

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

Digitale zahnärztliche Okklusionsanalyse - eine Pilotstudie zur klinischen Anwendbarkeit

Dissertation

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

vorgelegt von

Elena Theresa Angel

2021

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

gez.:

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

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

Zweitgutachter: Prof. Dr. Benedict Wilmes

*In Liebe und Dankbarkeit meinen Eltern, Dennis und meiner Großmutter Katharina
gewidmet*

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit verfolgte das Ziel, anhand von 20 Studienteilnehmern zwei Methoden der digitalen okklusalen Kontaktpunkterfassung mit analoger Vorgehensweise zu vergleichen. Im Fokus stand dabei die statische Okklusion, jedoch sollten auch dynamische Aspekte berücksichtigt werden. Untergliedert wurde die Arbeit in drei Teile.

Im ersten Teil der Promotionsarbeit wurde die Genauigkeit zwischen extra- und intraoralen Scanverfahren anhand einer Analysesoftware verglichen. Die Digitalisierung der Zahnreihen erfolgte mit dem Extraoralscanner S600 (Fa. Zirkonzahn) und dem Intraoralscanner Trios 3 (Fa. 3Shape). Bei einem in vitro Versuch, ergab sich eine mittlere Abweichung von $40,72 \pm 20,40 \mu\text{m}$ für den Oberkiefer und eine mittlere Abweichung von $33,84 \pm 15,07 \mu\text{m}$ für den Unterkiefer. In vivo wurden mittlere Abweichungen von $49,50 \pm 17,83 \mu\text{m}$ im Oberkiefer und $53,30 \pm 50,73 \mu\text{m}$ erzielt.

Im zweiten Teil der Arbeit fand ein Vergleich zwischen drei verschiedenen Methoden zur Bestimmung statischer Okklusionskontakte statt. Bei der ersten Methode handelte es sich um die klassische klinische Methode mithilfe von Okklusionsfolie und Durchbissregistraten. Dieser standen die digitale Okklusionsanalyse mit der Methode Extraoralscan und die digitale Okklusionsanalyse mit der Methode Intraoralscan gegenüber. Die Zuverlässigkeit zwischen den verschiedenen Methoden wurde anhand des Intraklassen-Korrelations-Koeffizienten (ICC) bewertet. Im paarweisen Vergleich wurden je nach Kiefer- und Zahnregion ICC-Werte zwischen 0,51 und 0,83 erzielt. Im Vergleich aller drei Methoden untereinander lagen die ICC-Werte zwischen 0,57 und 0,79. Sowohl im paarweisen Vergleich als auch im Vergleich aller drei Methoden untereinander ergab sich dadurch eine durchschnittliche bis sehr gute Übereinstimmung in Bezug auf die Anzahl der ermittelten statischen Okklusionskontakte. Systematische Abweichungen zwischen den Methoden lagen nicht vor.

Im dritten Teil der Studie wurden dynamische Okklusionskontakte in der Spätphase von Kausequenzen digital betrachtet. Der Fokus lag auf der Häufigkeitsanalyse der verwendeten Kontakte während der letzten zehn Kauzyklen. Es konnte ein verstärktes Okkludieren auf der Balanceseite beobachtet werden, wobei ein spezifischer Hauptkontakt nicht immer reproduzierbar war. Für die Methode Intraoralscan wurden mittelwertig über alle 20 Probanden 0,25 bis 2,1 Kontakte gezählt, für die Methode Extraoralscan waren es 0,15 bis 2,35 Kontakte.

SUMMARY

The aim of the present project was to use 20 study participants to compare two methods of digital occlusal contact point detection with an analog approach. The focus was on static occlusion, but dynamic aspects should also be considered. The project was divided into three parts.

In the first part of the doctoral thesis, the accuracy between extra- and intraoral scanning methods was compared by using an analysis software. The rows of teeth were digitized with the extraoral scanner S600 (Zirkonzahn) and the intraoral scanner Trios 3 (3Shape). In an in vitro test, there was a mean deviation of $40.72 \pm 20.40 \mu\text{m}$ for the upper jaw and a mean deviation of $33.84 \pm 15.07 \mu\text{m}$ for the lower jaw. In vivo mean deviations of $49.50 \pm 17.83 \mu\text{m}$ in the upper jaw and $53.30 \pm 50.73 \mu\text{m}$ were achieved.

In the second part of the thesis, a comparison was made between three different methods for determining static occlusal contacts. The first method was the classic clinical method using occlusion foil and bite registrations. This contrasted with the digital occlusion analysis with the extraoral scan method and the digital occlusion analysis with the intraoral scan method. The reliability between the different methods was assessed by using the intra-class correlation coefficient (ICC). Depending on the jaw and tooth area ICC results between 0,51 and 0,83 were reached in a pairwise comparison and in a comparison of all three methods with one another, the ICC values were between 0,57 and 0,79. Both in the pairwise comparison and in comparison of all three methods with one another, this resulted in an average to very good agreement with regard to the number of the determined static occlusion contacts. There were no systematic deviations between the methods.

In the third part of the study, dynamic occlusion contacts in the late phase of masticatory sequences were digitally examined. The focus was on the frequency analysis of the used contacts during the last ten chewing cycles. Increased occlusion on the balance side could be observed, although a specific main contact was not always reproducible. Over all 20 participants of the study an average of 0,25 to 2,1 contacts was counted for the intraoral scanning method and an average of 0,15 to 2,35 contacts for the extraoral scanning method.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AWS	Active Wavefront Sampling
BDIFF	Betragsdifferenz
CAD	Computer-aided design
CAM	Computer-aided manufacturing
CCD	Charge-coupled device
CLA	Codierter Lichtansatz
CMD	Kraniomandibuläre Dysfunktion
DLP	Digital Light Processing
DMD	Digital Mirror Device
DS-GVO	Datenschutzgrundverordnung
EOS	Extraoralscanner
Et al.	Et alii (Maskulinum), et aliae (Femininum), und andere
FGP	Functionally Generated Path
FK	Freies Kauen
GCS	Graduierung chronischer Schmerzen
GEDAS	Greifswald Digital Analyzing System
ICC	Intraclass Correlation Coefficients
ID	Identität
IOS	Intraoralscanner
IP	Interkuspitation
IR	Infrarot
JMA	Jaw Motion Analyzer
JMA^{Optic}	Optic Jaw Motion Analyzer
LED	Licht emittierende Diode
LK	Links Kauen
M.	Musculus
mm	Millimeter
µm	Mikrometer
RK	Rechts Kauen
STL	Stereolithographie, Standard Triangulation/Tesselation Language

Sync-LED	Synchronisierungs-LED
tan	Tangens
TR	Trios
v.a.	Vor allem
vgl.	Vergleiche
z.B.	Zum Beispiel
ZZ	Zirkonzahn
$\leq$	Kleiner gleich
$<$	Kleiner
%	Prozent

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung	I
Summary.....	II
Abkürzungsverzeichnis	III
Inhaltsverzeichnis	V
1 Einleitung	8
1.1 Kausystem.....	8
1.1.1 Zähne und Parodontium	8
1.1.2 Kiefergelenke.....	9
1.1.3 Muskulatur.....	10
1.1.4 Neuromuskuläre Steuerung	11
1.2 Unterkieferbewegungen.....	12
1.2.1 Bewegungsformen	12
1.2.2 Grenzbewegungen und funktionelle Bewegungen.....	13
1.3 Okklusion.....	15
1.3.1 Bedeutung und Aufgaben der Okklusion	15
1.3.2 Statische und dynamische Okklusion	17
1.3.3 Funktionelle Okklusion	19
1.3.4 Physiologische und nicht-physiologische Okklusion.....	20
1.3.5 Fehlende Okklusion.....	21
1.4 Okklusionsanalyse	21
1.4.1 Klinisch analoge Methoden	21
1.4.2 Digitale Methoden	24
1.4.3 Instrumentelle Verfahren zur Okklusionsanalyse.....	26
1.5 Digitale Technologien – Stand der Technik	28
1.5.1 Virtuelle Artikulatoren	28

1.5.2	Elektronische Systeme zur Unterkiefer-Bewegungsanalyse	28
1.5.3	Digitale Abformung durch Scanner.....	30
2	Ziele der Arbeit	41
3	Material und Methode	42
3.1	Ethikkommission, Einwilligungserklärung und Datenschutz	42
3.2	Studienteilnehmer	42
3.3	Übersicht.....	43
3.4	Verwendete Systeme und Software	45
3.4.1	Scanner	45
3.4.2	Kieferregistriersystem	49
3.4.3	Software.....	50
3.5	Angewandte Methoden	63
3.6	Arbeitsabläufe am Probanden und Labor	70
3.7	Statistische Auswertung.....	77
4	Ergebnisse	79
4.1	Konturabweichung des Intraoralscanners zum Extraoral-scanner.....	79
4.2	Kontaktpunktauswertung in der statischen Okklusion	81
4.3	Kontaktpunktauswertung in der dynamischen Okklusion	110
5	Diskussion	118
5.1	Methodendiskussion	118
5.1.1	Materialbedingte Einflussfaktoren	118
5.1.2	Personenbedingte Einflussfaktoren	124
5.2	Ergebnis Diskussion	126
5.2.1	Studienlage zur analogen und digitalen Abformung	126
5.2.2	Studienlage zur digitalen Kontaktpunktauswertung.....	129
5.2.3	Erzielte Ergebnisse bei der Konturabweichung zwischen Extra- und Intraoralscanner.....	131

5.2.4	Erzielte Ergebnisse bei der Kontaktpunktauswertung.....	133
6	Schlussfolgerung und Ausblick.....	150
7	Verzeichnisse	151
7.1	Literaturverzeichnis	151
7.2	Tabellenverzeichnis	158
7.3	Abbildungsverzeichnis.....	159
8	Anhang.....	164
8.1	Konturabweichung des Intraoralscanners zum Extraoralscanner – Gesamte tabellarische Zusammenfassung	164
8.2	Bildergebnisse aller 20 Probanden aus der statischen und dynamischen Okklusion	168
	Danksagung.....	189

1 EINLEITUNG

Im folgenden einleitenden Kapitel wird das Kausystem mit seinen dazugehörigen Komponenten näher beschrieben. Da sich die folgende Promotionsarbeit mit dem Thema der digitalen Okklusionsanalyse befasst, gelten ein besonderes Augenmerk der Okklusion an sich und verschiedenen Methoden ihrer Analyse. Eine entscheidende Rolle spielt dabei auch der aktuelle Stand der Technik in Bezug auf die Generierung und Auswertung von Bewegungs- und Modelldaten.

1.1 KAUSYSTEM

Das Kausystem (stomatognathes System) setzt sich aus dem gesamten Zahn-, Mund- und Kiefersystem zusammen. Neben dem Ober- und Unterkiefer mit seinen beiden Kiefergelenken spielen beim stomatognathen System die Zähne und ihre Parodontien, die Kaumuskulatur sowie deren neuronale Ansteuerung eine entscheidende Rolle. Zu den Hauptaufgaben des Kausystems zählen die Nahrungszerkleinerung, das Atmen, Schlucken und Sprechen (Schindler/Hugger 2006).

1.1.1 Zähne und Parodontium

Wie bei den meisten Säugetieren durchläuft auch das menschliche Gebiss zwei Dentitionen (Diphyodontie) (Türp et al. 2006). In der ersten Dentition besitzt der Mensch 20 Zähne (Milchgebiss). Ab circa dem sechsten Lebensjahr beginnt der Durchbruch der bleibenden Zähne. Mit den Weisheitszähnen verfügt der Mensch dann über 32 Zähne, die sich sowohl in ihrer Funktion als auch in ihrer Optik unterscheiden. Jeder Zahn besteht aus einer Zahnkrone, einem Zahnhals und der Zahnwurzel über die die beim Kauakt frei werdenden Kräfte in die Kiefer weitergeleitet werden (Schindler/Hugger 2006). Die Verbindung zwischen Kieferknochen und Zahn stellt das Parodontium dar. Das Parodontium umfasst diejenigen Strukturen die den Zahn im Kiefer verankern. Hierzu zählen die Alveole, das Zahnfleisch, das Zahnzement und die Wurzelhaut. Die Verbindung zwischen Zahnwurzel und Alveole besteht aus kollagenen Fasern, die wiederum in Blutgefäße und Nervenendigungen eingebettet sind (Desmodont) (Schindler/Hugger 2006). Die Zähne sind also nicht starr im Kiefer verankert (Lehmann et al. 2012), sondern besitzen eine gewisse Eigenbeweglichkeit, um Belastungen besser abzufangen zu können und Schäden an den Zähnen selbst und am Kieferknochen zu vermeiden. Das Desmodont kann durch seine große Zahl an Rezeptoren als Sinnesorgan

wirken, indem es dem zentralen Nervensystem Informationen über die einwirkenden Kräfte liefert. Hierzu zählen zum Beispiel die Größe der Kraft, der Impuls und die einwirkende Richtung der Kraft (Schindler/Hugger 2006).

