Aus der Abteilung für Kieferorthopädie und Orthodontie der Klinik für
Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde des Universitätsklinikums Ulm
Prof. Dr. Dr. Bernd Lapatki

Einfluss einer einwöchigen okklusalen Entkopplung auf funktionelle Kieferbewegungen

Dissertation

zur
Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin
der Medizinischen Fakultät der Universität Ulm

2020

Katharina Plaschke

geboren in Bad Säckingen

Amtierender Dekan:	Prof. Dr. Thomas Wirth
1. Berichterstatter:	Prof. Dr. Dr. Bernd Lapatki
2. Berichterstatter:	PD Dr. Heike Rudolph
Tag der Promotion:	23.06.2022

Teile dieser Dissertation wurden veröffentlicht in:

Hellmann, D., Glöggler, J. C., Plaschke, K., Jäger, R., Eiglsperger, U., Schindler, H. J., Lapatki, B. G. (2021): Effects of preventing intercuspation on the precision of jaw movements. *Journal of oral rehabilitation* 48, 392–402
DOI: 10.1111/joor.13137

Used with permission of John Wiley & Sons Ltd, from „Effects of preventing intercuspation on the precision of jaw movements“ Hellmann et al., *Journal of oral rehabilitation* 48, 4, 2021; permission conveyed trough Copyright Clearance Center, Inc.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis III

1 Einleitung 1

1.1 Das kraniomandibuläre System 1

1.2 Die Steuermechanismen des CMS 1

1.3 Adaptation in der Medizin und Physiologie 7

1.4 Motorisches Lernen und Adaptation 8

1.5 Kauen 15

1.6 Zielstellung 19

2 Material und Methoden 20

2.1 Probanden 20

2.2 Versuchsaufbau 21

2.3 Versuchsdurchführung 28

2.4 Genauigkeit JMA 32

2.5 Auswertung der Rohdaten 32

2.6 Auswertung der Kauzyklen 35

2.7 Statistik 41

3 Ergebnisse 42

3.1 Variabilität der Schließbewegung in IKP 42

3.2 Variabilität beim Training in eine anteriore Unterkieferposition 43

3.3 Vergleich IKP – Training 45

3.4 Kauen 48

4 Diskussion 57

4.1 Variabilität beim Kieferschluss in IKP 57

4.2 Variabilität beim Training in eine anteriore Unterkieferposition 59

4.3 Kauen 61

5 Zusammenfassung 67
6 Literaturverzeichnis 69
7 Anhang 76
8 Abbildungsverzeichnis 78
9 Tabellenverzeichnis 80
Danksagung 81
Lebenslauf 82

Abkürzungsverzeichnis

AI ..... *Asymmetrie Index*
ASCII ..... *American Standard Code for Information Interchange*
CMD ..... *kraniomandibuläre Dysfunktion*
CMS ..... *kraniomandibuläres System*
CPG ..... *Central Pattern Generator*
d ..... *Durchmesser*
DGFDT ..... *Deutsche Gesellschaft für Funktionsdiagnostik und - therapie*
EMG ..... *Elektromyogramm oder Elektromyographie*
fMRI ..... *funktionelle Magnetresonanztomographie*
HKA ..... *Hauptkomponentenanalyse*
IKP ..... *Interkuspidation*
JMA ..... *Jaw Movement Analyser*
KG ..... *Kiefergelenk*
M. ..... *Musculus*
max. ..... *Maximum, maximal*
MEAN ..... *Mittelwert*
MEP ..... *motorisch evozierte Potentiale*
MI ..... *primär motorischer Kortex*
min. ..... *Minimum, minimal*
Min. ..... *Minuten*
N ..... *Probandenzahl*
N. ..... *Nervus*
Ncl. ..... *Nucleus*
OK ..... *Oberkiefer*
PDL- Sensoren ..... *Mechanorezeptoren des parodontalen Ligaments*
SD ..... *Standardabweichung*
SI ..... *primär somatosensorischer Kortex*
TDS ..... *tongue drive system*
TLT ..... *tongue lift training*
TMS ..... *transkranielle Magnetstimulation*
TP ..... *Trainingsposition*
UK ..... *Unterkiefer*
ZNS ..... *zentrales Nervensystem*

1 Einleitung

1.1 Das kraniomandibuläre System

Das kraniomandibuläre System (CMS) ist eine aus Kaumuskulatur, Kiefergelenken, Kieferknochen, Zahnhalteapparat, Zähnen und Weichteilen bestehende komplexe funktionelle Einheit und dient neben der Nahrungsaufnahme und -zerkleinerung (Mastikation) dem Schlucken des Speisebolus sowie der Lautbildung (Artikulation) (Reitemeier et al. 2006). Darüber hinaus übernimmt das CMS wichtige Funktionen bei der Atmung und der Körperhaltung. Beschwerden und Störungen in diesem System werden als kraniomandibuläre Dysfunktion (CMD) bezeichnet (Behr et al. 2020). Innerviert werden die orofazialen Areale und die Kaumuskulatur durch die Hirnnerven V (N. trigeminus), VII (N. facialis), IX (N. glossopharyngeus) und XII (N. hypoglossus) (Behr et al. 2019; Schünke et al., 2012). Vor allem der allgemein-somatoafferente und speziell-viszeroefferente N. trigeminus mit seinen vier Nervenkernen (Ncl. motorius nervi trigemini, Ncl. mesencephalicus nervi trigemini, Ncl. principalis nervi trigemini, Ncl. spinalis nervi trigemini) ist eine der elementaren Grundlagen der Steuermechanismen des CMS (Behr et al. 2019; Schünke et al. 2012).

1.2 Die Steuermechanismen des CMS

Die präzise neuronale Steuerung der Bewegungen innerhalb des CMS wird maßgeblich durch folgende Strukturen gewährleistet:

- *Motorcortex*
- *Central Pattern Generator*
- *Periphere Feedbacksysteme*

1.2.1 Motorcortex

Der Motorcortex ist der Bereich der Großhirnrinde, der für willkürliche Bewegungen und das Zusammenfügen einfacher Bewegungsmuster zu einer komplexen Bewegungsabfolge zuständig ist. Die Muskulatur des CMS ist sowohl im primär motorischen Kortex (MI) wie auch im primär somatosensorischen Kortex (SI) überproportional stark repräsentiert (Behrends et al., 2010; Schünke et al., 2012).

Aus dieser überproportionalen Repräsentation lassen sich sowohl die feine motorische Steuerung der Sprach- und Kaumuskulatur als auch die hohe Sensibilität der orofazialen Strukturen wie z. B. der Lippen erklären (Behrends et al., 2010; Schünke et al., 2012).

Der Motorcortex unterhält direkte und indirekte Verbindungen zum CMS. Etwa 30 % sind direkte, schnell leitende, gekreuzte Verbindungen vom motorischen Kortex zu den Motoneuronen der Kaumuskulatur im Hirnstamm (Nervenkerne des N. trigeminus) (Cruccu et al., 1989). Durch transkranielle Magnetstimulation (TMS) des Motorcortexes können bilaterale Kontraktionen des Musculus (M.) masseter und des M. digastricus ausgelöst werden. Absteigende Neurone interagieren aktivierend und auch inhibierend mit Motoneuronen des trigeminalen Systems (Avivi-Arber et al., 2011; Nordstrom, 2007). Die von diesen Motoneuronen ausgehenden Signale werden von peripheren sensorischen Einflüssen bzw. dem SI moduliert (s. Abschnitt 1.2.3). Bewegungen können in willkürliche (Willkürmotorik) und unwillkürliche Bewegungen unterteilt werden. Willkürliche orofaziale Bewegungen sind z. B. die Kieferöffnung und der Kieferschluss oder die Zungenprotrusion. Diese selbstinitiierten Bewegungen stehen unter dem Einfluss des MI sowie weiterer modulierender motorischer Zentren des zentralen Nervensystems (ZNS) (Avivi-Arber et al., 2011). Im Gegensatz dazu stehen die automatischen und semiautomatischen Bewegungsabläufe wie der Masseterreflex als Beispiel eines automatischen Körperreflexes oder das Kauen und das Schlucken (semiautomatisch). Die semiautomatischen Bewegungen Kauen und Schlucken werden durch Aktivierung des Central Pattern Generator (s. Kapitel 1.2.2) generiert (Avivi-Arber et al., 2011; Lund, 1991; Kumar et al., 2015). Im Bereich der Adaptation an veränderte orale Bedingungen und beim Erlernen von neuen motorischen Mustern spielt der MI ebenfalls eine Rolle (Avivi-Arber et al., 2011; Sessle et al., 2007).

1.2.2 Central Pattern Generator

Als Central Pattern Generator (CPG) werden Netzwerke von Nervenzellen im Hirnstamm/Rückenmark bezeichnet, die eigenständig rhythmische Muskelkontraktionsmuster kontinuierlicher Bewegungen wie beim Kauen oder Gehen erzeugen können. Der CPG des CMS liegt zwischen den motorischen Kernen des N. trigeminus und des Ncl. olivaris inferior im Hirnstamm und besteht hauptsächlich aus Neuronen des trigeminalen Systems (Morquette et al., 2012).

Aktiviert wird er aus höher gelegenen Zentren des ZNS (z.B. Motorcortex) (Lund, 1991; Kumar et al., 2015; Schindler et al., 1998; Dellow und Lund, 1971) oder durch Stimulation peripherer Rezeptoren (Lund und Kolta, 2006b).

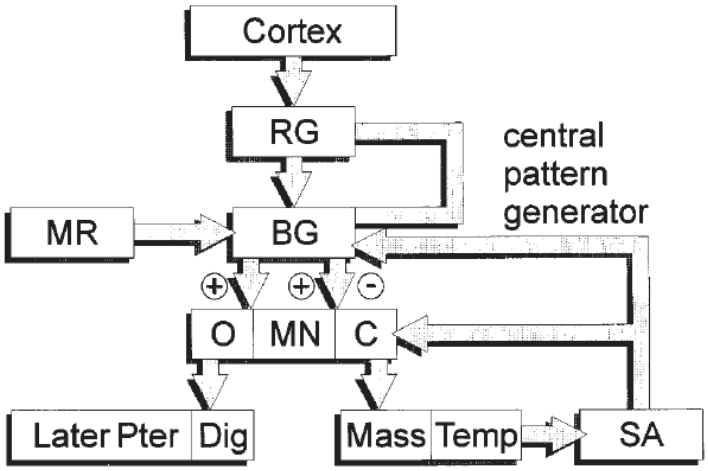


Fig. 1. Schematic drawing of neuronal connections between central pattern generators, cortex and peripheral proprioceptors. *RG* = Rhythm generators; *BG* = burst generators; *MR* = mechanoreceptors; *MN* = motoneurons V; *O* = opener; *C* = closer; *Dig* = digastric muscle; *Mass* = masseter muscle; *Later Pter* = lateral pterygoid muscle; *Temp* = temporal muscle; *SA* = muscle spindle.

Abb. 1: neuronale Vernetzung des CPG aus Schindler et al. 1998. Feedback control during mastication of solid food textures – a clinical- experimental study. The journal of prosthetic dentistry 80, S. 330-336. Figure 1.

Durch die Aktivität des CPG werden einfache rhythmische Kaubewegungen generiert. Dazu werden die α-Motoneurone der Kaumuskulatur in bestimmter Abfolge aktiviert bzw. inhibiert. Bei der Kieferöffnung werden die Motoneurone der Kieferschließer inhibiert, während gleichzeitig die Kieferöffner aktiviert werden (Lund, 1991; Schindler et al., 1998). Zur bedarfs- und zielgerichteten Steuerung des CMS muss der Antrieb des CPG durch sensorische Feedbackmechanismen feinjustiert werden. Erst

die Informationen einer Vielzahl intraoraler Rezeptoren, Gelenksrezeptoren und Rezeptoren in der Muskulatur sowie die Interaktion dieser Informationen mit der zentralen Steuerung (Motorcortex und CPG) führen zu einer Individualisierung und zielgerichteten Anpassung des Kaumusters (Lund, 1991; Hellmann et al., 2021)).

1.2.3 Periphere Feedbacksysteme

Die Aktivität der Muskulatur des CMS wird auch durch den Input aus verschiedenen peripheren Rezeptorsystemen reguliert. Zu diesen Rezeptoren zählen die Propriozeptoren der Muskulatur (Muskelspindeln) und der Kiefergelenke, die Mechanorezeptoren des Parodontalligaments (PDL-Sensoren), der Haut und der Schleimhaut, sowie die Thermorezeptoren und Nozizeptoren (Avivi-Arber et al., 2010). Propriozeptoren sind Rezeptoren der Tiefensensibilität (Propriozeption) und geben Auskunft über die Position und Aktivität der Gelenke, Muskeln und Sehnen - in Bezug auf das CMS also über die dreidimensionale Lage des Unterkiefers (UK) im Raum.

Parodontalligament

Die im Parodontalspalt der Zähne befindlichen PDL-Sensoren liefern Informationen über den Belastungszustand und die Richtung der Krafteinwirkung auf die Zähne. Entsprechend ihres Adaptationsverhaltens lassen sich die PDL-Sensoren in spontan feuernde, schnell adaptierende und langsam adaptierende Typen einteilen, wobei der letztgenannte am häufigsten zu finden ist (Johnsen und Trulsson, 2003). Die Stimulation eines einzelnen Zahnes kann auch die PDL-Sensoren der Nachbarzähne aktivieren – hierfür werden die Approximalkontakte und transseptale Fasern verantwortlich gemacht. Die rezeptiven Felder der PDL-Sensoren sind somit größer als ein einzelner Zahn und erstrecken sich typischerweise über zwei bis vier benachbarte Zähne (Trulsson, 2006). Johnsen und Trulsson untersuchten die Rezeptorantwort der PDL-Sensoren auf unterschiedliche horizontale und vertikale Kräfte.

Sie stimulierten den jeweiligen Zahn durch Druckapplikation in eine der sechs untersuchten Richtungen (mesial, distal, lingual oder fazial bzw. intrudierend oder extrudierend). Frontzähne und Prämolaren zeigten in zwei bis vier der sechs untersuchten Kraftrichtungen eine hohe Richtungssensitivität. Die Molaren hingegen wiesen eine Präferenz für Kräfte in distaler und lingualer Richtung auf (Johnsen und

Trulsson, 2003; Trulsson, 2006). Im Vergleich zu den von den Molaren gefolgten Prämolaren weisen die Frontzähne eine höhere Anzahl an Rezeptoren auf. Diese Verteilung entspricht der abnehmenden Richtungssensitivität entlang des Zahnbogens nach distal und spiegelt somit die Bedeutung der Schneidezähne als Werkzeug z. B. beim Halten und Teilen von Nahrung oder der Verwendung der Zähne als „dritte Hand" wider (Trulsson, 2006).

Versuche mit Lokalanästhesie der Zähne unterstreichen die Wichtigkeit der PDL-Sensoren für die Steuerung des CMS (Trulsson 1996; Orchardson und MacFarlane 1980). Bei „hold and split"-Versuchen, bei denen die Probanden eine Testnahrung z. B. eine Schokoladenlinse (Kumar et al., 2015; Zhang et al., 2016), eine Tablette (Kumar et al., 2014) oder eine Erdnuss (Trulsson 1996) mit den Schneidezähnen halten und präzise teilen müssen, sinkt die Haltekraft nach dem Training bzw. mit der Anzahl der Wiederholungen (Kumar et al., 2014; Zhang et al., 2016).

Nach Ausschaltung der PDL-Sensoren durch Lokalanästhesie steigt hingegen die Haltekraft an, wobei die Splitkraft unverändert bleibt (Trulsson 1996). Dieses Ergebnis könnte auf das fehlende Feedback der anästhesierten PDL-Sensoren zurückzuführen sein, wodurch das präzise Halten mit möglichst geringem Kraft- und Energieaufwand erschwert war. Zudem konnte die Testnahrung schlechter zwischen den Zähnen gehalten werden, die Probanden verloren im Vergleich zu Probanden ohne Lokalanästhesie die Testnahrung häufiger (Trulsson 1996).

Muskulatur

Neben den PDL-Sensoren haben auch die Rezeptoren der Kaumuskulatur Einfluss auf den CPG, denn es finden sich auch Neurone, die von den Muskelspindeln der Kaumuskulatur Feedback empfangen (Lund und Kolta, 2006a). Muskelspindeln sind als Dehnungssensoren Teil des propriozeptiven Systems. Im CMS sind sie nur in den Kieferschließern, nicht aber in den Kieferöffnern zu finden (Türker, 2002). Feedback von den Muskelspindeln zum CPG kann dessen Output (Kaumuster) verändern, z. B. in Form einer Anpassung des Kaumusters an eine veränderte Bolushärte beim Kauen (Lund und Kolta, 2006b).

Kiefergelenke

Schindler et al. untersuchten, welche Auswirkung auf Kaukraft und Kaubewegung eine Ausschaltung der PDL-Sensoren und der Rezeptoren der Kiefergelenke durch Lokalanästhesie hat. Es zeigte sich, dass die Rezeptoren der Kiefergelenke im Vergleich zu den PDL-Sensoren für die neuromuskuläre Steuerung nur eine untergeordnete Rolle zu spielen scheinen (Schindler et al., 1998; Hellmann et al., 2021).

Die Gelenkafferenzen der Kiefergelenke dienen hauptsächlich dem Schutz vor Überdehnung oder Überbelastung bei unphysiologischen Grenzbewegungen des Kiefergelenks (Sessle, 2006). Abbildung 2 skizziert den Zusammenhang der verschiedenen Rezeptorsysteme (Türker, 2002).

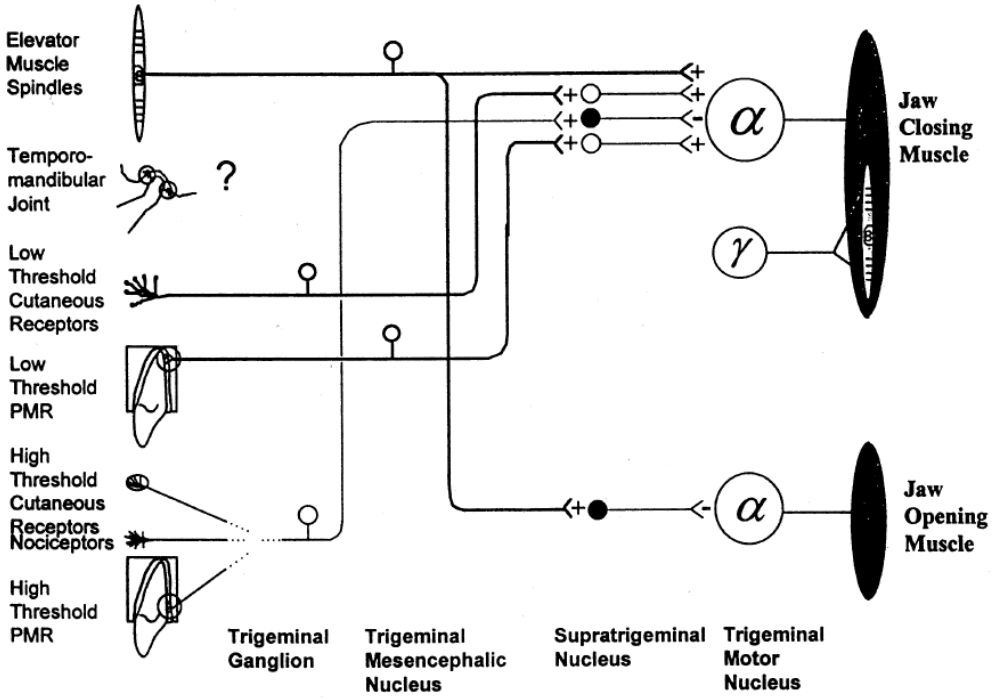


Abb. 2: Schemazeichnung der Rezeptorsysteme im CMS aus Türker 2002. Reflex control of human jaw muscles. Critical reviews in oral biology&medicine 13, 85-104. Figure 4.

1.2.4 Die Bedeutung der Interkuspidation für die Steuerung des CMS

Die maximale Interkuspidation (IKP) beschreibt die über die Zahnkontakte räumlich definierte Lage des Unterkiefers zum Oberkiefer (OK). Im Gegensatz zur zentrischen Okklusion ist in maximaler IKP die Lage der Kiefergelenke (KG) durch die Zahnkontakte determiniert. Während des Kauaktes wird die größte Muskelaktivität kurz vor oder bei Erreichen der IKP erreicht (Hannam et al., 1977), allerdings nur dann, wenn sich der UK in einer zentrischen und muskulär stabilen Position befindet. Bei Kieferschluss in unilateraler Okklusion oder bei isoliertem Kontakt der Schneidezähne konnten im Vergleich nur geringe Kaukräfte entwickelt werden (Forrester et al., 2010). Bei natürlichen Kaubewegungen nimmt kurz vor Erreichen der IKP die Geschwindigkeit der Kieferbewegung ab (Hannam et al., 1977; Koolstra und van Eijden, 1997).

Die Steuermechanismen scheinen im Nahbereich der Okklusion besonders präzise zu sein, was sich in Studien von Hellmann et al. zur Okklusionsbezogenheit des CMS, bei denen die Präzision von Unterkieferschließbewegungen bei verschiedenen vertikalen Abständen zur IKP untersucht wurden, zeigte (Hellmann et al. 2014). Die Steuerung der Schließbewegung ist umso präziser, je weiter sich der Unterkiefer an die IKP annähert.

Mithilfe der sog. „Uncontrolled Manifold Analyse“ (Hellmann et al., 2014), einer speziellen Varianzanalyse aus den Bewegungswissenschaften, und der Analyse von Muskelkontraktionsmustern während der Balance des Unterkiefers auf einem hydrostatischen System unter Beißkraft (Hellmann et al., 2015), konnte die IKP als Zielvariable beschrieben werden, der sich die Steuervariablen der KG-Position und der Muskelaktivität unterordnen. Dies bedeutet, dass die Steuermechanismen des CMS okklusionsbezogen agieren.

1.3 Adaptation in der Medizin und Physiologie

In der Physiologie ist der Begriff Adaptation die allgemeine Bezeichnung für die genetisch erworbene oder in der physiologischen Reaktionsbreite liegende Anpassung von Zellen, Geweben oder Organen an kurzfristige, langfristige bzw. wiederholte Wirkung von Belastungsreizen. Als physiologische Adaptation ist sie Teil der Fähigkeit zur Aufrechterhaltung der Homöostase (Hugger et al., 2016).

1.4 Motorisches Lernen und Adaptation

Bewegungen des Körpers dienen dazu, mit der Umwelt zu interagieren. Für das CMS dienen die Bewegungen des Unterkiefers primär der Aufbereitung von Nahrung und der Interaktion durch Mimik und Sprache. Die genauen Mechanismen, mit denen das ZNS die Muskulatur zielgerichtet ansteuert, um koordinierte Bewegungen zu erlernen bzw. entstehen zu lassen, sind noch nicht vollständig geklärt und Gegenstand intensiver Forschungsbemühungen.

Unter motorischer Kontrolle versteht man die internen Steuerungs- und Regelungsprozesse, die den generierten Bewegungen zugrunde liegen. Darauf aufbauend wird motorisches Lernen als eine erfahrungs- und übungsbedingte dauerhafte Veränderung jener interner Steuerungs- und Regelungsprozesse verstanden (Stein und Bös, 2014). Das heißt, kurzfristige Leistungsverbesserungen innerhalb einer Übungseinheit (Performance) fallen nicht unter das motorische Lernen (Güllich und Krüger, 2013). Neurowissenschaftlich wird innerhalb des motorischen Lernens zwischen Fertigkeitslernen und motorischer Adaptation differenziert (Krakauer und Mazzoni, 2011). Fertigkeitslernen wird als Aneignung neuer oder Optimierung bereits gekonnter Bewegungen definiert, wobei es in der Regel zu einer übungsbedingten Leistungssteigerung im Vergleich zum Ausgangsniveau kommt. Diese sich beim Erlernen der neuen Fähigkeit steigernde Leistung zeigt sich beispielsweise durch geringere Variabilität in der Performance (Krakauer und Mazzoni, 2011). Motorische Adaptation hingegen beschreibt die Anpassung bereits gekonnter Bewegungen an veränderte Bedingungen oder externe Reize (Stein und Bös, 2014) – für das CMS z. B. die Anpassung der Kaumuster während des Wachstums und den daraus resultierenden veränderten Kieferverhältnissen, eine veränderte Okklusion während kieferorthopädischer Therapie oder nach einer prothetischen Neuversorgung beispielsweise mit Totalprothesen. Bei der Adaptation kommt es dann also nicht wie für das Fertigkeitslernen definiert zu einer übungsbedingten Leistungsverbesserung sondern zu einer übungsbedingten Anpassung an die veränderten Bedingungen und damit zu einer Wiederherstellung des ursprünglichen Leistungsniveaus (Stein und Bös, 2014). Nach Entfernung des Reizes, der zur Adaptation geführt hat, zeigen Probanden/Patienten sog. „after-effects“, was bedeutet, dass vollständig adaptierte Bewegungsmuster die Reizeinwirkung überdauern. Bei Wegfallen der Reizeinwirkung oder bei gezielter Rückführung in die Ausgangssituation

muss, wenn zuvor eine vollständige Adaptation stattgefunden hat, eine Adaptation in umgekehrter Richtung erfolgen (Bastian, 2008).

Der Begriff „Training“ beschreibt allgemein einen Prozess, bei dem durch das wiederholte Üben bestimmter Fähigkeiten eine Zustandsänderung im Sinne einer definierten Zielvorstellung hervorgerufen werden soll. Im medizinischen Kontext spielt Training in der Rehabilitation z. B. bei Zustand nach Apoplex (Pang et al., 2018) eine wichtige Rolle. Die Fähigkeit des Gehirns zur Reorganisation sowie zu funktioneller und struktureller Anpassung wird als Neuroplastizität definiert. MI und SI haben die Fähigkeit neuroplastischer Veränderungen im Sinne funktioneller und struktureller Veränderungen zu durchlaufen.

Äußere Reize wie beispielsweise Verletzungen peripherer Nerven oder zentrale Veränderung wie nach einem Schlaganfall können Neuroplastizität ebenso auslösen wie Stimulation durch motorisches Training (Avivi-Arber et al., 2011). Versuche von Sessle et al. an Affen und Ratten zeigen neuroplastische Veränderungen bei okklusalen Modulationen, Zahnverlust und Feedbackverlust durch Nervenblock, aber auch beim motorischen Lernen einer protrusiven Zungenbewegung (Sessle et al., 2007).

Je nach Art und Komplexität der trainierten Aufgabe resultiert eine gesteigerte kortikale Erregbarkeit. Studien mit unterschiedlich schwierigen Aufgaben zeigen unterschiedliche Ergebnisse in der Neuroplastizität der trainierten Areale. Erst durch Training einer komplexeren Aufgabe wurden Anzeichen von Neuroplastizität, detektiert durch TMS, sichtbar (Lu et al., 2013; Zhang et al., 2016; Zhang et al., 2018).

1.4.1 Motorisches Training im CMS

Die gute Trainierbarkeit des CMS wurde bereits in mehreren Studien untersucht und gezeigt (Hellmann et al., 2021). Dabei reichen die Trainingsformen von einfachen Übungen wie dem Protrudieren der Zunge (Arima et al., 2011; Sessle et al. ,2007; Svensson et al., 2003; Svensson et al., 2006) oder dem Zusammenbeißen der Zähne („tooth clenching“) (Hellmann et al., 2011; Iida et al., 2014) bis hin zu komplexeren Zungenbewegungen (Boudreau et al., 2007; Komoda et al. ,2015; Kothari et al., 2012) und mehrteiligen Aufgaben wie dem Halten und präzisen Teilen einer Testnahrung mit den Schneidezähnen („hold and split“) (Kumar et al., 2014; Kumar et al., 2015; Zhang et al., 2016; Zhang et al., 2018).

