gleich gut zu kauen oder die ihre bevorzugte Kauseite nicht kannten. Elf dieser Probanden wiesen eine bessere Kaupartikelzerkleinerung auf der rechten und fünfzehn auf der linken Seite auf.

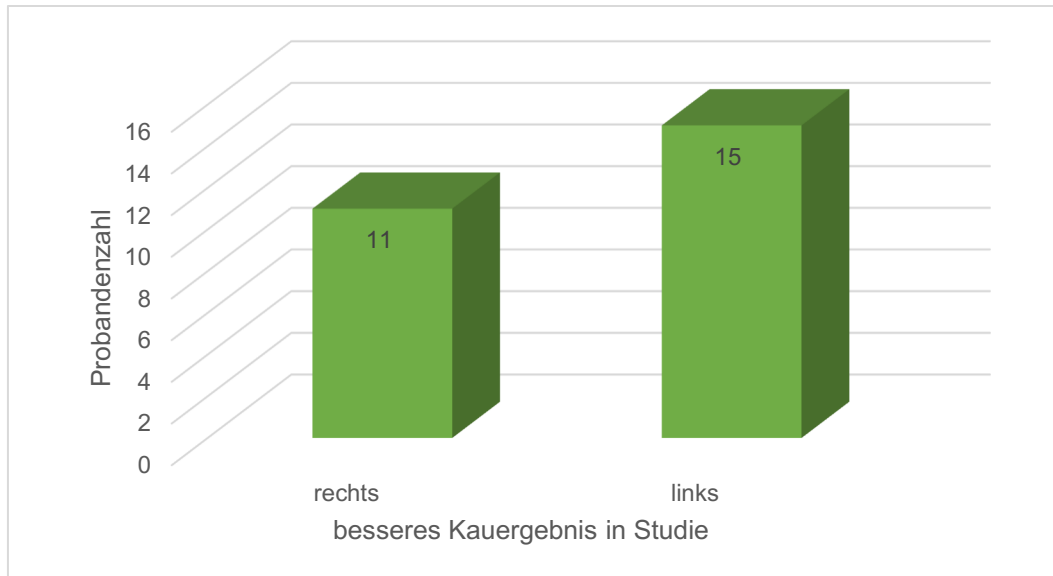


Abbildung 21: Vergleich der Probanden, die keine bevorzugte Kauseite angaben (Abszisse: Seite der besseren Kaupartikelzerkleinerung, Ordinate: Anzahl der Probanden)

4.7 Vergleich Rechts- und Linkshänder

Neben der bevorzugten Kauseite der Probanden, wurde auch die Händigkeit der einzelnen Teilnehmer genauer untersucht. Sechs der 55 Probanden waren nach eigenen Angaben Linkshänder, 49 Rechtshänder. 16 der 49 Rechtshänder wiesen auf der rechten Seite und drei der sechs Linkshänder auf der linken Seite eine bessere Kaupartikelzerkleinerung auf. Dies bedeutet, dass 33 % der Rechts- und 50 % der Linkshänder auf der Seite ihrer jeweiligen Händigkeit auch ein besseres Kauergebnis zeigten (Abb. 22).

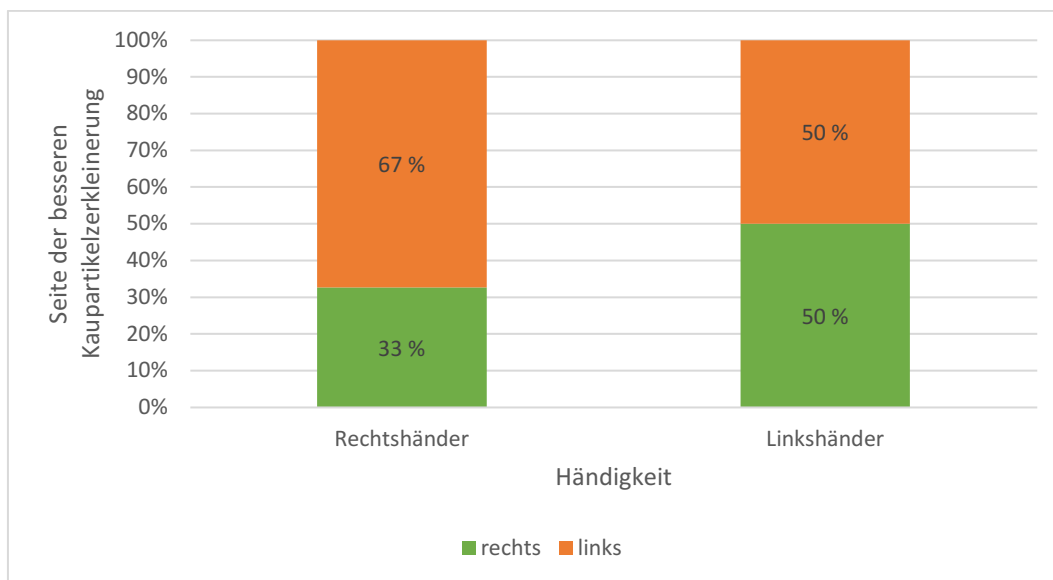


Abbildung 22: Übereinstimmung der von den Probanden angegebenen Händigkeit und der Kauseite, die eine bessere Kaupartikelzerkleinerung aufwies (gerundet in Prozent) (Abszisse: Händigkeit, Ordinate: Anteil der Probanden in Prozent, die auf der jeweiligen Seite die bessere Kaupartikelzerkleinerung zeigten)

5 Diskussion

5.1 Unterschiedliche Methodiken in Studien zu Kaufunktion

Um die Kaufunktion oder Kaufähigkeit bewerten zu können, wurden die Begriffe Kauleistung („*masticatory performance*“), Kaueffektivität („*masticatory efficiency*“) und Kaueffizienz eingeführt (Kravchenko 2011, S. 9). Alle Begriffe beschreiben dabei die Fähigkeit einer Person, ein natürliches oder künstliches Kaugut zu zerkleinern, jedoch fokussieren sie sich auf unterschiedliche Aspekte des Kauens. Die Kauleistung („*performance*“) beschreibt dabei die „Partikelgrößenverteilung nach einer vorgegebenen Anzahl von Kauzyklen“ (Schindler und Hugger 2006, S. 120), die Kaueffektivität („*efficiency*“) die „Anzahl der Kauzyklen, die notwendig ist, um die Nahrung bis zu einer bestimmten Partikelgröße zu reduzieren“ (Schindler und Hugger 2006, S. 120) und die Kaueffizienz den „pro Kauzyklus erreichte Zerkleinerungsgrad der Nahrung“ (Kravchenko 2011, S. 10).

So vielfältig die Begrifflichkeiten sind, so vielfältig sind auch die Methoden zur Bestimmung dieser. Die am häufigsten verwendeten Methoden waren jedoch die Siebmethode zur Bestimmung der Kauleistung und die kolorimetrische Methode. Die kolorimetrische Methode ist ein Farbdurchmischungstest, der zur Evaluation der Kaueffektivität genutzt wurde (Enkling et al. 2017) und bei dem anschließend untersucht wurde, wie sich die zuvor getrennten Farben eines Probekörpers vermischt hatten. Hierbei wurde ein zweifarbiges Paraffinwürfel gekaut und die Ausmaße des Vermengungsgrades der Farben durch digitale Bildgebung analysiert (Eberhard et al. 2012, S. 342). Wie eingangs erwähnt, wurden jedoch eine Vielzahl an weiteren Methoden zur Analyse der Kaufähigkeit, wie zum Beispiel das Messen des Zuckerverlusts in einem Kaugummi (Health, 1982) oder photometrische Methoden (Gunne, 1983, Nakasime, Higashi und Ichinose, 1989) genutzt (van der Bilt et al. 1993a, S. 163). Eine weitere verhältnismäßig schnelle Methode ist eine spectrophotometrische Analyse, bei der sich die Farbveränderung einer Kauprobe in vergangenen Studien nahezu linear zu dessen Oberflächengröße verhielt (Eberhard et al. 2012, S. 342).

Einen wichtigen Faktor im Kausystem stellt außerdem die Kaukraft dar. Sie hängt vom Muskelvolumen, der Aktivität und der Koordination der Kaumuskulatur ab (van der Bilt et al. 2006, S. 22). In der Studie von Miyaura et al. war die Kaukraft und die okklusale Kontaktfläche bei Männern größer als bei Frauen (Miyaura et al. 1999, S. 226). Ohne zwischen Männern und Frauen zu unterscheiden, zeigten Probanden mit einer vergleichsweise hohen maximalen Kaukraft im Durchschnitt eine bessere Kauleistung (Engelen et al. 2005, S. 745). Auch die hier diskutierten Daten zeigen, dass die Kauleistung der Männer im Durchschnitt höher ist. In Kapitel 5.4 wird noch einmal genauer auf den Vergleich der Ergebnisse von Männern und Frauen eingegangen.

Van der Bilt et al. stellten fest, dass die Varianz der Kaufähigkeit mit den vielen verschiedenen dentalen Faktoren, wie zum Beispiel der Anzahl der Zähne, der Anzahl der Zahnkontakte, der Gesamtokklusalfäche, der okklusalen Kontaktfläche, der Zahnform und der bevorzugten Kauseite, zusammenhängt (van der Bilt 2011, S. 760). Zum jetzigen Zeitpunkt ist jedoch wenig über die dynamische Kraft und die Druckverteilung an den Okklusalfächen bekannt, da diese Werte nicht direkt messbar sind (Röhrle et al. 2018, S. 453).

Bereits in der Vergangenheit wurde zudem gezeigt, dass ältere Personen, aufgrund des meist geringeren Zahnbestandes, eine schlechtere Kauleistung zeigten (Pereira und van der Bilt 2016, S. 630). Aus diesem Grund war es in dieser Pilotstudie wichtig, die Rahmenbedingungen genau zu definieren und die Probandengruppe für eine Bewertung der Software und für eine bessere Vergleichbarkeit zunächst einzugrenzen. In darauffolgenden Studien können die Probandengruppen dann erweitert und weitere Rückschlüsse gezogen werden. Zudem war es wichtig, zwischen der objektiven und der subjektiven Kauleistung zu unterscheiden. Eine sich objektiv als schlechter darstellende Kauleistung bedeutete nicht, dass dies von den Probanden subjektiv auch so empfunden wird. Die meisten Probanden, die eine reduzierte Kaufunktion, zum Beispiel durch Zahnverlust hatten, zeigten, dass auch sie problemlos kauen konnten, auch wenn sie die Nahrung schlechter zerkleinerten (van der Bilt 2011, S. 760). Teilweise wurde die schlechtere Fähigkeit, Kaugut zu zerkleinern durch längeres Kauen kompensiert. Da in der vorliegenden Studie die Anzahl an Kauzyklen reglementiert wurde, beleuchtete sie diese Besonderheit nicht.

Bei der Auswertung der Daten blieb somit zu beachten, dass eine höhere oder niedrigere Zerkleinerungsrate der Kaupartikel nicht gleichbedeutend mit einer nicht normalen Kaufunktion oder einer besseren oder schlechteren Kauleistung gleichzusetzen war.

5.2 Diskussion der angewendeten Methoden und Materialien

Aufgrund der geringeren Probandenzahl, gemessen an anderen Studien mit weit höherer Probandenzahl, hatte die vorliegende Studie den Charakter einer klinischen Pilotstudie. Eines der Ziele der Studie war es, die Vielfältigkeit und Bandbreite der Kauleistung einer zahn- und funktionsgesunden Probandengruppe zu zeigen. Dabei erzielte die Düsseldorfer Methode ähnliche Ergebnisse wie bereits vorangegangene Studien und hat somit eine hohe Aussagekraft.

5.2.1 Patientencharakteristika

Die Probanden wurden vorab sorgfältig ausgewählt und auf diverse Ein- und Ausschlusskriterien überprüft. Zu diesem Zweck füllten sie zunächst einen Fragebogen aus. Wenn alle Kriterien zutrafen, wurden mündlich Angaben zu einem Verdacht einer Craniomandibulären Dysfunktion ausgeschlossen und die Angaben in einer weitergehenden klinischen Untersuchung überprüft.

Ein besonderes Augenmerk wurde dabei, auf den Ausschluss möglicher Beeinträchtigungen des Kauvorgangs, wie zum Beispiel durch eine Craniomandibuläre Dysfunktion (CMD) oder nervale Erkrankung gelegt, da diese die Kaukraft beeinträchtigen können (Kruse et al. 2020, S. 2). Auch eine tiefergehende Abklärung vorhergegangener Operationen oder Traumata wurde vorgenommen. Letztere bezogen sich dabei nicht auf den gesamten Kopf- und Halsbereich, sondern auf den Bereich der Kiefer und der Kiefergelenke. So stellte beispielsweise eine vormals frakturierte Nase kein Ausschlusskriterium dar. Bei der Craniomandibulären Dysfunktion handelt es sich um muskuloskeletale Beschwerden im Gesichtsbereich.

„Zu den klassischen klinischen Symptomen [der CMD] zählen Schmerzen im Bereich der Kiefermuskulatur und/oder Kiefergelenke (myoarthropathische Schmerzen), Einschränkung der Unterkieferbeweglichkeit sowie Kiefergelenkgeräusche.“ (Leiggener et al. 2016, S. 150) Sie beeinflusst das Kauverhalten negativ (Pereira et al. 2006, S. 198) Die Diagnose erfolgte anhand der DC/TMD, der „*Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders*“, die 2014 die RDC/TMD (1992) ablösten, anhand welcher Eberhard et al. eine Craniomandibuläre Dysfunktion ausschlossen. Auch hier wurde sich am Studiendesign von Eberhard et al. orientiert. Der Einfluss von Schmerzen wurde unter anderem von Dao et al. untersucht. Keiner der asymptomatischen Probanden beschrieb vor oder nach dem Kauen Schmerzen, während 50 % der Patienten, die vorab myofasziale Schmerzen der Kaumuskulatur aufwiesen, eine Steigerung des Schmerzes nach dem Kauen beschrieben (Dao et al. 1994, S. 1163).

Ein noch höheres Maß an Behinderung der Kaufunktion konnte bei neuromotorischen Defiziten, beispielsweise bei Alzheimer Patienten, abhängigen älteren Personen, Patienten mit Down Syndrom und generell bei einer Vielzahl neurologischer Erkrankungen beobachtet werden (Woda et al. 2006b, S. 846), daher wurden auch diese aus der Studie ausgeschlossen.

Trotz einer besser werdenden Datenlage zur CMD wurde die Beeinträchtigung der Kaufunktion durch verschiedene Erkrankungen noch nicht ausreichend erforscht. Die Studie von Aseef et al., die normative Daten für gesunde Mädchen und Jungen zwischen sechs und zwanzig Jahren erhoben hat, bietet dringend benötigte quantitative Daten an, um das Kauen und Schlucken von Nahrungsmitteln durch Individuen mit und ohne Beeinträchtigung objektiv zu beschreiben (Aseef et al. 2024, S. 1839). Es besteht jedoch weiterhin ein großer Forschungsbedarf, um zunächst die Kaufunktion gesunder und schließlich auch beeinträchtigter Probanden zu beschreiben.

Bevor eine Beeinträchtigung der Kauleistung durch verschiedene Erkrankungen untersucht wird, sollte zuerst die Verlässlichkeit und Konstanz der neu entwickelten Software gezeigt sowie ein Referenzwert von zahn- und funktionsgesunden Probanden erhoben werden. Daher wurden Probanden mit jeglichem möglichem Risiko einer dadurch hervorgerufenen Beeinträchtigung der Kauleistung aus der Studie ausgeschlossen.

Eines der wichtigsten Ein- oder Ausschlusskriterien der vorliegenden Arbeit stellte anschließend der Zahnstatus dar. Die Zähne sind ein wichtiger Teil des Kausystems. Sie formen die Gesamtokklusalfäche, durch welche die Nahrungsmittel zerkleinert werden und die wiederum von der Anzahl der Zähne abhängt (van der Bilt et al. 2006, S. 22). Die Dentition und die Kaukraft wurden von van der Bilt et al. als die Schlüsselfaktoren der Kauleistung angesehen. Hierbei konnten 70 % der Varianz Kauleistung durch die Anzahl der okkludierenden (Prä-) Molaren und der Kaukraft erklärt werden (van der Bilt 2011, S. 771). Die maximale Kaukraft stieg mit der Anzahl der Zähne. Gleichzeitig war die Anzahl an okklusalen Zahnkontakten ein wichtiger Faktor für die maximal erreichbare Kaukraft, die etwa 10 % bis 20 % der Varianz erklären konnte. Der Zusammenhang zwischen maximaler Kaukraft und der Anzahl an okklusalen Kontakten war am engsten im Seitenzahnbereich. Daraus lässt sich die Konsequenz ableiten, dass der Verlust der Unterstützung durch Molaren in einer Reduktion der Kaukraft resultierte (Bakke 2006, S. 120). Verkürzte Zahnbögen mit drei bis vier Paaren an okkludierenden Prämolaren und asymmetrische Zahnbögen resultierten in einer Beeinträchtigung der Kaufähigkeit, besonders bei harten Nahrungsmitteln (van der Bilt 2011, S. 763).