Als Zahngruppen kann man die Frontzähne von den Seitenzähnen unterscheiden. Zu den Frontzähnen zählen je Kiefer vier Schneide- und zwei Eckzähne. Wie der Name der Schneidezähne bereits sagt, besteht ihre Aufgabe in der Schneidefunktion von Nahrung in mundgerechte Stücke. Sie besitzen eine scharfe Kante zum Abtrennen der Nahrung und weisen eine Schaufel- bzw. Meißelform auf (Türp et al. 2006). Die Eckzähne dienen zum Festhalten und Abreißen von Nahrung. Ihre Form zeichnet sich durch eine Kauspitze aus (Türp et al. 2006). Die Seitenzähne werden unterteilt in Prämolaren und Molaren. Ihre Aufgabe besteht in der Nahrungszerkleinerung (Türp et al. 2006). Von der Form her besitzen sie eine Kaufläche mit Zahnleisten und zwei oder mehreren Höckern, die durch Fissuren und Grübchen voneinander getrennt sind.

1.1.2 Kiefergelenke

Die Kiefergelenke stellen eine bewegliche Verbindung zwischen dem Schädel und dem Unterkiefer dar. Neben dem Gelenkkopf (Kondylus), welcher mit dem Gelenkknorpel (histologisch: Faserknorpel) überzogen ist, zählen auch die Gelenkgrube (Fossa mandibularis), die Zwischengelenksscheibe (Discus articularis) und die Gelenkkapsel (Capsula articularis) zu den Kiefergelenken (Hugger/Schindler 2006). Im Gegensatz zu anderen Gelenken des menschlichen Körpers weist das Kiefergelenk zwei Besonderheiten auf. Eine davon ist, dass die beiden Seiten des Kiefergelenks durch die Unterkieferspange miteinander verbunden sind. Als Folge wird durch die Bewegung auf einer Seite immer auch eine Bewegung auf der gegenüberliegenden Seite generiert (Hugger/Kordaß 2018). Eine weitere Besonderheit ist die Art der Bewegung. Durch den anatomischen Aufbau über die Zwischengelenksscheibe sind sowohl eine Dreh- als auch eine Translationsbewegung möglich. Durch diese zwei Besonderheiten verfügen die Kiefergelenke über eine einzigartige Vielfalt an Bewegungsmustern, wodurch beispielsweise eine optimale Kraftübertragung zwischen den Zähnen zur Zerkleinerung von Nahrung gewährleistet werden kann (Schindler/Hugger 2006). Bei Bezaahnung ist durch Erreichen von Zahn-zu-Zahn-Kontakten zwischen Ober- und Unterkiefer ein fester Endpunkt in der Bewegung gesetzt (Hugger/Kordaß 2018). Unter physiologischen Bedingungen wird das Kiefergelenk auf Druck beansprucht (Hugger/Kordaß 2018; Hugger/Schindler 2006).

1.1.3 Muskulatur

Das muskuläre System ist das antreibende Element des Kauapparates. Zur Kaumuskulatur gehören der jeweils paarig angelegte Musculus temporalis, Musculus masseter, Musculus pterygoideus medialis und Musculus pterygoideus lateralis (Abbildung 1) sowie akzessorischen Muskeln, die beim Kauvorgang unterstützend wirken.

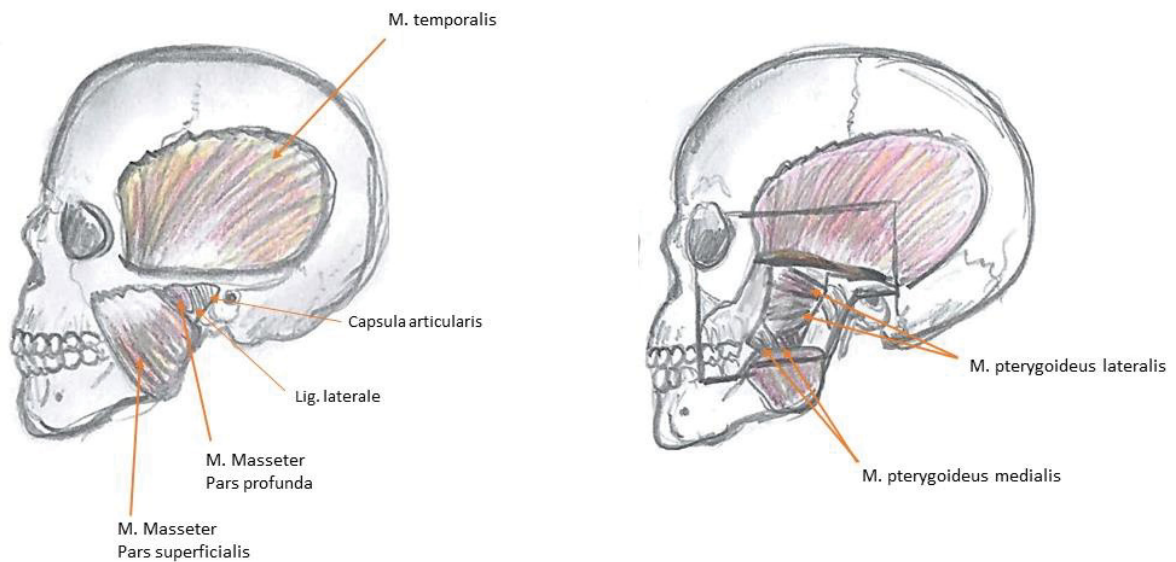


Abbildung 1: Kaumuskulatur.

Der flächenmäßig größte Kaumuskel ist der Musculus temporalis. Er besteht aus einem pars anterior und einem pars posterior. Aufgaben des Musculus temporalis sind der Kieferschluss (überwiegend pars anterior) und das Zurückziehen des Unterkiefers (pars posterior). Der Musculus masseter setzt sich aus einem pars superficialis und einem pars profunda zusammen. Die Aufgabe des Musculus masseter ist der Kieferschluss sowie der Vorschub des Unterkiefers. Der Musculus pterygoideus medialis hat eine ähnliche Funktion wie der Musculus masseter, nämlich der Kieferschluss und die Protrusion. Der Musculus pterygoideus lateralis setzt sich aus einem Caput superius und einem Caput inferius zusammen. Er ist der einzige Kieferöffner. Unterstützt wird er dabei durch die suprahyoidale Muskulatur (Lehmann et al. 2012; Putz/Pabst 2004) (Abbildung 2).

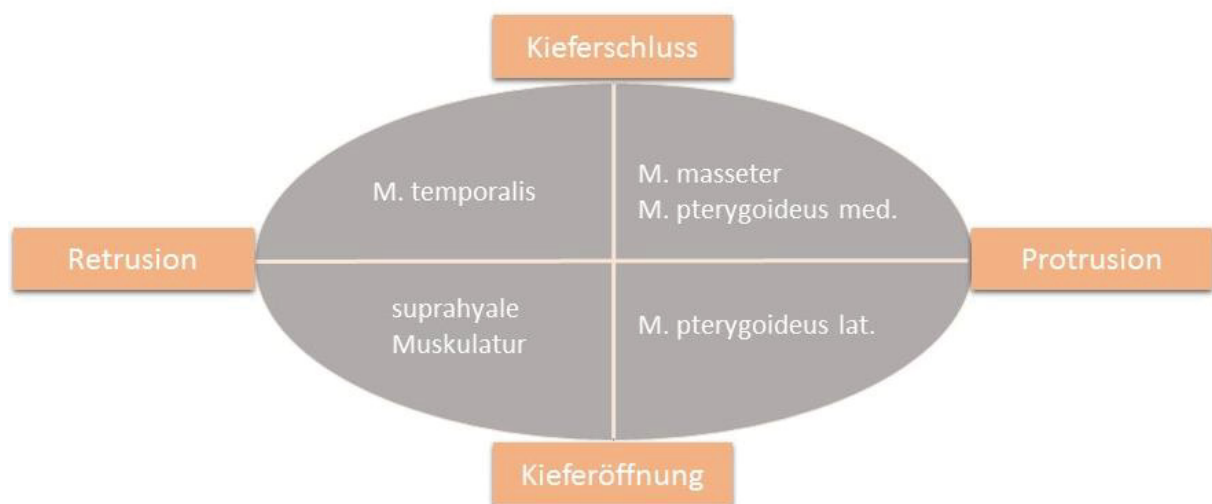


Abbildung 2: Kaumuskulatur und Unterkieferbewegungen.

Bild angefertigt durch Autor, modifiziert nach Lehmann et al. aus „Einführung in die Zahnerhaltung“ (Lehmann et al. 2012).

Bei der Muskelaktivierung lassen sich drei Formen unterscheiden: isotonische, isometrische und auxotone Aktivierung. Die isotonische Form der Muskelaktivierung kommt vornehmlich beim Öffnen und Schließen sowie bei Protrusion, Retrusion und Laterotrusion des Kiefers vor. Hierbei bleibt die Muskelspannung konstant, während sich der Muskel verkürzt. Beim Kauvorgang kommen alle drei Arten der Muskelaktivierung vor (Hugger/Schindler 2006). In der ersten Schließphase ist die Aktivierung isotonisch. Nachdem die Zähne Kontakt zur Nahrung hatten, zeigt die Muskulatur auxotonische Eigenschaften. Hierbei nimmt die Länge des Muskels ab, während die Kraft zunimmt. In der okklusalen Phase liegt nahezu eine isometrische Aktivierung vor, was bedeutet, dass eine Muskelspannung bei konstanter Muskellänge vorliegt (Hugger/Schindler 2006).

1.1.4 Neuromuskuläre Steuerung

Das Zusammenspiel zwischen Kiefergelenk, Muskeln und Zähnen wird durch das zentrale Nervensystem gesteuert. Es empfängt fortlaufend Informationen aus dem oralen und perioralen Bereich und passt die Bewegungsmuster reflektorisch an (Müller 2006). Die Rückmeldungen, die das ZNS aus den Rezeptoren des Kiefergelenks, der Muskeln und der Zähne erhält, bestehen aus Propriozeption (Empfinden für Körperlage und Körperbewegung) und Exterozeption (Wahrnehmung von Sinnesreizen aus der Umwelt) (Müller 2006; Duminil/Laplanche 2016). Im Kiefergelenk befinden sich freie Nervenendigungen sowie

Ruffini- und Pacini-Körperchen (Duminil/Laplanche 2016). Die beiden letztgenannten sind Mechanorezeptoren, welche sich in der Gelenkkapsel befinden und den darauf ausgeübten Druck detektieren. Die freien Nervenendigungen befinden sich in den Ligamenten und in der Gelenkkapsel. Sie spielen bei der Schmerzwahrnehmung eine Rolle (Duminil/Laplanche 2016). Die Kaumuskulatur verfügt über zwei Arten von sensorischen Rezeptoren sowie freie Nervenendigungen. Bei den sensorischen Rezeptoren handelt es sich um Muskelspindeln und Golgi-Sehnenorgane. Die Muskelspindeln liegen in den Muskeln selbst und erfassen den Dehnungszustand der Muskeln. Das Golgi-Sehnenorgan befindet sich in der Sehne des Muskels und hat dort die Aufgabe die mechanische Spannung zu messen. Die meisten Informationen werden jedoch über die Rezeptoren im Parodontalligament geliefert (Duminil/Laplanche 2016; Hugger et al. 2006). Millar et al. zufolge handelt es sich bei dabei um Rezeptoren die dem Ruffini-Typ entsprechen (Millar et al. 1989; Müller 2006). Die Funktionsweise des parodontalen Rezeptors variiert je nach Position im Parodontalligament. Es lassen sich langsam, schnell und spontan feuernde Sensortypen unterscheiden. Die Parodontalrezeptoren können in bis zu sechs Richtungen eine Empfindlichkeit aufweisen, wobei sich die meisten Zähne in nur zwei bis vier Richtungen sensitiv zeigen. Die Richtungssensitivität entspricht dabei der physiologischen Funktion des jeweiligen Zahns (Müller 2006).

1.2 UNTERKIEFERBEWEGUNGEN

1.2.1 Bewegungsformen

Unterkieferbewegungen kommen sowohl beim Kauen, Sprechen, Schlucken und bei sogenannten Leerfunktionen (z.B. beim Pressen und Knirschen, Leermastikationen im Schlaf usw.) vor. Laut Hugger und Schindler können die Unterkieferbewegungen als Zusammensetzung dreidimensionaler Bewegungsformen angesehen werden. Die „Bewegungsformen [...] beginnen aus einer gewohnheitsmäßigen Unterkieferposition heraus, die gewöhnlich einen maximalen Vielpunktkontakt zwischen Zähnen des Ober- und Unterkiefers aufweist“ (Hugger/Schindler 2006). Ausgehend von dieser Position können eine Vorschubbewegung (Protrusion), eine Seitwärtsbewegung nach rechts oder links (Laterotrusion), eine Öffnungsbewegung und eine Rückschubbewegung (Retrusion) unterschieden werden (Hugger/Schindler 2006). Jede Unterkieferbewegung setzt sich dabei aus einem Anteil zusammen, in dem sich der Unterkiefer aus der Ausgangsposition wegbewegt und einem Anteil, in dem sich der Unterkiefer wieder in die Ausgangsposition zurückbewegt. Die beiden Anteile müssen dabei nicht identisch sein (Hugger/Schindler 2006). Die Bewegungen

des Unterkiefers werden dabei von drei Führungsgrößen bestimmt: der Muskelführung, der Zahnführung und der Führung durch die Gelenkbahn und Bänder (Hohmann/Hielscher 2012).