Die unterschiedlichen Untersuchungszeiträume und Paramater zur Messung des Trainingserfolges sind in Tabelle 1 dargestellt. Die untersuchten Zeiträume reichen von einer einzelnen Trainingseinheit mit 15 Minuten (Boudreau et al., 2007) oder 60 Minuten Trainingszeit (Arima et al., 2011; Svensson et al., 2006) mit variierenden Follow-Up-Zeiten bis hin zu täglich wiederholten, einstündigen Einheiten über einen Zeitraum von einer Woche (Svensson et al., 2003). Zur Messung des Trainingserfolges zogen die Untersucher motorische evozierte Potentiale (MEP) und transkranielle Magnetstimulation (TMS) (Svensson et al., 2006; Svensson et al., 2003; Boudreau et al., 2007; Komoda et al., 2015; Lu et al., 2013; Zhang et al., 2016), Elektromyographie (EMG) (Hellmann et al., 2011; Komoda et al., 2015; Zhang et al., 2016) oder funktionelle Magnetresonanztomographie -Messungen (fMRI) (Arima et al., 2011) hinzu. Andere werteten die Performanceveränderung innerhalb oder zwischen den Trainingseinheiten (Kothari et al., 2012) oder die Dauer der Versuchsdurchführung (Kumar et al., 2015) aus.

Tabelle 1: Effekte motorischen Trainings auf das kraniomandibuläre System (CMS), N = Probandenzahl, h = Stunde, Min. = Minuten, MEP = motor evoked potential (motorisch evozierte Potentiale): Amplitude/Reizschwelle, TLT = tongue lift training, TDS = tongue drive system, (↑) = Verbesserung/Steigerung, (↓) = Verschlechterung/Abnahme, (↔) = keine Veränderung, (-) = nicht untersucht/gemessen

ZIELMUSKEL	AUTOR	N	AUFGABE	TRAINIGSZEIT	PERFORMANCE	VERÄNDERUNG IM GEHIRN	MEP Amplitude/ Reizschwelle
ZUNGE	Arima et al. 2011	13	Protrusion	1h	↑	↑	-
	Svensson et al. 2003	11	Protrusion	1h/7 Tage	↑	↑	↑/↓
	Svensson et al. 2006	11	Protrusion	1h	-	↑	↑/↓
	Sessle et al. 2007	4 (AFFE)	Protrusion	-	-	↑	-
	Boudreau et al. 2007	9	Protrusion	15 Min.	↑ (ohne Capsaicin)	↑	↑/↓
	Komoda et al. 2015	16	TLT	41 Min. /5 Tage	↔	↑	↑/↓
	Kothari et al. 2012	16 12	Protrusion + TDS TDS	1h 2x 5 Min.	↑ ↑		-
MASSETER	Hellmann et al. 2011	20	Tooth clenching	Keine Zeitangabe	↑	-	-
	Iida et al. 2014	15	Tooth clenching	1h/ 5 Tage	↑	↑	↑/↓
MASSETER	Kumar et al. 2014	20	Hold & split	60 Wieder-holungen ~ 1h	↔	-	-
	Kumar et al. 2015	30	Hold & split	30 Min./ Messung davor und danach	↑	-	-
	Lu et al. 2013	15	Hold & split	1h	↑	↔	↔
	Zhang et al. 2016	15	Hold & split	4h	↑	↑	↑/↔

Zungenmuskulatur

Ein einwöchiges protrusives Bewegungs-Training der Zungenmuskulatur führt zu einer Leistungssteigerung der auszuführenden Aufgabe, einer gesenkten Reizschwelle zur Auslösung der motorisch evozierten Potentiale und einer gesteigerten Amplitude dieser Potentiale (Svensson et al., 2003). In einer weiteren Studie zeigten Svensson et al., dass schon 60 Minuten Training oben genannte Veränderungen hervorruft und kortikale Plastizität (MI Repräsentation) sowohl 30 Minuten nach dem Training als auch noch einen Tag später messbar ist (Svensson et al., 2006). Versuche an Affen erzielten den gleichen Effekt (Sessle et al., 2007). Eine fMRI-Studie konnte belegen, dass protrusives Zungentraining zu nachweisbaren Veränderungen in zungen-assoziierten Hirnarealen führt. Diese Veränderungen korrelieren mit der Leistungssteigerung während des Trainings: Zu Beginn lag eine Erfolgsrate von 22,2 ± 9,8 % vor, die sich nach einer Stunde Training auf 43,0 ± 13,2 % steigerte (Arima et al., 2011).

Diese Effekte motorischen Trainings wurden nicht nur für protrusive Bewegungen der Zunge sondern auch für komplexere Bewegungen wie das Anheben der Zunge gegen einen Widerstand beschrieben (Komoda et al., 2015). Nozizeptiver Input, z. B. durch das Auftragen einer mit 1 % Capsaicin versetzten Creme auf die Zungenspitze während des Trainings, beeinflusst und verringert den Trainingserfolg. In der Kontrollgruppe (Creme ohne Capsaicin) traten nach einem 15-minütigen Kurzzeittraining die oben beschriebenen Effekte wie verringerte Reizschwelle, gesteigerte Leistung und Neuroplastizität in den zur Zunge assoziierten Bereichen des MI auf (Boudreau et al., 2007). Die Komplexität und die Kraftanforderung der zu trainierenden Aufgabe haben einen Einfluss auf die Leistung. Eine Studie, in der Probanden eine komplexe Aufgabe wie die Steuerung eines Computerspieles (TDS = tongue drive system) mit der Zunge durchführen mussten, hat eine im Vergleich zur einfacheren Zungenprotrusion höhere prozentuale Steigerung der Leistung nachgewiesen. Die Probanden beschrieben zudem weniger Ermüdung und Schmerzen sowie mehr Spaß bei der komplexeren Aufgabe (TDS). Sowohl positive Einflüsse durch größere Motivation als auch negative Einflüsse durch Ermüdung und Schmerzen könnten hier zu den unterschiedlichen Ergebnissen zwischen den Trainingsarten geführt haben (Kothari et al., 2012).

Kaumuskulatur - „Tooth clenching“

Iida et al. konnten in ihrer Studie durch wiederholtes Zusammenbeißen der Zähne neuroplastische Veränderungen im Motorcortex aufzeigen (Iida et al., 2014). Sie untersuchten dazu die Kaumuskulatur (M. masseter) und als Kontrollmuskulatur ohne Training die des Zeigefingers (M. interosseus dorsalis I). Die Probanden sollten durch das Zusammenbeißen der Zähne in IKP unterschiedlich hohe Kräfte generieren. Die Reizschwelle für MEPs lag nach fünf Tagen wiederholten Trainings signifikant niedriger. Die Amplitude der MEPs war bei gleicher Stimulusintensität für die trainierte Muskulatur im Vergleich zur Kontrollmuskulatur signifikant höher. Die Kortexareale für den trainierten M. masseter waren am Ende der Studie signifikant größer als zu Beginn der Studie (T = 5 Tage). Diese Ergebnisse zeigen, dass durch das wiederholte Zusammenbeißen (= Kontraktion der Kaumuskulatur) neuroplastische Veränderungen induziert werden konnten. Hellmann et al. beschrieben 2011 die Adaptationsfähigkeit der Kaumuskulatur. Über 10 Wochen untersuchten sie die Auswirkungen eines motorischen Trainings auf den M. masseter, bei dem die Probanden mit ihren Zahnreihen Druck auf einen hydrostatischen Drucksensor ausüben mussten. Dabei zeigte sich, dass durch das Training die EMG-Aktivität zwischen den Trainingstagen abnahm. Innerhalb einer Sitzung konnten keine Veränderungen gemessen werden. Sie vermuteten, dass die Abnahme der im EMG aufgezeichneten Muskelaktivität daher rührt, dass nicht effektive und für diese spezielle Aufgabe nicht benötigte motorische Einheiten des M. masseters abgeschaltet wurden, was einer Optimierung der Muskelaktivität in Bezug auf die Aufgabe entspricht (Hellmann et al., 2011).

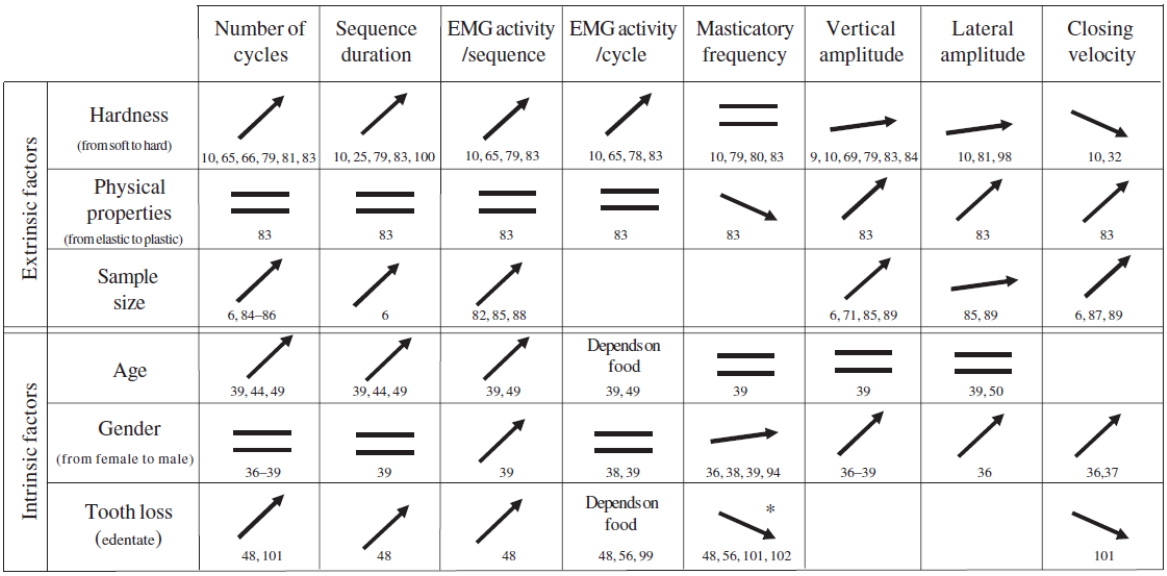
Kaumuskulatur - „hold and split“

Die motorische Aufgabe „hold and split“, also das Halten und Teilen einer Testnahrung mit den OK- und UK-Inzisivi, ist ein gängiges Mittel zur Überprüfung der Trainierbarkeit der Kaumuskulatur. Positionieren, Halten und Zerteilen einer Testnahrung zwischen den Inzisivi entsprechen der natürlichen Situation während der Nahrungszerkleinerung (Kumar et al., 2014). Als Testnahrung dienen dabei z. B. eine Tablette (Kumar et al., 2014) , eine Schokoladenlinse (Kumar et al. ,2015; Zhang et al., 2016) oder eine ungekochte Spaghetti (Zhang et al,. 2018). Kumar et al. konnten in ihrer 2015 durchgeführten Studie zu den Effekten eines Kurzzeittrainings auf die Performance einer intraoralen feinmotorischen Aufgabe zeigen, dass durch ein Training von 30 Minuten bzw. nach 100 Wiederholungen die Präzision der motorischen Aufgabe verbessert werden konnte. Eine handelsübliche Schokoladenlinse (Durchmesser (d) = 10 mm) diente dabei als Testnahrung, welche präzise in zwei gleich große Hälften geteilt werden sollte. Es konnten eine signifikante Steigerung der Leistung, definiert als geringere Abweichung vom idealen Split, sowie eine reduzierte Gesamtdauer bei der Durchführung gezeigt werden (Kumar et al., 2015). 2016 nutzten Zhang et al. in ihrer Studie die transkranielle Magnetstimulation zur Darstellung von Veränderungen im Motorcortex. Dazu sollten die Probanden mit ihren Schneidezähnen 6 Serien mit je 10 „hold an split“-Tasks absolvieren. Die Haltekraft war nach dem Training signifikant geringer, die Amplitude der MEPs größer und das Motorkortex Areal des M. masseter vergrößert. Diese Effekte traten für den Vergleichsmuskel ohne Training nicht auf. Somit konnten sie zeigen, dass ein kurzzeitiges Training signifikante Zeichen für Neuroplastizität auslösen kann (Zhang et al., 2016). Im Gegensatz dazu stehen die Untersuchungen von Kumar et al. von 2014 und von Lu et al. aus dem Jahr 2013. Kumar et al. diskutierten, dass durch ein 60-minütiges „hold and split“-Training eines einzelnen Schneidezahnes keine signifikante Senkung der Variabilität der Kaukraft und der EMG-Aktivität zu beobachten ist (Kumar et al., 2014). Lu et al. konnten in ihrer Studie nach einem 60-minütigen „tooth clenching“-Training keine Effekte auf die kortikale Repräsentation oder die MEPs des M. masseters zeigen. Aus dem Training resultiere jedoch eine gesteigerte Performance, wie sie auch schon für „hold and split“-Versuche (Kumar et al., 2015) gezeigt werden konnte (Lu et al., 2013).

1.5 Kauen

Eine gesunde Kaufunktion ist ein wichtiger Aspekt oraler Gesundheit. Einschränkungen in der Kaufunktion können zu einem schlechten Ernährungszustand und somit zu kardiovaskulären, körperlichen oder auch kognitiven Problemen führen (Morquette et al., 2012). Der störungsfreie Kauvorgang verlangt ein hohes Maß an Koordination der oralen Hart- und Weichgewebe. Er beginnt mit dem Abbeißen eines Nahrungsstückes mit den Schneidezähnen, gefolgt von der Zerkleinerung der Nahrungsstücke durch Prämolaren und Molaren, welche die Nahrung mit Speichel vermengen und so zu einem leicht zu schluckenden Bolus verarbeiten (Lund und Kolta, 2006b). Eine solche Kausequenz, vom Abbeißen der Nahrung bis zum Schlucken des Bolus, setzt sich aus einzelnen Kauzyklen zusammen, welche jeweils aus einer Kieferöffnungs- und einer Schließbewegung bestehen (Slavicek, 2010).

Der grundlegende Rhythmus für diese Kauzyklen wird vom CPG generiert. Dieses einfache Kaumuster unterscheidet sich stark zwischen Tier und Mensch, aber auch zwischen einzelnen Individuen und sogar innerhalb einer Kausequenz – abhängig von extrinsischen und intrinsischen Faktoren (Lund, 1991; Woda et al., 2006). Extrinsische Faktoren wie die Härte, die Textur und die Größe der Nahrung haben über die peripheren Rezeptoren (PDL-Sensoren, Muskelspindeln) einen modulierenden Einfluss auf das Kaumuster (Anzahl der Kauzyklen, Dauer der Kauzyklen, EMG-Aktivität, Kaufrequenz, vertikale und laterale Ausdehnung der Kauschleife, Geschwindigkeit der Schließbewegung).



		Number of cycles	Sequence duration	EMG activity /sequence	EMG activity /cycle	Masticatory frequency	Vertical amplitude	Lateral amplitude	Closing velocity
Extrinsic factors	Hardness (from soft to hard)	↗ 10, 65, 66, 79, 81, 83	↗ 10, 25, 79, 83, 100	↗ 10, 65, 79, 83	↗ 10, 65, 78, 83	= 10, 79, 80, 83	→ 9, 10, 69, 79, 83, 84	→ 10, 81, 98	↘ 10, 32
	Physical properties (from elastic to plastic)	= 83	= 83	= 83	= 83	↘ 83	↗ 83	↗ 83	↗ 83
	Sample size	↗ 6, 84–86	↗ 6	↗ 82, 85, 88			↗ 6, 71, 85, 89	→ 85, 89	↗ 6, 87, 89
Intrinsic factors	Age	↗ 39, 44, 49	↗ 39, 44, 49	↗ 39, 49	Depends on food 39, 49	= 39	= 39	= 39, 50	
	Gender (from female to male)	= 36–39	= 39	↗ 39	= 38, 39	→ 36, 38, 39, 94	↗ 36–39	↗ 36	↗ 36,37
	Tooth loss (edentate)	↗ 48, 101	↗ 48	↗ 48	Depends on food 48, 56, 99	↘* 48, 56, 101, 102			↘ 101

Abb. 3: Veränderungen des Kaumusters durch extrinsische und intrinsische Faktoren aus Woda et al. 2006. Adaptation of healthy mastication to factors pertaining to the individual or to the food. Physiology&behavior 89, S. 28-35, 2006.

Die peripheren Rezeptoren (PDL-Sensoren und Muskelspindeln) geben Feedback über die Veränderung der Nahrungsbeschaffenheit während des Kauens, sodass das Kaumuster innerhalb einer Kausequenz adaptiert werden kann. Je größer und härter der Bolus, desto größer wird die vertikale Höhe (Amplitude) des Kauzyklus und umso länger dauert die Kausequenz bzw. umso größer wird die Anzahl benötigter Kauzyklen (Kausequenz), während die Kaufrequenz gleich bleibt (Slavicek, 2010; Woda et al., 2006; Lund, 1991). Die EMG-Aktivität steigt, je härter die Nahrung ist, und sinkt, wenn das Feedback durch die PDL-Sensoren unterbunden wird (s. Abschnitt 1.2.3), was die Wichtigkeit der Sensoren für die Adaptation an die Nahrung bzw. die Veränderung der Härte des Bolus während des Kauvorgangs hervorhebt. Ebenso steigt die Feuerrate der Muskelspindeln mit der Härte der Nahrung und auch hier sinkt die Aktivität bei Entfernung des Feedbacks (Lund und Kolta, 2005).

Intrinsische Faktoren wie das Geschlecht, das Alter und die allgemeinen interindividuellen Unterschiede wie z. B. die Anzahl der okkludierenden Zahnpaare, die Kaukraft oder die Speichelmenge spielen ebenfalls eine modifizierende Rolle (s. Abb. 3) (Rovira-Lastra et al., 2014; Woda et al., 2006).

Zu Beginn der Kausequenz treten hohe Kräfte (abhängig von der Konsistenz und Härte) und große Kauschleifen (vertikale Amplitude) auf. Mit zunehmender Anzahl an Kauzyklen innerhalb der Kausequenz sinken die Muskelaktivität und die vertikale Höhe der Kieferöffnung. Die größte Veränderung dieser Parameter erfolgt im Bereich zwischen 20 mm und 16 mm Kieferöffnung und stabilisiert sich im Bereich zwischen 16 mm und 12 mm (Schindler et al., 1998).

Physiologische Bewegungen zeichnen sich durch eine gesunde Variabilität aus. Ein Merkmal einer CMD ist beispielsweise das verminderte Bewegungsausmaß durch Schonung der schmerzhaften Bewegungsbereiche. Bei anhaltenden Schmerzzuständen kann eine bleibende Einschränkung der physiologischen Bewegungsvielfalt die Folge sein (Hellmann und Schindler, 2016). Eine Funktionseinschränkung des CMS zeichnet sich durch geringere Variabilität in der Bewegung aus. Schmerzen führen zu einer Veränderung der Muskelaktivität, was wiederum zu einer reduzierter Bewegungsgeschwindigkeit und zu einer eingeschränkten Bewegungsamplitude führt (Peck et al., 2010).

Natürliches, gesundes Kauen zeichnet sich ebenfalls durch Variabilität aus, z. B. im Wechsel der Kauseite während einer Kausequenz (Woda et al., 2006). Die meisten Individuen präferieren allerdings eine Seite beim Kauen. Verschiedene Studien zeigen unterschiedliche Ergebnisse zur Lateralität beim Kauen bzw. der präferierten Kauseite. Neben einer Studie von Christensen, die keine Präferenz für eine Seite zeigte (Christensen und Radue, 1985), beschreibt die Mehrzahl der Studien eine deutliche Präferenz für eine Kauseite, die häufig die rechte ist (Paphangkorakit et al., 2006; Rovira-Lastra et al., 2014; Zamanlu et al., 2012; Martinez-Gomis et al., 2009; Nissan et al., 2004).

Sie zeigten aber auch, dass die präferierte Kauseite tages- und nahrungsabhängig ist (Paphangkorakit et al,. 2006). Vor allem für harte Nahrung zeichnete sich eine deutlichere Präferenz bezüglich der Kauseite ab: So bevorzugten 73,68 % der Probanden beim Kauen harter Nahrung eine Kauseite, während es beim Kauen von weicher Nahrung nur 57,89 % waren (Zamanlu et al., 2012). Trotz fehlender Zähne auf der rechte Seite wiesen Probanden in einer Studie von Nissan et al. eine Präferenz für diese Seite auf (Nissan et al., 2004). Weiterhin gibt es einen beschriebenen Zusammenhang zwischen der Seite mit der besseren Kauleistung und der bevorzugten

Kauseite (Rovira-Lastra et al., 2014). Es gibt Hinweise, dass die präferierte Kauseite zudem in Zusammenhang mit der höheren Anzahl an Okklusionskontakten in IKP und der höheren lateralen Beißkraft steht (Martinez-Gomis et al., 2009). Allgemein kann eine Lateralität bei der Händigkeit, der Füßigkeit, dem bevorzugten Ohr oder Auge beobachtet werden (Nissan et al., 2004). Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der Händigkeit und der bevorzugten Kauseite brachten gegensätzliche Ergebnisse. Barcellos et al. untersuchten den Zusammenhang zwischen der präferierten Kauseite und der Lateralität der Händigkeit, Füßigkeit, beim Sehen und Hören für unterschiedliche Altersgruppen. Bei der Altersgruppe der 3- bis 5-Jährigen (Milchzahngebiss) zeigte sich eine schwache Korrelation zum bevorzugten Ohr beim Hören. In der Gruppe der 6- bis 12-Jährigen (Wechselgebiss) korrelierten Kauen und Händigkeit sowie Kauen und Füßigkeit, in der Gruppe der vollbezahnten Erwachsenen (18 – 47 Jahre) (Nissan et al,. 2004) wurde ein Zusammenhang zwischen Kauen und Händigkeit sowie zur Füßigkeit und zum bevorzugten Ohr beim Hören deutlich (Barcellos et al., 2012). Diese Ergebnisse unterstreichen das Resultat der Studie von Nissan et al., welche ebenfalls eine Korrelation zwischen der Händigkeit, der Füßigkeit, dem bevorzugten Auge und dem bevorzugten Ohr zur präferierten Kauseite zeigte, wobei die Lateralität bei der Händigkeit am stärksten ausgeprägt war (Nissan et al., 2004). Martinez-Gomis et al. verneinten jedoch diesen Zusammenhang (Martinez-Gomis et al., 2009). Aufgrund der divergierenden Ergebnisse ist bisher nicht eindeutig geklärt, ob die Steuerung der Kauseite zentral geschieht oder von äußeren Einflüssen wie dem peripheren Feedback, der Zahnform oder möglichen Interferenzen bei der Laterotrusion abhängig ist (Nissan et al., 2004). Da mehrere Studien eine deutliche Präferenz für die rechte Seite offenlegten, könnte dies ein Hinweis auf eine zentrale Steuerung der bevorzugten Kauseite sein (Nissan et al., 2004; Martinez-Gomis et al., 2009; Barcellos et al., 2012).

1.6 Zielstellung

Ziel dieser Studie war es, den Einfluss einer einwöchigen okklusalen Entkopplung durch plane Aufbissplateaus der Molaren auf die physiologische Bewegung beim Kieferschluss in die IKP und beim Kauen zu erfassen. Hauptziel der Studie war die Klärung der Fragen, welchen Effekt die Entkopplung der IKP-Position auf deren Stabilität und die Variabilität beim Kieferschluss in die IKP hat und ob sich nach der Entkopplung messbare Veränderungen im Kaumuster zeigen (Hellmann et al., 2021).

Zusätzlich sollte untersucht werden, welchen Effekt ein 10-minütiges Training auf die Variabilität einer Schließbewegung des Unterkiefers in eine definierte Zielposition fernab der IKP hat. Hiermit sollte evaluiert werden, ob bereits 10 Minuten Unterkiefertraining ausreichen, um messbare Effekte der Variabilität beim Kieferschluss in diese Trainingsposition zu erzielen (Hellmann et al., 2021).

2 Material und Methoden

Die vorliegende Studie mit der Antragsnummer 346/16 wurde am 07.12.2016 von der Ethikkommission der Universität Ulm genehmigt. Die Probanden wurden mündlich und schriftlich anhand der Probandeninformation über den Studienablauf informiert und bestätigten ihr Einverständnis zur Teilnahme durch Unterschrift (Hellmann et al., 2021). Alle Daten wurden vor der weiteren Verarbeitung pseudonymisiert.

2.1 Probanden

Die Untersuchungen wurden an 14 gesunden Probanden (9 ♀, 5 ♂) durchgeführt. Die Rekrutierung erfolgte aus den Reihen der Studierenden der Universität Ulm. Zum Zeitpunkt der Untersuchung waren die Personen zwischen 22 und 29 Jahren alt (Mittelwert ± SD: 24,5 ± 2,3 Jahre). Anhand eines Anamnesebogens (Anamnesebogen des Universitätsklinikums Ulm, s. Anhang) und einer dentalen Befundaufnahme wurden allgemein- und zahnmedizinische Vorerkrankungen erfragt bzw. untersucht. Alle Probanden wurden im Hinblick auf die zuvor festgelegten Einschlusskriterien eines funktionsgesunden, eugnathen Gebisses sowie auf das Ausschlusskriterium Symptome einer CMD untersucht (Hellmann et al., 2021).

Der CMD-Kurzbefund nach Ahlers und Jakstat (Ahlers und Jakstat, 2015) umfasst die folgenden 6 Merkmale der CMD:

1. Asymmetrie der Mundöffnung
2. Einschränkung der Mundöffnung
3. Kiefergelenksgeräusche
4. Okklusale Geräusche
5. Muskelpalpation schmerzhaft
6. Traumatische Exzentrik

Durch Addition der positiv befundeten Merkmale wurde ein Screening-Index berechnet (Index ≤ 1: das Vorliegen einer CMD ist unwahrscheinlich, Index ≥ 2: das Vorliegen einer CMD ist wahrscheinlich). Es wurden nur Probanden mit einem Index ≤ 1 in die Studie eingeschlossen.

2.2 Versuchsaufbau

2.2.1 Vorbereitende Maßnahmen

Zu Beginn der Studie wurden von jedem Probanden Abformungen des Ober- und Unterkiefers mit Impregum (Polyether Abformmaterial, 3M / Neuss) angefertigt. Anschließend erfolgte im zahntechnischen Labor die Anfertigung der OK- und UK-Modelle aus Superhartgips (Fujirock EP, GC/Leuven). Zur Übertragung der schädelbezogenen Lage des OK-Modells in den Artikulator wurde ein arbiträrer Gesichtsbogen (Artex-Gesichtsbogen, Amann Girrbach AG / Koblach Österreich) verwendet. Im Sinne einer patientenanalogen Montage der Unterkiefermodelle wurden Bissregistrate in habitueller Okklusion aus Registriersilikon bei den Probanden angefertigt (FutarD, Bissregistratmaterial auf Vinylsiloxanbasis, Kettenbach GmbH / Eschenburg).

Herstellung der Trainingsgeräte

Für jeden Probanden wurden Modelle aus Superhartgips (HS-Superhartgips Natur, Henry Schein / Langen) hergestellt. Die OK-Modelle wurden mithilfe des zum Artex-System gehörenden Übertragungsschlittens (Artex Übertragungsschlitten, Amann Girrbach AG /Koblach Österreich) unter Verwendung eines Splitcast-Systems (HS-Splitcast-System, Henry Schein / Langen) im Artikulator montiert (Hellmann et al., 2021). Die Modellmontage der UK-Modelle erfolgte ebenfalls unter Verwendung des oben genannten Splitcast-Systems unter Zuhilfenahme des vorliegenden Bissregistrates. Auf diesen Modellen wurden Kunststoffschienen im Tiefziehverfahren hergestellt (Duran 1,5 mm, Scheu Dental / Iserlohn) (Hellmann et al., 2021). Im OK wurde im Streuverfahren ein Plateau aus Kunststoff auf die Schiene aufgetragen (Steady Resin, Scheu Dental / Iserlohn). Dieses zur Okklusionsebene parallele Plateau wurde lateral von den Zähnen 12 und 22 begrenzt und maß vom Inzisalpunkt aus je 10 mm nach anterior und posterior. Die Sperrung des Bisses durch die eingesetzten Trainingsgeräte lag bei 6,0mm (Hellmann et al., 2021). Gemessen wurde diese Sperrung frontal im Bereich der Zähne 11 und 41 an festgelegten Fixpunkten im Bereich der Umschlagfalten (apikalster Punkt der Umschlagfalte im UK bzw. OK). Der Inzisalstift des Artikulators wurde dann auf die so ermittelte Bisssperrung eingestellt.