Außerdem stellten Fontijn-Tekamp et al. einen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Kauzyklen und der Anzahl an okklusalen Einheiten fest. In einer festgelegten Anzahl an Kauzyklen konnten Probanden mit einer reduzierten Dentition ihr Essen nicht so gut pulverisieren wie Probanden mit mehr okklusalen Einheiten (Fontijn-Tekamp et al. 2004a, S. 434). Die Erhöhung der Anzahl an Kauzyklen und der Dauer des Kauvorgangs schien eine Anpassung an die beeinträchtigte Kaufunktion zu sein (Veyrone et al. 2007, S. 1180).

Auch Röhrle et al. belegten, dass die meiste Kraft beim Kauen auf die Seitenzähne verlagert wird (Röhrle et al. 2018, S. 458), weshalb in der hier vorliegenden Studie in der klinischen Untersuchung der Probanden sichergestellt wurde, dass maximal ein Satz an Prämolaren und keine Molaren (6er und 7er) fehlen durften. Konkret bedeutete dies, dass eine Absenz der Weisheitszähne oder einer Gruppe an Prämolaren möglich war, da diese gelegentlich nicht angelegt sind, nicht durchbrechen oder aus kieferorthopädischen Gründen extrahiert werden. Die Probanden mussten demnach mindestens 24 Zähne aufweisen.

Die Kaukraft und die okklusale Kontaktfläche reduzierten sich nach Miyaura et al. mit der Anzahl vorhandener Zähne bei Männern und bei Frauen gleichermaßen (Miyaura et al. 1999, S. 226), wobei der Kaudruck bei männlichen Probanden keine Veränderung mit dem Alter zeigt. Er steigt jedoch deutlich bei Probanden mit weniger als zwanzig Zähnen (Miyaura et al. 1999, S. 225–226). Galo et al. untersuchten den Alterungsprozess noch detaillierter. Er war bei jedem Menschen verschieden und variierte in den verschiedenen Organen und Systemen des menschlichen Körpers, er schien jedoch besonders in der Mundhöhle beschleunigt abzulaufen, je älter die Patienten wurden (Galo et al. 2006, S. 177). Mioche et al. zeigten hingegen, dass das Altern bei einem gesunden dentalen Zustand nur moderate Veränderungen des Kauverhaltens bewirkte. Veränderungen in der neuromuskulären Aktivität wurden teilweise über eine Anpassung des Kauverhaltens kompensiert. [...] Im Gegensatz dazu wurden große Veränderungen sowohl im Kauverhalten als auch bei den Eigenschaften des Bolus beobachtet, wenn der Alterungsprozess mit einer kompromittierten Dentition, allgemeiner Verschlechterung der Gesundheit und Medikamenteneinnahme einherging (Mioche et al. 2004, S. 43). Genau dies verdeutlichen vergangene Studien aus denen hervorgeht, dass ältere Personen, aufgrund des meist geringeren Zahnbestandes, eine schlechtere Kauleistung zeigten (van der Bilt 2011, S. 757) (Pereira und van der Bilt 2016, S. 630). Häufig konnte bei älteren Probanden auch eine steigende Anzahl sowie steigende Dauer der Kauzyklen bei Nahrungsmitteln festgestellt werden (Kohyama et al. 2002, S. 269). Auch sehr junge Probanden wiesen wiederum eine geringere Kauleistung auf (Julien et al. 1996, S. 96). Aufgrund der festgesetzten Altersgrenze zwischen 18 und 40 Jahren wurden sie in der vorliegenden Studie jedoch nicht eingeschlossen.

Eine gute Studienlage zeigte sich in Bezug auf Zahnverlust und ersetzte Zähne. Die Kauleistung wird maßgeblich vom Dentalstatus und der Kaukraft beeinflusst. Eine signifikante Reduktion der Kauleistung wurde bei Zahnverlust beobachtet. Dies konnte durch Prothesen, vor allem implantatgetragenen Prothesen, verbessert werden. Die Werte von natürlichen Zähnen wurden jedoch nicht erreicht (Pereira et al. 2006, S. 198).

Auch van der Bilt et al. stellten fest, dass die Versorgung von Patienten mit einer implantatgetragenen Prothese eine signifikant positive Auswirkung auf die Kaukraft und Kauleistung hatte (van der Bilt 2011, S. 754). Eine Vielzahl an Studien belegte außerdem, dass Totalprothesenträger mehr Kauzyklen und mehr Zeit für den Kauvorgang benötigen als bezahnte Probanden (Veyrone et al. 2007, S. 1180). Nissan et al. untersuchte 81 Probanden und fanden bereits heraus, dass die Lokalisation der Implantate keinen signifikanten Einfluss auf die Bevorzugung einer Kauseite hat. In der hier vorgelegten Studie wurden Personen, die herausnehmbaren oder festsitzenden implantatgetragenen Zahnersatz trugen, ausgeschlossen, um zunächst nur Probanden mit einer natürlichen Dentition zu untersuchen. Wie groß dieser Einfluss genau ist, gilt es folglich in weiteren Studien zu klären.

In ihrer Studie zeigten Witter et al., dass Patienten mit Prothesen eine deutlich schlechtere Kauleistung aufwiesen als Probanden mit einer kompletten natürlichen Dentition, da Probanden mit Prothesen 50 % größere mediane Partikelgrößen schluckten (Witter et al. 2011, S. 69). Ein ähnliches Phänomen zeigten übergewichtige Probanden, bei denen die Größe der geschluckten Portionen größer zu sein schien. Es gab jedoch noch keine Evidenz zu Kaugewohnheiten dieser Personengruppe (Pereira und van der Bilt 2016, S. 630), weshalb die körperliche Konstitution in der vorliegenden Studie keinen Einfluss auf die Auswahl der Probanden hatte.

Ein weiterer, ebenfalls wenig untersuchter Einflussfaktor war die Mundatmung. Hsu et al. beobachteten jedoch einen wesentlichen Einfluss der Mundatmung auf die Varianz der Kauzyklen (Hsu und Yamaguchi 2012, S. 559). Ob dies auch die Kauleistung beeinflusst, bleibt in weiteren Studien zu klären.

Trotz aller objektiv zusammenstellbaren Daten betonten Durham et al. in ihrer Studie zur oralen Rehabilitation, dass sowohl die klinische Situation als auch das subjektive Empfinden des Patienten in Betracht bezogen werden sollte (Durham und Ohrbach 2010, S. 492). Auch wenn die Kauleistung eines Probanden den objektiven Daten nach geringer ist als die des Durchschnitts, bedeutet dies nicht, dass er sie als vermindert oder schlecht empfindet.

5.2.2 Kaugut

Die Auswahl des Kauguts hatte einen großen Einfluss auf die Art und Weise des Kauens (Chen und Lolivret 2010, S. 331). In der Entwicklung eines Studiendesigns bestand die Auswahl zwischen einem natürlichen und einem artifiziellen Kaugut.

Die Textur des Kauguts kann den Kauvorgang beeinflussen. Die Textur bezeichnet dabei die Qualität des Kauguts oder Nahrungsmittels, wie es von einem Individuum wahrgenommen wird. Obwohl dies in einem engen Zusammenhang zur Struktur des Kauguts steht, sollten die Begriffe Textur und Struktur nicht gleichbedeutend verwendet werden (Zamanlu et al. 2012, S. 327).

Natürliches Kaugut hat den Vorteil, dass die Probanden bereits daran gewöhnt sind und dieses dadurch gewohnheitsmäßig kauen. Je nach saisonalen und geografischen Unterschieden kann die Konsistenz jedoch variieren oder gezielt beeinflusst werden. So verglichen Peyron et al. zunächst Karotten und Käse als Testnahrungsmittel und stellten Proben mit standardisierter Länge (2 cm) und Breite (2 cm), aber unterschiedlichen Dicken (0,5 cm, 1 cm und 1,5 cm) her. Später weiteten sie diesen Vergleich aus und nutzten Portionen dreier verschiedener Nüsse (Erdnüsse, Mandeln, Pistazien) und dreier Gemüsesorten (Blumenkohl, Rettich, Karotte) (Peyron et al. 2004, S. 578). Kohyama et al. verglichen Reis, Rindfleisch, Käse, Knäckebrot, Apfel und Erdnüsse (Kohyama et al. 2002, S. 269) (Peyron et al. 1997, S. 789). Häufig wurden auch Süßwaren, wie Karamellbonbons (Foster et al. 2006, S. 3470), Tooty Frooties (Nestlé) mit Orangengeschmack (Blissett et al. 2007, S. 574) oder Weingummi (Piancino et al. 2008, S. 932) genutzt. Andere Studien verwendeten einen Reisball (Ikenaga et al. 2013, S. 429) oder Rindfleisch zweier verschiedener Konsistenzen (Mioche et al. 2003, S. 193).

Hier zeigte sich auch ein Nachteil des natürlichen Kauguts als das Rindfleisch vor und nach dem Kauen gewogen wurde, um festzustellen, welches Gewicht der Bolus durch den Speichel zugelegt und durch den Verlust von Fleischsaft verloren hatte (Mioche et al. 2003, S. 193). Diese Veränderung der Konsistenz war zwar für den Schluckakt essentiell, erschwerte jedoch exakte Messungen. Eine ähnliche Beobachtung machten Mishellany-Dutour et al., die eine deutliche Reduktion des Gewichtes des ursprünglichen Bolus feststellten. Dies konnte auf zwischenzeitliches Schlucken oder das Herauslösen von Wasser und Ölen aus natürlichem Kaugut zurückgeführt werden (Mishellany-Dutour et al. 2008, S. 124).

Peyron et al. nannten als einen möglichen Grund für die interindividuelle Variabilität der Kaufunktion, dass der Bolus eine bestimmte Textur erreichen musste, bevor er geschluckt werden konnte (Peyron et al. 2004, S. 578).

Van der Bilt et al. zeigten, dass die Art der Testnahrungsmittel einen signifikanten Einfluss sowohl auf die Anzahl der Kauzyklen als auch die Gesamtdauer des Kauzyklus hatte (van der Bilt und Abbink 2017, S. 108). Die Probanden kauten am längsten auf den Nahrungsmitteln, die den größten Kraftaufwand beim Kauen benötigten, wie zum Beispiel Karotten, Erdnüsse oder Melba-Toast (ähnelt dem deutschen Zwieback) (van der Bilt und Abbink 2017, S. 108) (Pereira und van der Bilt 2016, S. 634). Zamanlu et al. schlussfolgerten in ihrer Studie zudem, dass hartes Kaugut eine eindeutigere Lateralität provozierte (Zamanlu et al. 2012, S. 330).

Um ein gewohntes Kaugefühl nicht zu verlieren, nutzten andere Studien natürliches Kaugut, das jedoch einheitlichere und leichter überprüf- und reproduzierbare Eigenschaften aufwies und von der Industrie bereits standardisiert hergestellt wurde. Ein Beispiel hierfür waren kommerziell zu erwerbende runde Cracker, bei denen eine Einheit 6,67 g wog und 4,4 cm Durchmesser aufwies (Aseef et al. 2024, S. 1841). Eine andere Möglichkeit boten Kaugummis (Freedent, Wrigley) eines konstanten Gewichts (Kazazoglu et al. 1994, S. 723) oder Kaugummis verschiedener Härtegrade (Veyrone et al. 2007, S. 1180). Durch die kommerzielle Herstellung blieben in diesen Fällen die Eigenschaften der Kaugüter annähernd konstant.

Plesh et al. zeigten, dass hartes Kaugut bei den meisten Probanden nur einen Einfluss auf die Geschwindigkeit des Kauens und nicht auf die Kieferöffnung hatte (Plesh et al. 1986, S. 502). Wintergerst et al. verglichen Studien, die verschiedene Größen und Härten an Kaugummi nutzten, um herauszufinden, wie die Härte des Bolus das Kauverhalten beeinflusste und stellten fest, dass die Härte und Größe des Bolus das Kauverhalten der Probanden auf unterschiedliche Art und Weise beeinflusste und dies daher sorgfältig beim Studiendesign abgewogen werden sollte. Für kinematische Studien empfahlen Wintergerst et al. einen weichen Kaugummi mit einem Gewicht von 2 g (Wintergerst et al. 2008, S. 369). Die Kaugeschwindigkeit bei weichem Kaugummi blieb dann konstant (van der Bilt und

Abbink 2017, S. 109), weshalb Kaugummi teilweise als Referenzkörper verwendet wurde (van der Bilt und Abbink 2017, S. 105). Hierbei war jedoch zu beachten, dass manche kommerziell erwerbliche Kaugummisorten zunächst eine festere Ummantelung aufweisen, die die Ergebnisse der ersten Kauzyklen dann wiederum beeinflussen könnte. Kaugummis eignen sich aufgrund ihrer gleichbleibenden Konsistenz nach dem Erreichen eines weichen Zustands allerdings nicht, um die Zerkleinerung eines Kauguts zu beurteilen. Sie kamen folglich für die vorliegende Studie nicht infrage.

Alternativ können natürliche Testnahrungsmittel auch gezielt zu einem bestimmten Zweck und mit bestimmten Eigenschaften produziert werden. Dies kann beispielsweise in Hinblick auf den Geschmack von Bedeutung sein. Wie groß dessen Einfluss ist, muss noch untersucht werden. Weitere wichtige Faktoren sind Konsistenz und Härte. Miyawaki et al. nutzten gezielt hergestellte natürliche Testnahrungsmittel und stellten kleine (5 g) und große (10 g) Gummibären her (Miyawaki et al. 2001, S. 779). Chen et al. nutzten für eine sensorische Evaluation Gelees und Puddings verschiedener Konsistenz (Chen und Lolivret 2010, S. 326), während Foster et al. Kaupartikel unterschiedlicher Härte aus Karamell als plastisches Kaugut (Foster et al. 2006, S. 3470) herstellten. In mehreren weiteren Studien, wie zum Beispiel bei Foster et al. und Lassauzay et al., wurden essbare Testnahrungsmittel genutzt, die gleichzeitig reproduzierbare physikalische Eigenschaften aufwiesen. Sie konnten außerdem in einer Bandbreite verschiedener Härtegrade hergestellt werden, die sich in ihren mechanischen und sensorischen Qualitäten unterschieden (Foster et al. 2006, S. 3475). Lassauzay et al., Peyron et al. und Foster et al. nutzten ein viskoelastisches Kaugut, in diesem Fall ein Kaugut aus Gelatine, das verschiedene Härtegrade aufwies, indem sie vier essbare Produkte Gelatine-Konfekt, die hauptsächlich ein elastisches Verhalten zeigten, in ihrer Härte variierten, jedoch in Form und Größe identisch waren, herstellten. Die Hauptbestandteile der Konfekte waren Gelatine, Wasser und Zucker. Zudem wurde Zitronensäure genutzt, um allen denselben Geschmack zu verleihen. Zur Unterscheidung wurden den Probekörpern unterschiedliche Farben verliehen (Lassauzay et al. 2000, S. 485) (Peyron et al. 2002, S. 42) (Foster et al. 2006, S. 3470), wobei bereits die unterschiedliche Farbgebung zu einem veränderten Kauverhalten führen kann. Foster et al. zeigten in dieser Studie auch, dass plastisches Kaugut mit einer niedrigeren Frequenz gekaut wird als elastisches

und die Härte des Kauguts nur in der initialen Phase des Kauens ausschlaggebend ist (Foster et al. 2006, S. 3477). Sie betonten außerdem noch einmal die Relevanz von standardisierten Testnahrungsmitteln (Foster et al. 2006, S. 3475).