1.2.2 Grenzbewegungen und funktionelle Bewegungen

Neben Unterkieferbewegungen mit Zahnkontakt (dynamische Okklusion, Kapitel 1.3) existieren auch freie Bewegungen ohne Zahnkontakt. Letztere werden nur muskulär und kondylär geführt. In Extremstellungen wie maximaler Mundöffnung oder maximalem Vorschub führen beide Bewegungsarten zu Grenzpositionen, die reproduzierbar eingenommen werden können (Lehmann et al. 2012). Die Bewegungen zwischen den verschiedenen Grenzpositionen sind Grenzbewegungen. Auch diese sind weitgehend reproduzierbar (Lehmann et al. 2012). Alle funktionellen Unterkieferbewegungen laufen innerhalb der Grenzbewegungen ab (Hohmann/Hielscher 2012; Lehmann et al. 2012). Im Gegensatz zu den Grenzbewegungen sind die funktionellen Bewegungen oft nicht eindeutig reproduzierbar (Hohmann/Hielscher 2012; Lehmann et al. 2012). Zur Analyse der Unterkieferbewegungen werden daher vorzugsweise die Grenzbewegungen herangezogen. Um die Grenzbewegungen analysieren zu können, werden gleichbleibende Referenzpunkte wie der Inzispunkt und die Kondylenmittelpunkte gewählt (Lehmann et al. 2012). Die maximalen Grenzbewegungen der Punkte werden auf die Median-Sagittalebene, die Frontalebene und die Horizontalebene übertragen. Setzt man alle Ebenen zusammen, entsteht eine Art Hülle, innerhalb der alle funktionellen Bewegungen stattfinden (Hohmann/Hielscher 2012). Betrachtet man die Bewegungen des Inzispunktes nur im zweidimensionalen Bereich und die drei Ebenen im Einzelnen, entsteht ein sogenanntes Posselt-Diagramm (Hohmann/Hielscher 2012).

Auf der Sagittalebene können Protrusion, Retrusion, maximale Öffnung, zentrische Okklusion und die Ruheschwebelage aufgezeichnet werden, welche auf der Öffnungsbahn liegt (Hohmann/Hielscher 2012) (Abbildung 3).

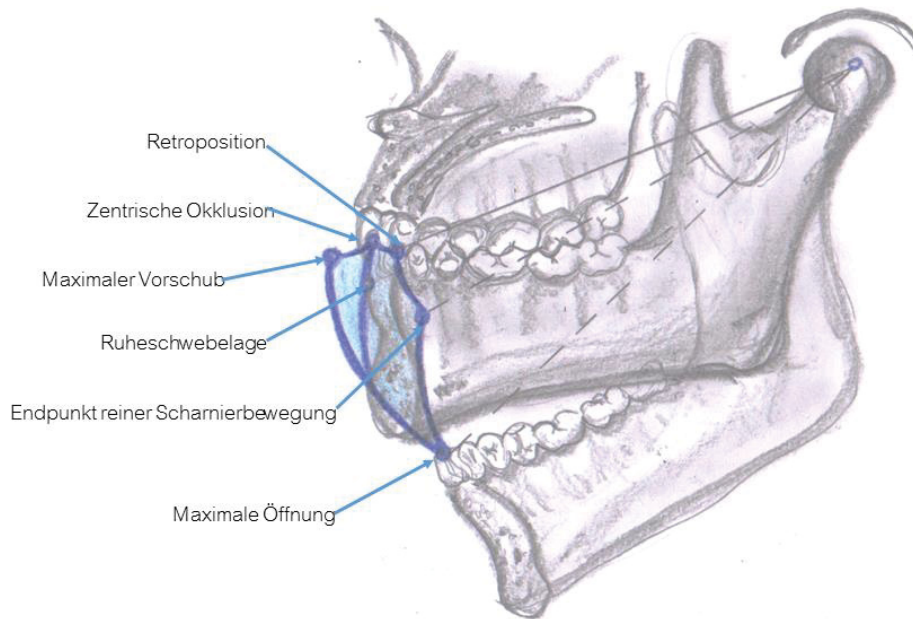


Abbildung 3: Grenzbewegungen des Unterkiefers in der Sagittalebene.

Zeichnung angefertigt durch Autor, Idee nach Hohmann und Hielscher „Lehrbuch der Zahntechnik Band 1“ (Hohmann/Hielscher 2012).

Bei der zahngeführten Protrusion (Vorschub) gleiten die Unterkieferfrontzähne entlang der Palatinalflächen der Oberkieferfrontzähne hinweg, bis sich der Kiefer in der maximalen Vorschubbewegung befindet. Die Retrusion ist zumeist von der okklusalen Situation im Seitenzahnbereich abhängig (Hugger/Schindler 2006).

Auf der Frontal- und Horizontalebene können die maximale Öffnung, der maximale Vorschub sowie die Lateralbewegungen nach rechts und links aufgezeichnet werden (Abbildung 4).

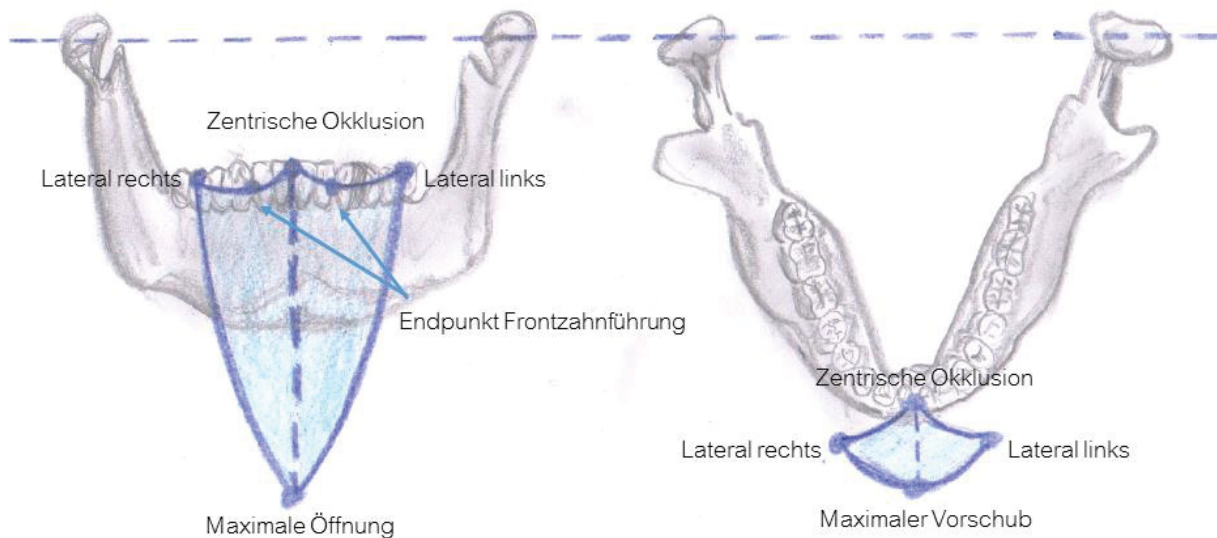


Abbildung 4: Grenzbewegungen des Unterkiefers in der Frontal- und Horizontalebene.

Zeichnung angefertigt durch Autor, Idee nach Hohmann und Hielscher „Lehrbuch der Zahntechnik Band I“ (Hohmann/Hielscher 2012).

Bei der Laterotrusion vollzieht der Inzisalpunkt eine relativ gleichmäßige Bewegung nach rechts oder links (Hugger/Schindler 2006).

Funktionelle Unterkieferbewegungen treten beim Kauen, Sprechen und Schlucken auf. Je nach Vorgang wird hier nur ein unterschiedlich großer Teil des maximalen Bewegungsspielraums ausgenutzt (Hugger/Schindler 2006). Die Bewegungen beim Sprechen laufen nur zum Teil unter Zahnkontakt ab. Beim Kauen kommt es oft in der Endphase und in Abhängigkeit von der Nahrungstextur zu Zahnkontakten. Das Prinzip des Kauvorgangs besteht darin, die Nahrung durch gegeneinander schiebende Okklusalfächen zu zerquetschen. Um die Nahrung greifen zu können, muss der Unterkiefer in eine leichte Seitwärtsposition gebracht werden. Aus dieser Seitwärtsposition erfolgt ein Zerreiben der Nahrung, bis es zu einem Eingleiten in der Schlussbiss kommt. Der Kauvorgang untergliedert sich daher in vier Phasen: Öffnungsphase, Seitwärtsverlagerung, Schließ- und Okklusionsphase (Hohmann/Hielscher 2012).

1.3 OKKLUSION

1.3.1 Bedeutung und Aufgaben der Okklusion

Unter dem Begriff Okklusion versteht man in der Zahnmedizin jeden Kontakt zwischen den Zähnen des Oberkiefers und denen des Unterkiefers (Türp et al. 2006). Insgesamt betrachtet kommt der Okklusion jedoch ein wesentlich breiteres Aufgabenspektrum zu als die schlichte

Interkuspidation von Zähnen. Die Okklusion stellt sozusagen das Endglied einer Funktionskette aus dynamisch – biologischen Beziehungen der einzelnen Komponenten des Kausystems dar und vereint die Interaktion von Zähnen, Kiefergelenken und Muskulatur (Hugger/Kordaß 2018).

Die Bedeutung der Okklusion wird häufig dann erst bewusst, wenn sie fehlt. Betrachtet man Patienten mit zahnlosen Kiefern, zeigen sich durch die eintretenden anatomisch und morphologischen Veränderungen eine ganze Reihe an funktionellen, ästhetischen und damit häufig auch psychosozial einhergehende Beeinträchtigungen (Türp et al. 2006). Aus der Evolution heraus gesehen spielte die Okklusion sogar eine überlebenswichtige Aufgabe. Die Nahrungsaufnahme in Form von Abbeißen über die Frontzähne und der Nahrungsverarbeitung durch das Kauen mittels der Seitenzähne gehört zu den primären Aufgaben der Okklusion. Weitere evolutionär bedingte Aufgaben der Okklusion waren die Zähne als Waffe zu benutzen. So stellt beispielsweise das Zeigen spitzer Eckzähne oder das Zähnefletschen bei Tieren ein Zeichen von Kraft und Stärke dar und dient der Abschreckung und Einschüchterung anderer. Sowohl evolutionär gesehen als auch heute dienen Zähne häufig als „dritte Hand“ um Gegenstände festzuhalten (Türp et al. 2006). Des Weiteren ist die Okklusion ein essentieller Bestandteil für die Aufrechterhaltung einer optimal funktionierenden Kaumuskulatur, da sie die vertikal notwendige Mindestdistanz zwischen Ober- und Unterkiefer sichert (Türp et al. 2006). Durch die Ruffini-Kolben im Desmodontalspalt fungieren Zähne auch als Tastorgane, mit denen sich „überraschend kleine Dimensionen [...] ertasten lassen“. „Die [...] Tastempfindlichkeit für kleinste Partikel liegt bei 8-15 Mikrometer“ (Kordaß/Lotze 2013). Auch bei der Stressverarbeitung spielen Zähne eine Rolle, beispielsweise beim Zähneknirschen oder Kieferpressen (Türp et al. 2006). Eine weitere Aufgabe, die der Okklusion zukommt, ist im Bereich der Phonetik anzusehen. Zähne tragen wesentlich zur Lautbildung bei indem sie als sogenannter Artikulator dienen und ein Hindernis im Resonanzraum darstellen. Durch das Hindernis kann der Luftstrom modifiziert und der Laut charakteristisch geformt werden. Weitere Aufgaben der Okklusion, die vor allem aus soziokultureller Sicht zählen, sind Ästhetik, Kosmetik und eine erotische Funktion. Wer schöne und gesunde Zähne hat, wird als optisch ansprechender empfunden als jemand, der fehlende, kariös zerstörte oder schiefe Zähne hat.

In der folgenden Tabelle (Tabelle 1) sollen die Aufgaben der Okklusion nochmal verdeutlicht werden (Türp et al. 2006):

Aufgaben der Okklusion	Beschreibung
Primäre Aufgaben	• Nahrungsaufnahme: Abbeißen (Frontzähne) • Nahrungsverarbeitung: Kauen (Seitenzähne) • Sicherung der vertikalen Distanz zwischen Ober- und Unterkiefer (vgl. Greisengesicht bei fehlender Okklusion) • Aufrechterhaltung einer Mindestdistanz zwischen Ober- und Unterkiefer für die optimale Muskelfunktion von M. masseter und M. pterygoideus medialis • Tastempfindung (Propriozeption) zur Registrierung von Zugspannung (Ruffini- Körperchen im Desmodontalspalt) • Stressverarbeitung: Knirschen, Pressen der Zähne • Phonetik: Lautbildung • Werkzeug: Festhalten, Zähne als „dritte Hand“ • Waffe: spitze Eckzähne
Sekundäre Aufgaben	• Ästhetik (v.a. Frontzähne) • Kosmetik (Zahnschmuck, „weiße“ Zähne) • Erotische Funktion

Tabelle 1: Aufgaben der Okklusion.

Tabelle modifiziert nach Türp, Alt, Schindler aus „Curriculum Orale Physiologie“ (Türp et al. 2006).