Abb. 4: Oberkiefer (OK)-Trainingsgerät mit Trainingsplateau (parallel zur Okklusionsebene, 10mm nach anterior und posterior vom Inzisalpunkt aus gemessen, lateral begrenzt durch die Zähne 12 und 22)

In die UK-Schiene wurde zwischen den Zähnen 31 und 41 ein Kugelanker (0,7 mm Scheu Dental / Iserlohn) eingearbeitet. Vestibulär wurde ein T-Attachment von Zebris befestigt (s. Abschnitt 2.2.2) (Hellmann et al., 2021).



Abb. 5: Unterkiefer (UK)- Trainingsgerät mit eingearbeitetem Kugelanker (zwischen den Zähnen 31 und 41) und vestibulär befestigtem T- Attachment

Das Plateau an der Oberkieferschiene diente zur Markierung der Zielposition für das Unterkiefertraining.
Die Position wurde probandenspezifisch wie folgt ermittelt (Hellmann et al., 2021):

- Einsetzen der Schienen in OK und UK
- Anzeichnen der maximale Protrusionsbahn (10,4 mm ± 1,0) aus habituellem Kieferschluss auf dem Plateau des OK-Trainingsgerätes mithilfe von Okklusionsfolie
- Festlegung der Trainingsposition (TP) bei 50 % der protrusiven Bewegungsspur durch Markierung und Einfräsen einer zum Kugelkopf der UK-Schiene formkongruenten Vertiefung mit einem Rosenbohrer (Hartmetallfräse rund Handstück 0,7 mm, Komet / Lemgo)

Herstellung der Aufbissplateaus

Den Probanden wurden auf den Unterkieferseitenzähnen plane Aufbissplateaus eingesetzt, um während der gesamten Dauer der Studie das Einnehmen der Interkuspidation zu unterbinden (Hellmann et al., 2021). Die Plateaus wurden für jeden Probanden individuell zunächst im Artikulator vorbereitet. Die Aufbissplateaus wurden jeweils für die Zähne 35-37 und 45-47 hergestellt (Hellmann et al., 2021). Um einen sicheren Halt der Aufbisse über die gesamte Dauer des Experimentes zu gewährleisten, wurden die Zahnäquatoren leicht gefasst. Die Bisssperrung wurde so gering wie prozedural möglich gehalten und betrug im Durchschnitt 3,5 mm ± 0,6 (Hellmann et al., 2021). Die Messung der Bisssperrung an den im Artikulator fixierten Gipsmodellen erfolgte im Bereich der Zähne 11 und 41 an festgelegten Fixpunkten im Bereich der Umschlagfalten (apikalster Punkt der Umschlagfalte im UK bzw. OK). Die Aufbissplateaus wurden zusätzlich mit provisorischem Zement auf Zinkoxid-Eugenol-Basis (Kerr / Orange, Kalifornien) intraoral fixiert (Hellmann et al., 2021). Durch die Bisssperrung wurde die natürliche Front-/ Eckzahnführung der Probanden aufgehoben. Die unilaterale Gruppenführung auf den Plateaus wurde nach dem Zementieren erneut überprüft und gegebenenfalls adjustiert (Hellmann et al., 2021). Es erfolgte eine Mundhygieneinstruktion sowie die Anweisung, zur Schonung der Aufbissplateaus auf harte oder klebrige Nahrung wie etwa Nüsse oder Kaugummi zu verzichten (Hellmann et al., 2021).

Tabelle 2: Durchschnitts-, Maximal- und Minimalwerte (in mm) sowie Standardabweichungen der zur Herstellung der Trainingsgeräte ermittelten Werte (14 Probanden, Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017), Ø= Durchschnittswert, SD= Standardabweichung, max. =Maximum, min. = Minimum

	Ø	SD	max.	min.
max. Protrusion	10,4 mm	1,0	12,0 mm	9,0 mm
Trainingsposition	5,2 mm	0,5	6,0 mm	4,5 mm
Bisssperrung durch Aufbissplateaus	3,5 mm	0,6	5,0 mm	3,0 mm
Bisssperrung durch Trainingsgeräte	6 mm	-	-	-

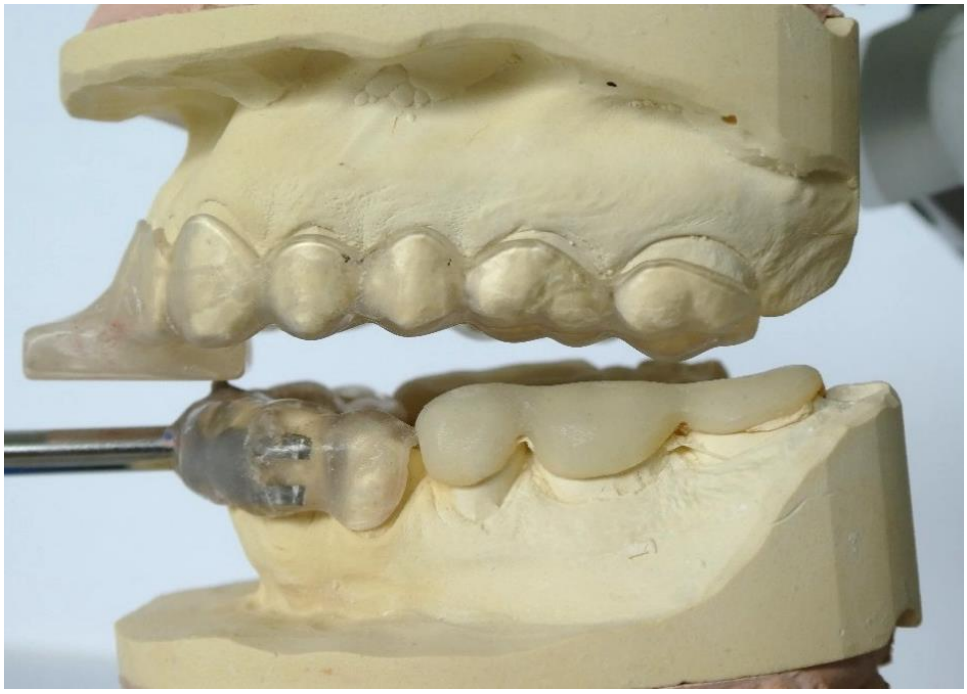


Abb. 6: probandenindividuelle Aufbissplateaus und Oberkiefer (OK)- und Unterkiefer (UK)-Trainingsgeräte auf dem Modell in lateraler Ansicht, Used with permission of John Wiley & Sons Ltd, from „Effects of preventing intercuspation on the precision of jaw movements" Hellmann et al., Journal of oral rehabilitation 48, 4, 2021; permission conveyed trough Copyright Clearance Center, Inc.

2.2.2 Messapparaturen

Zebris CMS20JMA

Das Zebris Kieferregistriersystem CMS20JMA (Jaw Movement Analyser, zebris Medical GmbH / Isny) erfasst nach der Methode der Laufzeitmessung von Ultraschallimpulsen Bewegungen des Unterkiefers in allen Ebenen. Dazu senden die Ultraschallgeber im Senderbogen Signale an die im Empfängerbogen integrierten Empfängermodule. Die Bewegungen werden in Echtzeit am Computerbildschirm angezeigt und nach Abschluss jeder Messung gespeichert. Die Verarbeitung und Speicherung der Daten erfolgt mit WinJaw (WinJaw v10.6.92).

Die Daten wurden in Tabellenform als ASCII (American Standard Code for Information Interchange) Datei mithilfe der in WinJaw vorgesehenen Funktion zur weiteren Bearbeitung und Analyse exportiert (s. Abschnitt 2.4).

Kalibrierung der Referenzebene

Für jede Messung mit dem JMA ist die Zuordnung einer schädelbezogenen Referenzebene notwendig. Diese muss für jeden Messzeitpunkt und nach jeder Lageveränderung des Empfängerbogens innerhalb einer Sitzung, ob durch ungewollte Bewegungen des Probanden oder durch gewolltes Abnehmen des Bogens, neu registriert werden. Im Sinne der hier geforderten Reproduzierbarkeit wurden zu jedem der Messzeitpunkte die für die Kalibrierung der Referenzebene notwendigen Messpunkte mithilfe eines zu diesem Zweck präparierten Gesichtsbogens standardisiert und reproduzierbar auf das Gesicht der Probanden übertragen. Hierfür wurde links und rechts jeweils 10 mm anterior der Ohr-Olive des Gesichtsbogens ein Referenzpunkt markiert (s. Abb. 7). Die daraus resultierende arbiträre Scharnierachse generierte zusammen mit dem rechten Infraorbitalpunkt eine Ebene, welche nachfolgend als Referenzebene systemkonform mit dem Taststift am Senderbogen eingemessen wurde (s. Abb. 8).

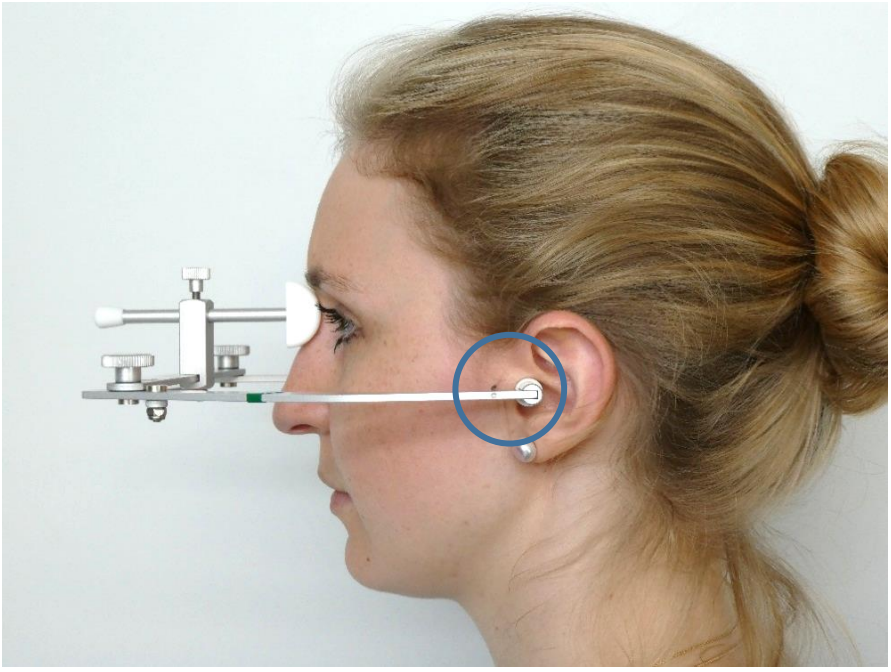


Abb. 7: angelegter Gesichtsbogen mit standardisiertem Referenzpunkt (10mm anterior der Ohr-Olive) zur Markierung der Referenzpunkte auf der Haut, Abdruck mit Einverständnis der abgebildeten Person

Befestigung der Messapparatur

Zur Befestigung der Empfängersensorik am Kopf wird der Messbogen mithilfe einer Nasenstütze am Nasion aufgesetzt. Am Hinterkopf befinden sich zwei weitere Stützen, die hinter den Ohren anliegen. Zur Lagesicherung erfolgt eine zusätzliche Fixierung über ein Gummiband am Hinterkopf sowie über ein Überkopfband, das seitlich angebracht ist (s. Abb. 8) (Hellmann et al., 2021). Die einzelnen Elemente lassen eine jeweils für den Probanden individuelle Anpassung an die Kopfgröße zu.

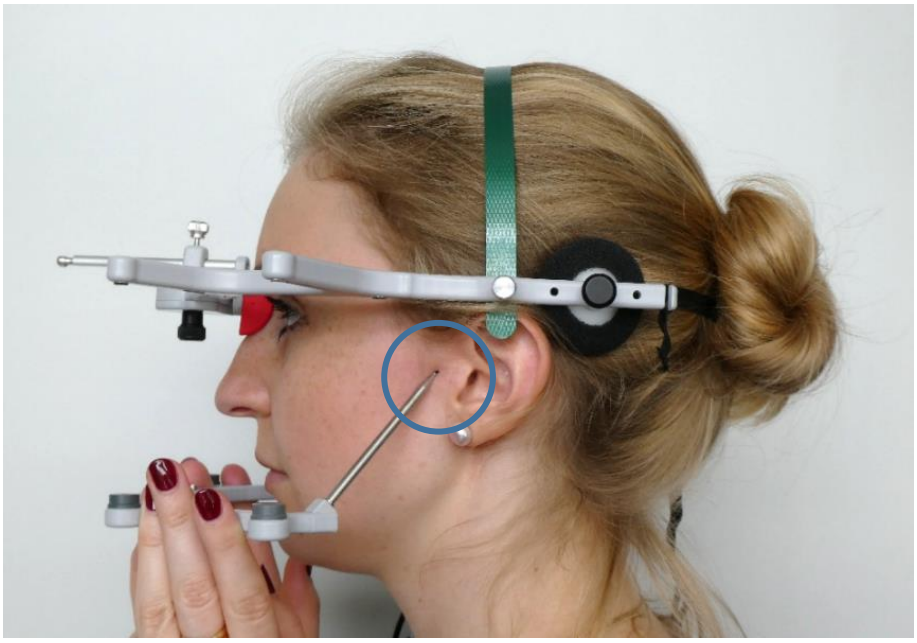


Abb. 8: angelegter Empfängerbogen; Senderbogen mit Taststift zur Festlegung der Referenzebene anhand der zuvor auf der Haut markierten Referenzpunkte (Taststiftspitze zeigt auf den markierten Referenzpunkt), Abdruck mit Einverständnis der abgebildeten Person

Der Senderbogen wird paraokklusal an den Labialflächen der Unterkieferinzisivi befestigt. Das t-förmige Attachment (im folgenden T-Attachment genannt) wurde mittels ProTemp4 (Composite für temporäre Kronen und Brücken, 3M Espe / Neuss) an die Kontur der Zähne angepasst (Hellmann et al., 2021). Die so entstandenen Impressionen erlauben eine eindeutige Reposition und Adaptation an die UK-Frontzähne. Der Kieferschluss sowie alle dynamischen Bewegungen des Unterkiefers waren störungsfrei möglich (s. Abb. 9B). Das so individualisierte T-Attachment wurde temporär mit Cyan-Acrylat (Instant Fix, Henry Schein / Langen) auf die zuvor getrockneten Zähne aufgeklebt (Hellmann et al., 2021) und für alle Messungen verwendet, bei denen die Probanden nicht die Trainingsgeräte (UK-Schiene mit eingearbeitetem T-Attachment) trugen.

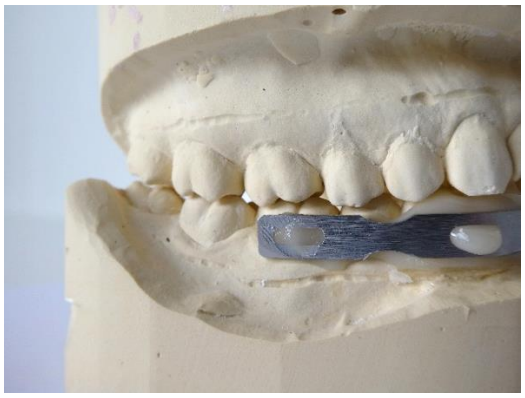
A)  B) 

Abb. 9A: T-Attachment an die Unterkiefer (UK)-Inzisivi angepasst, Ansicht von frontal Abb. 9B: störungsfreie Okklusion

Alternativ konnte der Senderbogen an dem in der UK-Schiene eingearbeiteten T-Attachment (s. Abb.5) befestigt werden. Dieses Attachment wurde für alle Messungen verwendet, bei denen sich die Trainingsschienen im Mund des Probanden befanden (Hellmann et al., 2021).

Oberflächen-EMG

Bei der Befestigung des Empfängerbogens am Kopf besteht das Risiko einer Relativbewegung der Messbögen zueinander. Eine solche würde zu einer unerwünschten Beeinflussung der Messwerte führen (Hellmann et al., 2021). Bewegungen der Stirn werden durch die Kontraktion der entsprechenden mimischen Muskulatur herbeigeführt. Um mögliche Messfehler durch Bewegungen des JMA bereits während der Messung erkennen zu können, wurde ein Oberflächenelektromyogramm (EMG) eingesetzt (Active Two, BioSemi / Amsterdam) (Hellmann et al., 2021). Dazu wurden zwei Oberflächenelektroden (Maße gesamt: 17 mm Länge * 11 mm Breite * 4,5 mm Höhe, Durchmesser der Ag-Cl Elektrode: 4 mm, FLAT Active Electrodes für Active Two, BioSemi / Amsterdam) mit einem Interelektrodenabstand von 2 cm auf der Stirn befestigt (Ableitung M. frontalis) (Hellmann et al., 2021). Die Position der Elektroden wurde mittels Lineal ermittelt und lag im Abstand von 2 cm rechts der Gesichtsmittellinie. Zwei Elektroden auf Nasenrücken und Mastoid dienten als Referenzelektroden. Zuvor wurde die Haut an den entsprechenden Stellen mit Alkoholtüchern gesäubert. Wurden Kontraktionen des M. frontalis im EMG registriert (MyoDaq: Tiefpassfilter 800 Hz, 24 Bits pro Sample, Abtastrate 4096 Samples pro Sekunde, Auflösung 31.25 nV pro Bit, Echtzeitübertragung am Computerbildschirm: MyoView),

wurde die laufende Zebrismessung gestoppt und verworfen. Nach erneuter Kalibrierung des Systems wurde die Messung wiederholt (Hellmann et al., 2021).

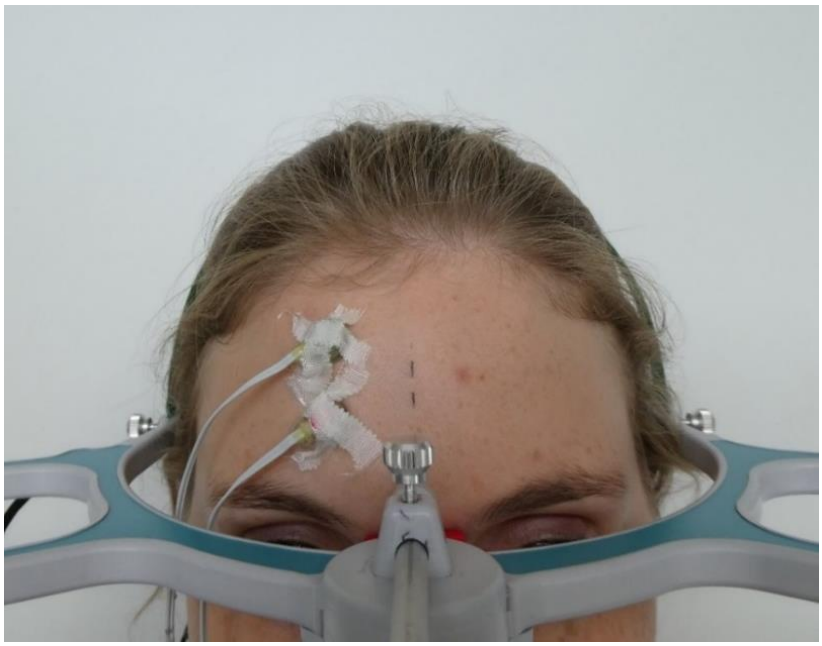


*Abb. 10: Die Elektromyogramm (EMG)-Elektroden (FLAT Active Electrodes für Active Two, BioSemi / Amsterdam, 17mm*11mm*4,5mm, Durchmesser: 4mm) wurden im Abstand von 2cm rechts der markierten Gesichtmittellinie auf der Stirn platziert. Der angelegte Empfängerbogen ist ebenfalls zu sehen.*

2.3 Versuchsdurchführung

2.3.1 Übersicht

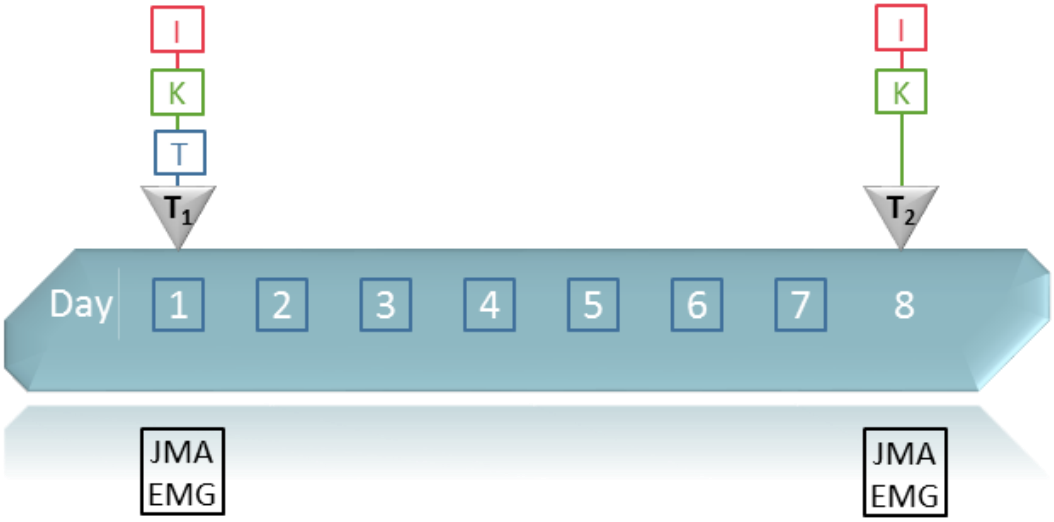


*Abb. 11: Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Versuchsdurchführung Tag 1-8 (Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017), blauer Rahmen Tag 1-7 = Aufbisse in situ, **I** (rot) = Messung „IKP"(Interkuspidation), **K** (grün) = Messung „Kauen", **T** (blau) = 10-minütiges Training, **JMA / EMG** = Messung erfolgte mit JMA (Zebris) und EMG (Oberflächenelektromyogramm)*

Die vorab notwendige erste Sitzung zur Vorbereitung der Trainingsgeräte und Aufbissplateaus (s. Abschnitt 2.2.1) stand in keinem zeitlichen Zusammenhang zu den weiteren Studientagen. Die Studientage 1-8 erfolgten ohne Unterbrechung an aufeinanderfolgenden Tagen (s. Abb. 11).

2.3.2 Messungen

Messung „IKP“

Drei Wiederholungen des Kieferschlusses in die habituelle IKP wurden mithilfe des JMA aufgezeichnet. Dazu wurde die Messapparatur mit dem T-Attachment auf den Labialflächen der UK-Inzisivi befestigt (s. Abschnitt 2.2.2) (Hellmann et al., 2021). Die Messung wurden zu den Zeitpunkten T_1 und T_2 durchgeführt (Tag 1 und Tag 8) (Hellmann et al., 2021).

Messung „Kauen“

Für die JMA-Messung beim Kauen (T_1 und T_2) wurde das T-Attachment vestibulär auf den Labialflächen der UK-Inzisivi befestigt (Hellmann et al., 2021) . Wie zuvor auch bei den Messungen zur IKP war die Okklusion noch nicht (T_1) bzw. nicht mehr (T_2) durch die Aufbissplateaus gesperrt. Als bekannte Testnahrung dienten vegetarische Fruchtgummi (Lagerung im Klimaschrank bei 21°) (Hellmann et al., 2021). Die Versuchsleitung legte die Testnahrung bei geöffnetem Mund auf die Zunge des Probanden. Zu Beginn der Messung befand sich die Testnahrung auf der Zunge und die Zähne standen in Okklusionskontakt (Hellmann et al., 2021). Nach dem Start der Messung wurde die Testnahrung mit der Zunge zwischen die Zahnreihen gebracht und in 20 Kauzyklen (= eine Kausequenz) zerkaut. Die Versuchsleitung zählte dabei die Kauzyklen (Hellmann et al., 2021). Der Proband wurde angewiesen, möglichst natürlich zu kauen. Für jede der drei Kausequenzen wurde ein neues Stück Testnahrung verwendet. Der Proband durfte am Ende jeder Messung die verbliebende Testnahrung vollständig zerkauen und schlucken.

Unterkiefertraining

Am ersten Versuchstag wurde zusätzlich das Unterkiefertraining mit den eigens dafür entwickelten Trainingsgeräten (s. Abschnitt 2.2.1) durchgeführt. Das 10-minütige Training fand ausschließlich unter Supervision des Versuchsleiters statt (Hellmann et al., 2021).

Dem Probanden wurden die individuell hergestellten OK- und UK-Schienen in den Mund eingesetzt. Für die Messungen und das Training nahm der Proband eine bequeme, aufrechte Sitzposition mit gerade ausgerichtetem Blick in den Spiegel ein (Hellmann et al., 2021).

Aus der zuvor probandenspezifisch markierten Vertiefung heraus (TP) sollte der Proband nun Öffnungs- und Schließbewegungen durchführen. Ziel war es, die TP mit jeder Schließbewegung zu treffen. Traf der Proband diese nicht sofort, sollte diese auf dem Plateau gesucht werden (Hellmann et al., 2021).

Erst nach dem erfolgreichen sensorischen Feedback durch die Vertiefung erfolgte die nächste Kieferöffnung (Hellmann et al., 2021). Dieser Zyklus wurde 10 Minuten lang wiederholt.

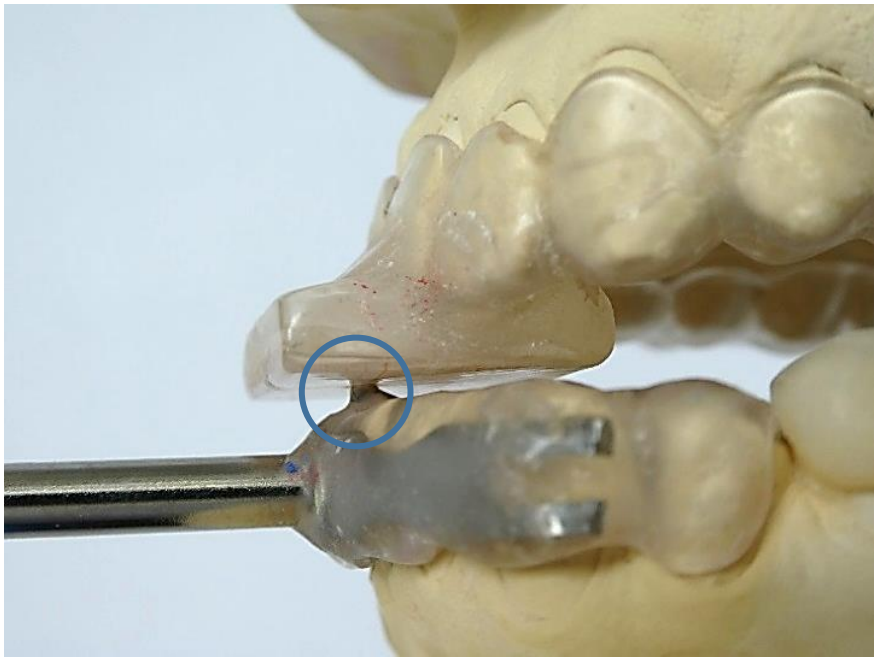


Abb. 12: Trainingsposition (TP); Die Kugel des Unterkiefer (UK)- Traingsgerätes befindet sich in der Vertiefung auf dem Trainingsplateau des Oberkiefer (OK)- Trainingsgerätes; Ansicht von lateral

Während des Unterkiefertrainings (T_1) wurden insgesamt 10 Schließbewegungen in die TP mithilfe des JMA aufgezeichnet. Hierfür wurde zu Beginn und am Ende des Trainings (nach 10 Minuten) die Schließbewegung des Unterkiefers auf dem Weg in die Zielposition 5 Mal aufgezeichnet (Hellmann et al., 2021).