Aufgrund der nicht vollständig auszuschließenden Unterschiede in natürlichen Nahrungsmitteln wurde für diese Studie entschieden, ein standardisiertes artifizielles Kaugut zu nutzen. In der Literatur wurden dafür eine große Bandbreite an verschiedenen Probekörpern und Materialien genutzt. Für einen Farbdurchmischungstest stellten zum Beispiel Fueki et al. zweifarbige Wachswürfel aus Paraffin (Fueki et al. 2008, S. 346) her, während Schimmel et al. einen zweifarbigen Kaugummi verwendeten, bei dem anschließend untersucht wurde, wie sich die zuvor getrennten Farben des Probekörpers vermengt hatten (Schimmel et al. 2015, S. 955). Dies geschah mittels einer Computeranalyse oder visueller Inspektion (van der Bilt et al. 2012, S. 11). Speksnijder et al. hingegen nutzten in ihrem Vermischungstest Wachs, bei dem eine Wachstablette mit einem Durchmesser von 20 mm hergestellt wurde. Sie bestand aus einer je 3 mm hohen roten und blauen Schicht (Speksnijder et al. 2009, S. 580). Auch Yoshimura et al. nutzten den Farbvermischungstest (Yoshimura et al. 2006, S. 339) und hoben dabei die Eigenschaft des Wachswürfels hervor, dass dieser ein konstanter Bolus während des Kauvorgangs blieb und sich nicht wie viele andere Testkaugüter verteilte (Yoshimura et al. 2006, S. 339).

Da in der hier diskutierten Studie jedoch die Zerkleinerung des Kauguts relevant war, waren diese Probekörper nicht geeignet. Die beiden hierfür meist verwendeten artifiziiellen Kaugüter waren CutterSil® (Buschang et al. 1997, S.522) und Optosil. Bereits 1980 wurde eine frühere Version des Silikons Optosil genutzt (van der Glas et al. 1987, S. 1548). Der Vorteil eines künstlichen Kauguts [...] ist, dass es nicht quillt, sich nicht in Speichel oder Wasser auflöst, nicht entlang vorbestimmter Spalten bricht, eine standardisierte Konsistenz hat (Buschang et al. 1997, S. 523) und sowohl die Form als auch die Konsistenz jederzeit reproduziert werden können (Olthoff et al. 1984, S. 899). Im Jahr 2014 zeigten Gonçalves et al., dass es keine unterschiedlichen Ergebnisse in der Verwendung eines natürlichen (Erdnüsse) oder eines künstlichen Kauguts (Optocal) gab (Gonçalves et al. 2014, S. 177).

Optocal wird mittlerweile meist für Studien mit Probanden mit herausnehmbarem Zahnersatz genutzt und befindet sich als Optocal Plus, das auf dem Silikonkomponenten Optosil Plus basiert (Fontijn-Tekamp et al. 2000, S. 1521), auf dem Markt. Optosil Plus wird bei bezahnten Probanden und mittlerweile noch häufiger als Cuttersil verwendet.

In früheren Studien diente „Optosil green“ als Kaugut, das kontinuierlich weiterentwickelt wurde, den Kern seines Namens jedoch nie verlor. Optosil befindet sich mittlerweile in den Varianten „Optosil P Plus“ und „Optosil Comfort“ auf dem Markt. Es ist ein C-Silikon, das durch die Vermischung mit Xantopren aktiviert wird und innerhalb einiger Minuten aushärtet. Der Vorteil von Optosil ist, dass es vor dem Sieben getrocknet werden kann und seine Textur trotzdem gleich und isotrop bleibt (van der Glas et al. 1987, S. 1548). Fontijn-Tekamp et al. mischten Optosil P Plus nicht nur mit einem Katalysator, sondern auch mit Zahnpasta, Vaseline, und dem Pulver zweier verschiedener dentaler Abdruckmassen (Fontijn-Tekamp et al. 2004b, S. 376). Meistens wird die Optosil-Basis, wie in der vorliegenden Arbeit, jedoch nur mit einem Katalysator (Xantopren) vermengt. Optosil weist einen eher neutralen Geschmack auf, den einige Probanden die an dieser Studie teilnahmen, als nicht angenehm empfanden. Ob und welchen Effekt ein Zusatz von Geschmackstoffen auf die Kauleistung hat, gilt es in weiteren Studien herauszufinden.

Neben der Auswahl des Kauguts war es außerdem wichtig, die Portionsgröße festzulegen. Dabei war sowohl die Größe der einzelnen Optosilwürfel als auch deren Anzahl entscheidend. In den verschiedenen Studien wurden Optosilwürfel mit unterschiedlichen Kantenlängen genutzt. So nutzten Olthoff et al. und van der Bilt et al. Würfel aus Optosil mit einer Kantenlänge von 8 mm (van der Bilt et al. 1993b, S. 159) (Olthoff et al. 1984, S. 899–900). Zuvor nutzten van der Bilt et al. jedoch auch unterschiedliche Kantenlängen (van der Bilt et al. 1991, S. 932). Das Ziel dieser Studie bestand jedoch darin, den Einfluss der Volumina von Kaugummi und Optosil auf die Mundöffnung zu untersuchen, weshalb sie die Startgröße der Optosilwürfel variierten (van der Bilt et al. 1991, S. 931). Zwei Jahre später nutzten van der Bilt et al. dann wiederum eine grobe, eine mittlere und eine feine Mischung mit jeweiligem Volumen von 12 cm³ gekauter Silikonpartikel (Optosil) (van der Bilt et al. 1993a, S. 163).

Schließlich setzten dann sowohl Fontijn-Tekamp et al. als auch van der Bilt et al. 17 Würfel mit einer Kantenlänge von je 5,6 mm (Gesamtvolumen circa 3 cm³) ein (Fontijn-Tekamp et al. 2004b, S. 376) (van der Bilt und Fontijn-Tekamp 2004, S. 194) (Fontijn-Tekamp et al. 2000, S. 1521), da dies in etwa einer üblichen Portionsgröße entspricht. Dieses Gesamtvolumen und die Kantenlängen wurden für die vorliegende Studie übernommen.

Die Eigenschaften des Kauguts beeinflussen alle Parameter des Kauvorgangs sowie die Kieferbewegung, die Muskelaktivität und die Kaufrequenz maßgeblich. So benötigte hartes Kaugut mehr Muskelaktivität als weiches (van der Bilt und Abbink 2017, S. 105). Diese stimmt auch damit überein, dass hartes Kaugut länger gekaut wurde als weiches und mehr Gesamtmuskelaktivität benötigt wurde (van der Bilt und Abbink 2017, S. 110). Die meisten Probanden machten außerdem die Anzahl der Kauzyklen von der Härte der Nahrungsmittel abhängig, einige Probanden zeigten jedoch auch keine deutliche Steigerung (Horio und Kawamura 1989). Aus diesem Grund wurde für diese Studie entschieden, dass eine festgelegte Anzahl an Kauzyklen verwendet wurde (Kapitel 5.2.3).

5.2.3 Versuchsdurchführung

Für große Portionen benötigten die Probanden in der Studie von Fontijn-Tekamp vor dem Schlucken mehr Zeit und mehr Kauzyklen. Die Anzahl an Kauzyklen, um das Kaugut auf das Schlucken vorzubereiten, stieg als eine lineare Funktion proportional zum Gesamtvolumen des Kauguts an (Fontijn-Tekamp et al. 2004a, S. 435). Im Schnitt korrelierte die Anzahl der Kauzyklen, die Probanden für natürliches und künstliches Kaugut bis zum Schlucken benötigten. Das bedeutete, dass es Probanden gab, die eine verhältnismäßig hohe oder eine verhältnismäßig geringe Anzahl an Kauzyklen bei allen Kaugütern nutzten. Es bedeutete jedoch nicht, dass Probanden eine feste Anzahl an Kauzyklen für jedes Nahrungsmittel nutzen, da sie im Schnitt mehr Kauzyklen für hartes Kaugut, wie beispielsweise Karotten oder Optocal Plus, als für weiches Kaugut, wie beispielsweise weichen Käse, benötigten (Fontijn-Tekamp et al. 2004a, S. 434–435). Außerdem benötigten trockene und harte Nahrungsmittel mehr Kauzyklen als feuchte und weiche Nahrungsmittel bevor sie geschluckt wurden (van der Bilt 2011, S. 754).

Die Härte der Nahrungsmittel wurde während des Kauens wahrgenommen und beeinflusste die Aktivität der Kaumuskulatur, die Kaukraft und die Bewegungen der Mandibula. Die Charakteristika der Nahrungsmittel haben einen großen Einfluss auf die Anzahl der Kauzyklen, die benötigt wurden, um das Kaugut zu schlucken (van der Bilt 2011, S. 769) (Pereira und van der Bilt 2016, S. 635). Ein ausschlaggebender Faktor für die Wahrnehmung der Charakteristika des Nahrungsmittels war das Volumen. Lucas und Luke vermuteten, dass die Wahrnehmung stärker von der Größe der Essenspartikel als von deren Gewicht abhing. Gleichzeitig hing das Schlucken einer Portion Erdnüsse wahrscheinlich mehr von der Zeit, die die Probanden brauchten, um sie zu durchnässen, als von der Partikelgröße ab (Lucas und Luke 1984, S. 205). Das ideale Volumen in Studien wird im folgenden Abschnitt noch weiter diskutiert.

Ein Nachteil eines künstlichen gegenüber eines natürlichen Kauguts ist es, dass Probanden es nicht gewohnt sind, dieses zu kauen. Aus diesem Grund waren klare Anweisungen und eine Übungsphase vor dem Beginn des Experimentes sehr wichtig (Fontijn-Tekamp et al. 2004b, S. 378). Dies wurde in der vorliegenden Studie berücksichtigt, indem vorab eine Übungsphase mit zehn Würfeln durchgeführt wurde. Es wurden noch keine Anweisungen zur Art des Kauens gegeben. Die Probanden durften zunächst gewohnheitsmäßig und mit einer beliebigen Anzahl an Kauzyklen kauen. Es wurde ihnen nur empfohlen, fest zuzubeißen. Da es bei der Beurteilung der Kauleistung jedoch wichtig war eine Vergleichbarkeit herzustellen, wurde die Anzahl der Kauzyklen nach dem Probedurchgang für den weiteren Studienablauf festgelegt. Verschiedene Studien nutzten eine unterschiedliche Zahl an Kauzyklen. Schimmel et al. ließen einen elastischen Probekörper zwanzigmal kauen (Schimmel et al. 2015, S. 955), Fueki et al. und Miyaki et al. legten sich wiederum auf 10 Kauzyklen fest (Fueki et al. 2008, S. 346) (Miyawaki et al. 2001, S. 778). Studien, die mit der Siebmethode erstellt wurden, legten nicht immer eine Anzahl der Kauzyklen fest und Eberhard et al. schlussfolgerten, dass die Unterschiede der Partikelgrößen durch die unterschiedliche Zahl an Kauzyklen erklärt werden könnten (Eberhard et al. 2012, S. 342). Die meisten Studien wählten 15 Kauzyklen. Diese Anzahl entsprach etwas weniger Kauzyklen als den 17 Kauzyklen, die Probanden im Schnitt bis zum Schlucken einer Portion Kuchen brauchten (Pereira und van der Bilt 2016, S. 635).

Unter anderem auch Giannakopoulos et al. nutzten 15 Kauzyklen und griffen dabei auf ein standardisiertes Silikon als Kaugut zurück (Giannakopoulos et al. 2014, S. 383). Dies korrelierte mit den Beobachtungen von Fontijn et al., die eine signifikante Relation zwischen der medianen Partikelgröße nach 15 Kauzyklen und der Partikelgröße im Moment des Schluckens beschrieben (Fontijn-Tekamp et al. 2004a, S. 435). Auch Speksnijder et al. legten sich auf 15 Kauzyklen fest und definierten außerdem mit 17 Würfeln Optocal Plus, die etwa 3 cm³ entsprechen, auch die Menge der gekauten Würfel und somit das Volumen. Anschließend spülten die Probanden den Mund aus und die verbliebenen Partikel wurden zur bereits ausgespuckten Probe hinzugefügt (Speksnijder et al. 2009, S. 582). Über die gesamte Kausequenz stieg die Anzahl der Kauvorgänge und die Gesamtdauer signifikant mit der Erhöhung der Anzahl an zu kauenden Partikel (Blissett et al. 2007, S. 577), weshalb ein genauer Rahmen für die Vergleichbarkeit mit vorangegangenen Studien wichtig war. Da die Angaben von 15 Kauzyklen und 17 Kauwürfeln mit einer Kantenlänge von 5,6 mm (Eberhard et al. 2012, S. 339) am häufigsten genutzt wurden und genauer sind als beispielsweise einen Mund voll Nahrungsmittel (Nagasawa et al. 1997), wurden diese Angaben unter anderem auch von Eberhard et al. sowie für die vorliegende Studie übernommen.

Nach der Gewinnung der Proben wurden die Partikel vor der Auswertung mit Wasser überspült und wie bei Fontijn-Tekamp et al. eine Woche lang luftgetrocknet (Fontijn-Tekamp et al. 2000, S. 1521). Schließlich wurden die luftgetrockneten Proben wie bei Eberhard et al. mit reinem Alkohol in demselben Filter desinfiziert (Eberhard et al. 2012, S. 339) und noch einmal zum Trocknen stehen gelassen. In trockenem Zustand lassen sich die Partikel einfach und schlierenfrei auf dem Scanner verteilen. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass die Filter staubgeschützt gelagert wurden und die Proben so nicht kontaminiert werden.

Auch zur Art des Kauens wurde in unterschiedlichen Studien unterschiedliche Angaben gemacht. Häufig sollten die Probanden gewohnheitsmäßig kauen, manche bestimmten wiederum, dass nur einseitig gekaut werden sollte (Miyawaki et al. 2001, S. 778). Weitere Studien bestimmten dieses einseitige Kauen noch genauer und die Probanden sollten auf ihrer bevorzugten Kauseite kauen (Fueki et al. 2008, S. 346).

In der vorliegenden Studie sollten die Varianten des freien und angewiesenen Kauens verglichen werden. Resultierend aus diesem Vergleich sollte die Frage beantwortet werden, ob es eine bevorzugte Kauseite gibt. Darauf wird in Kapitel 5.5 noch einmal näher eingegangen. Dementsprechend wurden die Anweisungen gestaltet.

Ergänzend zu den konkreten Vorgaben zum Kauprozess wurden weitere Rahmenbedingungen festgelegt. So sollten die Probanden in einigen Studiendesigns bequem auf einem Stuhl (Piancino et al. 2008, S. 932) in aufrechter Position sitzen (Peyron et al. 1997, S. 790). Andere definierten dies noch genauer und ließen die Probanden aufrecht und bequem in einem Zahnarztstuhl mit Kopfstütze in einem ruhigen Raum (Olthoff et al. 1984, S. 900) die Versuche durchführen, wobei nicht näher angegeben wurde, ob der Kopf angelehnt werden sollte oder nicht. Bei anderen, wie beispielsweise bei Deniz et al., wurde der Kopf nicht gestützt (Deniz und Kulak Ozkan 2013, S. 93). Auch hier wurden die Angaben von Eberhard et al. übernommen, dass die Probanden angewiesen wurden in aufrechter Position stehend (Eberhard et al. 2012, S. 339) zu kauen. Der Kopf wurde ebenfalls nicht gestützt.

Manche Versuchsaufbauten lenkten die Probanden während des Kauens mit einem Film (Hsu und Yamaguchi 2012, S. 560) oder einer Video-Vorlesung (Plesh et al. 1986, S. 502) ab. Andere legten fest, dass die Probanden ein Zielobjekt in 90 cm Entfernung fixieren sollten, um Bewegungen des Kopfes zu vermeiden (Piancino et al. 2008, S. 932). Wenn Angaben zum Umfeld gemacht wurden, wurden die Messungen in einem ruhigen und angenehmen Umfeld durchgeführt (Piancino et al. 2008, S. 932), wobei teilweise die Kaugeschwindigkeit durch ein Metronom vorgegeben wurde (Ottenhoff et al. 1993, S. 501) (Buschang et al. 1997, S. 523). Gegen die Vorgabe einer Kaugeschwindigkeit sprachen die Ergebnisse der Studie von van der Bilt et al., die gezeigt hatte, dass die Kaufrequenz während des Kauzyklus variierte. Aus diesem Grund zählte im vorliegenden Versuchsaufbau der Versuchsleiter zunächst nicht laut mit und lässt den Probanden sein eigenes Tempo finden. Nur die letzten drei Zyklen wurden wie bei van der Bilt et al. und Eberhard et al. laut mitgezählt (van der Bilt und Abbink 2017, S. 108) (Eberhard et al. 2012,

S. 339). Auch Buschang et al. beobachteten, dass das Kautempo variabel war. So legten sie es zunächst nichts fest und ließen die Probanden gewohnheitsmäßig, dann langsam mit 40 Zyklen pro Minute und dann schnell mit hundert Zyklen pro Minute kauen (Buschang et al. 1997, S. 523). Das langsame Kautempo brachte die kleinsten Partikel mit der größten Verteilung hervor, gefolgt vom gewohnheitsmäßigen und schnellen Kauen. Sie zeigten, dass sowohl die Größe des Bolus als auch das Kautempo eine Quelle für Variationen in Studien zur Kauleistung darstellten (Buschang et al. 1997, S. 524). Auch diese Ergebnisse verdeutlichen, wie wichtig es war, einen konstanten Versuchsaufbau in Studien zur Kauleistung festzulegen.