1.3.2 Statische und dynamische Okklusion

In der Zahnmedizin versteht man unter dem Begriff „Okklusion“ jeden Kontakt zwischen den Zähnen des Oberkiefers und des Unterkiefers (Türp et al. 2006). Von der Nomenklatur wird zwischen statischer und dynamischer Okklusion unterschieden. Bei der statischen Okklusion handelt es sich um Zahnkontakte, die ohne Bewegung des Unterkiefers bei Interkuspidation entstehen (Türp et al. 2006). Unter der dynamischen Okklusion versteht man Zahnkontakte, die infolge einer Bewegung des Unterkiefers wie beispielsweise bei der Kaubewegung entstehen (Türp et al. 2006). Sowohl der statischen als auch der dynamischen Okklusion werden weitere

Termini zugeteilt, die in der nachfolgenden Tabelle (Tabelle 2) erklärt werden (Ahlers et al. 2005; Maschinski 2000):

Statische Okklusion	Zahnkontakte ohne Bewegung des Unterkiefers
Maximale Interkuspidation	Statische Okklusion mit maximalem Vielpunktkontakt
Habituelle Okklusion	Gewohnheitsmäßig eingenommene statische Okklusion
Zentrische Okklusion	Maximale Interkuspidation bei zentrischer und druckfreier Kondylenposition. Die Zähne werden mittig zu ihren Parodontien belastet
Dynamische Okklusion (Artikulation)	Kontakte bei zahngeführten Bewegungen des Unterkiefers
Frontzahnführung	Dynamische Okklusion zwischen Ober- und Unterkiefer- Frontzähnen
Eckzahnführung	Dynamische Okklusion zwischen Ober- und Unterkiefer- Eckzähnen
Gruppenführung	Dynamische Okklusion zwischen mehreren Zähnen der Laterotrusionsseite
Interkuspidation	Schlussbiss bei maximalem Vielpunktkontakt

Tabelle 2: Unterteilung des Begriffs „Okklusion“.

Tabelle modifiziert nach „Lexikon Zahnmedizin, Zahntechnik“ (Maschinski 2000).

Bei auftretenden Kontakten in statischer Okklusion spricht man meist von Kontaktpunkten. Real handelt es sich dabei aber eher um kleinere Kontaktflächen. Diese kommen durch ein punkt- bis flächenartiges Berühren der Höcker und Kanten antagonistischer Zähne zustande. Bei jungen Patienten liegt noch ein ausgeprägtes Höcker-Fissuren-Relief mit schrägen Okklusalfächen vor, was günstige Voraussetzungen zum Zerkleinern der Nahrung bietet. Mit steigendem Abrasions- und Attritionsgrad der Zähne reduzieren sich die schrägen Okklusalfächen und das ausgeprägte Höcker-Fissuren-Relief. Die Okklusionskontakte werden dadurch in ihrer Fläche größer (Türp et al. 2006).

Bei der dynamischen Okklusion handelt es sich um Kontakte, die durch zahngeführte Bewegungen des Unterkiefers entstehen. Die zahngeführten Bewegungen entstehen aus der habituellen oder maximalen Interkuspitation heraus und man bezeichnet sie als exzentrische Bewegungen. Hierbei lassen sich drei Arten der exzentrischen Unterkieferbewegung differenzieren: protrusive, laterotrusive und retrusive Unterkieferbewegungen.

Bei der Protrusion (Frontzahnführung) handelt es sich um den zahngeführten Unterkiefervorschub. Okklusionskontakte, die hierbei zustande kommen, befinden vor allem auf den mittleren und seitlichen Inzisivi sowie den Eckzähnen. Zu Beginn der Vorschubbewegung tritt beim gesunden Normgebiss initial häufig eine Gruppenführung aller Frontzähne auf, während es im weiteren Verlauf meist zu einer dominanten Führung der mittleren Schneidezähne kommt, bis die Einnahme der Schneidekanten-Schneidekanten-Position zwischen Ober- und Unterkieferinzisivi erreicht ist. Je nachdem, wie steil die Oberkieferfrontzähne stehen, kann es auch in geringem Maße an den Seitenzähnen zu Protrusionskontakten kommen.

Die funktionelle Aufgabe der Frontzahnführung besteht im Schutz der Seitenzähne vor übermäßigen nicht-axialen Belastungen. Ermöglicht wird dies durch eine äußerst gut ausgebildete Tastempfindlichkeit der Frontzähne. In ihrem Desmodontalspalt befinden sich zahlreiche Mechanorezeptoren, welche dem Ruffini-Typ entsprechen (Millar et al. 1989; Müller 2006). Diese registrieren Zugspannungen und reagieren hochsensibel auf Veränderungen der Zahnbelastung von unter einem Newton. Seitenzähne dagegen reagieren erst auf Veränderungen der Zahnbelastung von circa fünf Newton (Türp et al. 2006).

Bei der Laterotrusion (Unterkiefer-Seitschub) kommt es entweder durch Eckzahnführung zu Kontakten an den Eckzähnen oder häufiger (vor allem dann, wenn die Eckzähne durch Attrition oder Abrasion verkürzt sind) auch zu Kontakten an den Seitenzähnen (Türp et al. 2006).

Die Retrusion (Rückschubbewegung des Unterkiefers) erfolgt zum größten Teil über die Seitenzähne (Türp et al. 2006).

1.3.3 Funktionelle Okklusion

Eine funktionelle Okklusion ist gegeben, wenn sie ihren Zweck erfüllt. Böttger et al. sahen den Zweck der Okklusion allem voran in der Nahrungszerkleinerung (Böttger et al. 1982). Zudem sollten aber auch alle anderen Aufgaben der Okklusion (Tabelle 1), beispielsweise das Abbeißen und Kauen, das Sprechen, etc. unterstützt werden. Der Patient sollte die Okklusion

als komfortabel empfinden und sich darin „zu Hause“ fühlen („home position“) (Hugger/Kordaß 2018).

1.3.4 Physiologische und nicht-physiologische Okklusion

Die Okklusion ist dann physiologisch, wenn keine Schäden an Zähnen und Zahnhalteapparat, Kiefergelenken oder Muskulatur auftreten. Eine physiologische Okklusion funktioniert gut, auch wenn sie in Einzelfällen von bestimmten Standardwerten abweicht. Zu den Kriterien einer physiologischen Okklusion zählen nach Türp, Alt und Schindler folgende Punkte (Türp et al. 2006):

- Okklusale Stabilität
- Zufriedenstellende Kaufunktion
- Beschwerdefreiheit an Zähnen, Desmodont, Kaumuskulatur und Kiefergelenke
- Zufriedenstellende Phonetik
- Zufriedenstellende Ästhetik

Während des gesamten Lebens zeigt die Okklusion Veränderungen, welche abhängig von den jeweils aktuellen funktionellen Gegebenheiten sind. Aber auch innerhalb eines einzelnen Tages kann die Okklusion intraindividuelle Differenzen aufweisen. So hängt sie beispielsweise von Faktoren wie der Tageszeit, der Lage des Körpers oder des Kopfes oder der Muskelaktivität aufgrund von emotionaler oder körperlicher Belastungen ab. Zu einem wesentlichen Faktor zählt auch der Anpressdruck der Unterkiefer- auf die Oberkieferzähne (Türp et al. 2006). Des Weiteren spielt auch die Darstellung der Okklusion eine Rolle. Je nach Dicke und Oberflächenstruktur des verwendeten Okklusionsindikators kann es zu intraindividuellen Abweichungen der Okklusion kommen (Türp et al. 2006).

Zu Okklusionsstörungen kann es durch den Falschstand von Zähnen, Frühkontakte durch Füllungen oder Zahnersatz oder durch Bisslageverschiebungen kommen. Wenn diese Okklusionsstörungen Veränderungen im stomatognathen System hervorrufen, spricht man von einer traumatisierenden Okklusion. Bei Zahnkontaktstörungen, die den Unterkiefer in eine abgleitende Position zwingen, spricht man von okklusalen Interferenzen (Hohmann/Hielscher 2012).

Ist die Okklusion nicht physiologisch, kann man zwischen den Begriffen „Malokklusion“ und „nicht-physiologischer Okklusion“ unterscheiden. Eine Malokklusion weicht nach Türp et al. vom Standard der Okklusion ab, was aber nicht unbedingt bedeutet, dass sie Beschwerden nach

sich zieht oder therapiebedürftig ist. Eine nicht physiologische Okklusion dagegen weist subjektive oder objektive pathologische Befunde auf und ist häufig behandlungsbedürftig (Türp et al. 2006).

1.3.5 Fehlende Okklusion

Eine besondere Leistung der Okklusion ist es, im gesamten Mundraum entlang der Zähne einen möglichst optimalen Beiß- und Kaukraftvektor generieren zu können um die Nahrung adäquat zu zerkleinern. Dabei müssen umliegende Strukturen wie beispielsweise die Kiefergelenke eine Last aufnehmen, die in etwa in der Höhe der auftretenden Beiß- und Kaukräfte liegt (Boyd et al. 1990; Hugger/Kordaß 2018; Hylander 1979). Durch das Fehlen von Zähnen im hinteren Bereich kommt es zu einer wesentlich höheren Belastung der Kiefergelenke als bei weitgehend intakter Bezahnung der Molaren (Hugger/Kordaß 2018). Studien zufolge hat es sich daher auch als sinnvoll erwiesen, verloren gegangene Zähne in Seitenzahnbereich aus funktioneller und präventiver Sicht zu ersetzen (Hugger/Kordaß 2018).

1.4 OKKLUSIONSANALYSE

Ziel der Okklusionsanalyse besteht darin, eine gute Funktionalität im Rahmen einer langfristigen Zahngesundheit zu gewährleisten. Stimmt die Okklusion nicht, können Schäden an den Zähnen selbst, am Parodontium oder den umliegenden Strukturen wie beispielsweise Muskulatur und Kiefergelenken entstehen. Daher zählt die Okklusionsanalyse zu einem unverzichtbaren Bestandteil im zahnärztlichen Alltag. Angefangen bei konservierenden Behandlungen wie Füllungen, bei prothetischen Arbeiten wenn Zahnersatz eingegliedert werden soll oder im Rahmen von Fragestellungen zu kranio-mandibulärer Dysfunktion spielt die Okklusionsanalyse immer eine entscheidende Rolle. Um Zahnkontakte zwischen den Ober- und Unterkieferzähnen zu ermitteln, gibt es heutzutage zahlreiche analoge und digitale Methoden. Bis jetzt sind aber weder Verfahren standardisiert worden noch gibt es einheitliche Definitionen über zu erfüllende Kriterien (Lovrov/Kordaß 2013).

1.4.1 Klinisch analoge Methoden

Alle klinisch analogen Verfahren zur Okklusionsanalyse erlauben eine mehr oder weniger zuverlässige Darstellung der Kontaktpunktverhältnisse (Ruge 2013; Tekscan 2017). Präzise Aussagen über die jeweilige Ausprägung der Kontakte sind jedoch nicht möglich (Ruge 2013).

Farbige Okklusionsindikatoren

Zu den farbigen Okklusionsindikatoren gehören Okklusionspapier, Okklusionsseide und Okklusionsfolie. Die Okklusionsfolie ist die dünnste der oben genannten Indikatoren und zeichnet daher am genauesten, jedoch am schlechtesten bei zu geringer Belastung (Reiber et al. 1989).

Aufgrund der einfachen Anwendbarkeit ist die Ermittlung von Okklusionskontakten mittels farbiger Okklusionsindikatoren eine gebräuchliche Methode (Lovrov/Kordaß 2013; Ruge 2013). Nachteil dieser Methode ist die relativ schlechte Reproduzierbarkeit (Carey et al. 2007; Ruge 2013). Festzuhalten ist außerdem, dass je fester zugebissen wird, umso mehr Kontakte angezeigt werden (Lovrov/Kordaß 2013; Riise 1982; Ruge 2013).

Abbildung 5 zeigt die Aufzeichnung statischer Okklusionskontakte mittels schwarzer Okklusionsfolie.



Abbildung 5: Aufzeichnung statischer Okklusionskontakte mit schwarzer Okklusionsfolie.

Shimstock-Folie

Bei der Shimstock-Folie handelt es sich um eine Prüffolie ohne Farbbeschichtung, die 8 µm Stärke aufweist. Während sich bei normal geschlossenen Zahnreihen die Folie gerade noch zwischen den Antagonisten durchziehen lässt, wird sie unter verstärkter Muskelspannung zwischen den antagonistischen Kontaktflächen festgehalten (Hugger/Kordaß 2018; Ruge 2013).

Wachsregistrare

Mittels Wachsregistraten kann die Okklusalfäche dreidimensional beurteilt werden. Je dünner die Wachsschicht zwischen den Antagonisten ist, desto stärker ist der Kontakt an der jeweiligen

Stelle. Myers und Anderson differenzierten die Qualität der Kontakte folgendermaßen (Myers/Anderson 1971):

- Wenig oder keine Verdünnung der Wachsschicht stellt einen annähernden Kontakt dar.
- Eine Verdünnung der Wachsschicht, die beim Halten des Registrats transluzent erscheint, stellt einen Kontakt dar.
- Eine Perforation der Wachsschicht stellt einen Suprakontakt dar.