Die EMG-Messungen erfolgten jeweils parallel zu den Zebrismessungen. Beide Geräte wurden zeitgleich gestartet, um auftretende Störungen zeitnah erkennen und beheben zu können (s. Abschnitt 2.2.2)

2.3.3 Zeitlicher Ablauf

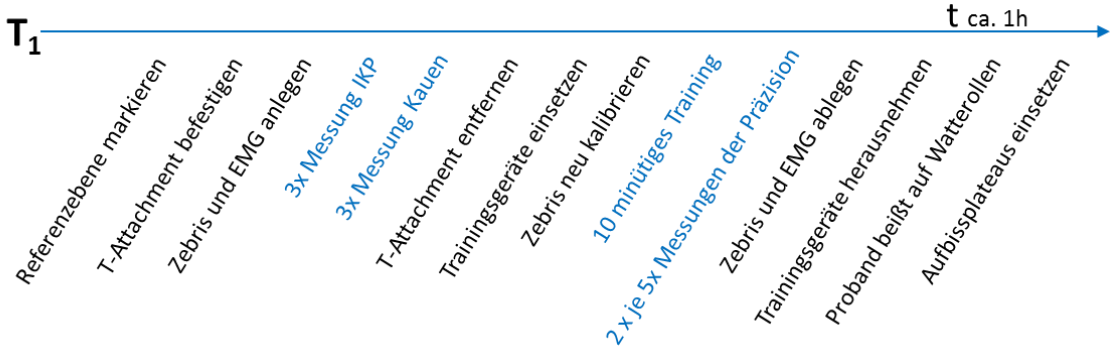


Abb. 13: Versuchsdurchführung zum Zeitpunkt T_1 (Tag 1 der Versuchsdurchführung, Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017); Arbeitsschritte in schwarz, Messungen in blau



Abb. 14: Versuchsdurchführung zum Zeitpunkt T_2 (Tag 8 der Versuchsdurchführung, Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017); Arbeitsschritte in schwarz, Messungen in blau

2.4 Genauigkeit JMA

In dem in der Studie untersuchten Nahbereich der IKP zeigten Hellmann et al. eine Genauigkeit des verwendeten Ultraschallmesssystems von 0,01 mm (Hellmann et al., 2014)

2.5 Auswertung der Rohdaten

Das Zebris-System generiert für jede Messung ein probandenspezifisches Koordinatensystem entsprechend der kalibrierten Referenzebene (s. Abschnitt 2.2.2) (Hellmann et al., 2021).

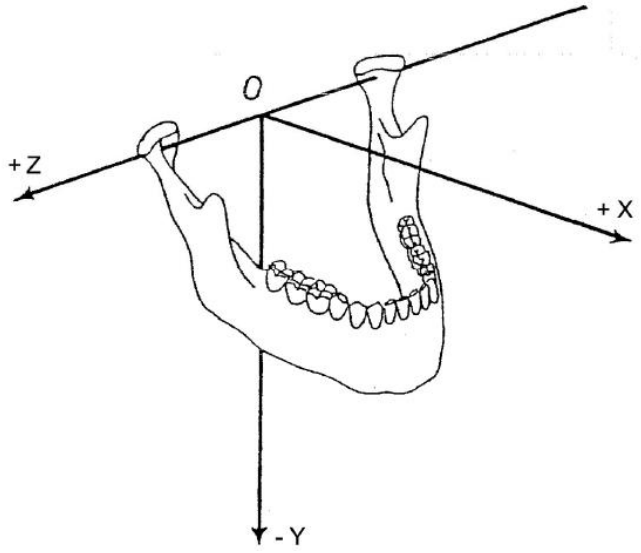


Abb. 15: Koordinatensystem Zebris CMS20JMA (Zebris Medical GmbH / Isny)

Der Winkel, die Länge und die Ausdehnung des Bewegungsprofils der Öffnungs- und Schließbewegung sind probandenabhängig, weshalb die Bewegungsspuren unterschiedlich im generierten Koordinatensystem lagen. Um eine Vergleichbarkeit der Messungen zu erreichen, wurde bei allen Schließbewegungen zunächst der Inzisalpunkt durch die Ermittlung der Umkehrpunkte der zyklischen Bewegung des Unterkiefers entlang der Y-Achse ausfindig gemacht (Hellmann et al., 2021). Typischerweise sammelten sich diese Umkehrpunkte in einem kleinen Volumen an. Schließbewegungen, deren Umkehrpunkte nicht in dieses Volumen fielen, wurden als unvollständig ausgeführt charakterisiert und nicht berücksichtigt. Weiterhin wurden Datenpunkte, die zu Öffnungsbewegungen gehörten, eliminiert.

Empirisch wurden die Datenpunkte in einem Annäherungsbereich von 20 mm ausgehend vom Nullpunkt festgelegt und in der Untersuchung berücksichtigt (s. Abb. 16B) (Hellmann et al., 2021), um die Variation zwischen den Schließbewegungen aufzuzeigen. Die Bewegungen folgen systematisch einer Bahn im Raum, die durch die Anatomie der Kiefergelenke determiniert wird. Um diesen Einfluss zu beseitigen, wurde eine Hauptkomponentenanalyse (HKA) der Daten durchgeführt. Mit dieser viel benutzten Technik werden absteigend von der Richtung der größten Datenvariation weitere Richtungen bestimmt, die einen gegebenen Datensatz charakterisieren. Als Resultat ergeben sich Einheitsvektoren entlang dieser Hauptrichtungen, die zueinander orthogonal sind und als die Basis eines Koordinatensystems angesehen werden können. Mittels dieser Vektoren wurden die Schließbewegungen so transformiert (d.h. gedreht), sodass sie entlang der Hauptrichtungen ausgerichtet waren (s. Abb. 16C) (Hellmann et al., 2021).

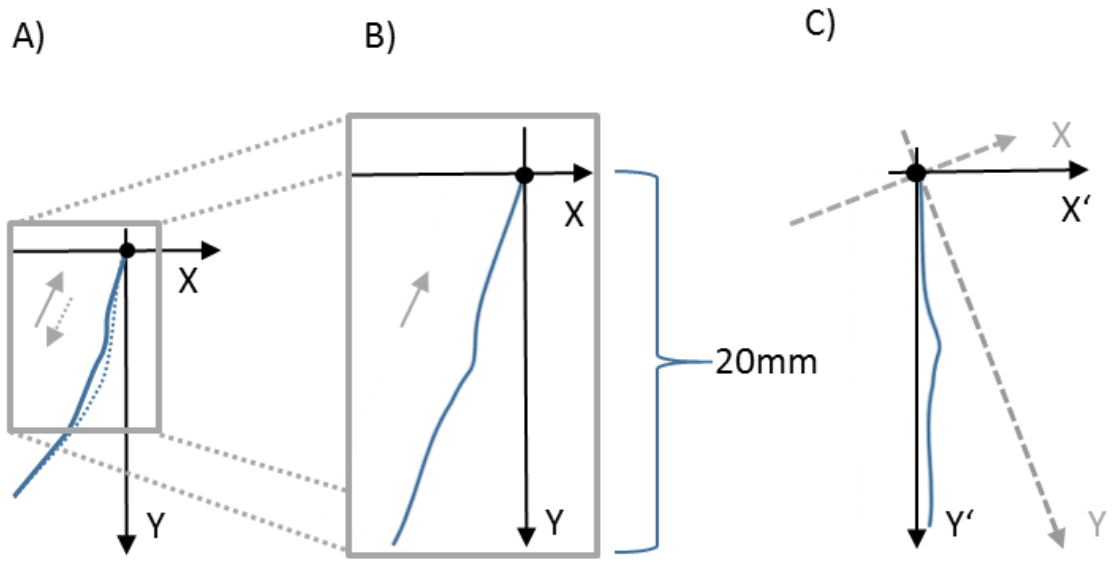


Abb. 16: Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist hier jeweils nur eine von fünf Bewegungsspuren gezeigt. Aufrichtung der Bewegungsspuren mittels Hauptkomponentenanalyse; A) Öffnungs- und Schließbewegung; gestrichelte Linie = Öffnungsbewegung, durchgezogene Linie = Schließbewegung; B) Auswertungsfenster: die letzten 20 mm der Schließbewegung; C) Aufgerichtete Bewegungsspur entlang der X´Y´-Achse (zum Vergleich die gestrichelte XY- Achse), Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017, Used with permission of John Wiley & Sons Ltd, from „Effects of preventing intercuspation on the precision of jaw movements“ Hellmann et al., Journal of oral rehabilitation 48, 4, 2021; permission conveyed trough Copyright Clearance Center, Inc.

Durch die Bestimmung einer Hauptkomponente für die Bewegungsspuren ergab sich eine Rotation des Koordinatensystems und dadurch eine Aufrichtung der Bewegungsspuren entlang der Y-Achse. Die probandenspezifische Lage im Raum wurde aufgelöst, sodass die Daten untereinander probanden- bzw. winkelunabhängig verglichen werden konnten.

Innerhalb des definierten 20 mm Auswertungsfensters wurden im Abstand von 1 mm horizontale Ebenen errichtet (s. Abb. 17) (Hellmann et al., 2021).

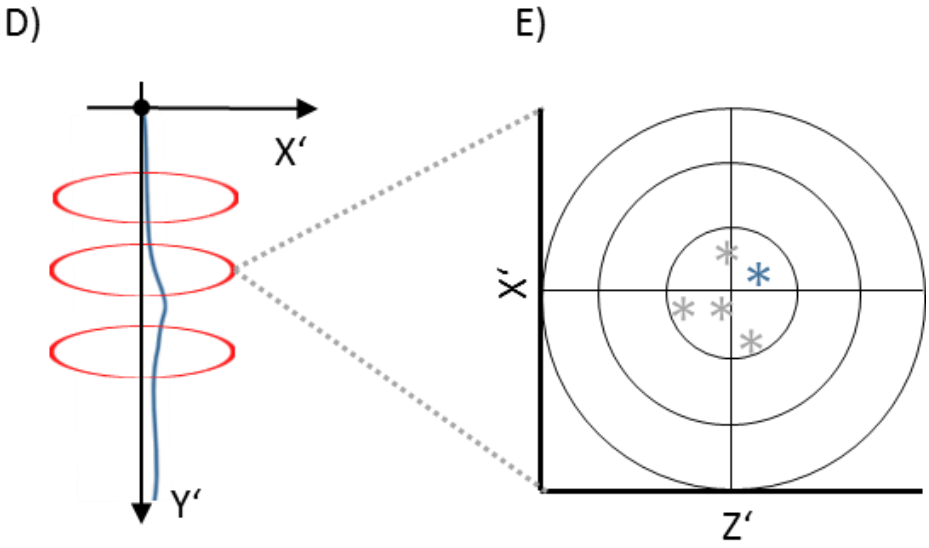


Abb. 17: Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist hier nur eine von fünf Bewegungsspuren gezeigt. D) Markierung der horizontalen Ebenen im Abstand von 1 mm; E) Aufsicht auf eine horizontale Ebene mit 5 Bewegungspunkten (aus 5 Bewegungsspuren), Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017, Used with permission of John Wiley & Sons Ltd, from „Effects of preventing intercuspation on the precision of jaw movements“ Hellmann et al., Journal of oral rehabilitation 48, 4, 2021; permission conveyed trough Copyright Clearance Center, Inc.

Jeder Punkt in der Ebene stellt einen Schnittpunkt der Schließbewegung mit der Schnittebene (Y´-Achse) dar. Für jeden Punkt wurde der Abstand zum Mittelpunkt gemessen. Der Mittelwert aus diesen 5 Schließbewegungen wurde für jeden Probanden ermittelt (Hellmann et al., 2021).

2.6 Auswertung der Kauzyklen

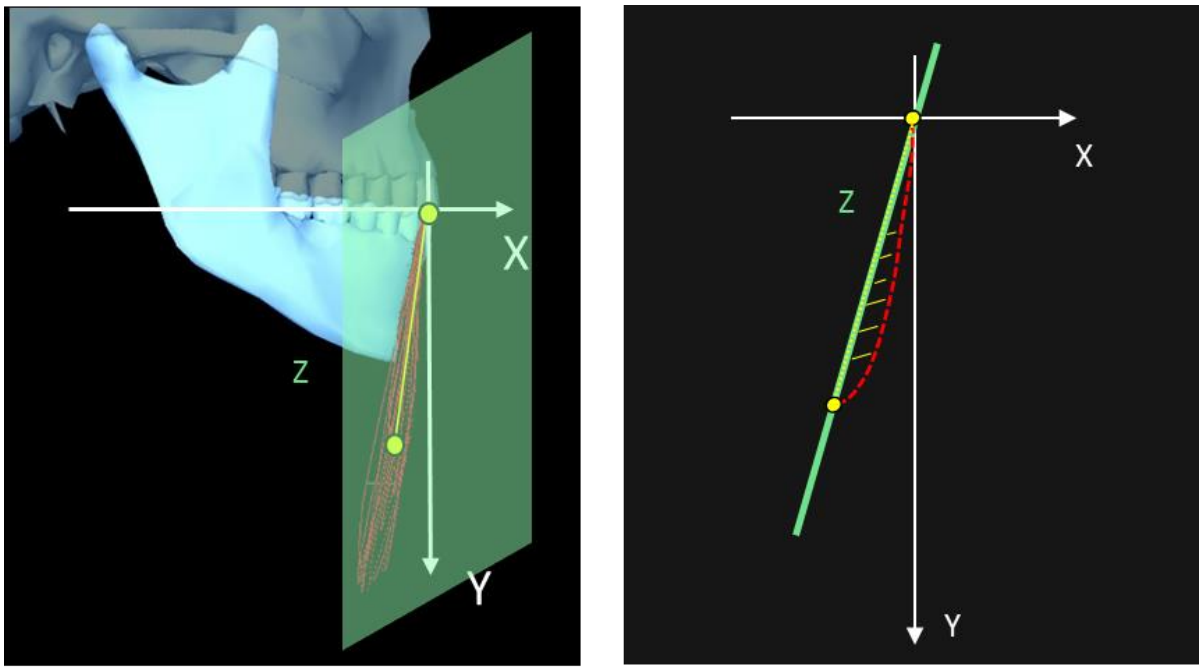
Die 20 Kauzyklen eines Probanden wurden jeweils in die drei Phasen P1-P3 unterteilt, welche unterschiedliche Stadien in Bezug auf die Nahrungszerkleinerung mit abnehmender Bolusgröße innerhalb einer Kausequenz repräsentieren. Unvollständige Kauzyklen und Kauzyklen, die zu weit entfernt vom Nullpunkt lagen (dynamisches Kriterium für jeden einzelnen Probanden), wurden ausgeschlossen (Hellmann et al., 2021). Daraus resultierend gibt es probandenspezifische Unterschiede in der Anzahl der verwendeten Kauzyklen innerhalb einer Phase.

Die Kauzyklen wurden auf folgende Parameter hin untersucht (Hellmann et al., 2021):

- Vertikale Amplitude der Kauschleife
- Fläche der Kauschleife
- Laterale Breite der Kauschleife
- Niveau der lateralen Breite der Kauschleife
- Präferierte Kauseite

Die Auswertung der Kauschleifen erfolgte analog zum oben genannten Prozedere durch Export der Daten aus Zebris im ASC II Format und Weiterverarbeitung, diesmal jedoch ohne Hauptkomponentenanalyse. Grundlage der Auswertung war die Frontalebene (YZ), wobei alle Punkte der Kauschleife auf die Ebene Z projiziert wurden. Dafür wurde die Ebene Z als Ebene durch die Verbindungsgerade durch die Umkehrpunkte der Kauschleife definiert (Hellmann et al., 2021). Bewegungsspuren vor oder hinter dieser Ebene (in Richtung der X-Achse) wurden auf die Ebene Z projiziert, sodass eine einfachere Betrachtung in einer Ebene (YZ) möglich ist (s. Abb. 18) .

A)



B)

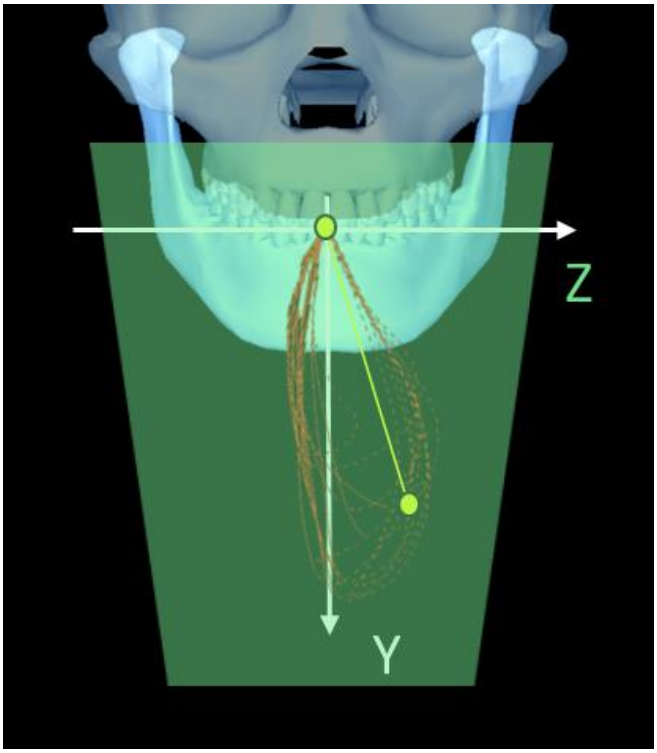


Abb. 18: Beschreibung der Auswertungsebenen, Einführung der Ebene Z (definiert als Verbindungsebene durch die Umkehrpunkte der Kauschleife). Bewegungsspuren außerhalb dieser Ebene (in Richtung der X- Achse) wurden auf die Ebene Z projiziert um eine einfacherer Betrachtung in einer Ebene (YZ) zu ermöglichen; A) Ansicht von lateral; B) Ansicht von frontal; Kauschleifen und Koordinatensystem in Bezug zum Schädel; Z-Achse (grün) = Projektionsbene; Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017

2.6.1 Vertikale Amplitude der Kauschleife

Die vertikale Amplitude einer Kauschleife wurde definiert als deren Umkehrpunktabstand in der Frontalebene (YZ-Ebene, s. Abb. 15).

Folgende Grafik zeigt exemplarisch die Bewegungsspuren der Kauschleifen und die Bestimmung der Umkehrpunktabstände durch Bestimmung der Umkehrpunkte:

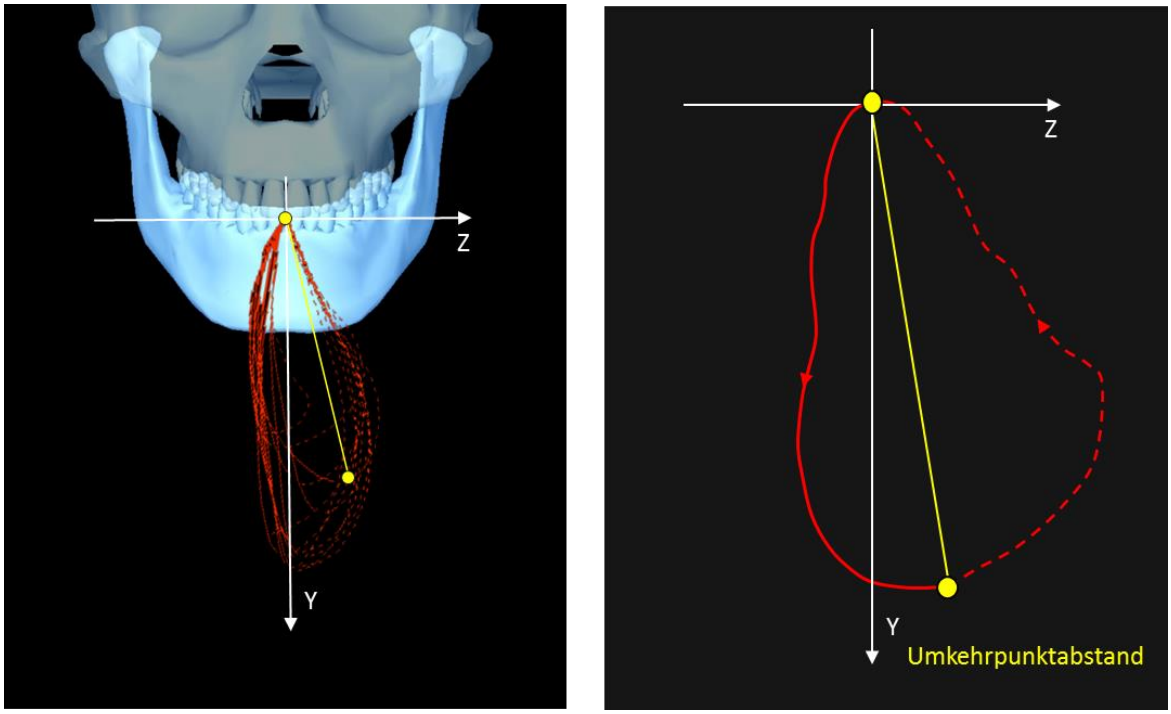


Abb. 19: Vertikale Amplitude der Kauschleife in der Frontalebene, links: Darstellung der Bewegungsspuren der Kauschleifen im Koordinatensystem (YZ-Ebene) in Bezug zum Schädel; rechts: Darstellung einer isolierten (fiktiven) Kauschleife im Koordinatensystem (YZ-Ebene); gelbe Punkte = Umkehrpunkte zwischen Öffnungs- und Schließbewegung, Verbindungslinie in gelb = Umkehrpunktabstand = vertikale Amplitude (Höhe) der Kauschleife, Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017

2.6.2 Fläche der Kauschleife

Die Fläche der Kauschleife wurde ebenfalls in der Frontalebene betrachtet. Diese entspricht der YZ-Ebene in dem durch das JMA generierten Koordinatensystem (s. Abb. 15).

Abbildung 20 zeigt exemplarisch die Fläche einer Kauschleife:

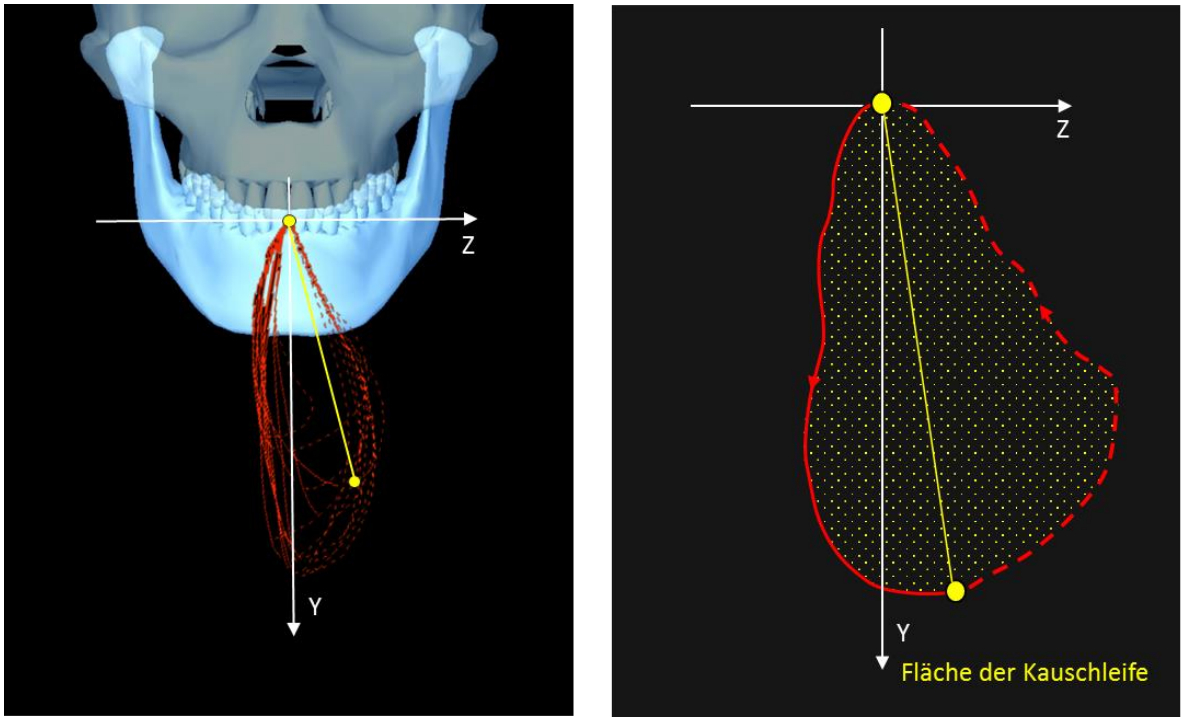


Abb. 20: Fläche der Kauschleife in der Frontalebene, links: Darstellung der Bewegungsspuren der Kauschleifen im Koordinatensystem (YZ-Ebene) in Bezug zum Schädel, rechts: Darstellung einer isolierten (fiktiven) Kauschleife im Koordinatensystem (YZ-Ebene), gelbe Punkte = Umkehrpunkte zwischen Öffnungs- und Schließbewegung, Verbindungslinie in gelb = Umkehrpunktabstand = vertikale Höhe der Kauschleife, gepunktetet Fläche innerhalb der Kaufschleife= Fläche der Kauschleife, Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017

2.6.3 Laterale Breite der Kauschleife

Die breiteste Stelle der Kauschleife wurde definiert als maximale laterale Breite der Kauschleife ausgehend von der Verbindungslinie der Umkehrpunkte. Bestimmt wurde diese ebenfalls in der Frontalebene (YZ-Ebene, s. Abb. 15).

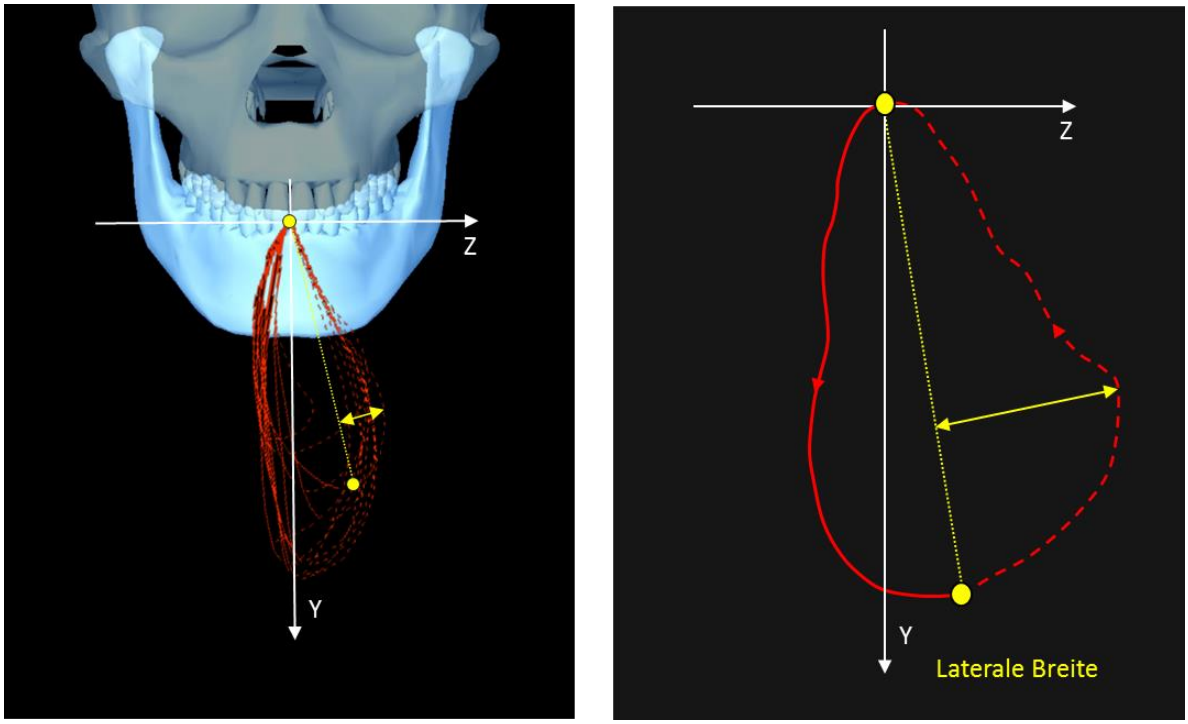


Abb. 21: Laterale Breite der Kauschleife in der Frontalebene, links: Darstellung der Bewegungsspuren der Kauschleifen im Koordinatensystem (YZ-Ebene) in Bezug zum Schädel, rechts: Darstellung einer isolierten (fiktiven) Kauschleife im Koordinatensystem (YZ-Ebene), gelbe Punkte = Umkehrpunkte zwischen Öffnungs- und Schließbewegung; gelb-gestrichelte Verbindungslinie = Umkehrpunktabstand = vertikale Höhe der Kauschleife, gelber Doppelpfeil = breiteste Stelle der Kauschleife = laterale Breite der Kauschleife ausgehend von der Verbindungslinie der Umkehrpunkte, Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017

2.6.4 Vertikales Niveau der lateralen Breite der Kauschleife

Zur weiteren Beschreibung der Kauschleife wurde die Veränderung der lateralen Breite definiert. Dazu dient das vertikale Niveau der maximalen lateralen Ausdehnung entlang der Umkehrpunktgeraden.