Die Festlegung der Anzahl an Sitzungen und deren zeitlicher Abstand variierte je nach Studiendesign und -ziel. In Bezug auf die Kaukraft empfahlen Roldán et al. das Erheben von Daten innerhalb einer Sitzung sowie in einer oder mehreren weiteren Sitzungen (Roldán et al. 2009, S. 806). Sie selbst setzten zwei Sitzungen in einem Abstand von 90 Minuten an (Roldán et al. 2009, S. 801). Wichtig hierbei waren jedoch Pausen, um Ermüdung zu vermeiden (Buschang et al. 1997, S. 523). Häufig wurden die Tests zweimal durchgeführt (Fontijn-Tekamp et al. 2000, S. 1521), wenn ein etwas längerer Zeitraum beobachtet werden sollte. Es wurden Daten jedoch auch an drei Terminen (0, 6 und 12 Monate) (Youssef et al. 1997, S. 179) oder mehr erhoben.

Die größten Unterschiede zwischen den einzelnen Sitzungen beobachteten Lassauzay et al. bei der vertikalen Amplitude, der Öffnungs- und Schließgeschwindigkeit des Kiefers, die sich zur Folgesitzung hin erhöhten. Die Anzahl der Kauzyklen und die Muskelarbeit steigerte sich von der ersten zur zweiten Sitzung (Lassauzay et al. 2000, S. 488). Fontijn-Tekamp et al. fanden hingegen keine statistische Wechselbeziehung zwischen der Wiederholung des Versuches und den restlichen Variablen (Fontijn-Tekamp et al. 2004b, S. 378), sprich der Kaufrequenz, der Anzahl der Kauzyklen und der Muskelarbeit. In der vorliegenden Studie wurde der Abstand zwischen den beiden Untersuchungen von zwei Wochen (Olthoff et al. 1984, S. 902) aus vorangegangenen Studien zur Kauleistung übernommen. Dabei wurde zusätzlich beobachtet, ob es einen „Trainings- oder Erinnerungseffekt“ gibt.

Dabei zeigte sich, dass von 49 Probanden 41 (ca. 84 %) beim angewiesenen und 38 (ca. 78 %) beim freien Kauen keine wesentliche Verbesserung oder Verschlechterung, im Sinne einer Kaupartikelreduzierung außerhalb der Standardabweichung, von der ersten zur zweiten Sitzung zeigten (Abb. 16). Basierend auf diesen Ergebnissen ließ sich also kein Trainings- oder Erinnerungseffekt feststellen.

Trotz allem bestätigten alle Probanden die Wichtigkeit der Übungsphase vor dem ersten Versuchsdurchgang, um sich an das Mund- und Kaugefühl des artifiziellen Kauguts zu gewöhnen. Einige wünschten sich, dass die Kauwürfel nicht geschmackneutral seien, wobei ein potenzieller Effekt auf die Kauleistung untersucht werden müsste.

5.2.4 Scanvorgang

Ein exakter Scan war die Voraussetzung für eine bestmögliche Auswertung der Proben.

Für die vorliegende Studie wurde das Vorgehen beim Scannen von Eberhard et al. größtenteils übernommen. Diese führten den Scan mit einem konventionellen Flachbettscanner mit einer Auflösung von 1200 dpi durch und verzichteten auf Filter. Die zu scannenden Partikel wurden anschließend auf einer zwanzig mal dreißig Zentimeter großen Glasplatte ausgebreitet. Um Gruppenbildungen zu verhindern, wurden die Partikel bei Eberhard et al. per Hand mit einem Malpinsel verteilt. Dabei wurde keine Ausrichtung der Partikel vorgenommen, sondern sie wurden willkürlich verteilt. Über die Glasplatte wurde bei Eberhard et al. eine dreißig auf vierzig Zentimeter große, schwarze, mit Velours ausgekleidete Box platziert, um Reflexionen im Hintergrund zu minimieren. Vor jedem Scanprozess wurde die Glasplatte mit einem fusselfreien Stoff und purem Alkohol sowie die Veloursbox mit einem Fusselentferner gereinigt. Abschließend wurden die Partikel bei Eberhard et al. mit einem Schminkepinsel von der Glasplatte entfernt, gesammelt und gewogen (Eberhard et al. 2012, S. 340). Zu großen Teilen wurde dieses Vorgehen in der vorliegenden Arbeit übernommen.

Auch bei anderen Studiendesigns, wie dem Farbdurchmischungstest, den Speksnijder et al. nutzten, kam ein Scanner zum Einsatz (Speksnijder et al. 2009, S. 581), jedoch nutzten sie einen grünen Hintergrund, der in einem Abstand von 2,8 cm platziert wurde, da dies den Kontrast verstärkte (Speksnijder et al. 2009, S. 582).

Ein Unterschied der Düsseldorfer zur Heidelberger Methode bestand in der verwendeten Veloursbox, die im Düsseldorfer Versuchsaufbau an die Größe der Glasplatte angepasst wurde und mit dieser bündig abschloss. Außerdem wurden die Partikel nicht mit einem Malpinsel auf der Glasplatte separiert und auch nicht mit einem Schminkepinsel von der Glasplatte entfernt, da sich in den Testscans zeigte, dass sich sehr kleine Partikel statisch aufladen und in den Haaren des Pinsels hängen bleiben. Stattdessen wurde zunächst ein Silikonschaber getestet, der jedoch aufgrund der entstehenden Reibung auf der Glasplatte teilweise hängen blieb und dadurch über einzelne Partikel hinweg glitt oder sie unkontrolliert in den Raum katapultierte. Die Verteilung der Partikel wurde daher grob durch das Schütten der Probe aus dem Filter und anschließendes Ausstreichen des Filterpapierees mit einem Kartonpapier vorgenommen. Die feine Verteilung, um Überlappungen zu vermeiden, wurde abschließend mit einer Pinzette durchgeführt, wobei nicht auf die Orientierung der Partikel geachtet wurde. Auch wenn diese zufällig geschah, kann diskutiert werden, ob Partikel aufgrund der Schwerkraft eher dazu neigten auf die Seite mit der größten Grundfläche zu kippen. Durch die deutlich unterschiedliche Anzahl an Partikeln bestand in der Ausbreitung dieser auch der größte Unterschied zwischen den jeweiligen Probanden in Bezug auf den Zeitaufwand, da viele kleine Partikel deutlich schwieriger ohne Überlappungen zu verteilen waren als wenige große Partikel. Hier bestand eine der größten möglichen Fehlerquellen im Scanvorgang, da die Partikel per Hand auf dem Scanner ausgebreitet wurden. Je gründlicher diese Verteilung geschah, je geringer waren die Überlappungen und desto genauer waren der Scan und damit auch die Ergebnisse. Abschließend zeigte sich, dass das kontrollierte Zusammenschieben der Partikel am besten mit einem Stück Kartonpapier möglich war. Dieses wurde nach jedem Probanden ausgetauscht.

Die für den gesamten Vorgang, von Reinigen, Ausbreiten, Scannen, Zusammenschieben und in separate Plastiktüten verpacken, aufgewendete Zeit betrug, abhängig von der Anzahl der Partikel, zwischen drei und 21 Minuten.

Um den Scanprozess zu überprüfen, wurde zunächst ein Scan ohne Kaupartikel, nur mit der Glasplatte sowie der darüber gelegten Veloursbox durchgeführt. So sollte das „Grundrauschen“ erfasst werden. Dieses Vorgehen war wichtig, da nicht in einem Staubschutzraum gearbeitet wurde und sich aus dem Velours auch immer wieder Kleinstpartikel lösen konnten.

Dabei wurden die in Tabelle 13 aufgeführten neun Partikel registriert, deren Volumen jedoch insgesamt nur 0,005873 mm³ betrug. Dieser auf das Gesamtvolumen bezogen geringe Wert ist zu vernachlässigen. Gleichzeitig zeigte er die Relevanz der Reinigung vor den Scanvorgängen und der Einstellung der „*minimum area size*“, einer Untergrenze der Größe der Partikel, die von der Software analysiert wurden, damit Staubpartikel nicht in die Berechnungen einbezogen wurden.

Tabelle 13: Ergebnisse eines Scans ohne Partikel

Number	Area (mm ²)	Volume (mm ³)	Min Feret (mm)	Minor Axis Length (mm)	Retained (%)
1	0.013441	0.000212	0.029120	0.031569	96.388.039
2	0.013441	0.000233	0.035936	0.034654	92.423.062
3	0.011201	0.000381	0.060241	0.068012	85.938.296
4	0.015681	0.000744	0.074835	0.094924	73.267.330
5	0.011649	0.000619	0.084667	0.106281	62.728.379
6	0.014337	0.000698	0.084667	0.097413	50.839.748
7	0.025986	0.001352	0.107096	0.104086	27.815.388
8	0.015233	0.000490	0.111541	0.064367	19.468.739
9	0.031362	0.001144	0.170388	0.072924	0.000000

Trotz der zuvor beschriebenen Fehlerreduktion durch Minimierung der Staubpartikel und möglichst gründliche Verteilung der einzelnen Partikel wies die Scanmethode eine Schwäche in der Verwendung auf. Diese liegt darin, dass von einem zweidimensionalen Scan auf ein dreidimensionales Volumen geschlossen werden musste und die zerkaute Partikel aufgrund der Schwerkraft tendenziell häufiger mit ihrer größten Fläche nach unten zum Liegen kamen. Folglich stieg die Genauigkeit je kleiner die Partikel wurden.

5.2.5 Berechnung und Auswertung

In den meisten Studien zur Kauleistung wurde das Ausmaß der Zerkleinerung der Nahrungsmittel durch die Siebmethode bestimmt (zum Beispiel Manly und Braley, 1950; Edlund und Lamm, 1980; Lucas and Luke, 1983; Olthoff et al., 1984; Jiffry, 1987). Dabei kamen eines oder mehrere Siebe zum Einsatz. Die Studien, die mehrere Siebe nutzten, konnten detailliertere Informationen liefern, indem sie die Kauleistung durch Variablen einer Partikelgrößenverteilung des gekauten Nahrungsmittels, wie die mediane Partikelgröße, beschrieben (van der Bilt und Fontijn-Tekamp 2004, S. 193). Mithilfe des Gesamtgewichts der zerkleinerten Partikel in den verschiedenen Sieben wurde die Partikelgrößenverteilung durch die Variablen der (kumulierten) Gewichtsverteilung beschrieben (van der Bilt et al. 1993a, S. 163). Die Partikelgrößenverteilung basierte also auf dem Volumen der Partikel (van der Bilt et al. 1993b, S. 159), da sich dieses kongruent zum Gewicht verhielt, und kam auch in der vorliegenden Studie zur Anwendung. Hierfür wurden die Partikel mittels ihrer Größe durch die Software nummeriert und anhand dieser Verteilung die numerische mittlere Partikelgröße bestimmt.

Diese mittlere Partikelgröße wurde nicht immer identisch definiert. Bei van der Bilt et al. bestimmte der x50-Wert die Partikelgröße, bei der 50 % der Anzahl der Partikel kleiner als dieser Wert sind (van der Bilt et al. 1993a, S. 163). In den meisten Studien zur Siebmethode war der x50-Wert der Wert, bei dem 50 % des Kauguts (bezogen auf das Volumen bzw. Gewicht des Kauguts) in einem theoretischen Sieb mit exakt dieser Maschengröße liegen geblieben wären. Diese mediane Partikelgröße, oder auch x50-Wert bezeichnet, wurde häufig als Referenzwert zum Vergleich verschiedener Studien und Probanden genutzt (Fontijn-Tekamp et al. 2000, S. 1521). Auch Eberhard et al. nutzten 2014 die Partikelgrößenverteilung in Kombination mit der Scanmethode und der Rosin-Rammler-Funktion, um die x50-Werte zu bestimmen (Eberhard et al. 2014, S. 346). Die Rosin-Rammler-Funktion wurde bereits in vielen vorangegangenen Studien genutzt, um eine Partikelgrößenverteilung zu errechnen (van der Bilt et al. 1991, S. 932).

Da das Volumen über einen zweidimensionalen Scan nicht exakt bestimmt werden konnte, wurde ein Volumen und ein kumuliertes Volumen aus den Daten des Scans bestimmt. Dieses wurde berechnet, indem, wie bei van der Bilt et al., für jedes gekaute Partikel angenommen wurde, dass es einer Ellipse mit einem Durchmesser gleich des gemessenen Durchmessers ähnelt (van der Bilt et al. 1993a, S. 163). Auch die vorliegende Studie nutzte die Ellipse als Annäherung an das Volumen der Kaupartikel. Bei der Berechnung wurden die Quadrate der kleinsten Abstände zwischen der Ellipse und dem Flächenrand des Partikels minimiert. Anschließend wurde die Fläche des Partikels mit der halben Länge der kleineren Achse der Ellipse („*minor axis length*“) multipliziert. Das Ergebnis war eine Abschätzung für das durchschnittliche dreidimensionale Volumen eines Partikels mithilfe dessen zweidimensionaler Grundfläche. Diese Vorgehensweise war identisch mit der Vorgehensweise der Heidelberger Methode. Wenn man die Maße der Partikel kannte, konnte man auch berechnen, auf welchem Sieb dieser Partikel zum Liegen gekommen wäre.

Im Durchschnitt kamen Eberhard et al. zu dem Schluss, dass die x50-Werte beim Scannen um 2 % bis 4 % im Vergleich zu den Ergebnissen der Siebmethode überschätzt wurden (Eberhard et al. 2012, S. 341). Trotz allem sollte die Scanmethode auch losgelöst von der Siebmethode betrachtet werden, da auch die Möglichkeit bestand, dass ein Partikel, das rein rechnerisch durch ein Sieb mit einer bestimmten Maschengröße gefallen wäre, sich beim Sieben jedoch nicht so gedreht hat, dass es dies getan hat.

Die bereits in Abschnitt 5.2.4 beschriebene Schwäche der Scanmethode zeigte sich im Folgenden: Zunächst wurden sowohl ein einzelner Würfel als auch 17 ungekaute Würfel gescannt. Da diese eine Kantenlänge von 5,6 mm aufwiesen, konnte ihr Volumen exakt berechnet werden ($175,616 \text{ mm}^3$). In der Analyse des Scans betrug das Volumen für einen einzelnen gescannten Würfel jedoch $102,71073 \text{ mm}^3$ statt des berechneten Volumens von $175,616 \text{ mm}^3$. Beim Scannen von 17 ungekauten Würfeln lag das Volumen der einzelnen Würfel zwischen $100,25 \text{ mm}^3$ bis $128,75 \text{ mm}^3$.

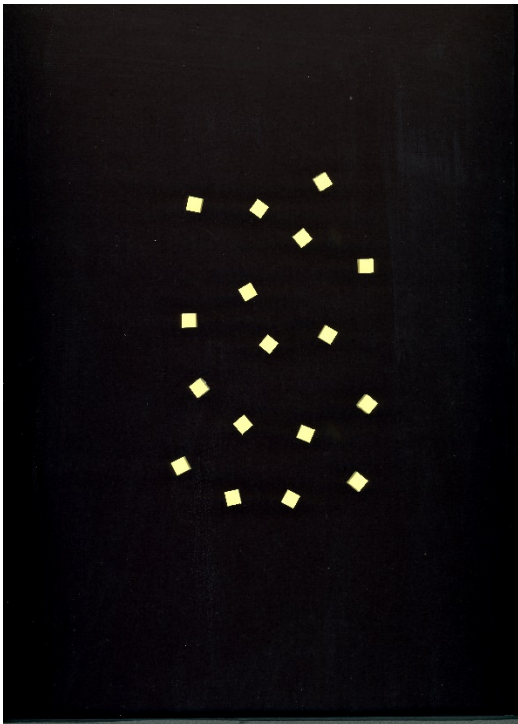


Abbildung 23: 17 gescannte Würfel

Diese Diskrepanz kam dadurch zustande, da nur die Grundfläche eines einzelnen bzw. 17 ungekauter Würfel gescannt wurde. In der Auswertung der Scanmethode wurde das Volumen jedoch mit $l * k * \frac{k}{2}$ berechnet, wobei k die kürzere und l die längere Achse (Durchmesser) der umschließenden Ellipse war. Die Höhe des Partikels wurde dabei mit $\frac{k}{2}$ abgeschätzt. Die Ellipse wurde verwendet, weil die Grundflächen der zerkauten Partikel in der Regel keine Rechtecke waren.