Vorteil von Wachsregistraten gegenüber der Darstellung von Okklusionskontakten mittels farbiger Okklusionsfolie ist die bessere Reproduzierbarkeit (Ehrlich/Taicher 1981; Lovrov/Kordaß 2013; Ruge 2013).

Silikonregistrat

Ähnlich wie bei Wachsregistraten kann auch hier die Okklusalfäche dreidimensional beurteilt werden. Eine quantitative Beurteilung ergibt sich, indem das Registrat gegen eine Lichtquelle gehalten wird und auftretende transluzente Bereiche oder Perforationen als Kontaktpunkt gewertet werden (Dinçer et al. 2003; Hützen et al. 2007; Kordaß/Ruge 2019a; Koriöth 1990; Lovrov/Kordaß 2013; Ruge 2013; Woda et al. 1987) (Abbildung 6).



Abbildung 6: Silikonregistrat mit dargestellten Okklusionskontakten.

FGP-Technik

FGP steht für „Functional generated Path“. Im Gegensatz zu allen vorangehenden Arten der Okklusionsanalyse zeigt die FGP-Technik keine statischen Okklusionskontakte im Schlussbiss auf. Diese Methode verfolgt vielmehr das Ziel, die Okklusion in der Dynamik aufzuzeigen. Im Bereich einer späteren Restauration wird eine Registrierpaste aufgetragen, in die sich die Form der Antagonisten bei Gleitbewegungen sozusagen „eingraviert“ (Ruge 2013). Die Paste muss daher zu Beginn der Aufzeichnung eine weiche, aber standfeste Konsistenz aufweisen. Hat das

Registrat abgebunden gibt es den dreidimensionalen Bewegungsspielraum für eine später folgende Restauration wieder. Die Kaufläche kann so gegen das Registrat modelliert werden und Störkontakte können identifiziert werden. Die Methode stammt aus den 1930er Jahren aus Amerika und geht auf Meyer zurück (Meyer 1959). Die FGP-Technik setzt funktionierende okklusale Führungsflächen voraus und kann vor allem bei Einzelzahnrestaurationen eingesetzt werden. Heutzutage spielt sie in der virtuellen CAD/CAM-Umgebung eine Rolle. Das CEREC 3D System (Fa. Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) beispielsweise setzt diese Methode um (Müller 2006; Ruge 2013).

1.4.2 Digitale Methoden

Im Gegensatz zu den analogen Methoden der Okklusionsanalyse erfolgt die digitale Analyse der Kontaktpunkte nach standardisierten Kriterien. Werden jedoch analog erstellte Registrate (beispielsweise Silikonregistrat) digitalisiert, sind auch diese Ergebnisse nicht eindeutig reproduzierbar, da sich die Kraftaufwendung beim Zusammenbeißen auf die Stärke und Anzahl der Okklusionskontakte auswirkt (Gurdsapsri et al. 2000; Lovrov/Kordaß 2013; Ruge 2013; Sakaguchi et al. 1994).

Im Folgenden werden beispielhaft einige Methoden zur digitalen Erfassung von Okklusionskontakten aufgezeigt. Diese Auflistung erhält keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Photookklusion

Durch die Photookklusion versuchte man das Problem des Einflusses der Beißkraft auf das Ergebnis der Okklusionsanalyse zu lösen. Es fanden Folien Verwendung die speziell gefärbt waren und man so durch die Farbe der Abdrücke Rückschlüsse auf die Größe und Kraft der Okklusalkontakte ziehen konnte (Lovrov/Kordaß 2013; Millstein 1984). Es gab auch transparente photoelastische Folien, an denen mit Hilfe von polarisiertem Licht Okklusionskontakte dargestellt werden konnten (Arcan/Zandman 1984; Lovrov/Kordaß 2013).

T-Scan

Das T-Scan System (Fa. Tekscan, South Boston MA, USA) erschien erstmals 1984 zur digitalen Okklusionsanalyse auf dem Markt (Lovrov/Kordaß 2013; Maness et al. 1987; Ruge 2013). Das T-Scan System bietet die Möglichkeit die Entwicklung der Okklusion in Zeitlupe zu analysieren und die prozentuale Belastung jedes einzelnen Zahns zu analysieren. Mit Hilfe des T-Scan Systems können unter anderem Vor- und Störkontakte identifiziert werden (Tekscan 2020) und

es kann beispielsweise eine funktionelle Diagnostik und Kontrolle einer Schienen- oder Einschleiftherapie erfolgen.

Das T-Scan System arbeitet über drucksensible Folien. Die Folien werden in einem USB-Sensor-Handstück eingespannt und können über horizontal und vertikal verlaufende Leiterbahnen Kräfte erfassen. Die Auswertung erfolgt in Echtzeit über die dazugehörige Software (Lovrov/Kordaß 2013; Ruge 2013; Tekscan 2020). Je nach auftretender Kraft erfolgt die Darstellung der Okklusionsflächen in Balken entsprechender Höhe und Farbe. Zusätzlich wird der Kraftmittelpunkt über einen zeitlich und örtlich verlaufenden Pfad angezeigt (Tekscan 2020). Des Weiteren liefert ein Kraft-Zeit-Diagramm Informationen über die aufgebaute und gehaltene Kraft während des Zubeißens im Seitenvergleich (Tekscan 2020). Insgesamt wird die aufgewendete Kraft beim T-Scan System visuell anschaulich dargestellt, jedoch handelt es sich dabei nur um relative Angaben. Der tatsächlich aufgewendete Kraftwert lässt sich nicht messen (Ruge 2013). Zudem kann es durch die angewendete Messfolie zu Verfälschungen in der Auswertung kommen. Bei Patienten mit starkem Überbiss kann sich die Folie falten, was zu einer erschwerten Zahnzuordnung führen kann (Ruge 2013).

Dental Prescale Occluzer

Der Dental Prescale Occluzer (Fa. Fuji Film, Tokio, Japan) basiert auf drucksensitiven Folien, die mit Mikrokapseln ausgestattet sind. Moderne Folien erreichen eine Messgenauigkeit von bis zu 2000 Messpunkte pro mm² (Hidaka et al. 1999; Lovrov/Kordaß 2013; Matsui et al. 1996; Suzuki et al. 1994, 1997). Nachteilig ist, dass die tatsächliche Kraft häufig geringer ist, als die gemessene Kraft (Lovrov/Kordaß 2013; Suzuki et al. 1997).

OccluSense

Das relativ neu auf dem Markt erschienene OccluSense System (Fa. Bausch, Köln, Deutschland) basiert ebenso wie das T-Scan System auf einer drucksensiblen Folie, welche eine Stärke von 60 µm aufweist. Die okklusalen Verhältnisse können in 256 Druckstufen dargestellt werden. Zusätzlich ist auf der Druckfolie eine rote Farbschicht angebracht, die die Okklusionsflächen auch auf den Zähnen des Patienten markiert (Bausch o.J.). Durch das OccluSense System kann nachvollzogen werden, welche Kaukraft auf welchem Kontaktpunkt liegt (Redelberger 2019). Da es sich bei OccluSense um eine Art Artikulationsfolie handelt, kann es wie die herkömmlichen Mittel zur Okklusionsprüfung verwendet werden (Bausch o.J.).

GEDAS

Mittels des an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald entwickelten GEDAS Systems (Greifswald Digital Analyzing System) können statische Kontakte in Interkuspidation in ihrer Stärke, Ausdehnung und Lage dargestellt werden. Zur Aufzeichnung der Kontakte werden Silikonregistrare verwendet, welche im Anschluss mittels eines Scanners digitalisiert werden. Die Digitalisierung erfolgt einmal im Durchlicht und einmal im Auflicht. Beim Durchlichtscan werden die Bereiche mit der größten okklusalen Annäherung hell dargestellt. Durch den Auflichtscan werden die Zahnstrukturen sichtbar gemacht. Je nach verwendetem Helligkeitsschwellwert können okklusale Annäherungen als Kontakte definiert werden. Anschließend werden die Bilder übereinander gelegt, sodass die über den Helligkeitsschwellwert definierten Kontakte in ihrer Lokalisation und Ausdehnung auf den Zähnen sichtbar gemacht werden können (Hugger/Kordaß 2018; Lovrov/Kordaß 2013; Ruge 2013).

Bereits in einer Pilotstudie aus dem Jahr 2006 konnte eine große inter- und intraindividuelle Übereinstimmung der Analyseergebnisse erzielt werden (Hützen et al. 2006; Ruge 2013). GEDAS wurde bereits im Rahmen einer groß angelegten Bevölkerungsstudie (SHIP Studie/„Study of Health in Pomerania“) ab dem Jahr 2002 angewendet (Hugger/Kordaß 2018; Hützen et al. 2006, 2007; Lovrov/Kordaß 2013; Ruge 2013; Stern/Kordaß 2010).

1.4.3 Instrumentelle Verfahren zur Okklusionsanalyse

Die instrumentelle Okklusionsanalyse geschieht traditionell mit Hilfe von Artikulatoren. Dazu sind Modelle von Ober- und Unterkiefer notwendig, die ihrer Okklusion oder ihrem Nahbereich entsprechend zueinander ausgerichtet werden (Hugger/Kordaß 2018). Mit Hilfe dieser Modelle können die statische und dynamische Okklusion analysiert werden. Im Fokus stehen dabei laut Hugger und Kordaß vor allem „diagnostische und therapeutische Aspekte des Okkludierens in einer zentrischen Kieferrelation“ (Hugger/Kordaß 2018).

Artikulatoren

Artikulatoren sind mechanische Geräte, die zusammen mit darin eingebrachten Modellen die Lagebeziehung der Kiefer zueinander angeben und zur Imitation von Unterkieferbewegungen dienen. Sie haben sowohl diagnostische Funktion (Okklusionsanalyse, Einschleifdiagnostik, etc.) als auch therapeutische Funktion (Herstellung von prothetischem Zahnersatz, Aufbissschienen, etc.) (Strub et al. 1999). Da es sich beim Artikulator um ein technisches Gerät handelt, sind beim Versuch die Okklusion der Zahnreihen Statik und Dynamik nachzuahmen

auch die Grenzen der Mechanik gesetzt. Die Nachahmung ergibt daher keine identische Simulation der komplexen dreidimensionalen Unterkieferfunktion. Hugger und Schindler zufolge gibt es demnach einige Punkte zu beachten (Hugger/Schindler 2006):

- Aus biologisch-physiologischer Sicht fehlen die physiologische Eigenbeweglichkeit der Zähne, das elastische Deformationsverhalten des Kieferknochens, die Resilienz der Gewebe der Kiefergelenke und Informationen über die Aktivität und Koordination der Kaumuskulatur.
- Aus Sicht der Werkstoffkunde kommt es zu Dimensionsabweichungen der verwendeten Werkstoffe, zum Beispiel im Rahmen der Abformung, der Modellherstellung, der Modellmontage und der Fixierung der Kieferrelation.

Zusätzlich spielt auch die menschliche Komponente in Form der Sachkenntnis und der Geschicklichkeit des Anwenders eine Rolle. Dennoch zählt der Gebrauch von Artikulatoren in der restaurativen Zahnheilkunde heutzutage zum Standard bei der Rehabilitation der Zahnreihen (Hugger/Schindler 2006).

Die Bestandteile eines Artikulators setzen sich zusammen aus Modellträgern und Artikulatorgelenken, welche die Kiefergelenke als posteriore Determinante nachahmen sollen. Dazu kommen ein Frontstift und ein Frontstiftteller, die der Reproduktion der Schneidezahnführung als anteriore Determinante dienen (Lehmann et al. 2012).

Artikulatoren können nach ihren Einstellmöglichkeiten unterteilt werden. Mittelwertartikulatoren sind unter Berücksichtigung ermittelter Durchschnittswerte konstruiert und nicht patientenindividuell einstellbar. Die Gelenkbahnneigung ist mit 33° fest eingestellt und die Schneidezahnführung meist auf einen Wert zwischen 10° und 15°. Als Bewegungsmöglichkeiten bieten sie Scharnier- und Gleitbewegungen (Lehmann et al. 2012; Strub et al. 1999).

Individuelle Artikulatoren lassen sich nochmals in teil- und volladjustierbare Artikulatoren untergliedern. Bei beiden ist die schädelbezügliche Modellmontage mittels Gesichtsbogen Voraussetzung. Bei teiladjustierbaren Artikulatoren ist neben der Scharnier- und Gleitbewegung auch eine Retralbewegung möglich. Bei volladjustierbaren Artikulatoren können Unterkiefergrenzbewegungen annähernd patientenindividuell reproduziert werden (Lehmann et al. 2012; Strub et al. 1999).

1.5 DIGITALE TECHNOLOGIEN – STAND DER TECHNIK

1.5.1 Virtuelle Artikulatoren

Zur computergestützten Bewegungsanalyse stehen heutzutage auch virtuelle Artikulatoren in CAD-Systemen zur Verfügung. Auch diese funktionieren zumeist nach den bekannten mechanischen Prinzipien (Ruge et al. 2014) (Kapitel 1.4). Durch virtuelle Artikulatoren werden die Unterkieferbewegungen zwar digitalisiert, doch die Montage der Modelle geschieht entweder digital beispielsweise mittelwertig oder analog über einen Artikulator und die anschließende Digitalisierung der Modellposition über entsprechende Transferkits (Ruge et al. 2014). Die Zahnbewegungen im virtuellen Artikulator entsprechen auch denen im mechanischen Artikulator (Ruge 2013).