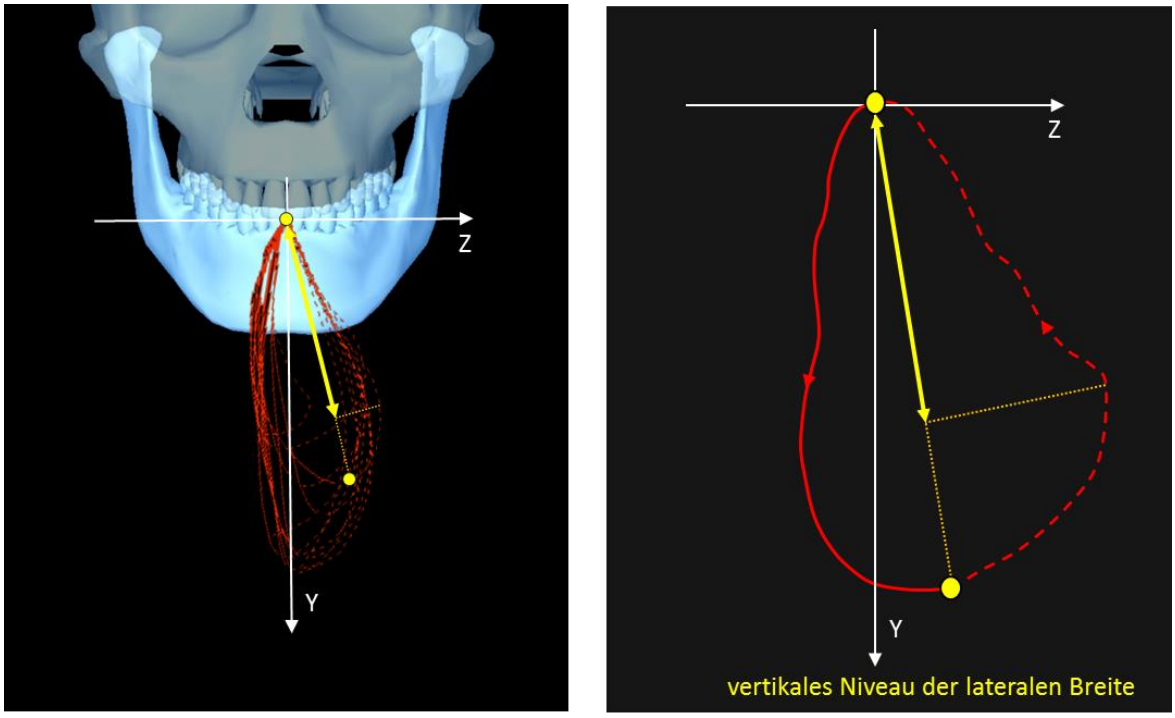


Abb. 22: Vertikales Niveau der lateralen Breite in der Frontalebene, links: Darstellung der Bewegungsspuren der Kauschleifen im Koordinatensystem (YZ-Ebene) in Bezug zum Schädel, rechts: Darstellung einer isolierten (fiktiven) Kauschleife im Koordinatensystem (YZ-Ebene), gelbe Punkte = Umkehrpunkte zwischen Öffnungs- und Schließbewegung, gelb-gestrichelte Verbindungslinie = Umkehrpunktabstand und laterale Breite der Kauschleife, gelber Doppelpfeil = vertikales Niveau der breitesten Stelle auf der Umkehrpunktgeraden, Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017

2.6.5 Präferierte Kauseite

Zur Ermittlung einer möglichen Kauseitenpräferenz (rechts oder links) beim Kauen wurde aus den drei Wiederholungen für T_1 bzw. T_2 jeweils der Prozentsatz der rechten Kauschleifen ausgezählt. Im Mittel entspricht eine Kauschleife innerhalb eines Kauzyklus 5 % (s. Abschnitt 2.3 Versuchsdurchführung). Daher werden diese 5 % als Toleranz angegeben. Werte < 45 % zeigen eine Präferenz der linken Seite, 50 ± 5 % keine Kauseitenpräferenz und Werte > 55 % eine Präferenz für die rechte Seite beim Kauen.

2.7 Statistik

Die statistische Analyse erfolgte mit der Software SigmaPlot 12.0 für Windows (Systat Software Inc., San Jose / USA). Die Überprüfung der Daten auf Normalverteilung wurde mithilfe des Kolmogorov-Smirnov Tests durchgeführt (Hellmann et al., 2021).

Zur Analyse der Variabilität der natürlichen Schließbewegungen in IKP sowie der Daten des Trainings auf dem Plateau wurden zunächst die Mittelwerte und Standardabweichungen der drei bzw. fünf Messwiederholungen (Abschnitt 2.3) für die jeweiligen vertikalen Abstände zur IKP bzw. zum Trainingsplateau bestimmt. Die Unterschiede dieser Daten zwischen den Messzeitpunkten bzw. Bedingungen erfolgte unter Verwendung des Wilcoxon Tests (Hellmann et al., 2021).

Zur Analyse der Kaufunktion wurden die Daten der drei Messwiederholungen (Abschnitt 2.3) für die jeweiligen Phasen P1-P3 gemittelt und die Standardabweichungen bestimmt sowie für den Vergleich dieser Daten zwischen T1 und T2 eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholungen (RM-ANOVA-Bonferroni adjustiert) verwendet (Hellmann et al., 2021).

Das Signifikanzniveau wurde für alle durchgeführten Tests bei $p \leq 0{,}05$ festgelegt (Hellmann et al., 2021).

3 Ergebnisse

Da in die Auswertung vorwiegend Schließbewegungen einbezogen wurden, bildet sich links auf der X- Achse (X>0) die Kieferöffnung ab. Entlang der X- Achse nach rechts zeigt sich so der Kieferschluss bis zum Kontakt in IKP (X=1) oder auf das Trainingsplateau (X=0).

3.1 Variabilität der Schließbewegung in IKP

Die Auswertung der Variabilität der Schließbewegung der letzten 20 mm in die IKP zeigt mit abnehmender Kieferöffnung eine abnehmende Variabilität. Zwischen T_1 und T_2 konnten weder für die Mittelwerte (MEAN) noch für die Standardabweichungen (SD) für keine der Distanzen signifikante Unterschiede innerhalb der Variabilität der Schließbewegung des Unterkiefers festgestellt werden (Hellmann et al., 2021).

Die deskriptive Statistik gibt jedoch einen Hinweis auf eine verringerte Variabilität zum Zeitpunkt T_2 im Bereich zwischen 4- bis 16 mm Kieferöffnung (s. Abb. 23).

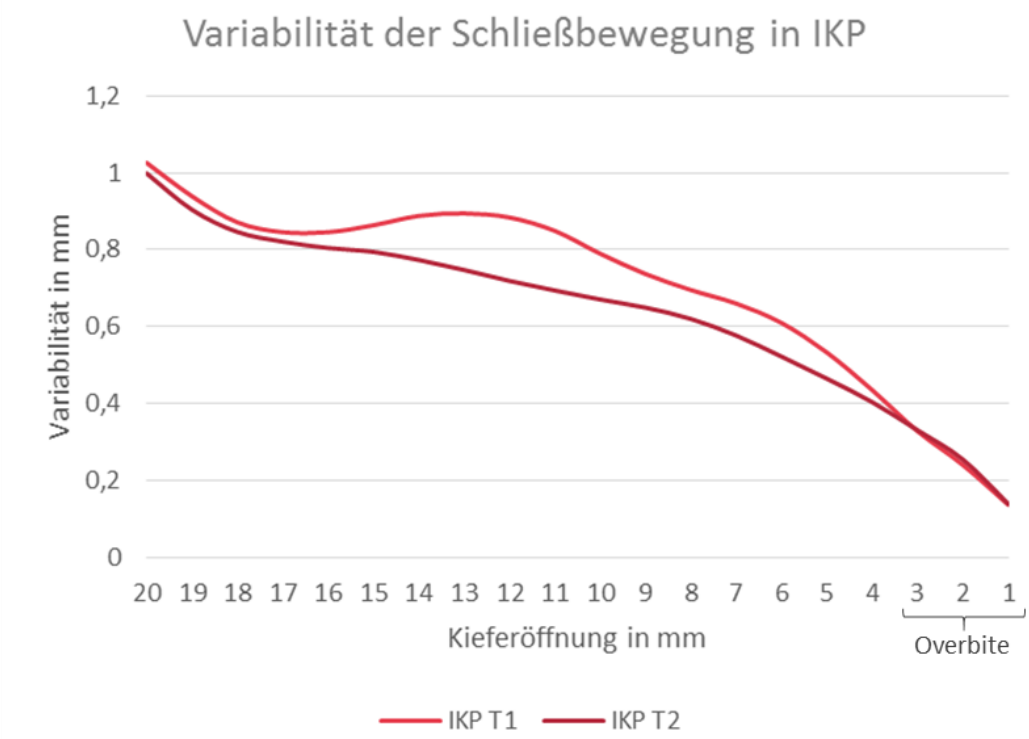


*Abb. 23: Variabilität der Schließbewegung (in mm) der letzten 20mm in die Interkuspidation (IKP), Zeitpunkt T_1 = rot, Zeitpunkt T_2 = dunkelrot, der durchschnittliche Overbite der 14 Probanden lag bei Ø 3,32 mm ± 1, * = Signifikanz ($p < 0,05$), Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017, Used with permission of John Wiley & Sons Ltd, from „Effects of preventing intercuspation on the precision of jaw movements" Hellmann et al., Journal of oral rehabilitation 48, 4, 2021; permission conveyed trough Copyright Clearance Center, Inc.*

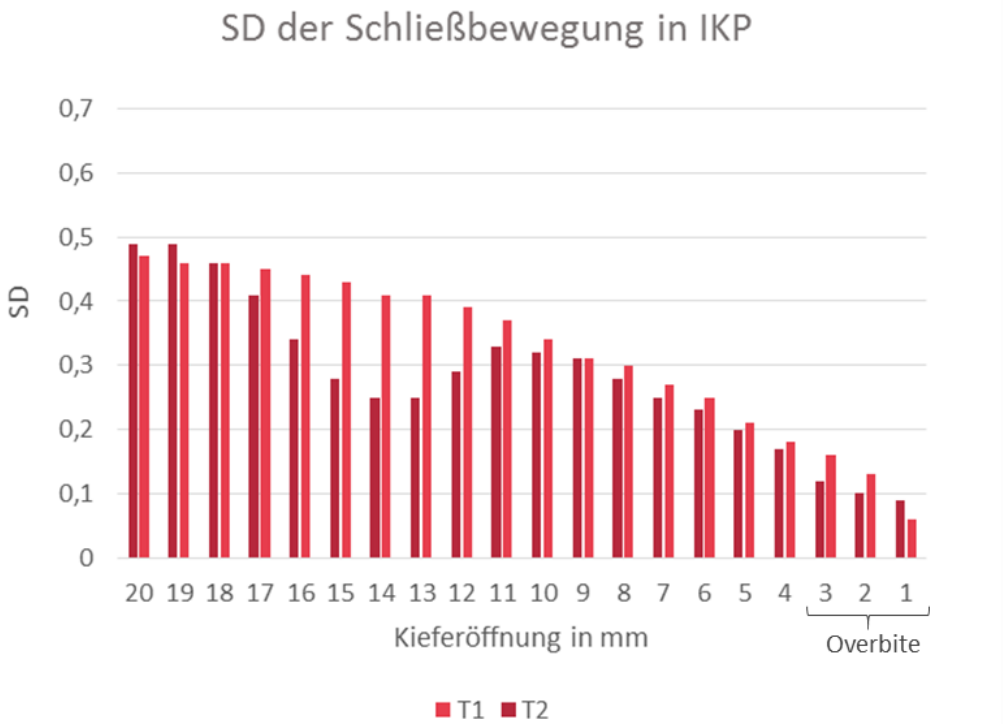


*Abb. 24: Standardabweichung (SD) der Schließbewegung der letzten 20mm in die Interkuspidation (IKP), Zeitpunkt T_1= rot, Zeitpunkt T_2 = dunkelrot, der durchschnittliche Overbite der 14 Probanden lag bei Ø 3,32 mm ± 1, * = Signifikanz ($p < 0,05$), Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017*

Die SD nimmt mit abnehmender Kieferöffnung ebenfalls ab. Deskriptiv zeigt sich analog zu den Mittelwerten eine geringere SD zum Zeitpunkt T_2. Am stärksten ist dieses Ergebnis im Bereich zwischen 10 bis 17 mm Kieferöffnung ausgeprägt. In den Bereichen > 17 mm und < 10 mm ist der Unterschied T_1 - T_2 sehr gering.

3.2 Variabilität beim Training in eine anteriore Unterkieferposition

Die Auswertung der finalen 10 mm der Schließtrajektorie des Unterkiefers vor Erreichen des Trainingsplateaus während der 10-minütigen Trainingssitzung zeigte für die Abstände 10 bis 1 mm eine signifikante Verringerung (* = Signifikanz $p < 0,05$) der Mittelwerte der Variabilität zwischen dem Beginn und Abschluss des 10-minütigen Trainings (s. Abb. 25) (Hellmann et al., 2021).

Die Variabilität der Positionen rund um die Zielposition (TP) auf dem Plateau wiesen im Mittelwert dagegen keinen signifikanten Unterschied auf. Die Streuung beim Auftreffen in die TP bzw. auf das Plateau hat sich somit nicht signifikant verbessert (Hellmann et al., 2021).

Für die Standardabweichungen zeichnete sich für keine der Distanzen ein signifikanter Unterschied innerhalb der Trainingszeit ab (s. Abb. 26) (Hellmann et al., 2021).

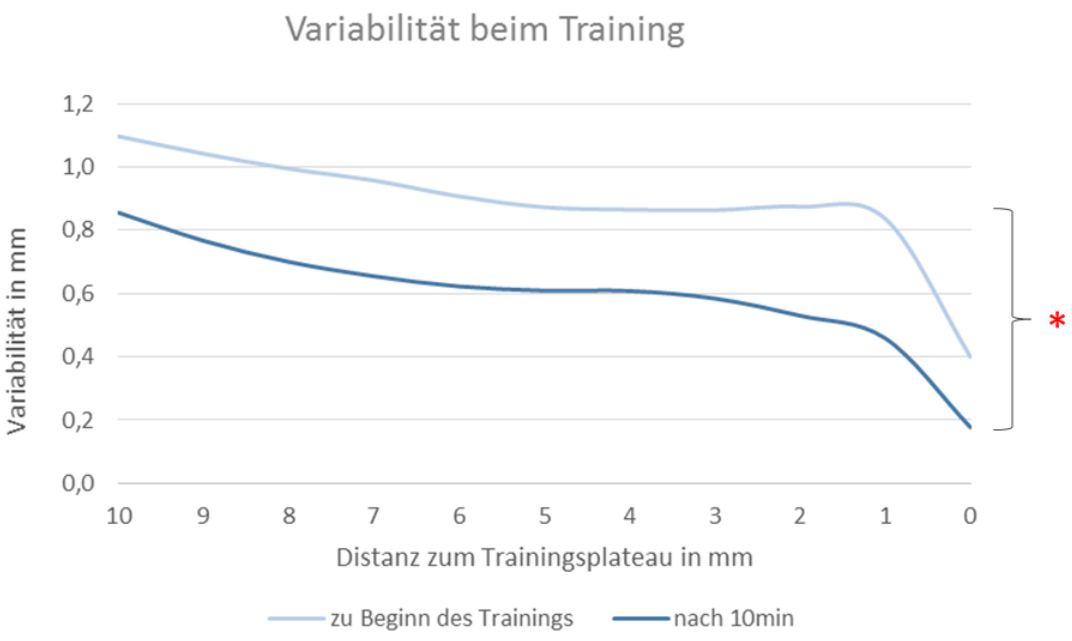


*Abb. 25: Variabilität (in mm) beim Training zum Zeitpunkt T_1 in eine anteriore Unterkiefer (UK)-Position; die X-Achse gibt die Distanz zum Trainingsplateau (X=0) in mm wieder, * = Signifikanz ($p < 0,05$), Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017, Used with permission of John Wiley & Sons Ltd, from „Effects of preventing intercuspation on the precision of jaw movements" Hellmann et al., Journal of oral rehabilitation 48, 4, 2021; permission conveyed trough Copyright Clearance Center, Inc.*

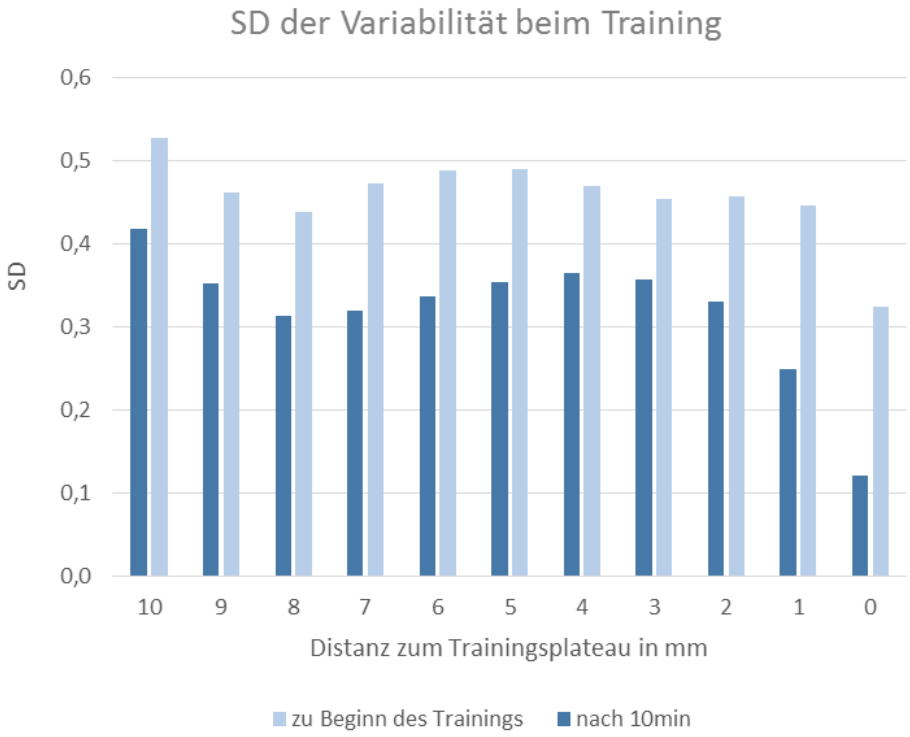


*Abb. 26: Standardabweichung (SD) beim Training zum Zeitpunkt T_1 in eine anteriore Unterkiefer (UK)-Position; die X-Achse gibt die Distanz zum Trainingsplateau (X=0) in mm wieder, * = Signifikanz ($p < 0,05$), Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017*

3.3 Vergleich IKP – Training

Um die Variabilität der Schließbewegung bei Annäherung an die Trainingsposition bewerten zu können, erfolgte zunächst ein Vergleich der letzten 10 mm der Bewegung eines jeden Probanden bis zum Kontakt mit dem Plateau (Höhe Trainingsplateau= 6mm) mit dem entsprechenden Abschnitt (16 bis 6m) der Annäherung an die IKP während einer natürlichen Schließbewegung (s. Abb. 27) (Hellmann et al., 2021).

Ohne Trainingsgeräte in Situ kann der Proband vollständig in IKP schließen (x= 0mm). Sind die Trainingsgeräte eingegliedert, trifft der Proband bereits bei einem Abstand von 6mm zur IKP auf das Trainingsplateau (x= 6mm). Die Höhe des Trainingsplateaus ist in der folgenden Grafik durch eine Hilfslinie markiert, der untersuchte Bereich der Kieferöffnung (16 bis 6mm) farbig hinterlegt.

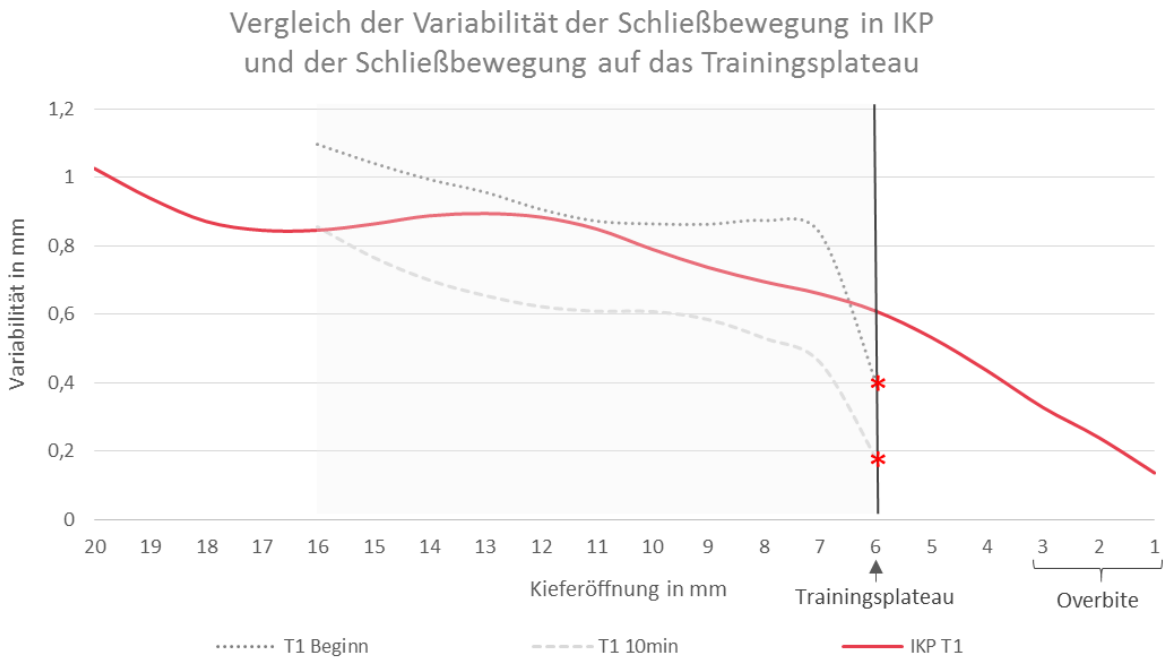


*Abb. 27: Vergleich der Variabilität der Schließbewegung in Interkuspidation (IKP) und der Schließbewegung auf das Trainingsplateau zwischen 16 bis 6 mm (grau hinterlegt), Training zum Zeitpunkt T_1 = grau unterbrochene Linien (zu Beginn und nach 10 min), IKP zum Zeitpunkt T_1 = rot, Höhe Trainingsplateau = 6mm (definiert für alle 14 Probanden), der durchschnittliche Overbite der 14 Probanden lag bei Ø 3,32 mm ± 1, * = Signifikanz ($p < 0,05$), Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017, Used with permission of John Wiley & Sons Ltd, from „Effects of preventing intercuspation on the precision of jaw movements" Hellmann et al., Journal of oral rehabilitation 48, 4, 2021; permission conveyed trough Copyright Clearance Center, Inc.*

Sowohl zu Beginn als auch am Ende des 10- minütigen Trainings zeigte die Schließbewegung auf das Trainingsplateau (10 bis 1mm Abstand zum Plateau) im Vergleich mit den Mittelwerten für die Variabilität des entsprechenden Abschnittes der Schließbewegung in IKP (16 bis 6mm) keine signifikanten Unterschiede (Hellmann et al., 2021).

Im Diagramm ist erkennbar, dass mit zunehmendem Kieferschluss sowohl in IKP als auch auf das Trainingsplateau die Variabilität abnimmt. Zu Beginn des Trainings (es wurden die ersten 5 Schließbewegungen in die TP aufgezeichnet) liegt die Variabilität zunächst oberhalb der Variabilität der Schließbewegung in IKP im entsprechenden Abschnitt. Nach 10 Minuten Training befindet sich die Variabilität der Schließbewegung auf das Trainingsplateau unterhalb der Variabilität der Schließbewegung in IKP. Trotz der in diesem Punkt fehlenden Signifikanz gibt dies einen Hinweis darauf, dass es durch Training zu einer im Vergleich mit der Annäherung an die IKP geringeren Variabilität zu kommen scheint (Hellmann et al., 2021). Dieser Trend wird ebenfalls durch den signifikanten Unterschied in der Variabilität zwischem dem Beginn und dem Ende des Traings untermauert (s. Abschnitt 3.2).

Bei Erreichen der Trainingsposition auf dem Trainingsplateau (x= 6mm) zeigte sich sowohl vor als auch nach dem Training ein signifikanter Unterschied im Sinne einer geringeren Variabilität auf Seiten der Trainingsübung im Vergleich zum entsprechenden Abstand bei der Annäherung an die IKP während einer ungestörten Schließbewegung (Hellmann et al., 2021).

Um einen direkteren Vergleich der Variabilität der Annäherungsbewegung an die jeweilige Zielposition zwischen der Schließbewegung vor Auftreffen auf das Trainingsplateau und der Schließbewegung in die IKP zu erlauben, wurden im folgenden Schaubild die Trainingkurven (10 bis 1mm vor Kontakt auf dem Plateau) entsprechend der Annäherungsbewegung an die IKP (10 bis 1mm vor Erreichen der IKP) verschoben (Hellmann et al., 2021).