Bei einem Würfel mit einer Kantenlänge von 1 mm ist das tatsächliche Volumen 1 mm^3 . Bei der Berechnung in der Heidelberger und Düsseldorfer Methode wäre die umschließende Ellipse ein Kreis mit $l = k = \sqrt{2}$. Somit wäre das berechnete Volumen $= \sqrt{2} * \sqrt{2} * \frac{\sqrt{2}}{2} = \sqrt{2} \approx 1.4142$. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass bei einem unzerkauten Würfel mit einer quadratischen Grundfläche von 1 mm keine Höhe von 1 mm, sondern eine Höhe von $\frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,7071$ in die Berechnung eingeht. Da die Proben äußerst selten unzerkaute Würfel aufwiesen, fällt diese Problematik weniger ins Gewicht.

Gleichsam trat diese Problematik auch bei der Anwendung der Siebmethode, genauer gesagt bei der Verwendung der Rosin-Rammler-Funktion, auf. Bereits Olthoff et al. beschrieben Schwierigkeiten bei der Siebmethode bei der Zuhilfenahme der Rosin-Rammler-Funktion, solange die meisten Partikel unzerkaut waren und damit eine ähnliche Größe hatten. In diesem Fall wies die Partikelgrößenverteilung eher einen stufenförmigen Verlauf auf, während die Rosin-Rammler-Funktion einem kurvenförmigen Verlauf folgte (Olthoff et al. 1984, S. 901). Laut Olthoff et al. wurde die für die Anwendung der Rosin-Rammler-Funktion gewünschte Zerkleinerung bei Optosil nach zehn Kauzyklen erreicht (Olthoff et al. 1984, S. 901). Folglich sollten in Studien zur Beurteilung der Kauleistung mindestens zehn Kauzyklen erfolgen. Die vorliegende Studie zeigte jedoch, dass zwei Probanden dieses Kriterium selbst nach den angewiesenen fünfzehn Kauzyklen nicht erfüllten. Demzufolge wurde das abgeschätzte Volumen bei beiden Methoden genauer, je kleiner die Partikel wurden.

5.3 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

Mit dem Ziel der vorliegenden Arbeiten, eine Reproduzierbarkeit von Daten und Ergebnissen zu gewährleisten, wurde im Vorfeld des Analyseprozesses ein Sicherungsverfahren durchgeführt. Hierfür wurden arbiträr ausgewählte Scandateien unter einem anderen Namen hochgeladen und analysiert. Die ermittelten Ergebnisse waren dabei identisch, sodass eine Fehlerquelle in diesem Vorgang gezielt ausgeschlossen werden konnte.

Zunächst wurden die x50-Werte der zehnfach gescannten Proben verglichen. Bei acht Probanden war die Abweichung nach der Düsseldorfer, bei zwei Probanden die Abweichung nach der Heidelberger Methode geringer. Wie in Abbildung 9 in Kapitel 4.2 dargestellt, lag die durchschnittliche Abweichung der Heidelberger Methode mit 1,52 % leicht höher als die der Düsseldorfer Methode mit 1,09 %. Beide Methoden zeigten damit eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Zusätzlich wurde die Anzahl der Partikel verglichen. Durchschnittlich betrug die Abweichung der in Abb. 10, Kapitel 4.2 dargestellten Partikelanzahl 1,89 %. Dabei lag die höchste Abweichung bei 3,46 %. Da die angelegten Scandateien, die der Berechnung als Grundlage dienten, identisch waren, gab es hier keinen Unterschied in der Partikelanzahl zwischen der Heidelberger und der Düsseldorfer Methode. Die Abweichungen waren zum einen auf den Untersuchungsleiter, der die Partikel auf dem Scanner verteilte und zum anderen auf die Art und Weise wie die Partikel dabei rotierten, zurückzuführen. Die Abweichungen zeigten jedoch eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Ein weiterer wichtiger Aspekt war die Reproduzierbarkeit über die Anzahl an Sitzungen. Die vorliegende Studie betrachtete nur zwei Sitzungen. Über diese zeigten jedoch 41 der 49 Probanden, die zu beiden Sitzungen erschienen, keine Veränderung ihrer Kauleistung außerhalb der einfachen Standardabweichung von der ersten zur zweiten Sitzung (Abb. 16, Kapitel 4.5.2). Beim angewiesenen Kauen zeigte sich dies bei 38 Probanden. Bei den verbliebenen Probanden zeigten beim freien Kauen sechs Probanden eine Verbesserung und fünf eine Verschlechterung von der ersten zur zweiten Sitzung. Beim angewiesenen Kauen zeigten jeweils fünf Probanden eine Verbesserung und drei eine Verschlechterung.

Es schien sich über zwei Sitzungen im Abstand von zwei Wochen also nur bei wenigen Probanden eine Veränderung oder ein Trainingseffekt einzustellen. Dabei sollte jedoch nicht die erste Trainingsrunde mit weniger Kaupartikeln vernachlässigt werden, da, wie bereits in Kapitel 5.2.2 dargestellt, die Umstellung auf artifizielles Kaugut für manche Probanden ungewohnt war.

Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Analyse über weitere Sitzungen mit unterschiedlichen Abständen oder über einen Zeitraum mehrerer Jahre. Hierbei wäre auch ein potenzieller Effekt einer altersbedingten Degeneration oder der Effekt der Versorgung der Zähne durch konservierende oder prothetische Maßnahmen zu analysieren.

5.4 Vergleich Düsseldorfer und Heidelberger Methode

Die Düsseldorfer Methode orientiert sich nah an dem Vorgehen von Eberhard et al., löst sich jedoch von der Siebmethode. Auch wenn die Siebmethode den aktuellen Goldstandard in der Beurteilung der Kauleistung darstellt, ist sie sehr aufwendig und für die Praxis wenig praktikabel. Außerdem können Fehler entstehen, wenn beispielsweise ein Partikel, das rein rechnerisch durch ein Sieb mit einer bestimmten Maschengröße fallen würde, sich nicht so dreht, dass es dies tatsächlich tut. Wie im vorangegangenen Kapitel dargestellt, wurde in der Düsseldorfer Methode eine Berechnung gewählt, die für jeden nachvollziehbar und anwendbar ist. Sie verwendet keine unbenannten Korrekturfaktoren, um möglichst nah an die Siebmethode heranzureichen. Für die Düsseldorfer Methode wurde vorab entschieden, dass die Berechnung möglichst nah an den gemessenen Werten und jederzeit und für jedermann reproduzierbar sein soll. Trotz allem werden zusätzlich die Werte nach der Heidelberger Methode ausgegeben und es ist weiterhin eine Übertragung auf die unterschiedlichen Siebe möglich. Zusätzlich sind alle Werte für jedes einzelne Partikel bekannt und man könnte weitere Siebe mit ihren zugehörigen Maschengrößen frei bestimmen.

Für die Düsseldorfer Methode spricht, wie in Kapitel 4.2 dargestellt, eine etwas geringere Abweichung in der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und die Offenlegung der Berechnungsgrundlage. Wichtig bei beiden Methoden ist, dass konstante Ergebnisse erzielt werden und somit die Ergebnisse eines Probanden in mehreren Untersuchungen und auch über einen längeren Zeitraum vergleichbar bleiben.

5.5 Studien zum Vergleich von Männern und Frauen

Shinkai et al. untersuchten die Ernährungsgewohnheiten verschiedener Ethnizitäten, Altersklassen und Geschlechter und stellten fest, dass Frauen, europäische Amerikaner und Ältere einen besseren HEI-Wert (Health Eating Index) aufwiesen als Männer, mexikanische Amerikaner und junge Menschen. Sie stellten jedoch auch fest, dass das Einkommen, die Bildung und die mastikatorischen Variablen keinen Einfluss auf diesen hatten (Shinkai et al. 2001, S. 1625). Es gibt eine große Variabilität unter den Individuen in der Physiologie der Mastikation, aber es ist noch nicht bekannt, ob dies auch zu einer ähnlichen Variabilität unter den Partikelgrößen des Bolus am Ende des Kauprozesses führt (Peyron et al. 2004, S. 578). Lassauzay et al. stellten fest, dass die größte Variabilität der Probanden bei der Anzahl der Kauzyklen, der Kaufrequenz, der Öffnungs- und Schließgeschwindigkeit und der lateralen Amplitude lag, wohingegen die Muskelarbeit, die Schließdauer und die vertikale Amplitude stärker entlang einer Kausequenz variierten als zwischen den einzelnen Probanden (Lassauzay et al. 2000, S. 489). Fontijn-Tekamp et al. fanden in einer Studie mit Erwachsenen mit natürlicher Dentition keinen Einfluss des Geschlechts oder Alters. Hier hatte allein die Anzahl der okklusalen Einheiten Einfluss auf die Schwelle zum Schlucken (Fontijn-Tekamp et al. 2004a, S. 434).

In ihrer Studie mit Totalprothesenträgern oder Trägern implantatgetragener Prothesen hingegen beobachteten Fontijn-Tekamp et al., dass Männer ihre Nahrung effizienter zerkleinerten als Frauen, da sie dieselbe Anzahl an Kauzyklen und Zeit benötigten, jedoch im Moment des Schluckens eine höhere Partikelgrößenreduktion erreichten (Fontijn-Tekamp et al. 2004b, S. 375).

Hier zeigte sich ein Unterschied zwischen den Geschlechtern also nur in der medianen Partikelgröße, nicht in der Anzahl der Kauzyklen oder der Zeit bis zum Schlucken (Fontijn-Tekamp et al. 2004b, S. 378).

Auch in der hier vorliegenden Studie zeigte sich, dass die x50-Werte der Männer deutlich niedriger waren als die der Frauen. Da die Anzahl der Kauzyklen festgelegt wurde, um die Kauleistung der einzelnen Probanden vergleichen zu können, konnte diese nicht exakt mit den Ergebnissen von Fontijn-Tekamp et al. verglichen werden.

Die meisten vergangenen Studien zeigten, dass Männer größere Bisse abbissen, mehr Kaukraft entwickeln und schneller kauen als Frauen (Pereira und van der Bilt 2016, S. 630). Nur Mioche et al. beobachteten als eine der wenigen, dass Frauen kürzer kauten, bestätigten jedoch auch, dass sie weniger Muskelaktivität entwickelten als Männer. Folglich war die Textur des Bolus im Moment des Schluckens weniger zerkleinert und weniger homogen (Mioche et al. 2003, S. 195). Diesem Ergebnis folgte auch die Düsseldorfer Studie, bei welcher der Durchschnitt des x50-Wertes der Männer beim freien Kauen der ersten Sitzung mit 3,9 mm deutlich niedriger war als der der Frauen mit 4,76 mm.

Nagasawa et al. untersuchten den Einfluss verschiedener Nahrungsmittel und stellten fest, dass die Dauer der Kauzyklen bei allen Nahrungsmitteln bei den Frauen signifikant länger war als bei den Männern. Jedoch stieg diese bei beiden an, wenn Nahrungsmittel härter und somit schwerer zu kauen waren. Die durchschnittliche Kaufrequenz bei den Männern betrug 1,7 Hz und bei den Frauen 1,4 Hz. Die Kaukraft der Frauen war geringer als die der Männer und das Kauintervall bei Frauen länger als bei Männern. Bei den meisten Nahrungsmitteln war die Öffnungsgeschwindigkeit der Männer signifikant schneller als die der Frauen (Nagasawa et al. 1997, S. 607). Diese Meinung teilten auch Youssef et al. Sie stellten fest, dass Männer signifikant kürzere Kauzyklen mit höheren Kaugeschwindigkeiten als Frauen zeigten. Dies bestätigte noch einmal die Entscheidung in dieser Studie keine Kaugeschwindigkeit vorzugeben. Männer nutzten, laut Youssef et al. außerdem eine deutlich größere Kaukraft als Frauen, obwohl ihre elektromyografischen Aktivitätslevel äquivalent waren (Youssef et al. 1997, S. 179). Die Dauer des Gesamtkauzyklusses, die langsamen Öffnungs- und schnellen Schließphasen waren bei den Frauen signifikant länger und ihre Muskelaktivität war tendenziell länger als die der Gruppe der Männer.

Die vertikale mandibuläre Auslenkung war bei den Männern tendenziell größer. Bei der Amplitude der Muskelaktivität gab es keine geschlechtsspezifischen Unterschiede (Youssef et al. 1997, S. 179).

Julien et al. verglichen nicht nur junge Erwachsene, sondern auch Jungen und Mädchen und es zeigte sich, dass Männer die besten Ergebnisse erzielten, gefolgt von Frauen und Mädchen. Da die Studie nur zwei Jungen einschloss, waren deren Werte nur begrenzt auswertbar und nur bedingt repräsentativ. In dieser Studie stellte sich die Körpergröße als die wichtigste korrelierende Variable heraus. Die ausschlaggebenden Faktoren, welche die Unterschiede der Probandengruppen beeinflussten, waren die Kontaktflächen der Seitenzähne und die Kaukraft (Julien et al. 1996, S. 69). Auch Aseef et al. führten eine Studie mit jüngeren Probanden zwischen sechs und zwanzig Jahren durch. Jüngere Probanden nahmen mehr Bisse, kauten häufiger und schluckten häufiger mit einer längeren Kau- und Schluckzeit. Die Jungen zeigten eine niedrigere Anzahl an Schluckvorgängen, eine kürzere Schluckzeit und eine geringere Gesamtkauzeit. Außerdem zeigten die Mädchen weniger Kauvorgänge und Kauzyklen (Aseef et al. 2024, S. 1845). Die Ergebnisse von Jungen und Mädchen waren gemischt. Die Jungen benötigten in Bezug auf die Rohdaten weniger Schluckvorgänge und weniger Zeit zum Kauen und Schlucken eines Crackers. In Bezug auf die abgeleiteten Daten benötigten die Mädchen jedoch weniger Kauzyklen, Schluckvorgänge und Zeit für jedes einzelne Kauen eines Crackers (Aseef et al. 2024, S. 1845). Da in dieser Studie nur Probanden, die älter als 18 Jahre alt waren, zum Einsatz kamen, besteht weiteres Forschungspotential bei Jungen und Mädchen.

5.6 Studien zur bevorzugten Kauseite

Jeder kennt das Konzept einer dominanten Hand. In der Literatur wurde außerdem schon ein dominanter Fuß oder ein dominantes Auge beschrieben. Doch gibt es auch eine dominante Kauseite? Und wenn ja, hängt diese mit der Händigkeit zusammen und bedeutet eine bevorzugte Kauseite auch eine dominante Seite in Bezug auf eine bessere Kauleistung?

„Studien belegen, dass der Kauvorgang abwechselnd bilateral, häufig aber auch vorwiegend auf einer Seite erfolgen kann. So bevorzugen manche Personen eine Kauseite, auf der sie die Speisen zum größten Teil zerkleinern.“ (Kravchenko 2011, S. 77) Die Präferenz einer Kauseite hat keine einheitliche Definition, weshalb sie mit unterschiedlichen Methoden bestimmt wurde. Die meisten Studien haben sie so definiert, dass die bevorzugte Kauseite die Seite ist, auf der die meisten ersten oder generell die meisten Kauaktionen beim freien Kauen stattfanden. Dies wurde durch Beobachtung, durch Befragen der Probanden, mithilfe von Kinesiographie (bei der die Unterkieferbewegung mithilfe verschiedener Instrumente registriert wird) oder Elektromyographie bestimmt. Dabei war die reine Befragung das ungenaueste Verfahren, da man vollständig auf die Meinung der Probanden vertrauen musste und viele noch nicht bewusst beobachtet hatten, ob sie eine bevorzugte Kauseite aufwiesen. Auch wenn man Probanden darum bat, gezielt darauf zu achten, konnte die Bevorzugung einer Seite genau durch eben dieses Bewusstmachen verfälscht werden.

Miyawaki et al. bestimmten mithilfe der Elektromyographie die bevorzugte Kauseite dadurch, dass die Muskelaktivität auf der Kauseite höher war als auf der gegenüberliegenden Seite (Miyawaki et al. 2001, S. 780). Bei der Analyse der bevorzugten Kauseite mithilfe der Elektromyographie zeigten verschiedene Probanden unterschiedliche Strategien der beidseitigen Masseteraktivierung während des gewohnheitsmäßigen und des gezielten einseitigen Kauens (Kravchenko et al. 2014).

Die maximale willkürliche Kaukraft wurde bereits in vielen Studien als ein Indikator für den funktionellen Stand des Kausystems genutzt. Dabei wurden sowohl uni- als auch bilaterale Versuchsaufbauten genutzt, diese jedoch selten verglichen.

Dies taten van der Bilt et al. und stellten fest, dass die durchschnittliche einseitige Kaukraft (rechts 430 N, links 429 N) signifikant geringer war als die beidseitige (569 N) (van der Bilt et al. 2008, S. 217).