Eine Möglichkeit, um die starren Parameter der mechanischen Artikulation mit individuellen Daten zu überlagern, besteht darin, diese mit einer elektronischen Bewegungserfassung des Unterkiefers zu koppeln (Ruge 2013; Ruge et al. 2014). Auf diese Weise ist es möglich, den zeitlichen Ablauf von okklusalen Kontakten zu beobachten und dabei die Bewegungsbahn der Kondylen nachzuvollziehen (Gärtner/Kordaß 2003; Kordaß/Gärtner 1999; Ruge 2013).

1.5.2 Elektronische Systeme zur Unterkiefer-Bewegungsanalyse

Zur elektronischen Aufzeichnung von Unterkieferbewegungen stehen heutzutage eine Reihe unterschiedlicher Messsysteme zur Verfügung. Sie lassen sich durch ihre Messmethode sowie die Art der Aufzeichnung unterscheiden. In Bezug auf die Messmethode lassen sich optoelektronisch messende Systeme von Systemen unterscheiden, die auf Ultraschall- oder Magnetfeldbasis messen. Bezüglich der Art der Aufzeichnung lässt sich zwischen einer gelenknahen und gelenkfernen Anordnung der Sensorik sowie zwischen berührungshaft und berührungslos messenden Systemen differenzieren. Zudem kann noch unterschieden werden, ob ein Messsystem extraoral oder intraoral misst und welche Freiheitsgrade erfasst werden können. In der folgenden Tabelle (Tabelle 3) werden einige Beispiele aufgezählt. Es besteht jedoch kein Anspruch auf Vollständigkeit aller Messsysteme.

Messsystem	Messmethode	Art der Aufzeichnung
• ARCUSdigma (Fa. KaVo Dental, Biberach, Deutschland) • JMAlyser⁺ (Fa. zebris Medical, Isny, Deutschland) • AXIOQUICK RECORDER (Fa. SAM Präzisionstechnik, Gauting, Deutschland)	Ultraschall	gelenkfern, berührungslos, extraoral
• Freecorder BlueFOX (DDI-Group, Dortmund, Deutschland)	opto-elektronisch	gelenknah, berührungslos, extraoral
• JMA^{Optic} System (Fa. zebris Medical, Isny, Deutschland)	opto-elektronisch	gelenkfern, berührungslos, extraoral
• K7-Kinesiograph (Fa. Myotronics-Noromed, Kent, WA, USA) • JT-3D (Fa. BioRESEARCH Associates, Brown Deer WI, USA.)	Magnetfeldbasis	gelenkfern, berührungslos, extraoral
• CADIAX (GAMMA Medizinisch-wissenschaftliche Fortbildungs-GmbH, Klosterneuburg, Österreich)	Messraster auf Widerstandsfolie, Spannungsverteilungsverfahren	gelenknah, berührungshaft, extraoral
• DIR-System (Fa. DIR System, Essen, Deutschland) • IPR-System (Fa. Dental Balance, Potsdam, Deutschland)	elektronisches Stützstift -Registrierat	berührungshaft, intraoral
• DMD-System (Fa. Ignident, Ludwigshafen am Rhein, Deutschland)	Magnetfeldbasis	intraoral, okklusionsnah

Tabelle 3: elektronische Messsysteme zur Aufzeichnung von Unterkieferbewegungen

1.5.3 Digitale Abformung durch Scanner

Wie in vielen wirtschaftlichen Bereichen entwickeln sich auch in der Zahnmedizin digitale Technologien rasant weiter. Neben der konventionellen Abformung besteht heutzutage auch die Möglichkeit einer optischen Abformung über spezielle 3D-Scanner. Insgesamt gibt es einen indirekten und einen direkten Weg um die Situation im Mund digital zu erfassen.

1.5.3.1 Indirekte Datenerfassung

Die indirekte Datenerfassung erfolgt auf Grundlage von Gipsmodellen, welche durch konventionelle Abformung entstanden sind. Die Gipsmodelle werden mit Hilfe von extraoralen Scannern digitalisiert.

Grundsätzlich kann bei den Extraoralscannern zwischen taktiler (mechanischer) und lichtoptischer Funktionsweise unterschieden werden (Schweiger/Kieschnick 2017).

Während taktile Scanner die Oberfläche von Gegenständen mittels Berührung durch spezielle Tastinstrumente erfassen, tasten optische Scanner das zu scannende Objekt berührungslos mit Licht ab (Schweiger/Kieschnick 2017). Einerseits bringt dies einen zeitlichen Vorteil, andererseits können die zu scannenden Objekte auch nicht durch das Tastinstrument „verkratzt“ werden.

Optische Scanner differieren in ihrer Aufnahmetechnik. Unterschieden wird das Messprinzip der koaxialen Antastung vom Messprinzip der Triangulation. Der Erfassungswinkel bei der koaxialen Antastung ist wesentlich größer als beim Triangulationsverfahren. Auch diese beiden Messprinzipien werden nochmals in Untergruppen unterteilt. So zählen zum Prinzip der koaxialen Abtastung die Konfokaltechnik, die Interferometrie und das Laufzeitverfahren. Zum Messprinzip der Triangulation zählen die Fotogrammetrie und die strukturierte Beleuchtung, welche das Lichtpunktverfahren, das Laserlichtschnittverfahren und die Streifenlichtprojektion umfasst.

Die folgende Grafik soll die Unterteilung der Messprinzipien der optischen Scanner nochmal genauer veranschaulichen (Abbildung 7):

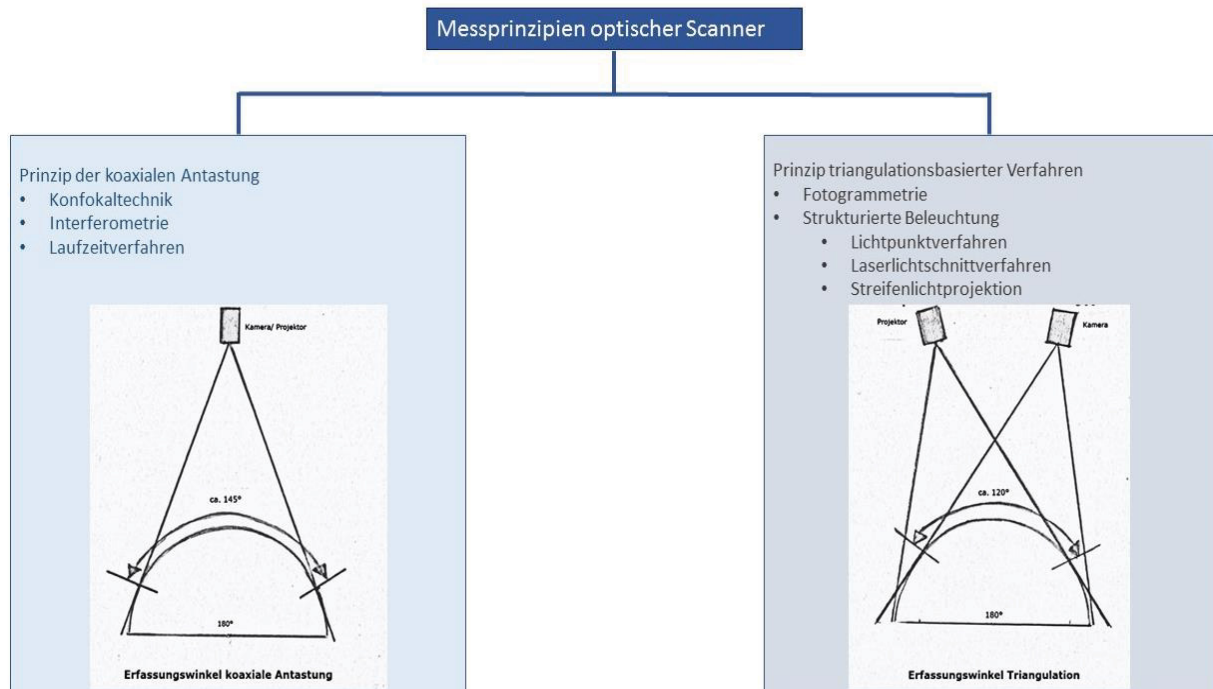


Abbildung 7: Messprinzipien optischer Scanner

Zeichnungen angefertigt durch Autor, modifiziert nach Schweiger und Kieschnick aus „CAD/CAM in der digitalen Zahnheilkunde“ (Schweiger/Kieschnick 2017).

Koaxiale Antastung

Konfokaltechnik/ konfokales Laserstrahlprinzip

Bei der Konfokaltechnik (= konfokales Laserstrahlprinzip) fokussiert eine Kamera auf einen bestimmten Punkt der Objektoberfläche und stellt diesen scharf. Während die Position der Schärfeebene des Objektivs bekannt ist (= Z-Wert), werden die X- und Y-Werte bei der Aufnahme erfasst. Für alle Punkte in der Schärfeebene werden die Raumkoordinaten bestimmt (Schweiger/Kieschnick 2017). Anschließend wird die Schärfeebene in Z-Richtung verschoben. Der Wert der Verschiebung ist dabei bekannt. Dann werden die nächsten sich scharf stellenden Oberflächenpunkte ermittelt (Schweiger/Kieschnick 2017).

Insgesamt wird die Oberfläche Schicht für Schicht aufgenommen. Das 3D-Bild des Objektes setzt sich aus den Raumkoordinaten aller gemessenen Oberflächenpunkte zusammen (Schweiger/Kieschnick 2017).

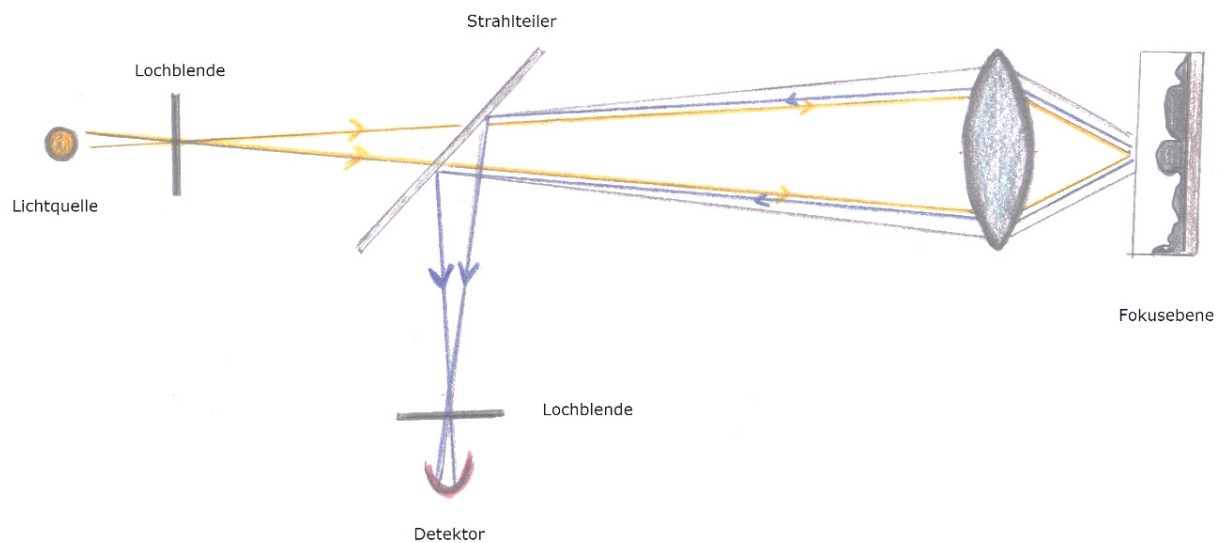


Abbildung 8: Konfokales Laserstrahlprinzip.

Zeichnung angefertigt durch Autor, modifiziert nach Schweiger und Kieschnick aus „CAD/CAM in der digitalen Zahnheilkunde“ (Schweiger/Kieschnick 2017).

Von der punktförmigen Lichtquelle wird Licht auf das Objekt, in diesem Falle die Oberfläche des Zahnes, ausgesendet. Die von dort reflektierten Strahlen werden im gleichen Strahlengang zurückgeworfen und auf den Detektor geleitet. Die sich im Detektorstrahlengang befindliche Lochblende sorgt dafür, dass nur das Licht aus dem scharf abgebildeten Bereich den Detektor erreicht. Proportional zum Objekt-Fokus-Abstand werden unterschiedliche Tiefenschärfeebenen scharf dargestellt. Der Punkt in der Mitte der Lochblende und der Beleuchtungspunkt auf dem Objekt sind gleichzeitig im Fokus, das heißt sie sind „konfokal“ zueinander (Abbildung 8).