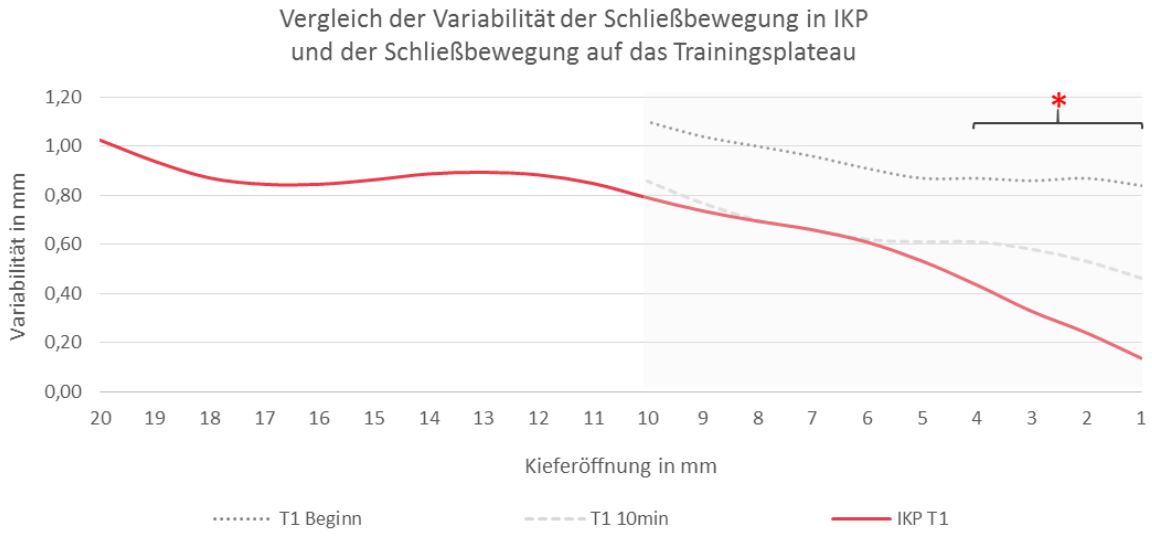


*Abb. 28: Vergleich der Variabilität der Schließbewegung in Interkuspidation (IKP) und der Schließbewegung auf das Trainingsplateau zwischen 10 bis 1mm (grau hinterlegt), Training zum Zeitpunkt T_1 = grau unterbrochene Linien (zu Beginn und nach 10 min), IKP zum Zeitpunkt T_1 = rot, * = Signifikanz ($p < 0,05$), Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017, Used with permission of John Wiley & Sons Ltd, from „Effects of preventing intercuspation on the precision of jaw movements" Hellmann et al., Journal of oral rehabilitation 48, 4, 2021; permission conveyed trough Copyright Clearance Center, Inc.*

Sowohl zu Beginn als auch nach Abschluss des 10- minütigen Trainings zeigte die Variabilität der Schließbewegung auf das Trainingsplateau keinen signifikanten Unterschied im Vergleich zur natürlichen Schließbewegung in IKP für die Abstände 10 bis 5mm. Die Abstände 4 bis 1mm lassen einen signifikanten Unterschied im Sinne einer höheren Variabilität auf Seiten der Trainingsübung im Vergleich zur natürlichen Schließbewegung in IKP erkennen (Hellmann et al., 2021).

Da die Kieferposition in IKP definitionsgemäß (Utz et al., 2010) eine Reproduzierbarkeit von 0,02 mm beim Bezahnten erreicht, ist die Präzision beim Erreichen der protrudierten Zielposition nach 10-minütigem Training mit einem Mittelwert von 0,18 mm und einer Standardabweichung von 0,12 im Vergleich zur IKP offensichtlich geringer (Hellmann et al., 2021).

Zusammenfassend lässt sich die Aussage treffen, dass sich die Variabilität der Schließbewegung bei der Annäherung an das Trainingsplateau vor und nach dem Training im Vergleich zur Variabilität für die Schließbewegung in IKP auf Höhe des Trainingsplateaus (x=6mm) nicht signifikant unterscheidet, während sie im Vergleich zur finalen Annäherung an die IKP (4 bis 1mm vor Erreichen der IKP) jedoch signifikant höher ist (Hellmann et al., 2021).

3.4 Kauen

Die Kausequenzen beim Kauen der Testnahrung wurden auf die folgenden Parameter hin untersucht (Hellmann et al., 2021):

- Vertikale Amplitude der Kauschleife
- Fläche der Kauschleife
- Laterale Breite der Kauschleife
- Niveau der lateralen Breite der Kauschleife
- Präferierte Kauseite

3.4.1 Vertikale Amplitude der Kauschleife

Zu Beginn der Kausequenz (P1) sind größere Umkehrpunktabstände messbar, welche zum Ende der Kausequenz (P3) mit abnehmender Nahrungsgröße sinken. Dieses Phänomen ist für T_1 und T_2 gleichsam erkennbar. Der gemessene Umkehrpunktabstand zum Zeitpunkt T_2 ist für P1 - P3 signifikant größer im Vergleich zu T_1 ($p < 0,05$) Die Differenz der Umkehrpunktabstände zwischen T_1 und T_2 nimmt von P1 zu P3 zu (Hellmann et al., 2021).

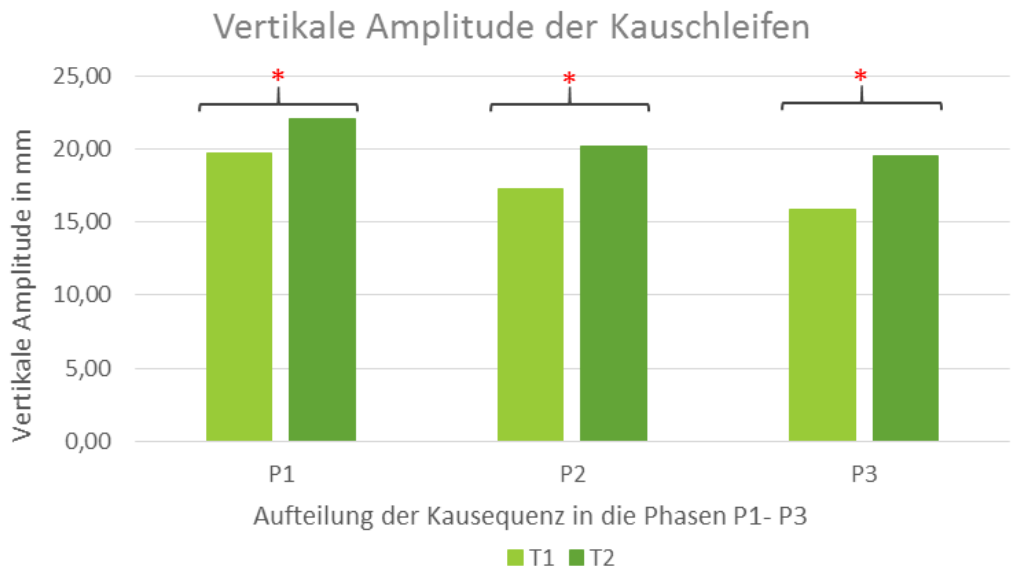


*Abb. 29: Vertikale Amplituden der Kauschleifen zu den Zeitpunkten T_1 und T_2 in mm; X-Achse: Aufteilung der Kausequenz in 3 Phasen P1-P3 (entsprechend der Nahrungszerkleinerung mit abnehmender Bolusgröße), Zeitpunkt T_1= hellgrün, Zeitpunkt T_2 = dunkelgrün, * = Signifikanz ($p < 0,05$), Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017, Used with permission of John Wiley & Sons Ltd, from „Effects of preventing intercuspation on the precision of jaw movements" Hellmann et al., Journal of oral rehabilitation 48, 4, 2021; permission conveyed trough Copyright Clearance Center, Inc.*

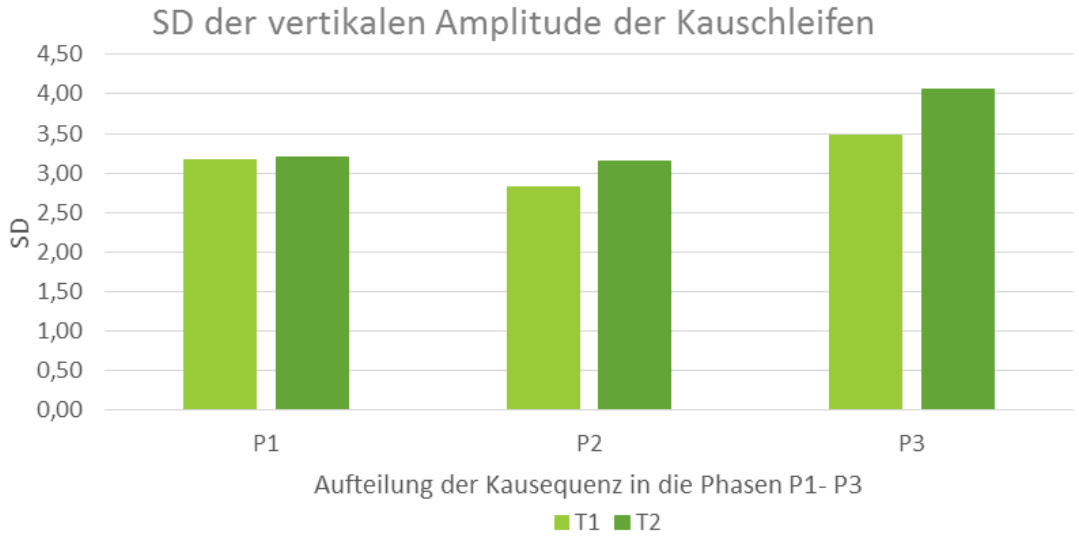


*Abb. 30: Standardabweichung (SD) der vertikalen Amplituden der Kauschleifen zu den Zeitpunkten T_1 und T_2; X-Achse: Aufteilung der Kausequenz in 3 Phasen P1-P3 (entsprechend der Nahrungszerkleinerung mit abnehmender Bolusgröße), Zeitpunkt T_1= hellgrün, Zeitpunkt T_2 = dunkelgrün, * = Signifikanz ($p < 0,05$), Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017*

3.4.2 Fläche der Kauschleifen

Die Fläche der Kauschleifen vergrößerte sich von T_1 zu T_2 signifikant ($p < 0,05$) . Wie bei der vertikalen Amplitude nimmt die Größe der Fläche im Verlauf der Kausequenz erwartungsgemäß mit abnehmender Bolusgröße von P1 bis P3 ab (Hellmann et al., 2021).

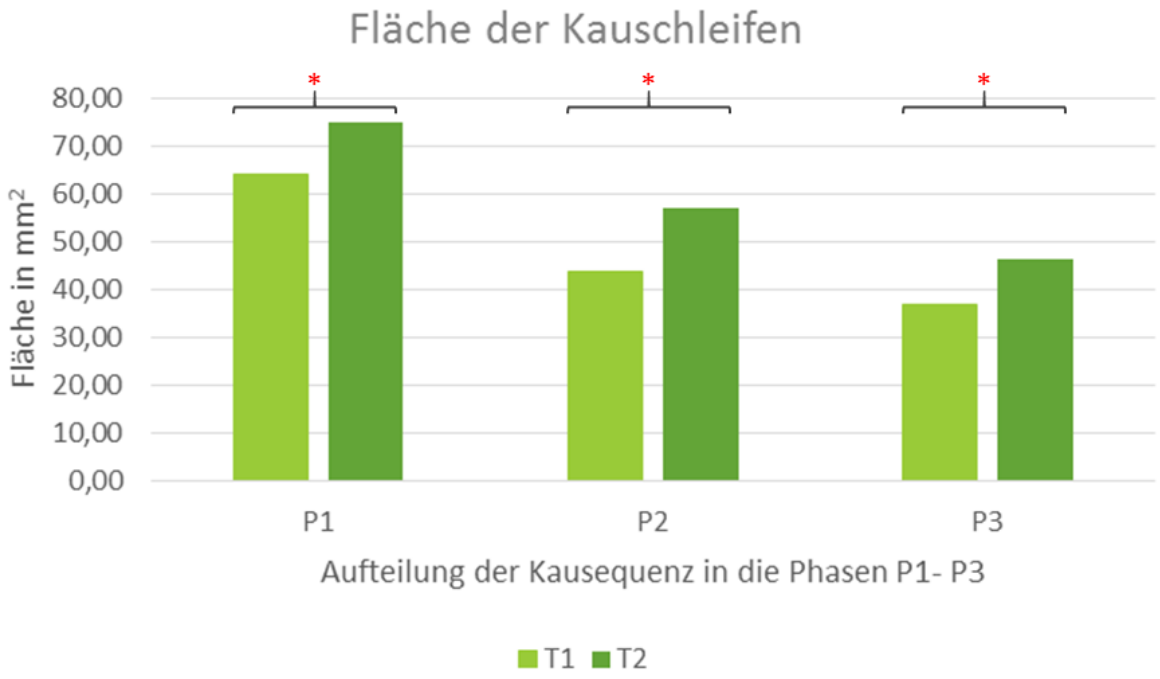


*Abb. 31: Fläche der Kauschleifen zu den Zeitpunkten T_1 und T_2 in mm²; X-Achse: Aufteilung der Kausequenz in 3 Phasen P1-P3 (entsprechend der Nahrungszerkleinerung mit abnehmender Bolusgröße), Zeitpunkt T_1 = hellgrün, Zeitpunkt T_2 = dunkelgrün, * = Signifikanz ($p < 0,05$), Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017, Used with permission of John Wiley & Sons Ltd, from „Effects of preventing intercuspation on the precision of jaw movements" Hellmann et al., Journal of oral rehabilitation 48, 4, 2021; permission conveyed trough Copyright Clearance Center, Inc.*

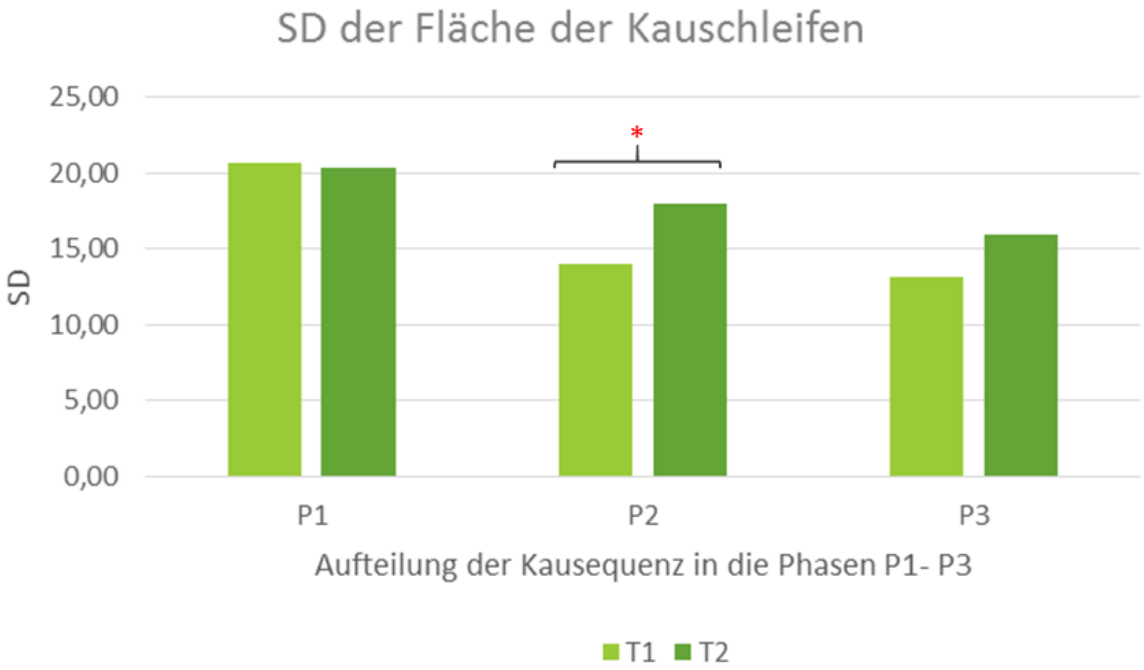


*Abb. 32: Standardabweichung (SD) der Fläche der Kauschleife zu den Zeitpunkten T_1 und T_2; X-Achse: Aufteilung der Kausequenz in 3 Phasen P1-P3 (entsprechend der Nahrungszerkleinerung mit abnehmender Bolusgröße), Zeitpunkt T_1 = hellgrün, Zeitpunkt T_2 = dunkelgrün, * = Signifikanz ($p < 0,05$), Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017*

3.4.3 Laterale Breite der Kauschleife

Die Breite der Kauschleife nimmt von T1 zu T2 für alle drei Phasen der Nahrungszerkleinerung P1-P3 zu (s. Abb. 33). Für P2 ist dieses Ergebnis signifikant ($p < 0,05$). Die Breite der Kauschleife verringert sich im Verlauf des Kauzykluses mit abnehmender Nahrungsgröße (P1-P3). Für die SD zeigen sich keine Signifikanzen (s. Abb. 34) (Hellmann et al., 2021).

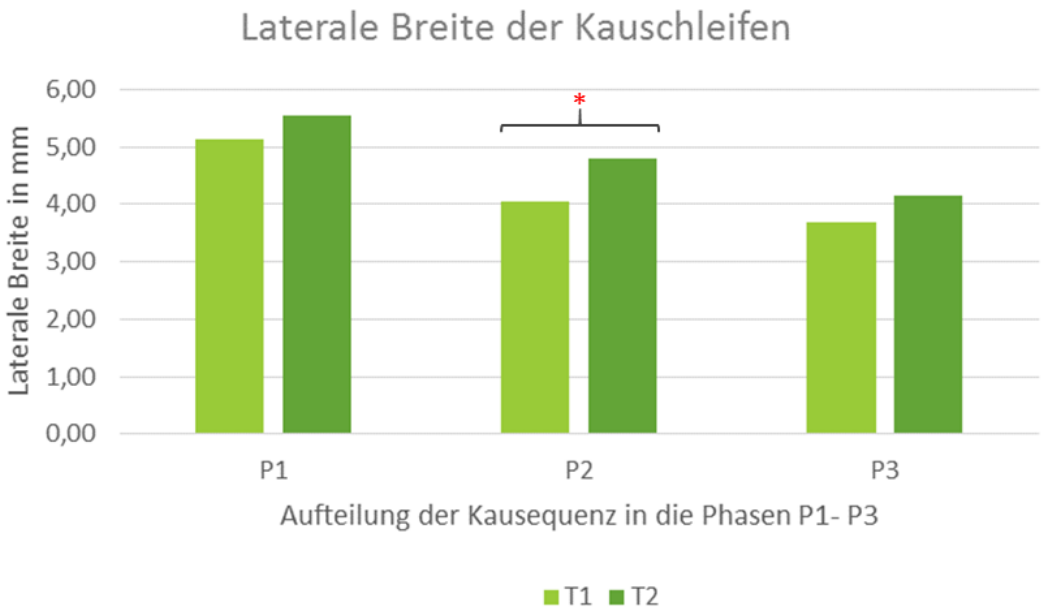


*Abb. 33: Laterale Breite der Kauschleifen zu den Zeitpunkten T_1 und T_2 in mm; X-Achse: Aufteilung der Kausequenz in 3 Phasen P1-P3 (entsprechend der Nahrungszerkleinerung mit abnehmender Bolusgröße), Zeitpunkt T_1 = hellgrün, Zeitpunkt T_2 = dunkelgrün, * = Signifikanz ($p < 0,05$), Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017, Used with permission of John Wiley & Sons Ltd, from „Effects of preventing intercuspation on the precision of jaw movements" Hellmann et al., Journal of oral rehabilitation 48, 4, 2021; permission conveyed trough Copyright Clearance Center, Inc.*

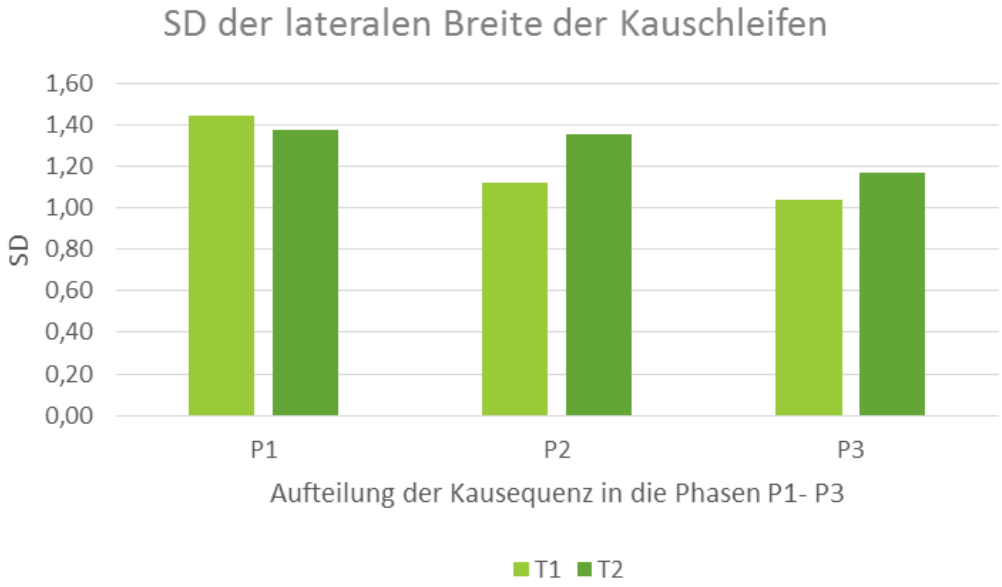


*Abb. 34: Standardabweichung (SD) der lateralen Breite der Kauschleifen zu den Zeitpunkten T_1 und T_2; X-Achse: Aufteilung der Kausequenz in 3 Phasen P1-P3 (entsprechend der Nahrungszerkleinerung mit abnehmender Bolusgröße), Zeitpunkt T_1 = hellgrün, Zeitpunkt T_2 = dunkelgrün, * = Signifikanz ($p < 0,05$), Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017*

3.4.4 Vertikales Niveau der lateralen Breite der Kauschleife

Das vertikale Niveau der lateralen Breite der Kauschleifen nimmt für T_2 signifikant ($p < 0,05$) zu (P1-P3), wenn man die Schließbewegung des Unterkiefers beim Kauen einzeln betrachtet. Für die Veränderungen während der Öffnungsbewegung zeigten sich keine Signifikanzen. Die SD verhält sich nicht gleichmäßig und weist keine Signifikanzen auf.

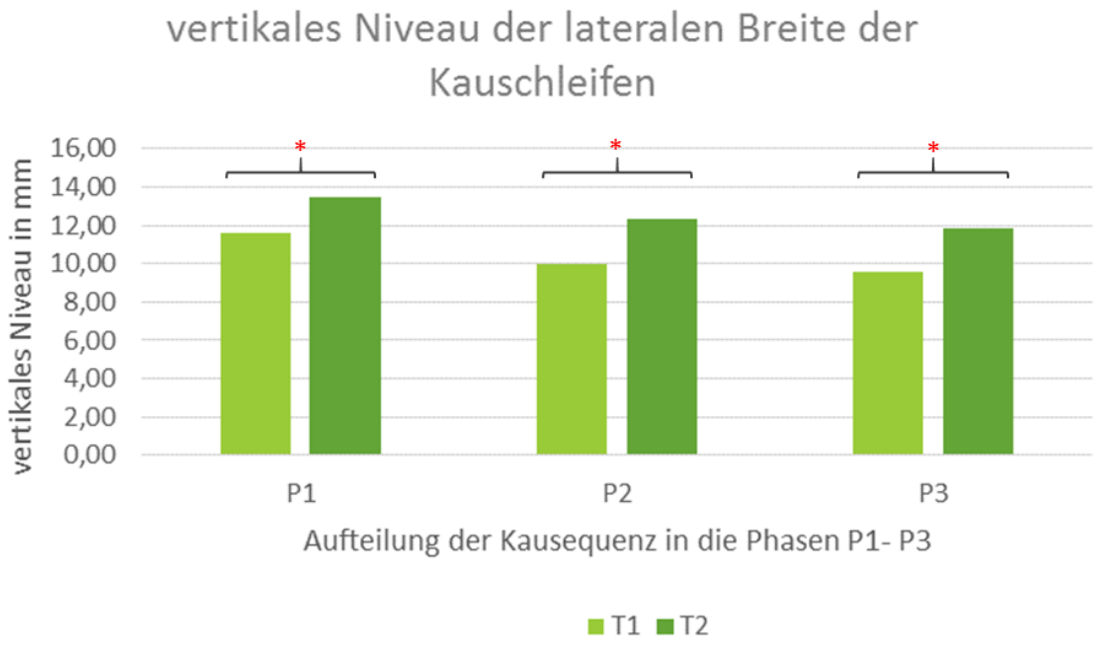


*Abb. 35: vertikales Niveau der lateralen Breite der Kauschleifen zu den Zeitpunkten T_1 und T_2 in mm für die Schließbewegung des Unterkiefers (UK); X-Achse: Aufteilung der Kausequenz in 3 Phasen P1-P3 (entsprechend der Nahrungszerkleinerung mit abnehmender Bolusgröße), Zeitpunkt T_1 = hellgrün,Zeitpunkt T_2 = dunkelgrün, * = Signifikanz ($p < 0,05$), Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017*

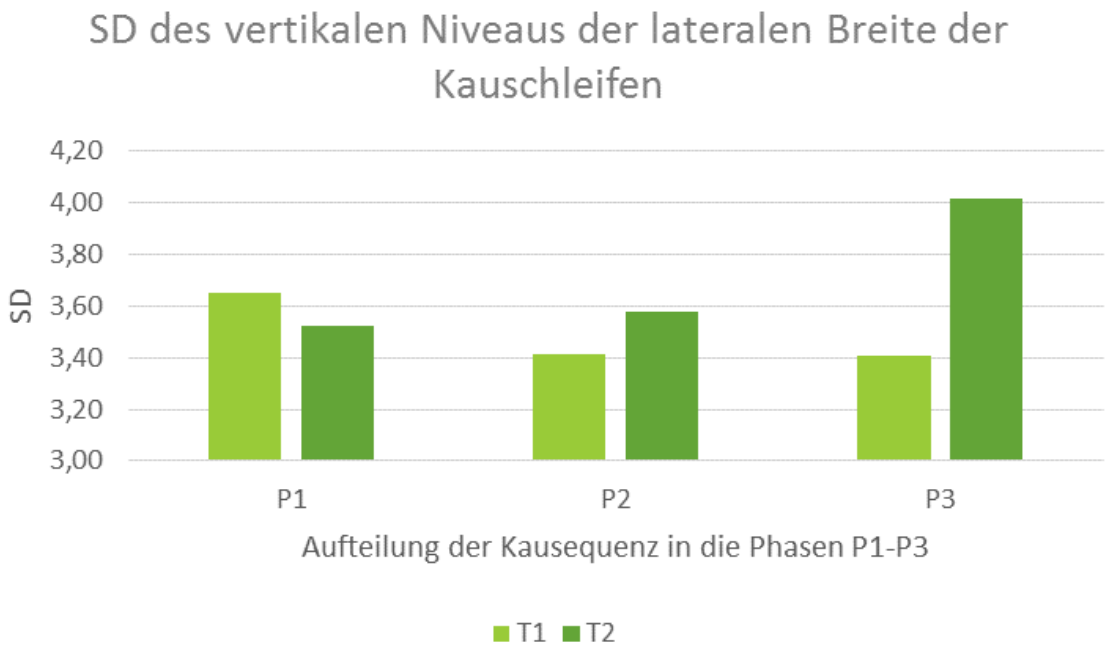


*Abb. 36: Standardabweichung (SD) des vertikalen Niveaus der lateralen Breite der Kauschleifen zu den Zeitpunkten T_1 und T_2 für die Schließbewegung des Unterkiefers (UK); X-Achse: Aufteilung der Kausequenz in 3 Phasen P1-P3 (entsprechend der Nahrungszerkleinerung mit abnehmender Bolusgröße), Zeitpunkt T_1 = hellgrün, Zeitpunkt T_2 = dunkelgrün, * = Signifikanz ($p < 0,05$), Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017*

3.4.5 Präferierte Kauseite

Tabelle 3 zeigt die Verteilung der Kauschleifen gemittelt über die drei Wiederholungen jeweils für T_1 und T_2. Die Tabelle stellt die Anzahl der Kauschleifen auf der rechten Seite in % dar.

Im Mittel entspricht eine Kauschleife innerhalb eines Kauzyklus 5 % (s. Abschnitt 2.3 Versuchsdurchführung). Daher werden diese 5 % als Toleranz angegeben. Werte < 45 % zeigen eine Präferenz der linken Seite, 50 ± 5 % keine Präferenz und Werte > 55 % eine Präferenz für die rechte Seite beim Kauen.