Pond et al. folgerten 1986, dass die bevorzugte Kauseite für den ersten Kauvorgang eng mit den darauffolgenden korreliert (Pond et al. 1986, S. 500), während Zamanlu et al. empfahlen, dass die Präferenz einer Kauseite genauer über alle Kauzyklen beobachtet werden sollte als nur durch die Bestimmung der bevorzugten Kauseite im ersten Kauzyklus (Zamanlu et al. 2012, S. 330). Bei Pond et al. zeigten 77 (77,8 %) von 99 teilnehmenden Probanden eine bevorzugte Kauseite. 39 (39,4 %) Probanden bevorzugten es links und 38 (38,4 %) rechts zu kauen (Pond et al. 1986, S. 498). Ob das initiale Platzieren des Kauguts auf einer Seite auch mit dem weiteren Kauen und einer besseren Kauleistung auf der bevorzugten Kauseite verbunden ist, wurde nicht untersucht.

In der hier diskutierten Studie gab etwa die Hälfte der Probanden an, eine bevorzugte Kauseite zu haben. Bei den Männern waren es 55,00 %, bei den Frauen 51,43 %. Bei den Probanden, die rechts als ihre bevorzugte Kauseite angaben, stimmte dies bei acht Probanden mit den gewonnenen Ergebnissen überein, bei 15 Probanden jedoch nicht. Bei den sechs Probanden, die links als ihre bevorzugte Kauseite angaben, gaben die Ergebnisse allen Probanden Recht. Eine mögliche Erklärung dafür wäre, dass es in unseren Breitengraden deutlich mehr Rechts- als Linkshänder gibt, diese Seite häufig als die dominantere angesehen wird und ein Proband dadurch eher geneigt sein könnte, die rechte Kauseite als seine dominante Kauseite anzugeben. Die meisten Studien zeigten im Gegensatz zu der vorliegenden Arbeit eine Präferenz zum Kauen auf der rechten Seite (Zamanlu et al. 2012, S. 326). Diese Studien betrachteten bei der Bestimmung der bevorzugten Kauseite jedoch die Seite des ersten Kauzyklusses als die bevorzugte Kauseite (Zamanlu et al. 2012, S. 326). Auch hier kann eine unterbewusste Prägung, dass die rechte Seite die dominante ist, zu einer Beeinträchtigung des Ergebnisses führen. Gleichzeitig bedeutet die Inklination zu einer Kauseite nicht, dass diese auch zu einer besseren Kauleistung führt.

Verschiedene Studien untersuchten außerdem nicht nur den Zusammenhang zwischen bevorzugter Kauseite und Händigkeit, sondern auch die Einflussfaktoren, die zu dieser Wahl führen könnten. Einer der offensichtlichsten Einflussfaktoren ist die prothetische Rehabilitation durch Zahnersatz. Kazazoglu et al. untersuchten zu diesem Zweck vierzig Probanden. Zwanzig bezahnte und zwanzig unbezahnte. Von den unbezahnten trugen elf normale und neun implantatgetragene Prothesen. Sie gaben den Probanden 1 g Kaugummi (Freedent, Wrigley), das sie natürlich kauen sollten. Die Probanden wurden nach dem ersten, dritten, fünften und siebten Kauzyklus gestoppt und die Position des Kaugummis registriert, um die beobachtete bevorzugte Kauseite zu bestimmen (*Observed Preferred Chewing Site*, OPCS). Die Probanden kauten außerdem unbeobachtet für zwei Minuten und wurden danach nach ihrer bevorzugten Kauseite gefragt (*Stated Preferred Chewing Site*, SPCS). Um ihre Angabe zu bestätigen, wurden sie anschließend angewiesen, auf der Gegenseite zu kauen.

Unter Beobachtung (OPCS) kauten 60 % der Probanden immer auf derselben Seite und 13 % nutzen die gleiche Anzahl an Kauzyklen auf beiden Seiten. Wenn die Probanden eigene Angaben machten (SPCS), gaben 63 % eine bevorzugte Kauseite an, während 38 % keine bevorzugte Kauseite angaben. Von diesen fünfzehn Probanden kauten jedoch neun ausschließlich auf einer Seite. Außerdem ließ sich bei den Prothesenträgern eine deutliche Tendenz zum einseitigen Kauen beobachten. Die Studie zeigt eine gute Übereinstimmung der bevorzugten und der selbst genannten bevorzugten Kauseite in Bezug auf die frühen Kauzyklen, wobei bei einigen Probanden, die keine bevorzugte Kauseite angaben, im Test eine bevorzugte Kauseite zu beobachten war (Kazazoglu et al. 1994, S. 723–724). Durch das häufige Unterbrechen und bewusste Kauen entstand jedoch nur schwer ein Kaufluss und die Probanden kauten weniger instinktiv.

Die ausgeprägte Bevorzugung einer Seite bei der Händigkeit konnte bei bezahnten Probanden nicht gefunden werden. Es wird angenommen, dass es große Vorteile beim beidseitigen Kauen gibt, die jedoch von den Schwierigkeiten, die umfassender Zahnersatz, wie zum Beispiel eine Totalprothese, darstellt, überwogen werden. Studien bestätigen außerdem die Relevanz peripherer Reflexe, vierzig Prozent der Probanden, die nicht dauerhaft auf einer Seite kauten, passen ihr Kauverhalten vermutlich als Reaktion auf orale Stimuli an (Kazazoglu et al. 1994, S. 724).

Auch Nissan et al. untersuchten Probanden mit implantatgetragenen Prothesen. Sie legten die bevorzugte Kauseite durch die Beobachtung der ersten Kaubewegung fest. Die Probandengruppe bestand aus 81 Patienten, die mit implantatgetragenen Teilprothesen versorgt waren und einer Kontrollgruppe von 108 Patienten ohne Implantate. Von den Probanden bevorzugten 78,3 % die rechte, 19,1 % die linke und 21 % zeigten keine bevorzugte Kauseite (Nissan et al. 2011, S. 165). Zwischen den Geschlechtern und deren bevorzugter Kauseite gab es keine statistisch relevanten Unterschiede. Sie wurde auch nicht signifikant von fehlenden Zähnen oder Implantaten beeinflusst (Nissan et al. 2011, S. 165).

In weiteren Studien wurde nach zusätzlichen Einflussfaktoren außerhalb des prothetischen Zahnersatzes gesucht. R. J. Wilding fokussierte sich auf den Zusammenhang der Fläche okklusaler Kontakte, der Kaueffektivität und auf den Einfluss einer bevorzugten Kauseite auf die Kaueffektivität (Wilding 1993, S. 589). Zunächst wurde die rechte und linke Seite des Probanden selbst verglichen, danach die Probanden untereinander. Es wurden Zusammenhänge zwischen der Kaueffektivität und der Fläche der okklusalen Kontakte festgestellt, die innerhalb eines Probanden besser zu beurteilen waren als zwischen verschiedenen Probanden (Wilding 1993, S. 589). Dies deckte sich mit den in der hier dargestellten Studie erhobenen Daten, dass die Unterschiede zwischen den Probanden teilweise sehr groß ausfallen und daher ein Vergleich der von demselben Probanden erhobenen Daten besser beurteilbar war. Dies kann für die zahnärztliche Praxis relevant werden, beispielsweise beim Vergleich der Kauleistung vor und nach dem Eingliedern einer Restauration.

Weiner et al. untersuchten, ob es einen Zusammenhang zwischen der Wahl der bevorzugten Kauseite in Bezug auf den DMF-Score (*decayed, missing or filled teeth*) gibt (Weiner 2001, S. 36). Ihre Ergebnisse zeigten, dass Frauen eher eine bevorzugte Kauseite angaben, während Männer eher vermuteten, auf beiden Seiten gleichermaßen zu kauen. Es konnte jedoch keine statistisch relevante Korrelation zwischen der Händigkeit, der bevorzugten Kauseite und dem DMF-Score gefunden werden (Weiner 2001, S. 36). Hier decken sich die Daten der vorliegenden Studie nicht ganz, da sowohl bei den Männern mit 55,00 % als auch bei den Frauen mit 51,43 %, etwa die Hälfte angaben, eine bevorzugte Kauseite zu haben.

Nach Christensen et al. stimmte diese, wenn Probanden eine bevorzugte Kauseite angaben, meist auch mit der beobachteten bevorzugten Kauseite überein (Christensen und Radue 1985, S. 421). In der hier vorliegenden Studie stimmten die Angaben von den Probanden, die links als ihre bevorzugte Kauseite angaben, mit einer besseren Kauleistung beim Linkskauen überein. Bei den Probanden, die rechts als ihre bevorzugte Kauseite angaben, hing dies deutlich seltener mit einer höheren Kaupartikelzerkleinerung auf der rechten Seite zusammen. Dies könnte daran liegen, dass Rechtshänder eher vermuten könnten, dass sie auch rechts besser kauen. Trotzdem bleibt erneut zu betonen, dass eine bevorzugte Kauseite nicht gleichbedeutend mit einer besseren Kaupartikelzerkleinerung auf dieser Seite zusammenhängen muss und hier ein Vergleich aufgrund unterschiedlicher Studiendesigns nur bedingt möglich war.

Die vorliegende Studie und die von Christensen et al. zeigten, dass die bevorzugte Kauseite nicht durch die Händigkeit vorhergesagt werden konnte (Christensen und Radue 1985, S. 421). Dieser Beobachtung folgten auch Pond et al., bei denen 67 (67,7 %) der Probanden mit einer bevorzugten Kauseite Rechtshänder, 9 Linkshänder und einer beidhändig waren. Es konnte also auch hier keine Korrelation zwischen der bevorzugten Kauseite und der Händigkeit gefunden werden (Pond et al. 1986, S. 499).

Die Bestimmung einer bevorzugten Kauseite und ob es diese gibt, bleibt daher noch immer eine viel diskutierte Thematik. Wie bereits dargestellt, wurden bereits viele verschiedene Methoden genutzt, diesem näher zu kommen, doch auch das Kaugut kann einen Einfluss haben. Zamanlu et al. verglichen die vorhandenen Studien in Bezug auf natürliches Kaugut unter Zuhilfenahme der Elektromyographie des Masseters und stellten fest, dass eine Seitenpräferenz bei hartem Kaugut (Walnüsse) stärker zum Vorschein tritt als bei weichem Kaugut (Kuchen). Bei hartem Kaugut zeigten 73,68 % eine Seitenpräferenz, bei weichem Kaugut waren es 57,89 %. In beiden Fällen zeigte sich eine signifikante Präferenz zur rechten Seite (Zamanlu et al. 2012, S. 326). Dass bei Nahrungsmitteln verschiedener Textur dieselbe Seite präferiert wurde, kann indizieren, dass die Mastikation mit einem ähnlichen Muster begonnen wurde, das durch das sensorische Feedback der Textur während der nachfolgenden Kausequenzen angepasst wurde (Zamanlu et al. 2012, S. 329).

Die Studie mit dem größten Probandenkollektiv war die „*Study of Health in Pomerania*“, kurz SHIP-Studie. Diese hat gezeigt, dass der Kauvorgang bilateral oder auch einseitig erfolgen konnte. (Diernberger et al. 2008, S. 613). Sie kam zu dem Ergebnis, dass etwa die Hälfte der Probanden eine Kauseite bevorzugten (Diernberger et al. 2008, S. 617), was dem Ergebnis der initialen Befragung in der vorliegenden Studie ähnelte, wobei bei Diernberger et al. die Prävalenz einer bevorzugten Kauseite bei 45,4 % lag. Frauen zwischen 40 und 69 Jahren gaben diese häufiger an und es zeigte sich eine Präferenz der rechten Seite (64 %) (Diernberger et al. 2008, S. 613). In dieser Studie mussten Probanden jedoch keine gesunde Dentition oder Schmerzfreiheit aufwiesen.

In der SHIP-Studie wurden folgende unabhängige Variablen signifikant mit einer bevorzugten Kauseite assoziiert: subjektiver einseitiger Schmerz im Bereich des Kiefergelenks, subjektives einseitiges Knacken des Kiefergelenks, einseitiger Kiefergelenks- oder muskulärer Schmerz bei Palpation, Verlust einer Stützzone (Eichner Klassifikation), Verlust beider Stützzone auf einer Seite, nur noch eine verbliebene Stützzone, herausnehmbare Teilprothese, Restaurationen, die mithilfe eines Attachments fixiert wurden. Eine bevorzugte Kauseite wurde bei fast der Hälfte der Probanden festgestellt und war mit einseitigen Zeichen einer Craniomandibulären Dysfunktion, am häufigsten mit Kiefergelenksschmerzen und asymmetrischem Verlust des Antagonistenkontakts verbunden. Auch wenn verlorene Zähne ersetzt wurden, schienen nicht alle Restaurationen ein beidseitiges Kauen zu unterstützen (Diernberger et al. 2008, S. 613). Mit ihren Ergebnissen widersprach die SHIP-Studie einigen Ergebnissen von Pond et al., die 1986 feststellten, dass ein Kreuzbiss, partielle Prothesen, Seitenzähne ohne Kontakt in zentraler Okklusion, Beeinträchtigungen der Kau- oder Balancesseite, offene Kontakte, Zahnbeweglichkeit, Fremitus, Kälte- und Perkussionsempfindlichkeit nicht mit der Bevorzugung einer Kauseite zusammenhängen. Dahingegen stellten jedoch auch Jiang et al. fest, dass das Bevorzugen einer Kauseite mit craniomandibulären Funktionsstörungen zusammenhängen konnte (Jiang et al. 2015, S. 105). Die Ergebnisse zeigten auch, dass vermutet werden konnte, dass die Bevorzugung einer Kauseite die knöchernen Morphologie des Kiefergelenkes bei asymptomatischen Studienteilnehmern beeinflusste (Jiang et al. 2015, S. 105).

Da sich die Studien hier widersprachen, wurde in der hier vorliegenden Studie Probanden mit jeglicher Beeinträchtigung des Kauvorgangs oder nicht zahngesunder Dentition ausgeschlossen.

Auch wenn der Kauvorgang beidseits stattfand, wurde, wie vorangehend dargestellt, angenommen, dass die meisten Menschen mehr auf einer bestimmten Seite kauten. Jedoch ist damit noch nicht klar, ob ein Kauen auf der bevorzugten Kauseite auch zu einer besseren Kauleistung führte. Um diese zu bestimmen, musste die Anzahl der Kauzyklen eingegrenzt werden. Anschließend konnte Rechts- und Linkskauen verglichen werden (Piancino et al. 2012, S. 274). Die hier vorliegende Studie gab die Kauseite vor, indem die Probanden erst frei, dann nur rechts und dann nur links kauen sollten. Dabei wurde die bevorzugte Kauseite nicht über die gewählte Seite des ersten Kauzyklusses beim freien Kauen, sondern durch einen Zerkleinerungsrad außerhalb der Standardabweichung für die jeweilige Seite bestimmt. Es wurde außerdem die Korrelation von Händigkeit und bevorzugter Kauseite betrachtet. 33 % der Rechts- und 50 % der Linkshänder wiesen auch auf der Seite ihrer jeweiligen Händigkeit ein besseres Kauergebnis auf. Hierbei wurde allerdings nur der Vergleich der rechten und linken Seite beim angewiesenen Kauen und kein bilaterales, freies Kauen betrachtet. Außerdem schloss die Studie nur sechs Linkshänder ein. Dementsprechend ist dieses Ergebnis nur eingeschränkt belastbar.

Zusätzlich wäre es interessant zu beobachten, wie sich die Bevorzugung einer Kauseite mit der Zeit entwickelt und ob sie sich zum Beispiel durch den Einfluss von Schmerzen oder die Versorgung mithilfe konservierender oder prothetischer Maßnahmen verändert.

5.7 Anwendbarkeit in der Praxis

Laborbasierte Methoden sind notwendig, um die Kaufunktion verschiedener Patientengruppen in Zahlen auszudrücken und Veränderungen der Kaufunktion in Folge von zahnärztlichen Behandlungen auszuwerten (van der Bilt 2011, S. 757). Die einzigen okklusalen Faktoren, die zur Kaubewegung beitragen, die Zahnärzte verändern können, sind die Okklusalebene und die okklusale Führung (Ogawa et al. 1998, S. 641). Patienten mit einer kompromittierten Dentition oder mit Totalprothesen haben viele Probleme der Kaufunktion beschrieben (van der Bilt 2011, S. 771), doch gab es bisher wenige Studien, die den direkten Einfluss einer prothetischen Versorgung auf die Kauffunktion zeigten (van der Bilt 2011, S. 763). Mit der Scanmethode lässt sich dieses subjektive Gefühl einer besseren oder schlechteren Kauleistung quantifizieren.