Interferometrie

Bei der Interferometrie handelt es sich um eine Messmethode, die die Interferenz von Wellen zu Grunde liegt (Fakultät für Physik Technische Universität München 2019). „Die Interferenz ist die Überlagerung zweier oder mehrerer kohärenter Wellen, die an einem Raumpunkt zusammentreffen“ (Tipler 2000). Das heißt, dass der Begriff Interferenz auf der Wellennatur des Lichtes beruht. Voraussetzung für die Überlappung von Lichtwellen ist zusammenhängendes (kohärentes) Licht, welches mit einem Laser erzeugt wird. Der Lichtstrahl wird in zwei Teilstrahlen aufgespalten, wovon einer direkt und einer über einen Umweg auf ein und denselben Objektpunkt landen und dort reflektiert werden. Durch die

unterschiedliche Wegstrecke des Lichtes ergeben sich Überlagerungsmuster (Interferenzen) die ein Maß für die Entfernung zum Objektpunkt sind (Schweiger/Kieschnick 2017). Ausgewertet wird das Interferenzmuster über einen CCD-Sensor (charge-coupled device-Sensor).

Laufzeitverfahren

Beim Laufzeitverfahren wird die Laufzeit des Lichtsignals vom Sender zum Objekt und wieder zurück gemessen.

Triangulation

Das Messprinzip der Triangulation ist schon lange bekannt. Im 19. Jahrhundert wurde es in der Geodäsie vor allem zur Landvermessung eingesetzt. Erstmals erwähnt wurde es bereits 600 v. Chr. von Thales von Milet (Gandyra 2002; Mainzer 1980). Es besagt, dass ein Eckpunkt eines Dreiecks eindeutig bestimmt werden kann, wenn die gegenüberliegende Seite und die angrenzenden Winkel bekannt sind (Abbildung 9).

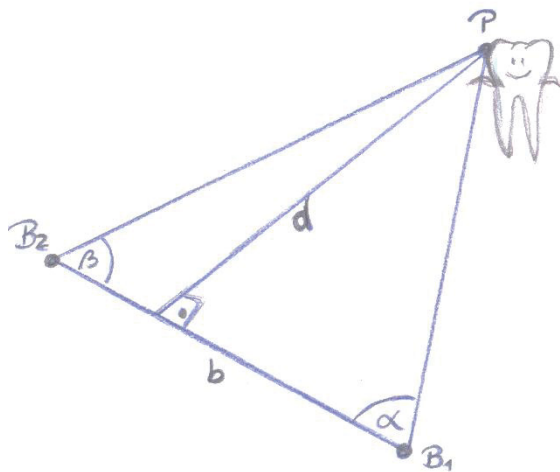


Abbildung 9: Triangulationsprinzip nach Thales
Zeichnung angefertigt durch Autor, modifiziert nach
(Gandyra 2002).

d = gesuchte Entfernung

Der interessierende Punkt P des Objekts wird von den beiden Beobachtungspunkten B1 und B2 angepeilt und die Winkel α und β zur Basislinie $\overline{B_1B_2}$ gemessen (Gandyra 2002). Nach Anwendung des Sinussatzes ergibt sich die Höhe d durch die Seiten $\overline{B_1P}$ und $\overline{B_2P}$. Für d ergibt sich nach Umrechnung folgende Bestimmungsgleichung (Gandyra 2002):

$$d = \overline{B_1B_2} \frac{\tan \alpha \times \tan \beta}{\tan \alpha + \tan \beta}$$

Das Triangulationsverfahren wird sowohl bei Streifenlicht- als auch bei Laserscannern eingesetzt. Als Projektionsquelle dient Licht (Laserlicht oder Licht aus dem Farbspektrum), welches das Objekt in einem bestimmten Winkel beleuchtet. Das Licht kann dabei punkt-, linien- oder flächenförmig sein, beispielsweise in Form eines Laserpunktes, einer Laserlinie

oder eines Streifenmusters (Schweiger/Kieschnick 2017). Das projizierte Muster wird über eine digitale Kamera (z.B. CCD-Kamera) aufgenommen. Dadurch, dass die Strahlrichtung und der Abstand zwischen Kamera und Lichtquelle bekannt sind, kann der Abstand vom Objekt zur Kamera ermittelt werden.

Fotogrammetrie

Bei der Fotogrammetrie handelt es sich um eine Methode bei der die Oberfläche von Objekten durch die Analyse von konventionellen Fotos dreidimensional rekonstruiert werden kann. Bekannt sein müssen dabei Informationen zur Kamera und ihrer Ausrichtung (Schweiger/Kieschnick 2017).

Strukturierte Beleuchtung

Das Prinzip der strukturierten Beleuchtung untergliedert sich wiederum in Lichtpunktverfahren, Lichtschnittverfahren und Streifenlichtprojektion.

Die einfachste Form der strukturierten Beleuchtung und des Triangulationsverfahrens ist dabei das Lichtpunktverfahren. Das Objekt wird Punkt für Punkt mittels eines einzelnen punktförmigen Lichtstrahls abgetastet. Die Dreiecksseiten werden dabei zwischen der Strecke von Sender (Projektor) zu Empfänger (Kamera) sowie dem ausgesendeten und dem reflektierten Lichtstrahl gebildet. Nachteil des Verfahrens ist der hohe zeitliche Aufwand, weswegen es sich in der dentalen Technik nicht durchgesetzt hat.

Beim Lichtschnittverfahren wird der Strahl des eindimensionalen Triangulationsverfahrens zu einer Linie oder einem Lichtband erweitert. Auf diese Weise kann das zu vermessende Objekt in zwei Dimensionen erfasst werden (Gandyra 2002). Die Kamera nimmt den erzeugten Lichtschnitt auf, der dann entsprechend der Triangulationsgesetze ausgewertet wird.

Eine flächenhafte Vermessung des Objektes erhält man, wenn man das Lichtschnittverfahren nochmals erweitert und mehrere Streifen projiziert.

Bei dentalen Scansystemen ist die Streifenlichtprojektion stark verbreitet. Bei dem Verfahren handelt es sich um eine neuere Methode der 3D-Objekterfassung, da es erst seit Anfang der 1990er Jahre eingesetzt wird. Das Streifenlichtverfahren gehört zu den topometrischen Verfahren, die laut Breuckmann folgende Eigenschaften besitzen (Breuckmann 1993):

- Messprinzip der Triangulation
- Messen mit strukturierter Beleuchtung
- Bildhafte Erfassung von 3D-Messdaten
- Dynamische Messwertaufnahme
- Rechnergestützte Online-Verarbeitung

Bei der Streifenlichtprojektion wird ein Streifenlichtmuster auf das zu scannende Objekt projiziert. In schneller Reihenfolge werden Hell-Dunkel-Muster aus beleuchteten und unbeleuchteten Streifen auf das Objekt geworfen. Um die komplette zu scannende Oberfläche zu erfassen, ist das Streifenmuster von Projektion zu Projektion verschieden. Die Musterfolge muss dabei der Software bekannt sein.

Zur Erzeugung des Streifenmusters gibt es drei gängige Verfahren: Das Gray-Code-Verfahren (ein codierter Lichtansatz mit Maskenbelichtung, CLA-Verfahren), das Phasen Shift-Verfahren und die DLP-Projektion (Digital Light Processing).

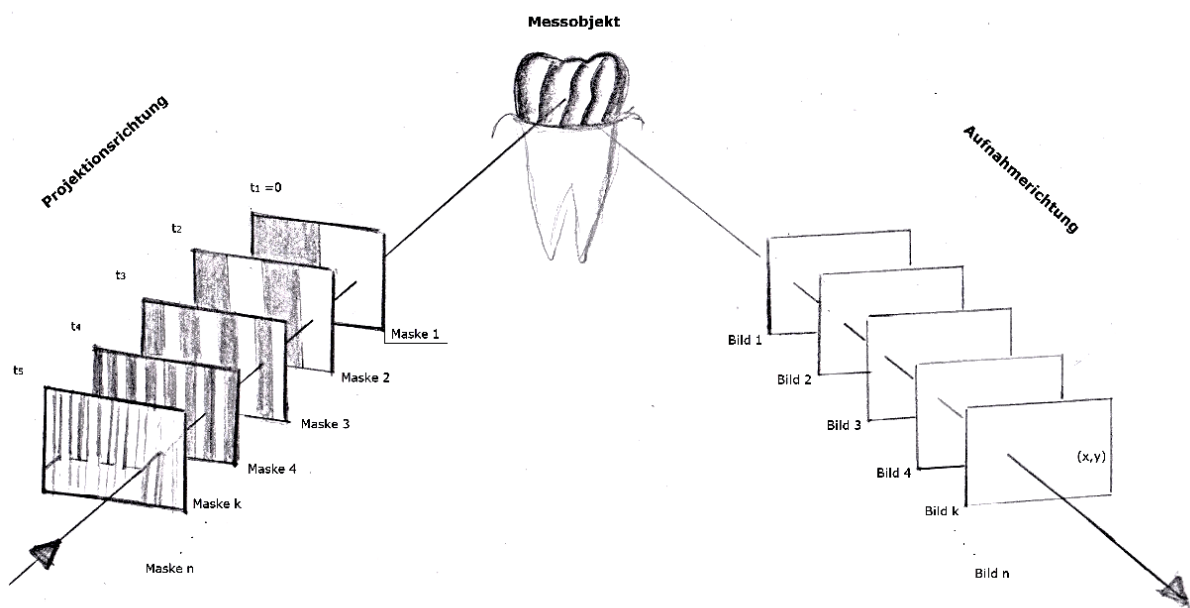


Abbildung 10: Sequentielle Projektion von Masken zur Lichtcodierung für einen Bildpunkt.

Zeichnung angefertigt durch Autor, modifiziert nach (Gandyra 2002).

Beim Codierte Lichtansatz mit Maskenbelichtung (CLA) werden in schneller Reihenfolge kodierte Streifenmuster auf das zu scannende Objekt geworfen. Je aufeinanderfolgender Maske wird die Breite der Streifen um 50% reduziert. Eine Kamera nimmt die projizierten Muster der Reihenfolge nach auf. Jedem Pixel (x/y) wird dabei eine Abfolge von Binärwerten zugeordnet.

0 steht dabei für weiße Bildelemente, 1 für schwarze Bildelemente. Indem jedem Pixel ein n-Bit Code zugeordnet wird, kann der Ursprung des auftreffenden Lichtstrahls im Projektor definiert werden. Der Buchstabe n steht hier für die Anzahl der projizierten Muster (Abbildung 10). Mit Hilfe des Binärisierungscodes kann also berechnet werden, in welcher Spalte im Projektor ein Lichtstrahl erzeugt worden ist. Mittels Triangulierung können die Raumkoordinaten des beleuchteten Punktes im Raum nachvollzogen werden (Gandyra 2002; Schweiger/Kieschnick 2017).

Das Phasen-Shift-Verfahren ist ähnlich wie der Codierte Lichtansatz (CLA). Im Gegensatz zum CLA wird beim Phasen-Shift-Verfahren nicht die Breite der Streifen variiert, sondern die Lage der Streifen auf dem Scanobjekt wird verändert. Dem Licht wird sozusagen eine sinusförmige Intensität aufmoduliert. Das Sinus-Streifensignal erzeugt ein harmonisches Intensitätssignal in jedem messbaren Punkt der zu scannenden Objektoberfläche, dem die exakte Phasenlage zugeordnet werden kann (Gandyra 2002; Zimmermann et al. 2015).

Bei der DLP-Projektion werden zur Erzeugung von Streifenlichtmustern sogenannte DLP-Projektoren (Digital Light Processing-Projektoren) verwendet. Das wichtigste Element der DLP-Projektoren sind die darin vorhandenen DMD-Chips (Digital Mirror Device-Chips), die von Texas Instruments entwickelt wurden. Diese Chips enthalten kleine Spiegel, die durch einen elektrischen Impuls gekippt werden können. Durch gezieltes Ansteuern der Spiegel kann das Licht in Richtung der Projektionsoptik weiter geleitet oder abgelenkt werden. Mit Hilfe der DMD-Chips können beispielsweise Streifenmuster erzeugt und verändert werden, indem pixelweise beleuchtete und unbeleuchtete Projektionsstellen erzeugt werden (Schweiger/Kieschnick 2017).

Der in der Promotionsarbeit verwendete Extraoralscanner S600 der Firma Zirkonzahn ist ein 3D-Streifenlichtscanner, bei dem die oben genannten DLP-Projektoren eingesetzt werden.

1.5.3.2 Direkte Datenerfassung

Unter der direkten Datenerfassung versteht man die dreidimensionale digitale Datenerfassung direkt im Mund des Patienten.

Nach Zimmermann et. al. ergeben sich unter anderem folgende Vorteile bei intraoralen Scanner Systemen (Zimmermann et al. 2015):

Echtzeitdarstellung

Während bei der konventionellen Abformung entscheidende Details erst am fertigen Gipsmodell sichtbar werden, kann die Qualität der digitalen Abformung unmittelbar am Bildschirm beurteilt werden.

Leichte und selektive Wiederholbarkeit

Ein Intraoralscan kann ohne großen Aufwand wiederholt werden. Ist nur ein Teil der Abformung nicht geglückt, kann am digitalen Modell auch ein Einzelbereich ausgeschnitten und neu abgescannt werden. Es muss nicht die komplette Abformung wiederholt werden.

Leichte Desinfizierbarkeit

Intraoralscanner lassen sich leicht desinfizieren und entsprechende Scanspitzen auch autoklavieren. Es entfallen die Desinfektion der Abformung und die aufwändige Säuberung des Abformlöffels.