Tabelle 3: Verteilung der Kauschleifen über drei Wiederholungen für T_1 und T_2, Bestimmung der präferierten Kauseite: Anzahl der rechten Kauschleifen < 45 % = Präferenz der linken Kauseite, 50 ± 5 % = keine Kauseitenpräferenz, > 55 % = Präferenz der rechten Kauseite, Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017

Anzahl der rechten Kauschleifen in %

Proband	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
T_1	50	34,18	56,90	56,52	47,95	64,15	53,06
T_2	40,38	52,38	51,67	29,82	41,54	55,93	41,82
Proband	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
T_1	64,29	50	60,66	30,51	45,76	56,14	50
T_2	69,09	53,45	47,46	59,65	58,84	26,84	68,85

Zum gemessenen Zeitpunkt T_1 präferierten zwei Probanden (Proband 2 und 11) die linke Kauseite und sechs Probanden (Proband 3, 4, 6, 8, 10 und 13) die rechte Seite, sechs Probanden zeigten keiner Präferenz für eine Kauseite (Proband 1, 5, 7, 9, 12, 14). Zum Zeitpunkt T_2 präferierten fünf Probanden die linke (Proband 1, 4, 5, 7 und 13) und fünf Probanden (Proband 6, 8, 11, 12, 14) die rechte Kauseite, vier Probanden zeigten keine Kauseitenpräferenz (Proband 2, 3, 9, 10).

Tabelle 4: Darstellung der präferierten Kauseiten für T_1 und T_2; Anzahl der rechten Kauschleifen < 45 % = Präferenz der linken Kauseite, 50 ± 5 % = keine Kauseitenpräferenz, > 55 % = Präferenz der rechten Kauseite, Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017

Präferierte Kauseite

	links	rechts	keine	Insgesamt
T_1	2	6	6	14
T_2	5	5	4	14

Zusätzlich lassen sich bei einigen Probanden Wechsel der präferierten Kauseite erkennen. Von T_1 zu T_2 wechselten insgesamt 11 Probanden ihre präferierte Kauseite. Davon wechselten drei Probanden entweder von links nach rechts oder umgekehrt (Proband 4, 11, 13). Fünf Probanden zeigten zu T_1 keine Präferenz einer Kauseite und wechselten dann zu T_2 nach links (Proband 1, 5, 7) oder rechts (Proband 12, 14). Drei Probanden ließen nach der einwöchigen Entkopplung keine Kauseitenpräferenz mehr erkennen (Proband 2, 3, 10).

Tabelle 5: Wechsel der präferierten Kauseite von T_1 zu T_2, Definition der präferierten Kauseite (s. Tabelle 3): Anzahl der rechten Kauschleifen < 45 % = Präferenz der linken Kauseite, 50 ± 5 % = keine Kauseitenpräferenz, > 55 % = Präferenz der rechten Kauseite, Klinik für Kieferorthopädie und Orthodontie Universitätsklinikum Ulm 2016-2017

Wechsel der präferierten Kauseite von T_1 zu T_2

Kein Wechsel	Links - Rechts	Links - Keine	Rechts - Links	Rechts - Keine	Keine - Links	Keine - Rechts	Insgesamt
3	1	1	2	2	3	2	14

4 Diskussion

In der vorliegenden Studie sollten der Einfluss einer einwöchigen okklusalen Entkopplung durch Aufbissplateaus auf die physiologische Bewegung beim Kieferschluss in IKP und beim Kauen untersucht werden. Zu klären galt die Frage, wie stabil sich die Variabilität der Schließbewegung in IKP verhält und ob sich messbare Veränderungen im Kaumuster zeigen. Zusätzlich sollte evaluiert werden, wie modulierbar die Schließbewegung des Unterkiefers in eine anteriore Unterkieferposition, die ihrerseits weit von der IKP entfernt liegt, ist. Dazu sollten die Effekte eines 10- minütigen Unterkiefertrainings untersucht und mit der Variabilität der natürlichen Schließbewegung in IKP verglichen werden (Hellmann et al., 2021).

4.1 Variabilität beim Kieferschluss in IKP

Die Okklusionskontakte der Zähne von Ober- und Unterkiefer geben dem Unterkiefer eine eindeutige Position im Raum vor (Nishigawa et al., 2012).Bei einfachen Schließbewegungen des Kiefers wurden eine initiale Phase mit geringerer Präzision bzw. Reproduzierbarkeit der Bewegungsspuren (> 4 mm Abstand des Inzisalpunktes von der IKP) und eine finale Phase, bei der sich die Zähne des Unterkiefers innerhalb des frontalen und seitlichen Überbisses bewegen, mit einer hohen Präzision nachgewiesen. Die physiologische Begründung für dieses Phänomen liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit darin, dass auf diese Weise ein Schaden an der Zahnhartsubstanz durch unkontrollierte Zahnkontakte vermieden werden kann (Hellmann et al., 2014). Es wird allgemein angenommen, dass die IKP eine Kalibrierfunktion innerhalb der neuromuskulären Steuerung der Unterkieferbewegungen innehat (s. Abschnitt 1.2). Nishigawa et al. untersuchten den Zusammenhang von Okklusionskontakten in IKP und der Reproduzierbarkeit von Unterkieferbewegungen („tapping movements“ = Klappern mit den Zähnen). Die Probanden sollten dazu schnelle Unterkieferbewegungen aus einer möglichst geringen Kieferöffnung heraus in IKP durchführen. Dabei zeigte sich eine negative Korrelation zwischen der Anzahl der Okklusionskontakte in IKP, welche durch ein Bissregistrat aus Silikon in IKP ermittelt wurden, und der Distanz zwischen IKP und „tapping point“. Sie postulierten daher, dass aus einer stabilen Okklusion in einer größeren Reproduzierbarkeit „tapping movements“ resultieren.

Die Reproduzierbarkeit der maximalen Interkuspidation wird in einer Stellungnahme der DGFDT mit 0,02 mm angegeben und ist somit zuverlässiger reproduzierbar als die zentrische Kondylenposition mit 0,2 mm (Utz et al., 2010).

In der vorliegenden Studie wurde die Möglichkeit einer dreidimensionalen Kalibrierung durch die Eingliederung der Aufbissplateaus auf die Unterkieferseitenzähne aufgehoben. Vor dem Hintergrund einer postulierten Kalibrierfunktion der IKP hätte aus der fehlenden dreidimensionalen Orientierung durch die Okklusion und der fehlenden Front-/Eckzahnführung eine negative Beeinflussung der Unterkieferschließbewegung im Sinne einer geringeren Präzision bzw. erhöhten Variabilität resultieren müssen. Dass es trotz der einwöchigen Ausschaltung der Einnahme der IKP nicht zu einer signifikanten Veränderung der Variabilität der Schließbewegungen kam, ist ein Beleg für eine vorübergehende Stabilität der neuromuskulären Muster innerhalb der Steuerprogramme des CMS, welche durch die einwöchige Störung nicht nachhaltig und damit messbar negativ beeinflusst wurden (Hellmann et al., 2021). Die deskriptive Statistik deutete jedoch auf eine etwas geringere Variabilität der Schließbewegung in IKP nach einwöchiger okklusaler Entkopplung hin. Eine mögliche Hypothese hierzu wäre eine verringerte Variabilität als Schutzmechanismus des CMS nach der einwöchigen Störung (Hellmann et al., 2021). Durch das fehlende Feedback während des untersuchten Zeitraums könnte es zu einer vermehrten Stereotypie der UK-Schließbewegung gekommen sein um Verletzungen der Hart- und Weichgewebe durch unkontrollierbare, da ohne Feedback erfolgte Bewegungen zu vermeiden. Physiologische Bewegungen zeichnen sich durch Variabilität aus. Die verringerte Variabilität nach der einwöchigen Entkopplung könnte ein Hinweis auf eine Störung dieser physiologischen Muster sein. Im Bereich des Overbites und im Bereich > 16 mm liegen die Variabilitäten zu T_1 und T_2 nah zusammen. Im Bereich des Overbites ist die Variabilität durch den begrenzten Raum zwischen den Zähnen eingegrenzt, je größer der Abstand zur IKP, desto größer ist die Variabilität der Annäherungsbewegung.

Die Aufbissplateaus haben im Versuchszeitraum die Feedback-Position der IKP im Sinne einer dreidimensionalen Referenzposition des Unterkiefers unterbunden, jedoch konnten Zahnkontakte auf den Plateaus eingenommen werden, welche ein sensorisches Feedback der PDL-Sensoren der Seitenzähne durch Druckbelastung ermöglichten (Hellmann et al., 2021).

Dieses Feedback könnte in Verbindung mit der Propriozeption der Kaumuskulatur (s. Abschnitt 1.2), die ihrerseits ebenfalls Informationen über die Lage des UK im Raum beisteuert, ausreichende Informationen liefern, wodurch die gemessene Stabilität der neuromuskulären Muster der Unterkieferführung dann aber eher durch die Informationen aus der Kaumuskulatur gewährleistet wurde (Hellmann et al., 2021). Da die Propriozeption der Kiefermuskulatur nicht beispielsweise durch Lokalanästhesie ausgeschaltet wurde (Morimoto et al., 1989), stand diese wichtige Informationsquelle während der einwöchigen okklusalen Entkopplung durchgehend zur Verfügung.Broekhuijsen und van Willigen untersuchten den Effekt verschiedener Rezeptorsysteme auf das Positionsverhalten des Unterkiefers. Sie legten dar, dass die Muskelafferenzen der Kaumuskulatur eine wichtige Funktion bei der Ausbildung von Engrammen übernehmen (Broekhuijsen und van Willigen, 1983), sodass auch zahnlose Patienten in der Lage sind, exakte Unterkieferpositionen wie z. B. die präferierte vertikale Dimension der Okklusion zu generieren. Die dargebotenen Ergebnisse unterstreichen die Hypothese, dass neben den PDL-Sensoren die Propriozeption der Kaumuskulatur einen maßgeblichen Einfluss auf die Aufrechterhaltung einer stabilen Steuerung von Unterkieferbewegungen haben könnte (Broekhuijsen und van Willigen, 1982; Hellmann et al., 2021).

4.2 Variabilität beim Training in eine anteriore Unterkieferposition

Hellmann et al. zeigten die hohe Reproduzierbarkeit der Unterkieferschließbewegung selbst bei Störung der IKP durch ein anteriores, palatinal der Frontzähne befestigtes Plateau. In der vorliegenden Studie wurde diese Störung der IKP auf eine Woche ausgeweitet. Zusätzlich zur Beeinflussung durch Aufbissplateaus wurde ein Training in eine anteriore Unterkieferposition als zusätzlicher Reiz durchgeführt (Hellmann et al., 2021). Die Trainingsposition lag bei 50 % der protrusiven Kapazität, was einer Position innerhalb des physiologischen Funktionsraumes entspricht, welcher durch die Grenzbewegungen des Unterkiefers (Posselt Diagramm) begrenzt ist. Die Messungen der Protrusion des Unterkiefers ergaben eine maximale protrusive Kapazität von 10,4 mm ± 1 (Hellmann et al., 2021), was den Ergebnissen einer Studie von Kang et al. entspricht (Kang et al., 1991).

Innerhalb des 10-minütigen Trainings zeigte sich ein deutlicher Trainingseffekt mit einer signifikanten Verringerung der Variabilität innerhalb der Annäherungsbewegung des Unterkiefers an die Trainingsposition (Hellmann et al., 2021). Bereits zu Beginn des Trainings lag die Variabilität beim Kieferschluss auf das Plateau (Plateau in 6 mm Entfernung zur IKP) während des Trainings signifikant unter dem Wert der Variabilität des Kieferschlusses in IKP auf dem vertikalen Niveau des Trainingsplateaus (Abstand 6mm von der IKP), was eine sofortige Adaptation der neuromuskulären Muster an die neue Trainingsposition bedeutet (Hellmann et al., 2021). Dies bekräftigt die bereits in anderen Studien beschriebene Adaptationsfähigkeit des CMS. Im 10-minütigen Verlauf des Trainings verringerte sich die Variabilität an demselben Punkt (x=6mm) noch weiter (s. Abb. 27 in Abschnitt 3.3). Daraus lässt sich ableiten, dass eine direkte Adaptation auch für eine Zielposition, die sich ihrerseits in einem großen Abstand zur IKP befindet, möglich ist. Nimmt man einen direkten Vergleich der letzten 10 mm vor Auftreffen auf das Plateau bzw. in IKP vor, so ist die Adaptationsfähigkeit jedoch begrenzt und nicht ausreichend, um die Variabilität der Schließbewegung in IKP (Abstand von 10 bis 1mm) zu unterbieten. Dies zeigt, dass die Variabilität der Schließbewegung durch ein 10- minütiges Training alleine nicht annähernd so gut ist wie die Variabilität der jahrelang geübten natürlichen Schließbewegung. Im Abstand von 6 mm zur IKP wo die Variabilität der Schließbewegung außerhalb des Overbites natürlicherweise größer ist, zeigt sich ein signifikanter Trainingseffekt bei Erreichen der TP auf dem Plateau.

Das Auftreffen in der Vertiefung auf dem Plateau war jedoch vor und nach dem Training gleich gut. Die Streuung beim Auftreffen auf das Plateau rund um die Vertiefung hat sich durch das 10- minütige Training nicht signifikant verringert.

Ausgehend von diesem Ergebnis lässt sich die Hypothese aufstellen, dass die Variabilität einer Unterkieferschließbewegung auf dem Weg in eine Zielposition von einem dreidimensionalen Feedback (IKP oder Trainingsposition) abhängig ist (Hellmann et al., 2021). Zusammenfassend zeigen sich gute Trainingserfolge die im direkten Vergleich mit der Variabilität in IKP aber diese nicht unterbieten können.

In der hier vorliegenden Studie konnte ein Trainingseffekt bereits während des 10-minütigen Unterkiefertrainings durch Kieferöffnungs- und Schließbewegungen gezeigt werden.

Um die Variabilität beim Auftreffen in Zielposition (Streuung um die TP) zu verbessern, wäre vermutlich ein längeres Trainingsintervall oder mehrfache Wiederholungen des Trainings erforderlich gewesen (Hellmann et al., 2021).

Weitere Faktoren wie Schlaf und Erholung zur Festigung der erlernten Bewegung wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Zudem wurden innerhalb des einwöchigen Untersuchungszeitraums zwei Parameter gleichzeitig verändert: die Entkopplung der Okklusion durch die Aufbissplateaus und der Reiz durch das Training in einer anterioren Unterkieferposition. Deshalb ist mit dem hier zugrunde liegenden Messprotokoll nicht einwandfrei zu klären, welche Reizveränderung zu welchem Effekt geführt hat. Um die einzelnen Effekte separat untersuchen zu können, wären Folgestudien mit einem angepassten Studienprotokoll und mindestens einer Kontrollgruppen notwendig (Hellmann et al., 2021).

4.3 Kauen

Die einwöchige Entkopplung durch die Aufbissplateaus hat einen signifikanten Einfluss auf die Form und Ausdehnung der Kauschleife. Im folgenden Abschnitt sollen die Veränderungen der einzelnen Parameter genauer diskutiert werden.

4.3.1 Veränderungen des Kaumusters

Als Testnahrung wurden in der vorliegenden Studie vegetarische Fruchtgummi gewählt, da mit einem bekannten Nahrungsmittel ein möglichst natürliches Kauen ermöglicht werden sollte.

Als in der Literatur beschriebene Testnahrung werden Lebensmittel wie Erdnüsse, Mandeln oder Karotten (van der Bilt, 2011; Yoshida et al., 2007) oder normierte Silikonstückchen verwendet (Flores-Orozco et al., 2016; van der Bilt, 2011; Yoshida et al., 2007). Aber auch Kaugummi, Fruchtgummi oder eine Vielzahl unterschiedlich harter und weicher Lebensmitteln (Schindler et al., 1998) wurden in Studien zur Untersuchung des Kauens verwendet. Bekannte Lebensmittel haben den Vorteil, dass die Probanden an die Testnahrung bereits gewöhnt sind, während die unbekannte Testnahrung (Silikonwürfel) den Vorteil bietet, für alle Probanden gleich unbekannt zu sein.

Testnahrung wie Fruchtgummi oder Kaugummi könnten durch Ernährungsgewohnheiten der Probanden Einfluss auf die Ergebnisse des Kaumuster oder der Kaueffektivität haben. Zur Untersuchung der Kaueffektivität werden unterschiedliche Verfahren angewendet. Die Mehrzahl der Studien untersuchte die Kauleistung durch mehrfaches Sieben der zerkleinerten Testnahrung durch unterschiedlich große Siebe(Edlund und Lamm, 1980; Olthoff et al., 1984). Andere Studien nutzten den Farbwechseln eines Kaugummis zur Bestimmung der Mischeffektivität beim Kauen (Hama et al., 2014; Matsui et al., 1996) oder die Messung der Glukosekonzentration (Uesugi und Shiga, 2017) zur Bestimmung der Kaueffektivität.

In der vorliegenden Studie erfolgte keine Untersuchung der Kauleistung. Dies wäre für weitere Studien von Interesse, um den Effekt der Aufbissplateaus auf die Kauleistung während der einwöchigen Studienphase zu untersuchen. Ebenfalls ist nicht auszuschließen, dass mögliche Effekte auf die Testnahrung zurückzuführen sind, da keine direkte Vergleichbarkeit zu anderen Studien besteht. Weitere Limitationsaspekte des Kauguts sind Größe und Klebrigkeit. Seitenwechsel und Änderungen der präferierten Kauseite könnten mit der Klebrigkeit oder mit der Umverteilung großer Stücke zusammenhängen und somit das Ergebnis der Untersuchung beeinflussen.

Da das Alter und die Anzahl der Zähne einen Effekt auf die objektive und subjektive Kaufunktion haben (van der Bilt, 2011), wurde in der vorliegenden Studie ein vollbezahntes, eugnathes Gebiss als Einschlusskriterium definiert und die Probandengruppe aus Studenten im Alter von 22 bis 29 Jahren gebildet, um oben genannte Faktoren zu reduzieren. Da die Gruppe der Probanden jedoch nicht geschlechtsspezifisch ausgesucht wurde, können für ein Geschlecht spezifische Einflüsse auf die Untersuchung nicht ausgeschlossen werden.

Welchen Effekt die Aufbissplateaus auf das Kauverhalten der Probanden hatten, ist mit dem hier gezeigten Versuchsaufbau ohne Kontrollgruppe nicht abschließend zu klären(Hellmann et al., 2021). Fehlende Signifikanzen können eventuell auf die kleine Gruppengröße zurückzuführen sein. Für weitere Untersuchungen bezüglich einer klinischen Relenvanz der hier gezeigten Ergebnisse wäre ein Versuchsaufbau mit mehr Probanden und mindestens einer Kontrollgruppe von Vorteil.

Vertikale Amplitude der Kauschleife

Die vertikale Amplitude der Kauschleifen war zum Zeitpunkt T_2 im Vergleich zu T_1 vor der Intervention durch die Aufbissplateaus für alle drei Phasen der Kausequenz (P1 – P3) größer (Hellmann et al., 2021).

Es wird vermutet, dass der Funktionsraum für das Kauen während der einwöchigen Intervention an die veränderte vertikale Höhe angepasst wurde (Hellmann et al., 2021), woraus ein größerer Abstand der Umkehrpunkte resultierte.

Eine größere Kieferöffnung beim Kauen führt laut Studien von Uesugi und Shiga, Yoshida et al. und Flores-Orozco et al. zu einer gesteigerten Performance, d. h., je größer die Kieferöffnung (opening distance/vertikale Amplitude) desto besser die Kauleistung (Uesugi und Shiga, 2017; Yoshida et al., 2007; Flores-Orozco et al., 2016). Bezogen auf unser Studienprotokoll mit der Irritation durch die Aufbissplateaus könnte die größere vertikale Amplitude (= größere Kieferöffnung beim Kauen) auf eine Kompensation dieses Störfaktors zurückzuführen sein. Durch die Aufbissplateaus könnte es zunächst zu einer Abnahme der Performance/Kaueffektivität gekommen sein und durch die Anpassung an die vertikale Höhe der Plateaus im Sinne einer gesteigerten Kieferöffnung dann eine Steigerung der Kaueffektivität erreicht worden sein. Da in der vorliegenden Studie weder die Kaueffektivität noch die Kauperformance untersucht wurden, kann diesbezüglich keine endgültige Schlussfolgerung aus den hier dargestellten Ergebnissen gezogen werden. Dazu wären weitere Untersuchungen, die eine Betrachtung der Effektivität und der Kauleistung ermöglichen, nötig (Hellmann et al., 2021).

Die Zeitspanne, die benötigt wird, um eine definierte Menge an Testnahrung zu zerkleinern und zu schlucken, wird als Kauleistung definiert (Tewksbury et al., 2018). In der vorliegenden Studie wurde die Anzahl der Kauzyklen auf 20 begrenzt. Die Probanden sollten die Testnahrung erst nach Abschluss aller 20 Kauzyklen schlucken. Rhythmus und Zeit waren nicht vorgegeben. Jeder Proband konnte in seinem individuellen Rhythmus kauen, da die Anzahl der Kauzyklen durch die Versuchsleitung gezählt und die Messung entsprechend gestoppt wurde. Dieses Vorgehen sollte den Probanden die Option geben, möglichst natürlich zu Kauen.

Fläche der Kauschleife

Die Fläche der Kauschleife in der Frontalebene (YZ-Achse, s. Abb. 15) beschreibt die räumliche Ausdehnung bzw. die räumliche Bewegung des Unterkiefers beim Kauen. Durch Veränderungen des physiologischen Ablaufs, wie hier durch das Eingliedern der Aufbissplateaus, könnte es zu Veränderungen dieses beim Kauen genutzten Raumes kommen. Die Auswertung dieser Fläche zeigte eine signifikante Vergrößerung dieser Fläche und somit des Funktionsraumes des Unterkiefers. Es wäre zu vermuten, dass durch die Entkopplung durch die Aufbissplateaus und die gesteigerte vertikale Amplitude der Kauschleife der genutzte Raum beim Kauen größer wurde, analog der Veränderungen der vertikalen Amplitude (Hellmann et al., 2021).

Die Vermutung, dass durch die Einschränkung während des Kauens mit den Plateaus eine Kompensation im Sinne einer Flächenvergrößerung erfolgte, um das Kaugut adäquat zerteilen zu können, liegt nahe.

Laterale Breite der Kauschleife

Die laterale Breite der Kauschleife entspricht der breitesten Stelle der Kauschleife. Diese Distanz zeigt ebenfalls eine Vergrößerung (für P2 signifikant) von T_1 zu T_2. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Kauschleifen breiter werden, was einer Funktionsraumerweiterung in lateraler Richtung entspricht (Hellmann et al., 2021). Eine mögliche Erklärung für diese Funktionsraumweiterung wäre die Kompensation der Störung der physiologischen Kaubewegung und -effektivität durch die eingegliederten Aufbissplateaus. Durch die Ausdehnung des Funktionsraumes nach lateral und vertikal könnte diese Störung kompensiert worden sein. Aus der Vergrößerung der lateralen und der vertikalen Amplitude resultiert dann somit die Vergrößerung des Funktionsraums.

Vertikales Niveau der lateralen Breite der Kauschleife

Die breiteste Stelle der Kauschleife verlagert sich bei T_2 weiter nach kaudal, d. h., das vertikale Niveau, auf dem sich die maximale laterale Breite der Kauschleife zeigt, erfolgte bei größerer Kieferöffnung. Im Nahbereich der IKP kam es zu einer Vertikalisierung des Kaumusters bei Annäherung an die neue IKP auf den flachen Plateaus. Die horizontale Komponente der Kaubewegung (Mahlbewegung) verlagerte sich nach kaudal.

Eine mögliche Erklärung hierfür wäre eine erhöhte Stereotypie beim Kieferschluss, um das Verletzungsrisiko zu verringern. Des Weiteren wäre eine Adaptation des Kaumusters an die veränderten Bedingungen durch die Aufbissplateaus als Erklärung in Betracht zu ziehen. Ein hackbissähnliches Kaumuster könnte auf der planen Oberfläche der Plateaus zur Stabilisierung der Nahrung und damit zur Kompensation der Störung durch die Aufbissplateaus dienen.

4.3.2 Präferierte Kauseite

Kauen wird als bilateral bezeichnet, wenn der Proband die Testnahrung auf beiden Seiten gleichzeitig oder abwechselnd aber gleichmäßig auf beiden Seiten zerkleinert. Von einem einseitigen oder unilateralen Kaumuster spricht man, wenn eine Seite beim Kauen dominiert (Martinez-Gomis et al., 2009).

Wie die präferierte Kauseite bestimmt wird, unterscheidet sich deutlich zwischen den einzelnen Forschungsgruppen. Oftmals wird die präferierte Kauseite mit der Seite des ersten Kontakts beim Kauen gleichgesetzt, andere ermitteln einen Asymmetrie Index (AI). Differenzen zwischen Studienergebnissen können durch unterschiedliche Versuchsanordnungen, unterschiedliche Testnahrung und Unterschiede in der Zusammensetzung der Probandengruppe erklärt werden. Unterschiede in der Lateralität bzw. der präferierten Kauseite zeigen sich laut Studien hauptsächlich bei harten Nahrungsmitteln (Zamanlu et al., 2012; Mizumori et al., 2003). Das könnte daran liegen, dass weiche Nahrung weniger Kraftaufwand benötigt und daher auf beiden Seiten gleich gekaut werden kann. Bei härteren Lebensmitteln hingegen dominiert eine Seite die andere (Mizumori et al., 2003). Daraus folgernd könnte das hier verwendete weiche Fruchtgummi einen Einfluss auf die Präferenz der Kauseite gehabt haben. Um externe Faktoren wie fehlende Zähne, Zahnschmerzen, kariöse Läsionen oder eine CMD als Einflussfaktoren für die Lateralität beim Kauen auszuschließen, wurden diese als Ausschlusskriterien bzw. ein eugnathes Gebiss als Einschlusskriterium für die Probandengruppe definiert. In unserer Versuchsgruppe präferierten zum Zeitpunkt T_1 zwei Probanden die linke und sechs Probanden die rechte Seite, zum Zeitpunkt T_2 fünf Probanden die linke und fünf die rechte Seite. Sechs bzw. vier Probanden zeigten entsprechend keine Präferenz für eine Seite (50 ± 5 % Kauschleifen auf der rechten Seite). Durch die kleine Versuchsgruppe ist hier keine eindeutige Präferenz einer Seite nachweisbar. Zudem wechselten 11 der 14 Probanden ihre präferierte Kauseite bzw. die Kauseite ohne Präferenz zwischen T_1 und T_2.

Eine eindeutige Präferenz, wie sie in anderen Studien gezeigt werden konnte (Paphangkorakit et al., 2006; Rovira-Lastra et al., 2014; Zamanlu et al., 2012; Martinez-Gomis et al., 2009; Nissan et al., 2004; Christensen und Radue, 1985), stellte sich hier nicht heraus.

Eine deutliche Limitation in der Bestimmung der präferierten Kauseite ist die fehlende Beobachtung der Kauseitenpräferenz im natürlichen Kauverhalten ohne den Versuchsaufbau bzw. vor der durch die Aufbissplateaus entstehenden Irritation. Deshalb sollte für weitere Untersuchungen zunächst die Feststellung der Präferenz beim natürlichen Kauen ohne Versuchsaufbau bzw. durch Befragung der Probanden erfolgen. Erst dann sollte zusätzlich die Bestimmung mit der Messapparatur erfolgen, da diese eventuell Einfluss auf die Natürlichkeit der Kaumuster haben könnte.

Zu Beginn der Untersuchung zeigten mehr Probanden eine Präferenz für die rechte Seite, was den bisherigen Studienergebnissen entspricht. Am Ende der Untersuchung präferierten gleich viele Probanden die linke und rechte Kauseite. Sowohl das Kaugut als auch der Versuchsaufbau selbst (Messapparatur, Aufbissplateaus) könnten das Ergebnis beeinflusst haben. Durch die Klebrigkeit und die Größe der Fruchtgummi könnten einige Kauschleifen auch der Umverteilung der Nahrung im Mund gedient haben, ohne dass diese als eigentliche Kauseitenpräferenz gewertet werden können.