Van der Glas et al. kündigten bereits 1987 eine Erleichterung durch Bildanalyseprogramme in der Zukunft an (van der Glas et al. 1987, S. 1550). Im Gegensatz zur Siebmethode benötigte die Scanmethode einen deutlich geringeren Zeitaufwand

und die anschließende Reinigung und Desinfektion war deutlich unkomplizierter. Zusätzlich war der Kostenaufwand geringer, da der anwendende Wissenschaftler oder Zahnarzt nicht mehrere Siebe, sondern nur einen Scanner mit der dementsprechenden Auflösung, der häufig bereits vorhanden ist, benötigt. Dass die benötigten Materialien günstiger waren als ein Set von zehn standardisierten Sieben oder eine Siebmaschine, stellten bereits Eberhard et al. klar (Eberhard et al. 2012, S. 342). Sowohl bei der Sieb- als auch bei der Scanmethode wurde eine vorgefertigte Form für die Herstellung der Würfel genutzt. Optosil und Xantopren werden seit vielen Jahren als Abformmaterial, beispielsweise für die spätere Herstellung von Provisorien, genutzt und sind somit häufig bereits verfügbar oder andernfalls mit geringem Aufwand anzuschaffen. Auch sie wurden bei beiden Methoden gleichermaßen benötigt. In beiden Fällen wurden die Proben anschließend gelagert, dabei war kein zusätzlicher Stauraum für die Siebe nötig.

Die Düsseldorfer Methode wurde so entwickelt, dass sie für jeden Anwender nachvollziehbar und sofort nutzbar ist, da die Software auch online zu Verfügung gestellt werden kann. Es ist nur eine Registrierung nötig, um die Scans direkt online analysieren zu lassen, ohne dass ein Anwender die Software zugesandt bekommen und anschließend installieren muss. Die gescannte Datei wird online hochgeladen und automatisch ausgewertet. Der Datensatz steht nach wenigen Minuten zur Auswertung oder Patientenkommunikation zur Verfügung und es ist auch ein digitaler Versand möglich. Da das digitale Arbeiten in den letzten Jahren deutlich an Bedeutung gewinnt, geht die Düsseldorfer Methode hier mit der Zeit.

In diesem Kontext bietet die Scanmethode eine schnelle und unkomplizierte Möglichkeit, zum Beispiel den Erfolg von eingesetzten Restaurationen in der Forschung oder der Praxis greifbar zu machen. Das Ziel einer zahnärztlichen Behandlung ist nicht nur das Ersetzen fehlender Zähne und die phonetische und ästhetische Rehabilitation, sondern auch das Wiederherstellen einer angemessenen Kaufunktion (Eberhard et al. 2012, S. 338). Hierbei wäre nur zu beachten, dass für herausnehmbaren Zahnersatz Optocal statt Optosil empfohlen wird. So wäre es möglich den Erfolg einer Versorgung zu überprüfen, indem eine Untersuchung vor der Versorgung mit neuem Zahnersatz und eine direkt nach dem Einsetzen des neuen Zahnersatzes und/oder nach einer gewissen Eingewöhnungszeit vorgenommen wird. Auf diese Art und Weise kann objektiv bewertet werden, ob sie eine Verbesserung der Kauleistung mit sich bringt. Gleichzeitig wäre auch ein Vergleich verschiedener zahntechnischen Materialien möglich, zum Beispiel in Bezug darauf, ob eine Abnutzung des Zahnersatzes mit einer Veränderung der Kauleistung einhergeht und wenn ja wie groß deren Ausmaß ist. Nicht nur für Wissenschaftler und Behandler, sondern auch für Patienten wäre auf diesem Weg eine Veränderung nicht nur subjektiv beurteilbar, sondern auch visualisierbar.

Die Düsseldorfer Methode bietet eine weniger zeit- und materialaufwendige Alternative zur Siebmethode und vereinfacht auch die bisher vorgestellte digitale Variante durch die Onlinefunktion und ihre transparente Offenlegung der Berechnungsgrundlagen. Sie bietet somit sowohl im wissenschaftlichen als auch im klinischen Kontext eine deutliche Erleichterung und Vereinfachung der Bestimmung der Kauleistung.

6 Literaturverzeichnis

Allen, T. (1990): Particle Size Measurement. Fourth Edition. Dordrecht: Springer (Powder Technology Series).

Aseef, A.; Dodderi, T.; Muthukumar, V.; Krishnamurthy, R.; Balasubramaniam, R. K.; Kothari, M. (2024): Test of mastication and swallowing solids in healthy individuals aged 6 to 20 years: A normative study in an Indian context. In: *Journal of oral rehabilitation*, S. 1–9. DOI: 10.1111/joor.13741.

Bakke, M. (2006): Bite Force and Occlusion. In: *Seminars in Orthodontics* 12 (2), S. 120–126. DOI: 10.1053/j.sodo.2006.01.005.

Blissett, A.; Prinz, J. F.; Wulfert, F.; Taylor, A. J.; Hort, J. (2007): Effect of bolus size on chewing, swallowing, oral soft tissue and tongue movement. In: *Journal of oral rehabilitation* 34 (8), S. 572–582. DOI: 10.1111/j.1365-2842.2007.01756.x.

Buschang, P. H.; Throckmorton, G. S.; Travers, K. H.; Johnson, G. (1997): The effects of bolus size and chewing rate on masticatory performance with artificial test foods. In: *Journal of oral rehabilitation* 24 (7), S. 522–526. DOI: 10.1046/j.1365-2842.1997.00524.x.

Chen, J.; Lolivret, L. (2010): The determining role of bolus rheology in triggering a swallowing.

Christensen, L. V.; Radue, J. T. (1985): Lateral preference in mastication: a feasibility study. In: *Journal of oral rehabilitation* 12 (5), S. 421–427. DOI: 10.1111/j.1365-2842.1985.tb01547.x.

Dao, T. T.; Lund, J. P.; Lavigne, G. J. (1994): Pain responses to experimental chewing in myofascial pain patients. In: *Journal of dental research* 73 (6), S. 1163–1167. DOI: 10.1177/00220345940730060601.

Deniz, D. A.; Kulak Ozkan, Y. (2013): The influence of occlusion on masticatory performance and satisfaction in complete denture wearers. In: *Journal of oral rehabilitation* 40 (2), S. 91–98. DOI: 10.1111/joor.12015.

Diernberger, S.; Bernhardt, O.; Schwahn, C.; Kordass, B. (2008): 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). In: *Journal of oral rehabilitation* 35 (8), S. 613–620. DOI: 10.1111/j.1365-2842.2007.01790.x.

Durham, J.; Ohrbach, R. (2010): Oral rehabilitation, disability and dentistry. In: *Journal of oral rehabilitation* 37 (6), S. 490–494. DOI: 10.1111/j.1365-2842.2010.02078.x.

Eberhard, L.; Braun, S.; Wirth, A.; Schindler, H-J; Hellmann, D.; Giannakopoulos, N. N. (2014): The effect of experimental balancing interferences on masticatory performance. In: *Journal of oral rehabilitation* 41 (5), S. 346–352. DOI: 10.1111/joor.12150.

- Eberhard, L.; Schindler, H. J.; Hellmann, D.; Schmitter, M.; Rammelsberg, P.; Giannakopoulos, N. N. (2012): Comparison of particle-size distributions determined by optical scanning and by sieving in the assessment of masticatory performance. In: *Journal of oral rehabilitation* 39 (5), S. 338–348. DOI: 10.1111/j.1365-2842.2011.02275.x.
- Engelen, L.; Fontijn-Tekamp, A.; van der Bilt, A. (2005): The influence of product and oral characteristics on swallowing. In: *Archives of oral biology* 50 (8), S. 739–746. DOI: 10.1016/j.archoralbio.2005.01.004.
- Enkling, N.; Saftig, M.; Worni, A.; Mericske-Stern, R.; Schimmel, M. (2017): Chewing efficiency, bite force and oral health-related quality of life with narrow diameter implants - a prospective clinical study: results after one year. In: *Clinical Oral Implants Res* 28 (4), S. 476–482. DOI: 10.1111/clr.12822.
- Fontijn-Tekamp, F. A.; Slagter, A. P.; van der Bilt, A.; van 'T Hof, M. A.; Witter, D. J.; Kalk, W.; Jansen, J. A. (2000): Biting and chewing in overdentures, full dentures, and natural dentitions. In: *Journal of dental research* 79 (7), S. 1519–1524. DOI: 10.1177/00220345000790071501.
- Fontijn-Tekamp, F. A.; van der Bilt, A.; Abbink, J. H.; Bosman, F. (2004a): Swallowing threshold and masticatory performance in dentate adults. In: *Physiology & behavior* 83 (3), S. 431–436. DOI: 10.1016/j.physbeh.2004.08.026.
- Fontijn-Tekamp, F. A.; Slagter, Ad P.; van der Bilt, A.; Van't Hof, M. A.; Kalk, W.; Jansen, J. A. (2004b): Swallowing thresholds of mandibular implant-retained overdentures with variable portion sizes. In: *Clinical Oral Implants Res* 15 (3), S. 375–380. DOI: 10.1111/j.1600-0501.2004.01006.x.
- Foster, K. D.; Woda, A.; Peyron, M. A. (2006): Effect of texture of plastic and elastic model foods on the parameters of mastication. In: *Journal of neurophysiology* 95 (6), S. 3469–3479. DOI: 10.1152/jn.01003.2005.
- Fueki, K.; Sugiura, T.; Yoshida, E.; Igarashi, Y. (2008): Association between food mixing ability and electromyographic activity of jaw-closing muscles during chewing of a wax cube. In: *Journal of oral rehabilitation* 35 (5), S. 345–352. DOI: 10.1111/j.1365-2842.2008.01849.x.
- Galo, R.; Vitti, M.; Santos, C. M.; Hallak, J. E. C.; Regalo, S. C. H. (2006): The effect of age on the function of the masticatory system--an electromyographical analysis. In: *Gerodontology* 23 (3), S. 177–182. DOI: 10.1111/j.1741-2358.2006.00113.x.
- Giannakopoulos, N. N.; Wirth, A.; Braun, S.; Eberhard, L.; Schindler, H. J.; Hellmann, D. (2014): Effect of the occlusal profile on the masticatory performance of healthy dentate subjects. In: *The International journal of prosthodontics* 27 (4), S. 383–389. DOI: 10.11607/ijp.3793.
- Gonçalves, T. M. S. V.; Vilanova, L. S. R.; Gonçalves, L. M.; Rodrigues Garcia, R. C. M. (2014): Effect of complete and partial removable dentures on chewing movements. In: *Journal of oral rehabilitation* 41 (3), S. 177–183. DOI: 10.1111/joor.12125.

- Horio, T.; Kawamura, Y. (1989): Effects of texture of food on chewing patterns in the human subject. In: *Journal of oral rehabilitation* 16 (2), S. 177–183. DOI: 10.1111/j.1365-2842.1989.tb01331.x.
- Hsu, H-Y; Yamaguchi, K. (2012): Decreased chewing activity during mouth breathing. In: *Journal of oral rehabilitation* 39 (8), S. 559–567. DOI: 10.1111/j.1365-2842.2012.02306.x.
- Ikenaga, N.; Yamaguchi, K.; Daimon, S. (2013): Effect of mouth breathing on masticatory muscle activity during chewing food. In: *Journal of oral rehabilitation* 40 (6), S. 429–435. DOI: 10.1111/joor.12055.
- Jiang, H.; Li, C.; Wang, Z.; Cao, J.; Shi, X.; Ma, J.; Liu, H. (2015): Assessment of osseous morphology of temporomandibular joint in asymptomatic participants with chewing-side preference. In: *Journal of oral rehabilitation* 42 (2), S. 105–112. DOI: 10.1111/joor.12240.
- Julien, K. C.; Buschang, P. H.; Throckmorton, G. S.; Dechow, P. C. (1996): Normal masticatory performance in young adults and children. In: *Archives of oral biology* 41 (1), S. 69–75. DOI: 10.1016/0003-9969(95)00098-4.
- Kazazoglu, E.; Heath, M. R.; Müller, F. (1994): A simple test for determination of the preferred chewing side. In: *Journal of oral rehabilitation* 21 (6), S. 723. DOI: 10.1111/j.1365-2842.1994.tb01189.x.
- Kohyama, K.; Mioche, L.; Martin, J.-F. (2002): Chewing patterns of various texture foods studied by electromyography in young and elderly populations. In: *Journal of Texture Studies* 33 (4), S. 269–283. DOI: 10.1111/j.1745-4603.2002.tb01349.x.
- Kravchenko, A.; Weiser, A.; Hugger, S.; Kordass, B.; Hugger, A.; Wanke, E. (2014): Variability and reliability of muscle activity measurements during chewing. In: *International journal of computerized dentistry* 17 (1), S. 21–33.
- Kravchenko, A. (2011): Reproduzierbarkeit von Kaufunktionsdaten in einer klinischen Studie. Düsseldorf, Heinrich-Heine-Universität, Diss., 2011. Universitäts- und Landesbibliothek der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Düsseldorf.
- Kruse, T; Lehmann, H.mC.; Braumann, B.; Fink, G. R.; Wunderlich, Gilbert (2020): The Maximum Bite Force for Treatment Evaluation in Severely Affected Adult SMA Patients-Protocol for a Longitudinal Study. In: *Frontiers in neurology* 11 (139), S. 1–6. DOI: 10.3389/fneur.2020.00139.
- Lassauzay, C.; Peyron, M. A.; Albuissou, E.; Dransfield, E.; Woda, A. (2000): Variability of the masticatory process during chewing of elastic model foods. In: *European journal of oral sciences* 108 (6), S. 484–492. DOI: 10.1034/j.1600-0722.2000.00866.x.
- Lehmann, K. M.; Hellwig, E.; Wenz, H.-J.(2012): Aufbau der Zähne und der Zahnreihen. In: Klaus M. Lehmann, Elmar Hellwig und Hans-Jürgen Wenz (Hg.): Zahnärztliche Propädeutik. Einführung in die Zahnheilkunde : mit 304 Abbildungen in 401 Einzeldarstellungen. 13., aktualisierte Auflage. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag, S. 15–74.

- Leiggener, C. S.; Jochum, H.; Türp, J. C. (2016): Kraniomandibuläre Dysfunktionen. Klassifikation, Diagnostik, Therapie. Springer. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s12285-016-0061-6#citeas>, zuletzt aktualisiert am 17.01.2024, zuletzt geprüft am 17.01.2024.
- Lucas, P. W.; Luke, D. A. (1984): Optimum mouthful for food comminution in human mastication. In: *Archives of oral biology* 29 (3), S. 205–210. DOI: 10.1016/0003-9969(84)90056-6.
- Lucas, P. W. (2004): Dental functional morphology. How teeth work. 1. publ. Cambridge: Cambridge University Press.
- Mioche, L.; Bourdiol, P.; Monier, S. (2003): Chewing behaviour and bolus formation during mastication of meat with different textures. In: *Archives of oral biology* 48 (3), S. 193–200. DOI: 10.1016/s0003-9969(03)00002-5.
- Mioche, L.; Bourdiol, P.; Peyron, M.-A. (2004): Influence of age on mastication: effects on eating behaviour. In: *Nutrition research reviews* 17 (1), S. 43–54. DOI: 10.1079/NRR200375.
- Mishellany-Dutour, A.; Renaud, J.; Peyron, M.-A.; Rimek, F.; Woda, A. (2008): Is the goal of mastication reached in young dentates, aged dentates and aged denture wearers? In: *The British journal of nutrition* 99 (1), S. 121–128. DOI: 10.1017/S0007114507795284.
- Miyaura, K.; Matsuka, Y.; Morita, M.; Yamashita, A.; Watanabe, T. (1999): Comparison of biting forces in different age and sex groups: a study of biting efficiency with mobile and non-mobile teeth. In: *Journal of oral rehabilitation* 26 (3), S. 223–227. DOI: 10.1046/j.1365-2842.1999.00364.x.
- Miyawaki, S.; Ohkochi, N.; Kawakami, T.; Sugimura, M. (2001): Changes in masticatory muscle activity according to food size in experimental human mastication. In: *Journal of oral rehabilitation* 28 (8), S. 778–784. DOI: 10.1046/j.1365-2842.2001.00702.x.
- Nagasawa, T.; Yanbin, X.; Tsuga, K.; Abe, Y. (1997): Sex difference of electromyogram of masticatory muscles and mandibular movement during chewing of food. In: *Journal of oral rehabilitation* 24 (8), S. 605–609. DOI: 10.1046/j.1365-2842.1997.00537.x.
- Nissan, J.; Berman, O.; Gross, O.; Haim, B.; Chaushu, G. (2011): The influence of partial implant-supported restorations on chewing side preference. In: *Journal of oral rehabilitation* 38 (3), S. 165–169. DOI: 10.1111/j.1365-2842.2010.02142.x.
- Ogawa, T.; Koyano, K.; Umemoto, G. (1998): Inclination of the occlusal plane and occlusal guidance as contributing factors in mastication. In: *Journal of dentistry* 26 (8), S. 641–647. DOI: 10.1016/s0300-5712(97)00066-3.
- Olthoff, L. W.; van der Bilt, A.; Bosman, F.; Kleizen, H. H. (1984): Distribution of particle sizes in food comminuted by human mastication. In: *Archives of oral biology* 29 (11), S. 899–903.
- Orachardson, R.; Cadden, S. W. (2009): Mastication and Swallowing: 2. Control. In: *Oral Biology* 2009, S. 390–398.