Die in der Einleitung beschriebenen Studienergebnisse zur Präferenz der rechten Seite beim Kauen konnten durch unsere Studie nicht eindeutig bestätigt werden.

5 Zusammenfassung

Veränderungen der Interkuspidation (IKP), ob gewollt oder ungewollt, und damit verbundene Veränderungen innerhalb der Steuerung des kraniomandibulären Systems (CMS) sind Erscheinungen zahnärztlicher und kieferorthopädischer Therapien. Ziel dieser Studie war es, den Einfluss einer einwöchigen okklusalen Entkopplung der IKP auf die physiologischen Bewegungen des CMS durch plane Aufbissplateaus auf den Molaren zu untersuchen. Zielparameter waren die Variabilität des Kieferschlusses in die IKP sowie in eine konstruierte, protrusive Trainingsposition. Des Weiteren sollten mögliche Veränderungen des Kaumusters beim Kauen von Testnahrung vor und nach der einwöchigen Entkopplung evaluiert werden.

Mit dem CMS20JMA (Jaw Motion Analyzer, zebris Medical GmbH/Isny) wurden Schließ- und Öffnungsbewegungen in die IKP und beim Kauen von Fruchtgummi dreidimensional aufgezeichnet. Mit dem eigens für diese Studie entwickelten Trainingsgerät, bestehend aus einer Oberkiefer (OK)- und einer Unterkiefer (UK)-Schiene, wurde ein 10-minütiges Training des Kieferschlusses in eine anteriore Trainingsposition (TP) durchgeführt, welche im Abstand von 50 % der protrusiven Kapazität entlang der probandenspezifischen Protrusionsbahn lokalisiert war. Hierfür wurde an einer Unterkieferschiene eine Kugel befestigt, welche von den Probanden in eine in der Oberkieferschiene (TP) eingelassene Vertiefung versenkt werden sollte. Anschließend folgte die Entkopplung durch das Eingliedern der planen Aufbissplateaus. Nach Entfernung der Aufbissplateaus (eine Woche nach T_1), wurden die Messungen wiederholt (T_2).

Die Variabilität der Schließbewegung des Unterkiefers in IKP hat sich während der einwöchigen Entkopplung nicht signifikant verändert. Zu beiden Messzeitpunkten T_1 und T_2 zeigte sich eine mit der Annäherung an die IKP abnehmende Variabilität der Kieferschließbewegungen, wobei im Bereich des Overbite erwartungsgemäß die geringste Variabilität auftrat. Dieses Ergebnis zeigt, dass die einwöchige Entkopplung keinen signifikanten Einfluss auf Variabilität des Kieferschlusses in die IKP hatte.

Während des 10-minütigen Trainings in der protrusiven Trainingsposition zeigt sich eine signifikant verringerte Variabilität des Kieferschlusses, was im Einklang mit früheren Studien steht und die gute Trainierbarkeit des CMS belegt.

Dieses Ergebnis zeigt jedoch, dass im Vergleich zu bisher bekannten Studien bereits 10 Minuten Training ausreichend sind um signifikante Veränderungen (hier: geringere Variabilität des Kieferschlusses in eine TP) zu erzielen. Trotz der signifikanten Verbesserung während des Trainings ergibt sich im direkten Vergleich zu der Schließbewegung in IKP immer noch eine signifikant größere Variabilität beim Kieferschluss in die TP.

Die Variabilität der Positionen rund um die Zielposition (TP) auf dem Plateau wiesen im Mittelwert dagegen keinen signifikanten Unterschied auf. Die Streuung beim Auftreffen in die TP bzw. auf das Plateau hat sich somit während des 10-minütigen Trainings nicht signifikant verbessert.

Die aufgezeichneten Kauschleifen wurden auf verschiedene Parameter hin untersucht, um Veränderungen durch die Entkopplung der Okklusion detektieren zu können. Die vertikale Amplitude weist eine signifikante Vergrößerung nach der Entkopplung auf, ebenso die Fläche der Kauschleife. Die laterale Breite zeigt ebenfalls eine Vergrößerung, welche jedoch nur in der mittleren Phase der Kausequenz signifikant ist. Das vertikale Niveau der lateralen Breite verlagerte sich signifikant nach unten. Es ist zu vermuten, dass die Veränderungen ein Effekt der Entkopplung und der damit verbunden Bisserhöhung durch die Aufbissplateaus bzw. die Anpassung des Kauverhaltens sind. Die Untersuchung der präferierten Kauseite zeigte keine signifikanten Ergebnisse. Auch wenn manche Probanden zwischen T_1 und T_2 die präferierte Kauseite wechselten, gab es keine wie in anderen Studien beschriebene probandenübergreifende Präferenz einer Seite. Zusammenfassend weisen alle untersuchten Parameter Veränderungen zwischen T_1 und T_2 auf. Dass diese Veränderungen nicht immer statistisch signifikant waren, könnte eventuell auf die geringe Größe der Stichprobe zurückzuführen sein.

Die vorliegenden Ergebnisse konnten die Stabilität der Steuerung des CMS beim Kieferschluss in IKP trotz der einwöchigen okklusalen Entkopplung bestätigen, gleichzeitig zeigte sich aber auch die Anpassungsfähigkeit des CMS beim Kauen unter erschwerten Bedingungen. Die Ergebnisse bestätigen zudem die ausgeprägte Adaptationsfähigkeit des CMS. Weitere Studien sind erforderlich, um Aufschluss über mögliche klinische und therapeutische Anwendungsmöglichkeiten zu geben.

6 Literaturverzeichnis

1 Ahlers, M. O., Jakstat, H. A., (2015):CMD- Screening mit dem "CMD-Kurzbefund". *ZWR – Das Deutsche Zahnärzteblatt* 124, 102-106.

2 Arima, T., Yanagi, Y., Niddam, D. M., Ohata, N., Arendt-Nielsen, L., Minagi, S., Sessle, B. J., Svensson, P. (2011): Corticomotor plasticity induced by tongue.task training in humans: a longitudinal fMRI study. *Experimental brain research* 212, 199-212.

3 Avivi-Arber, L., Lee, J-C., Yao, D., Adachi, K., Sessle, B. J. (2010): Neuroplasticity of face sensorimotor cortex and implications for control of orofacial movements. *Japanese Dental Science Review* 46, 132-142.

4 Avivi-Arber, L., Martin, R., Lee, J-C., Sessle, B. J. (2011): Face sensorimotor cortex and its neuroplasticity related to orofacial sensorimotor functions. *Archives of oral biology* 56, 1440–1465.

5 Barcellos, D. C., da Silva, M. A., Batista G. R., Pleffken, P. R., Pucci, C. R., Bühler, B. A., Torres, C. R., de Paiva, G. S. (2012): Absence or weak correlation between chewing side preference and lateralities in primary, mixed and permanent dentition. *Archives of oral biology* 57, 1086–1092.

6 Bastian, A. J. (2008): Understanding sensorimotor adaptation and learning for rehabilitation. *Current opinion in neurology* 21, 628–633.

7 Behrends, J. C., Bischofberger, J., Deutzmann, R., Ehmke, H., Frings, S., Grissmer, S., Hoth, M., Kurtz, A., Leipziger, J., Müller, F., Pedain, C., Rettig, J., Wagner, C., Wischmeyer, E. (2010): *Physiologie Duale Reihe* (1. Aufl.) Thieme. 618–621.

8 Behr, M., Fanghänel, J. (2019): *Kraniomandibuläre Dysfunktionen* (1. Aufl.) Thieme. 20-27, 62-67.

9 Boudreau, S., Romaniello, A., Wang, K., Svensson, P., Sessle, B. J., Arendt-Nielsen, L. (2007): The effects of intra-oral pain on motor cortex neuroplasticity associated with short-term novel tongue-protrusion training in humans. *Pain* 132, 169–178.

10 Broekhuijsen, M. L., van Willigen, J. D. (1982): The precision of measurement and the stability of the preferred vertical dimension of occlusion in man. *Archives of oral biology* 27, 487–491.

11 Broekhuijsen, M. L., van Willigen, J. D. (1983): Factors influencing jaw position sense in man. *Archives of oral biology* 28, 387–391.

12 Christensen, L. V., Radue, J. T. (1985): Lateral preference in mastication: a feasibility study. *Journal of Oral Rehabilitation* 12, 421–427.

13 Cruccu, G., Berardelli, A., Inghilleri, M., Manfredi, M. (1989): Functional organization of the trigeminal motor system in man. A neurophysiological study. *Brain: a journal of neurology* 112, 1333–1350.

14 Dellow, P. G., Lund, J. P. (1971): Evidence for central timing of rhythmical mastication. *The Journal of Physiology* 215, 1–13.

15 Edlund, J., Lamm, C. J. (1980): Masticatory efficiency. *Journal of Oral Rehabilitation* 7, 123–130.

16 Flores-Orozco, E. I., Rovira-Lastra, B., Willaert, E., Peraire, M., Martinez-Gomis, J. (2016): Relationship between jaw movement and masticatory performance in adults with natural dentition. In: *Acta odontologica Scandinavica* 74, 103–107.

17 Forrester, S. E., Allen, S. J., Presswood, R. G., Toy, A. C., Pain, M. T. (2010): Neuromuscular function in healthy occlusion. In: *Journal of Oral Rehabilitation* 37, 663–669.

18 Güllich, A., Krüger, M. (2013): Sport, Das Lehrbuch für das Sportstudium. 1. Auflage, Springer, Berlin Heidelberg, S. 67- 268, 439-501.

19 Hama, Y., Kanazawa, M., Minakuchi, S., Uchida, T., Sasaki, Y. (2014): Properties of a color-changeable chewing gum used to evaluate masticatory performance. *Journal of prosthodontic research* 58, 102–106.

20 Hannam, A. G., de Cou, R. E., Scott, J. D., Wood, W. W. (1977): The relationship between dental occlusion, muscle activity and associated jaw movement in man. *Archives of oral biology* 22, 25–32.

21 Hellmann, D., Giannakopoulos, N. N., Blaser, R., Eberhard, L., Rues, S., Schindler, H.- J. (2011): Long-term training effects on masticatory muscles. *Journal of Oral Rehabilitation* 38, 912–920.

22 Hellmann, D., Becker, G., Giannakopoulos, N. N., Eberhard, L., Fingerhut, C., Rammelsberg, P., Schindler, H.- J. (2014): Precision of jaw-closing movements for different jaw gaps. *European journal of oral sciences* 122, 49–56.

23 Hellmann, D., Brüstle, F., Terebesi, S., Giannakopoulos, N. N., Eberhard, L., Rammelsberg, P., Schindler, H.-J. (2015): Static balancing behaviour of the mandible. *European journal of oral sciences* 123, 439–446.

24 Hellmann, D., Schindler, H.-J. (2016): Koordinatives Training mit dem RehaBite® – Empfehlungen aus der Praxis. *ZMK Zahnheilkunde/ Management/ Kultur* 7-8, 486-489.

25 Hellmann,D., Glöggler, J. C., Plaschke, K., Jäger, R., Eiglsperger, U., Schindler, H.-J., Lapatki, B. G. (2021): Effects of preventing intercuspation on the prescision of jaw movements. *Journal of Oral Rehabilitation* 48, 392-402.

26 Hugger, A., Lange, M., Schindler, H.-J., Türp, J. C. (2016): Begriffsbestimmungen: Funktionsstörung, Dysfunktion, craniomandibuläre Dysfunktion, Myoarthropathie des Kausystems. Begriffsbestimmung der DGFDT https://www.dgfdt.de/aktuelle-leitlinien (10.08.2019)

27 Iida, T., Komiyama, O., Obara, R., Baad-Hansen, L., Kawara, M., Svensson, P. (2014): Repeated clenching causes plasticity in corticomotor control of jaw muscles. *European journal of oral sciences* 122, 42–48.

28 Johnsen, S. E., Trulsson, M. (2003): Receptive field properties of human periodontal afferents responding to loading of premolar and molar teeth. *Journal of neurophysiology* 89, 1478–1487.

29 Kang, J. H., Chung, S. C., Fricton, J. R. (1991): Normal movements of mandible at the mandibular incisor. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 66, 687–692.

30 Komoda, Y., Iida, T., Kothari, M., Komiyama, O., Baad-Hansen, L., Kawara, M., Sessle, B., Svensson, P. (2015): Repeated tongue lift movement induces neuroplasticity in corticomotor control of tongue and jaw muscles in humans. *Brain research* 1627, 70–79.

31 Koolstra, J. H., van Eijden, T. M. (1997): Dynamics of the human masticatory muscles during a jaw open-close movement. *Journal of Biomechanics* 30, 883–889.

32 Kothari, M., Svensson, P., Huo, X., Ghovanloo, M., Baad-Hansen, L. (2012): Force and complexity of tongue task training influences behavioral measures of motor learning. *European journal of oral sciences* 120, 46–53.

33 Krakauer, J. W., Mazzoni, P. (2011): Human sensorimotor learning: adaptation, skill, and beyond. *Current opinion in neurobiology* 21, 636–644.

34 Kumar, A., Grigoriadis, J., Trulsson, M., Svensson, P., Svensson, K. G. (2015): Effects of short-term training on behavioral learning and skill acquisition during intraoral fine motor task. *Neuroscience* 306, 10–17.

35 Kumar, A., Svensson, K. G., Baad-Hansen, L., Trulsson, M., Isidor, F., Svensson, P. (2014): Optimization of jaw muscle activity and fine motor control during repeated biting tasks. In: *Archives of oral biology* 59, 1342–1351.

36 Lu, S., Baad-Hansen, L., Zhang, Z., Svensson, P. (2013): One hour jaw muscle training does not evoke plasticity in the corticomotor control of the masseter muscle. *Archives of oral biology* 58, 1483–1490.

37 Lund, J. P. (1991): Mastication and its Control by the Brain Stem. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine* 2, 33–64.

38 Lund, J. P., Kolta, A. (2005): Adaption of the central masticatory pattern to the biomechanical properties of food. *International Congress Series* 1284, 11–20.

39 Lund, J. P., Kolta, A. (2006a): Brainstem circuits that control mastication: do they have anything to say during speech? *Journal of communication disorders* 39, 381–390.

40 Lund, J. P., Kolta, A. (2006b): Generation of the central masticatory pattern and its modification by sensory feedback. *Dysphagia* 21, 167–174.

41 Martinez-Gomis, J., Lujan-Climent, M., Palau, S., Bizar, J., Salsench, J., Peraire, M. (2009): Relationship between chewing side preference and handedness and lateral asymmetry of peripheral factors. *Archives of oral biology* 54, 101–107.

42 Matsui, Y., Ohno, K., Michi, K., Hata, H., Yagamata, K., Ohtsuka, S. (1996): The evaluation of masticatory function with low adhesive colour-developing chewing gum. *Journal of Oral Rehabilitation* 23, 251–256.

43 Mizumori, T., Tsubakimoto, T., Iwasaki, M., Nakamura,T. (2003): Masticatory laterality - evaluation and influence of food texture. *Journal of Oral Rehabilitation* 30, 995–999.

44 Morimoto, T., Inoue, T., Masuda, Y., Nagashima, T. (1989): Sensory components facilitating jaw-closing muscle activities in the rabbit. *Experimental Brain Research* 76, 424–440.

45 Morquette, P., Lavoie, R., Fhima, M.-D., Lamoureux, X., Verdier, D., Kolta, A. (2012): Generation of the masticatory central pattern and its modulation by sensory feedback. *Progress in neurobiology* 96, 340–355.

46 Nishigawa, K., Suzuki, Y., Ishikawa, T., Bando, E. (2012): Effect of occlusal contact stability on the jaw closing point during tapping movements. *Journal of prosthodontic research* 56, 130–135.

47 Nissan, J., Gross, M. D., Shifman, A., Tzadok, L., Assif, D. (2004): Chewing side preference as a type of hemispheric laterality. *Journal of Oral Rehabilitation* 31, 412–416.

48 Nordstrom, M. A. (2007): Insights into the bilateral cortical control of human masticatory muscles revealed by transcranial magnetic stimulation. *Archives of oral biology* 52, 338–342.

49 Olthoff, L. W., van der Bilt, A., Bosman, F., Kleizen, H. H. (1984): Distribution of particle sizes in food comminuted by human mastication. *Archives of oral biology* 29, 899–903.

50 Olthoff, L. W., van der Glas, H. W., van der Bilt, A. (2007): Influence of occlusal vertical dimension on the masticatory performance during chewing with maxillary splints. *Journal of Oral Rehabilitation* 34, 560–565.

51 Orchardson, R., MacFarlane, S. H. (1980): The effect of local periodontal anaesthesia on the maximum biting force achieved by human subjects. *Archives of oral biology* 25, 799–804.

52 Pang, M. Y., Yang, L., Ouyang, H., Lam, F. M., Huang, M., Jehu, D. A. (2018): Dual-Task Exercise Reduces Cognitive-Motor Interference in Walking and Falls After Stroke. *Stroke* 49, 2990–2999.

53 Paphangkorakit, J., Thothongkam, N., Supanont, N. (2006): Chewing-side determination of three food textures. *Journal of Oral Rehabilitation* 33, 2–7.

54 Peck, C. C., Wirianski, A., Murray, G. M. (2010): Jaw motor plasticity in health and disease. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering* 13, 455–458.

55 Proulx, M. J., Todorov, O. S., Taylor, A. A., de Sousa, A. A. (2016): Where am I? Who am I? The Relation Between Spatial Cognition, Social Cognition and Individual Differences in the Built Environment. *Frontiers in Psychology* 7, 64.

56 Reitemeier, B., Schwenzer, N., Ehrenfeld, M. (2006): *Einführung in die Zahmedizin* (1. Aufl.) Thieme, 98-124.

57 Rovira-Lastra, B., Flores-Orozco, E. I., Salsench, J., Peraire, M., Martinez-Gomis, J. (2014): Is the side with the best masticatory performance selected for chewing? *Archives of oral biology* 59, 1316–1320.

58 Schindler, H.-J., Stengel, E., Spiess, W. E. (1998): Feedback control during mastication of solid food textures - a clinical-experimental study. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 80, 330–336.

59 Schünke, M., Schulte, E., Schumacher, U., Voll, M., Wesker, K. (2012): *Prometheus LernAtlas der Anatomie* (3. Aufl.) Thieme. 106-109, 114-121, 124-125, 129, 437, 447, 520-521

60 Sessle, B. J. (2006): Mechanisms of oral somatosensory and motor functions and their clinical correlates. *Journal of Oral Rehabilitation* 33, 243–260.

61 Sessle, B. J., Adachi, K., Avivi-Arber, L., Lee, J., Nishiura, H., Yao, D., Yoshino, K. (2007): Neuroplasticity of face primary motor cortex control of orofacial movements. *Archives of oral biology* 52, 334–337.

62 Slavicek, G. (2010): Human mastication. *international journal of stomatology & occlusion medicine* 3, 29–41.

63 Stein, T., Bös, K. (2014): Überblick – Grundlagenwissen zum motorischen Lernen. *neuroreha* 06, 57–61.

64 Svensson, P., Romaniello, A., Arendt-Nielsen, L., Sessle, B. J. (2003): Plasticity in corticomotor control of the human tongue musculature induced by tongue-task training. *Experimental brain research* 152, 42–51.

65 Svensson, P., Romaniello, A., Wang, K., Arendt-Nielsen, L., Sessle, B. J. (2006): One hour of tongue-task training is associated with plasticity in corticomotor control of the human tongue musculature. *Experimental brain research* 173, 165–173.

66 Tewksbury, C. D., Callaghan, K. X., Fulks, B. A., Gerstner, G. E. (2018): Individuality of masticatory performance and of masticatory muscle temporal parameters. *Archives of oral biology* 90, 113–124.

67 Trulsson, M. (2006): Sensory-motor function of human periodontal mechanoreceptors. *Journal of Oral Rehabilitation* 33, 262–273.

68 Trulsson, M., Johansson, R. S. (1996): Forces applied by the incisors and roles of periodontal afferents during food-holding and -biting tasks. *Experimental brain research* 107, 486–496.

69 Türker, K. S. (2002): Reflex Control of Human Jaw Muscles. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine* 13, 85–104.

70 Uesugi, H., Shiga, H. (2017): Relationship between masticatory performance using a gummy jelly and masticatory movement. *Journal of prosthodontic research* 61, 419–425.

71 Utz, K. H., Schmitter, M., Freesmeyer, W. B., Morneburg, T., Hugger, A., Türp, J. C., Rammelsberg, P. (2010): Kieferrelationsbestimmung. Wissenschaftliche Mitteilung der Deutschen Gesellschaft für Prothetische Zahnmedizin und Biomaterialien e.V. https://www.dgzmk.de/zahnaerzte/wissenschaft-forschung/mitteilungen/details/document/kieferrelationsbestimmung.html (20.06.2019)

72 van der Bilt, A. (2011): Assessment of mastication with implications for oral rehabilitation: a review. *Journal of Oral Rehabilitation* 38, 754–780.

73 Woda, A., Foster, K., Mishellany, A., Peyron, M. A. (2006): Adaptation of healthy mastication to factors pertaining to the individual or to the food. *Physiology & behavior* 89, 28–35.

74 Yoshida, E., Fueki, K., Igarashi, Y. (2007): Association between food mixing ability and mandibular movements during chewing of a wax cube. *Journal of Oral Rehabilitation* 34, 791–799.

75 Zamanlu, M., Khamnei, S., SalariLak, S., Oskoee, S. S., Shakouri, S. K., Houshyar, Y., Salekzamani, Y. (2012): Chewing side preference in first and all mastication cycles for hard and soft morsels. *International Journal of Clinical and Experimental Medicine* 5, 326–331.

76 Zhang, H., Kumar, A., Kothari, M., Luo, X., Trulsson, M., Svensson, K. G., Svensson, P. (2016): Can short-term oral fine motor training affect precision of task performance and induce cortical plasticity of the jaw muscles? *Experimental brain research* 234, 1935–1943.

77 Zhang, H., Kumar, A., Luo, X., Svensson, K., Trulsson, M., Svensson, P. (2018): Effect of short-term training on fine motor control in trigeminally innervated versus spinally innervated muscles. *Human movement science* 58, 132–139.

7 Anhang

Abb. 37: Anamnesebogen des Universitätklinikums Ulm, Seite 1, aus Gründen des Urheberrechts entfernt

Abb. 38: Anamnesebogen des Universitätklinikums Ulm, Seite 2, aus Gründen des Urheberrechts entfernt

8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: neuronale Vernetzung des CPG aus Schindler et al. 1998 (Freigabe durch Prof. Schindler).....3
Abb. 2: Schemazeichnung der Rezeptorsysteme im CMS aus Türker 2002 (Freigabe durch SAGE publications).....6
Abb. 3: Veränderungen des Kaumusters durch extrinsische und intrinsische Faktoren aus Woda et al. 2006 (Freigabe durch ELSEVIER).....16
Abb. 4: OK-Trainingsgerät mit Trainingsplateau 22
Abb. 5: UK- Trainingsgerät mit Kugelanker und T- Attachment 22
Abb. 6: Aufbissplateaus auf dem Modell, OK- und UK-Trainingsgeräte auf dem Modell 24
Abb. 7: angelegter Gesichtsbogen zur Markierung der Referenzebene 25
Abb. 8: angelegter Empfängerbogen; Senderbogen mit Taststift zur Festlegung der Referenzebene 26
Abb. 9A: T-Attachment an die UK-Inzisivi angepasst, Ansicht von frontal Abb. 9B: störungsfreie Okklusion.....27
Abb. 10: EMG-Elektroden auf der Stirn platziert mit angelegtem Empfängerbogen 28
Abb. 11: zeitlicher Ablauf der Versuchsdurchführung Tag 1-8 28
Abb. 12: Trainingsposition (TP).....30
Abb. 13: Versuchsdurchführung zum Zeitpunkt T_1.....31
Abb. 14: Versuchsdurchführung zum Zeitpunkt T_2.....31
Abb. 15: Koordinatensystem Zebris CMS20JMA (Zebris Medical GmbH / Isny) 32
Abb. 16: A) Öffnungs- und Schließbewegung; gestrichelte Linie = Öffnungsbewegung, durchgezogene Linie = Schließbewegung B) Auswertungsfenster: die letzten 20 mm der Schließbewegung C) Aufgerichtete Bewegungsspur.....33
Abb. 17: D) Markierung der horizontalen Ebenen im Abstand von 1 mm
E) Aufsicht auf eine horizontale Ebene mit 5 Bewegungspunkten 34
Abb. 18: Beschreibung der Auswertungsebenen A) Ansicht von lateral B) Ansicht von frontal.....36
Abb. 19: Vertikale Amplitude der Kauschleife in der Frontalebene 37
Abb. 20: Fläche der Kauschleife in der Frontalebene.....38
Abb. 21: Laterale Breite der Kauschleife in der Frontalebene.....39
Abb. 22: Vertikales Niveau der lateralen Breite in der Frontalebene 40

Abb. 23: Variabilität der Schließbewegung in Interkuspidation (IKP) 42
Abb. 24: Standardabweichung (SD) der Schließbewegung in Interkuspidation (IKP), ... 43
Abb. 25: Variabilität beim Training zum Zeitpunkt T_1 in eine anteriore Unterkiefer (UK)-Position 44
Abb. 26: Standardabweichung (SD) beim Training zum Zeitpunkt T_1 in eine anteriore Unterkiefer (UK)-Position 44
Abb. 27: Vergleich der Variabilität der Schließbewegung in Interkuspidation (IKP) und der Schließbewegung auf das Trainingsplateau zwischen 16 bis 6 mm 45
Abb. 28: Vergleich der Variabilität der Schließbewegung in Interkuspidation (IKP) und der Schließbewegung auf das Trainingsplateau zwischen 16 bis 6 mm 47
Abb. 29: Vertikale Amplituden der Kauschleifen zu den Zeitpunkten T_1 und T_2 in mm 49
Abb. 30: Standardabweichung (SD) der vertikalen Amplituden der Kauschleifen zu den Zeitpunkten T_1 und T_2 49
Abb. 31: Fläche der Kauschleifen zu den Zeitpunkten T_1 und T_2 in mm^2 50
Abb. 32: Standardabweichung (SD) der Fläche der Kauschleife zu den Zeitpunkten T_1 und T_2 51
Abb. 33: Laterale Breite der Kauschleifen zu den Zeitpunkten T_1 und T_2 in mm 52
Abb. 34: Standardabweichung (SD) der lateralen Breite der Kauschleifen zu den Zeitpunkten T_1 und T_2 52
Abb. 35: vertikales Niveau der lateralen Breite der Kauschleifen zu den Zeitpunkten T_1 und T_2 in mm 53
Abb. 36: Standardabweichung (SD) des vertikalen Niveaus der lateralen Breite der Kauschleifen zu den Zeitpunkten T_1 und T_2 für die Schließbewegung 54
Abb. 37: Anamnesebogen des Universitätklinikums Ulm, Seite 1 76
Abb. 38: Anamnesebogen des Universitätsklinikums Ulm, Seite 2 77

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Effekte motorischen Trainings auf das kraniomandibuläre System (CMS) 11
Tabelle 2: Durchschnitts-, Maximal- und Minimalwerte (in mm) sowie Standardabweichungen der zur Herstellung der Trainingsgeräte ermittelten Werte 24
Tabelle 3: Verteilung der Kauschleifen über drei Wiederholungen für T_1 und T_2, Bestimmung der präferierten Kauseite 55
Tabelle 4: Darstellung der präferierten Kauseiten für T_1 und T_2 56
Tabelle 5: Wechsel der präferierten Kauseite von T_1 zu T_2 56

Danksagung

Die Danksagung wurde aus Gründen des Datenschutzes entfernt.

Lebenslauf

Der Lebenslauf wurde aus Gründen des Datenschutzes entfernt.