- Ottenhoff, F. A.; van der Bilt, A.; van der Glas, H. W.; Bosman, F. (1993): Control of human jaw elevator muscle activity during simulated chewing with varying bolus size. In: *Experimental brain research* 96 (3), S. 501–512. DOI: 10.1007/BF00234118.
- Paphangkorakit, J.; Chaiyapanya, N.; Sriladlao, P.; Pimsupa, S. (2008): Determination of chewing efficiency using muscle work. In: *Archives of oral biology* 53 (6), S. 533–537. DOI: 10.1016/j.archoralbio.2007.12.014.
- Pereira, L. J.; van der Bilt, A. (2016): The influence of oral processing, food perception and social aspects on food consumption: a review. In: *Journal of oral rehabilitation* 43 (8), S. 630–648. DOI: 10.1111/joor.12395.
- Pereira, L. J.; Duarte Gaviao, M. B.; van der Bilt, A. (2006): Influence of oral characteristics and food products on masticatory function. In: *Acta odontologica Scandinavica* 64 (4), S. 193–201. DOI: 10.1080/00016350600703459.
- Peyron, M. A.; Lassauzay, C.; Woda, A. (2002): Effects of increased hardness on jaw movement and muscle activity during chewing of visco-elastic model foods. In: *Experimental brain research* 142 (1), S. 41–51. DOI: 10.1007/s00221-001-0916-5.
- Peyron, M. A.; Maskawi, K.; Woda, A.; Tanguay, R.; Lund, J. P. (1997): Effects of food texture and sample thickness on mandibular movement and hardness assessment during biting in man. In: *Journal of dental research* 76 (3), S. 789–795. DOI: 10.1177/00220345970760031201.
- Peyron, M-A; Mishellany, A.; Woda, A. (2004): Particle size distribution of food boluses after mastication of six natural foods. In: *Journal of dental research* 83 (7), S. 578–582. DOI: 10.1177/154405910408300713.
- Piancino, M. G.; Bracco, P.; Vallelonga, T.; Merlo, A.; Farina, D. (2008): Effect of bolus hardness on the chewing pattern and activation of masticatory muscles in subjects with normal dental occlusion. In: *Journal of electromyography and kinesiology* 18 (6), S. 931–937. DOI: 10.1016/j.jelekin.2007.05.006.
- Piancino, M. G.; Isola, G.; Merlo, A.; Dalessandri, D.; Debernardi, C.; Bracco, P. (2012): Chewing pattern and muscular activation in open bite patients. In: *Journal of electromyography and kinesiology* 22 (2), S. 273–279. DOI: 10.1016/j.jelekin.2011.12.003.
- Plesh, O.; Bishop, B.; McCall, W. (1986): Effect of gum hardness on chewing pattern. In: *Experimental neurology* 92 (3), S. 502–512. DOI: 10.1016/0014-4886(86)90292-x.
- Pond, L. H.; Barghi, N.; Barnwell, G. M. (1986): Occlusion and chewing side preference. In: *The Journal of prosthetic dentistry* 55 (4), S. 498–500. DOI: 10.1016/0022-3913(86)90186-1.
- Röhrle, O.; Saini, H.; Lee, P. V. S.; Ackland, D. C. (2018): A novel computational method to determine subject-specific bite force and occlusal loading during mastication. In: *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering* 21 (6), S. 453–460. DOI: 10.1080/10255842.2018.1479744.

- Roldán, S.; Buschang, P. H.; Isaza Saldarriaga, J. F.; Throckmorton, G. (2009): Reliability of maximum bite force measurements in age-varying populations. In: *Journal of oral rehabilitation* 36 (11), S. 801–807. DOI: 10.1111/j.1365-2842.2009.01997.x.
- Rosin, P.; Rammler, E. (1933): Laws governing the fineness of powdered coal. 1933 (7), 29. Online verfügbar unter <https://typeset.io/papers/laws-governing-the-fineness-of-powdered-coal-4qw6e13s23>.
- Schierz, O.; Rauch, A. (2018): DC/TMD - Deutsche Version. In: [uniklinikum-leipzig.de](https://www.uniklinikum-leipzig.de), <https://www.uniklinikum-leipzig.de/einrichtungen/zahn-prothetik/Freigegebene%20Dokumente/symptomfragebogen-zahn-prothetik-uniklinikum-leipzig.pdf>, Abgerufen am 17.09.2024
- Schimmel, M.; Christou, Panagiotis; Miyazaki, Hideo; Halazonetis, Demetrios; Herrmann, François R.; Müller, Frauke (2015): A novel colourimetric technique to assess chewing function using two-coloured specimens: Validation and application. In: *Journal of dentistry* 43 (8), S. 955–964. DOI: 10.1016/j.jdent.2015.06.003.
- Schindler, H. J.; Hugger, A. (2006): Kauphysiologie und Kieferreflexe. In: A. Hugger, J. C. Türp und Th. Kerschbaum (Hg.): Curriculum Orale Physiologie. Unter Mitarbeit von A. Hugger, J. C. Türp und Th. Kerschbaum. Berlin: Quintessenz Verl.
- Shinkai, R. S.; Hatch, J. P.; Sakai, S.; Mobley, C. C.; Saunders, M. J.; Rugh, J. D. (2001): Oral function and diet quality in a community-based sample. In: *Journal of dental research* 80 (7), S. 1625–1630. DOI: 10.1177/00220345010800070601.
- Soboļeva, U.; Lauriņa, L.; Slaidiņa, A. (2005a): Jaw tracking devices--historical review of methods development. Part I. In: *Stomatologija* 7 (3), S. 67–71.
- Soboļeva, U.; Lauriņa, L.; Slaidiņa, A. (2005b): Jaw tracking devices--historical review of methods development. Part II. In: *Stomatologija* 7 (3), S. 72–76.
- Speksnijder, C. M.; Abbink, J. H.; van der Glas, H. W.; Janssen, N. G.; van der Bilt, A. (2009): Mixing ability test compared with a comminution test in persons with normal and compromised masticatory performance. In: *European journal of oral sciences* 117 (5), S. 580–586. DOI: 10.1111/j.1600-0722.2009.00675.x.
- van der Bilt, A. (2002): Human oral function: a review. In: *Brazilian Journal of Oral Science* (1), S. 7–18. Online verfügbar unter <https://pdfs.semanticscholar.org/7f50/70688686c62762c056b869bba488ddeb178a.pdf>, zuletzt geprüft am 18.02.2019.
- van der Bilt, A.; Abbink, J. H. (2017): The influence of food consistency on chewing rate and muscular work. In: *Archives of oral biology* 83, S. 105–110. DOI: 10.1016/j.archoralbio.2017.07.011.
- van der Bilt, A.; Abbink, J. H.; Mowlana, F.; Heath, M. R. (1993a): A comparison between data analysis methods concerning particle size distributions obtained by mastication in man. In: *Archives of oral biology* 38 (2), S. 163–167.
- van der Bilt, A.; Engelen, L.; Pereira, L. J.; van der Glas, H. W.; Abbink, J. H. (2006): Oral physiology and mastication. In: *Physiology & behavior* 89 (1), S. 22–27. DOI: 10.1016/j.physbeh.2006.01.025.

- van der Bilt, A.; Fontijn-Tekamp, F. A. (2004): Comparison of single and multiple sieve methods for the determination of masticatory performance. In: *Archives of oral biology* 49 (3), S. 193–198.
- van der Bilt, A.; Speksnijder, C. M.; Liz Pocztaruk, R. de; Abbink, J. H. (2012): Digital image processing versus visual assessment of chewed two-colour wax in mixing ability tests. In: *Journal of oral rehabilitation* 39 (1), S. 11–17. DOI: 10.1111/j.1365-2842.2011.02229.x.
- van der Bilt, A.; van der Glas, H. W.; Mowlana, F.; Heath, M. R. (1993b): A comparison between sieving and optical scanning for the determination of particle size distributions obtained by mastication in man. In: *Archives of oral biology* 38 (2), S. 159–162.
- van der Bilt, A.; van der Glas, H. W.; Olthoff, L. W.; Bosman, F. (1991): The effect of particle size reduction on the jaw gape in human mastication. In: *Journal of dental research* 70 (5), S. 931–937. DOI: 10.1177/00220345910700051301.
- van der Bilt, A. (2011): Assessment of mastication with implications for oral rehabilitation: a review. In: *Journal of oral rehabilitation* 38 (10), S. 754–780. DOI: 10.1111/j.1365-2842.2010.02197.x.
- van der Bilt, A.; Tekamp, A.; van der Glas, H.; Abbink, J. (2008): Bite force and electromyography during maximum unilateral and bilateral clenching. In: *European journal of oral sciences* 116 (3), S. 217–222. DOI: 10.1111/j.1600-0722.2008.00531.x.
- van der Glas, H. W.; van der Bilt, A.; Olthoff, L. W.; Bosman, F. (1987): Measurement of selection changes and breakage functions during chewing in man. In: *Journal of dental research* 66 (10), S. 1547–1550. DOI: 10.1177/00220345870660100701.
- Veyrone, J. L.; Lassauzay, C.; Nicolas, E.; Peyron, M. A.; Woda, A. (2007): Mastication of model products in complete denture wearers. In: *Archives of oral biology* 52 (12), S. 1180–1185. DOI: 10.1016/j.archoralbio.2007.04.016.
- Wanke, E. (2019): Assessment of chewing efficiency. Particle distribution analysis by optical scanning. Version 1.
- Weiner, R. (2001): Chew on this: is there a dominant side for chewing? In: *Journal of the Massachusetts Dental Society* 50 (2), S. 36–38.
- Wilding, R. J. (1993): The association between chewing efficiency and occlusal contact area in man. In: *Archives of oral biology* 38 (7), S. 589–596. DOI: 10.1016/0003-9969(93)90124-5.
- Wintergerst, A. M.; Throckmorton, G. S.; Buschang, P. H. (2008): Effects of bolus size and hardness on within-subject variability of chewing cycle kinematics. In: *Archives of oral biology* 53 (4), S. 369–375. DOI: 10.1016/j.archoralbio.2007.10.012.

- Witter, Dick. J.; Tekamp, F. Anneke; Slagter, Ad P.; Kreulen, Cees M.; Creugers, Nico H. J. (2011): Swallowing threshold parameters of subjects with complete dentures and overdentures. In: *OJST* 01 (03), S. 69–74. DOI: 10.4236/ojst.2011.13012.
- Woda, A.; Foster, K.; Mishellany, A.; Peyron, M. A. (2006a): Adaptation of healthy mastication to factors pertaining to the individual or to the food. In: *Physiology & behavior* 89 (1), S. 28–35. DOI: 10.1016/j.physbeh.2006.02.013.
- Woda, A.; Mishellany, A.; Peyron, M-A (2006b): The regulation of masticatory function and food bolus formation. In: *Journal of oral rehabilitation* 33 (11), S. 840–849. DOI: 10.1111/j.1365-2842.2006.01626.x.
- Wöstmann, B. (2006): Ernährung und Zahnersatz. In: A. Hugger, J. C. Türp und Th. Kerschbaum (Hg.): Curriculum Orale Physiologie. Unter Mitarbeit von A. Hugger, J. C. Türp und Th. Kerschbaum. Berlin: Quintessenz Verl.
- Yoshimura, M.; Fueki, K.; Garrett, N.; Ohyama, T. (2006): Influence of food platform width of mandibular removable partial denture on food mixing ability. In: *Journal of oral rehabilitation* 33 (5), S. 335–340. DOI: 10.1111/j.1365-2842.2005.01570.x.
- Youssef, R. E.; Throckmorton, G. S.; Ellis, E.; Sinn, D. P. (1997): Comparison of habitual masticatory patterns in men and women using a custom computer program. In: *The Journal of prosthetic dentistry* 78 (2), S. 179–186. DOI: 10.1016/s0022-3913(97)70123-9.
- Zamanlu, M.; Khamnei, S.; SalariLak, S.; Oskoe, S. S.; Shakouri, S. K.; Houshyar, Y.; Salekzamani, Y. (2012): Chewing side preference in first and all mastication cycles for hard and soft morsels. In: *International Journal of Clinical and Experimental Medicine* 5 (4), S. 326–331.

7 Anhang

Fragebogen

1. Wie alt sind Sie?
2. Hatten Sie bereits eine Kiefergelenksoperation?
3. Hatten Sie Traumen oder Unfälle, die den Gesichtsbereich betroffen haben?
4. Haben Sie Erkrankungen mit Beteiligung des Zentralnervensystems oder des peripheren Nervensystems?
5. Haben Sie eine rheumatische Erkrankung oder eine Fibromyalgie?
6. Leiden Sie an Vigilanzstörungen?
7. Haben Sie eine schwere psychische/psychiatrische Erkrankung (endogene Depression, schizophrene Störungen, schwere Zwangs- bzw. Angststörung)?
8. Nehmen Sie sedierende Medikamente ein?
9. Sind Sie drogen-, medikamenten- oder alkoholabhängig?
10. Sind Sie schwanger/Besteht die Möglichkeit einer Schwangerschaft oder stillen Sie?
11. Haben Sie eine Allergie auf Silikone?
12. Leiden Sie im Moment unter Zahnschmerzen?
13. Wissen Sie, ob Sie auf einer Seite bevorzugt kauen und wenn ja auf welcher?
14. Rechtshänder Linkshänder

Abbildung 24: Fragebogen für Probanden

Fragebogen CMD

Mündliche Abfrage:

1. Hatten Sie jemals auf einer beliebigen Seite Schmerzen im Kiefer, im Schläfenbereich, im Ohr oder vor dem Ohr/im Bereich des Kiefergelenks?
2. Hatten Sie während der letzten 30 Tage Kopfschmerzen, die im Schläfenbereich auftraten?
3. Sind bei Ihnen in den letzten 30 Tagen Kiefergelenkgeräusche aufgetreten, wenn Sie Ihren Unterkiefer bewegt haben?
4. Hatten Sie jemals, wenn auch nur kurzzeitig, eine Kieferklemme/-sperre, sodass sich Ihr Mund nicht vollständig öffnen oder schließen ließ?
5. Ist es in den letzten 30 Tagen vorgekommen, dass Sie etwas unternehmen mussten, um den Mund wieder schließen zu können, weil Ihr Kiefer blockiert oder verklemmt war, z. B. entspannen, bewegen, drücken oder manövrieren?

Abbildung 25: mündliche Fragen zum Ausschluss von CMD vor der klinischen Inspektion (Fragen angelehnt an den Fragebogen zu „Beschwerden der Kiefergelenke und der Kaumuskulatur“ der Universität Leipzig und der deutschen Version der DC/TMD (Schierz und Rauch 2018). Eine Bejahung einer dieser Fragen führte zum Ausschluss aus der Studie, weshalb der Fragebogen der DC/TMD nicht vollständig ausgefüllt werden musste.)

8 Danksagung

Abschließend möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

An erster Stelle gilt mein herzlichster Dank meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Alfons Hugger sowie Herrn Prof. Dr. Egon Wanke für die Bereitstellung des Promotionsthemas sowie die großartige Unterstützung, stete Motivation und Betreuung.

Danken möchte ich auch Frau Prof. Dr. Petra Gierthmühlen, dass ich mein Dissertationsprojekt in der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik durchführen durfte.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen Eltern und meinem Bruder für ihre Unterstützung und Motivation in allen Lebenslagen danken. Sie haben mir immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden, wofür ich unglaublich dankbar bin und mir auf meinem Lebensweg immer ermöglicht, meine Träume zu verfolgen.

Mein besonderer Dank gilt meinem Verlobten Marvin, da er mich sowohl während des Studiums als auch bei dieser Arbeit immer unterstützt und motiviert hat und mir immer geduldig und verständnisvoll zur Seite steht.

Außerdem möchte ich meinen Probanden dafür danken, dass Sie sich bereiterklärt haben, an dieser Studie teilzunehmen.