Analyseoptionen

Am digitalen Modell kann direkt kontrolliert werden ob zum Beispiel die Einschubachse oder der Abstand zum Antagonisten in Ordnung sind (Zimmermann et al. 2015). Außerdem lassen sich Restaurationsparameter wie Mindestschichtstärke oder eine passende Restaurationsgestaltung aus funktioneller und morphologischer Sicht überprüfen.

Kein Modellverschleiß

Das digitale Modell unterliegt keinem Verschleiß durch das Aufpassen der Arbeit wie es beim Gipsmodell der Fall ist.

Archivierbarkeit und Verlaufskontrolle

Im Gegensatz zu Gipsmodellen wird kein räumlicher Platz benötigt, um die Modelle zu lagern. Ferner können an den digitalen Modellen Verlaufskontrollen bezüglich Zahnwanderungen, Zahnkippen, Abrasionen, etc. vollzogen werden.

Darstellung in Echtfarben

Bei vielen Intraoralscannern ist eine Erfassung der Echtfarben möglich. So kann zum Beispiel die Präparationsgrenze besser identifiziert werden oder farbliche Veränderungen der Zähne oder der Gingiva können analysiert werden. Manche Modelle bieten sogar die Möglichkeit die Zahnfarbe zu bestimmen.

Chairside-Möglichkeit

Einige Systeme bieten die Möglichkeit den kompletten digitalen Workflow in einer Sitzung am Stuhl zu machen. Abgesehen von der Zeitersparnis können die Zähne direkt im Anschluss an die Präparation prothetisch versorgt werden.

Verknüpfung von Daten

Die Verknüpfung mit weiteren Datensätzen wie dreidimensionalen Röntgenaufnahmen oder einem Gesichtsscan liefert weitere diagnostische und planungstechnische Möglichkeiten.

Trotz der vielen Vorteile gibt es auch einigen Nachteile bei intraoralen Scannersystemen zu verzeichnen. Insbesondere bei der Erfassung von größeren Arealen ist es notwendig spezielle Scanpfade einzuhalten (Zimmermann et al. 2015). Das bedeutet, dass der Intraoralscanner in einer bestimmten Reihenfolge beziehungsweise in einem bestimmten Muster über die Zahnreihen geführt werden muss, um ein möglichst genaues Modell zu erhalten (Zimmermann et al. 2015). Dies erfordert von Seiten des Anwenders eine gewisse Übung. Bei einer Implantatversorgung sind zusätzlich spezielle Scankörper notwendig, um die Implantatposition in der digitalen Abformung erfassen zu können. Auch im Bereich der Okklusionserfassung gibt es noch Verbesserungsmöglichkeiten. So ist bei einigen Systemen eine nachträgliche Änderung der Bisslage oder die Erfassung der dynamischen Okklusion noch nicht möglich. Ein weiterer Nachteil liegt derzeit noch in den relativ hohen Kostenintensität von intraoralen Scannern (Zimmermann et al. 2015).

Heutzutage gibt es eine ganze Reihe an Systemen, die sich in ihrer Aufnahmetechnik unterscheiden. Gängige technische Verfahren bei Intraoralscannern sind:

- Active Wavefront Sampling
- Triangulation
- Konfokale Mikroskopie

Beim Active Wavefront Sampling werden wie bei einer Videokamera viele Einzelmessungen aufgenommen, welche anschließend zu einem Modelldatensatz zusammengefügt werden. Die Kamera wird mit einem AWS-Modul (Active Wavefront Sampling-Modul) verwendet. Ein AWS-Modul hat eine dezentralisierte Blende, welche zirkulär um die Achse herum fährt. Licht, welches vom zu scannenden Objekt zurückgeworfen wird, trifft ebenfalls durch die rotierende Öffnung (Logozzo et al. 2014). Die durch die Blende zurückreflektierten Strahlen werden scharf auf der Bildebene abgebildet (3M ESPE AG 2019). Über den Durchmesser der auf der

Bildebene eintreffenden Strahlen kann die räumliche Tiefe ausgerechnet werden (Logozzo et al. 2014).

Auf Triangulation und konfokale Mikroskopie wurde schon weiter oben im Text (S. 24ff.) eingegangen. Der in der Promotionsarbeit verwendete Intraoralscanner „Trios 3“ der Firma 3Shape arbeitet auf Basis der konfokalen Mikroskopie.

1.5.3.3 STL-Format

Das STL-Datenaustauschformat wurde von der Firma 3D-Systems (Rock Hill, USA) entwickelt und erstmals im Jahr 1989 veröffentlicht und eingesetzt (Dangel 2017). STL steht für STereoLithographie (Kai et al. 1997) oder Standard Triangulation/Tesselation Language.

Werden die Zahnreihen gescannt, entstehen Punktwolken (Abbildung 11). Um diese näher zu beschreiben, werden die einzelnen Punkte softwaretechnisch zu Dreiecksnetzen verbunden (Abbildung 12).

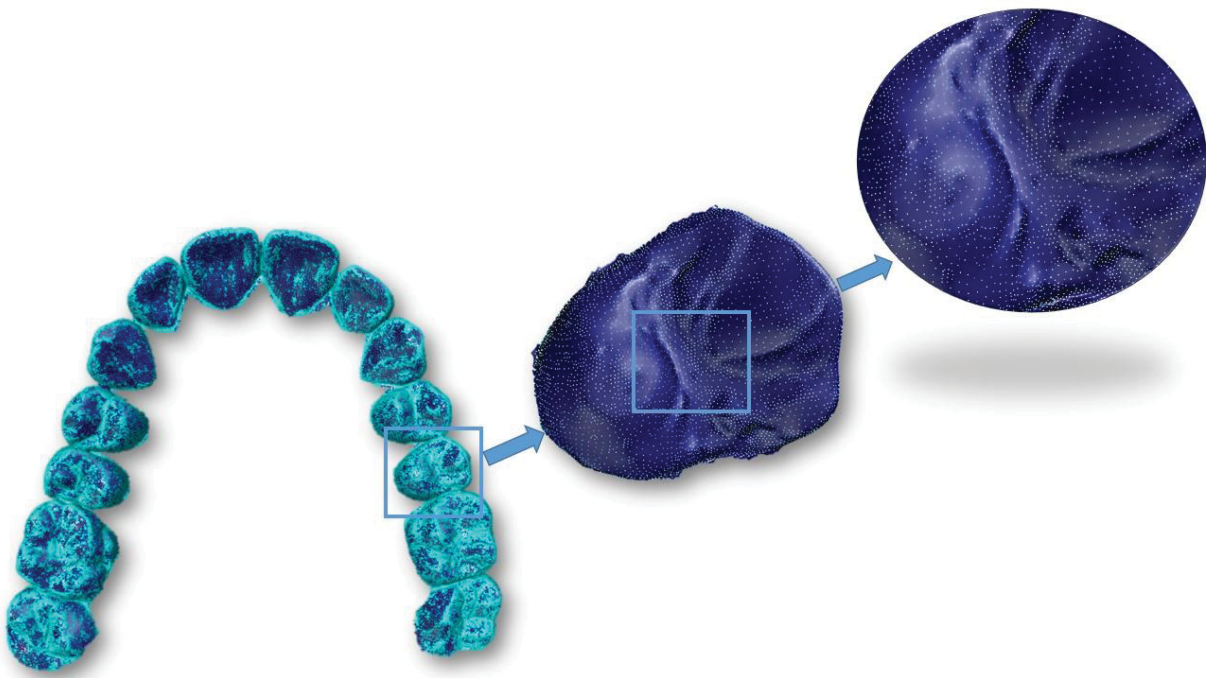


Abbildung 11: Darstellung von 3D-Körpern mittels einer Punktwolke.

Die türkisfarbenen Abschnitte im Bild stellen die Einzelpunkte dar. Der im Quadrat abgebildete Ausschnitt wird jeweils von links nach rechts vergrößert dargestellt. In der Vergrößerung ganz rechts sind die einzelnen Punkte als solche zu erkennen.

Das STL-Format beschreibt die Oberfläche eines Volumens, indem es diese in viele kleine Dreiecksfacetten auflöst. Je kleiner die Dreiecksnetze sind, desto besser ist die Auflösung (Dangel 2017). In Abbildung 12 ist beispielhaft ein gescannter Oberkieferzahnbogen und seine Unterteilung in Dreiecksnetze dargestellt. Die STL-Schnittstelle wird standardmäßig bei vielen CAD Systemen verwendet (Kai et al. 1997).

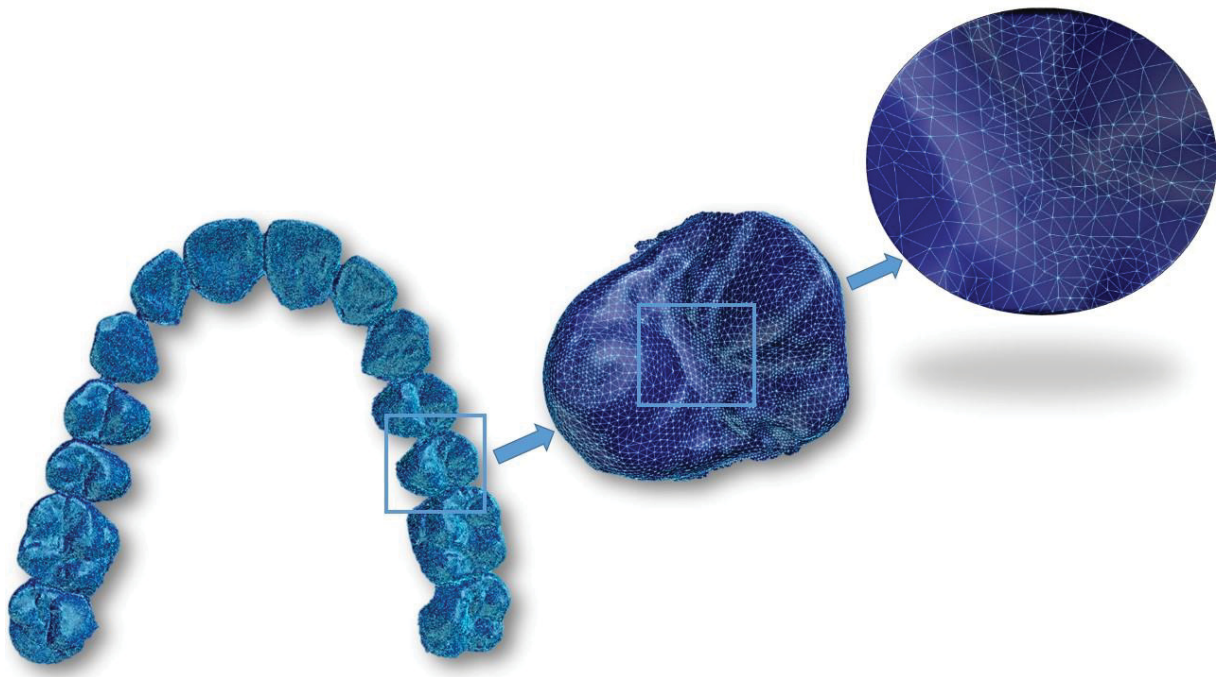


Abbildung 12: Darstellung von 3D-Körpern mittels Dreiecksnetzen.

Die türkisfarbenen Abschnitte im Bild stellen die Dreiecksnetze dar. Der im Quadrat abgebildete Ausschnitt wird jeweils von links nach rechts vergrößert dargestellt. In der Vergrößerung ganz rechts sind die einzelnen Dreiecksnetze als solche zu erkennen.

2 ZIELE DER ARBEIT

Ziel war es, Methoden der digitalen okklusalen Kontaktpunkterfassung mit analoger Vorgehensweise zu vergleichen. Im Fokus stand die statische Okklusion, jedoch sollten auch dynamische Aspekte berücksichtigt werden.

Als erstes bestand die Intention darin, unterschiedliche Arten der digitalen Datenerfassung näher zu betrachten und die Genauigkeit zwischen extra- und intraoralen Scanverfahren miteinander zu vergleichen.

Im nächsten Schritt sollten verschiedene Methoden zur Bestimmung statischer Okklusionskontakte miteinander verglichen werden. Bei der ersten Methode handelte es sich um die klassische klinische Methode mithilfe von Okklusionsfolie und Durchbissregistraten. Dieser standen die digitale Okklusionsanalyse mit extraoralen Scanverfahren und die digitale Okklusionsanalyse mit intraoralen Scanverfahren gegenüber.

Zuletzt sollten auch dynamische Okklusionskontakte in der Spätphase von Kausequenzen digital betrachtet und analysiert werden. Dabei lag der Fokus auf der Häufigkeitsanalyse der verwendeten Kontakte während der letzten zehn Kauzyklen.

3 MATERIAL UND METHODE

3.1 ETHIKKOMMISSION, EINWILLIGUNGSERKLÄRUNG UND DATENSCHUTZ

Für die Durchführung der klinischen Studie lag ein positives Ethikvotum (Studennummer: 5827R, Registrierungs-ID: 2016126379) vom 16.05.2017 vor. Die Durchführung der Arbeit erfolgte nach der Deklaration von Helsinki.

Die Teilnahme an der Studie war freiwillig und jeder Proband erhielt eine mündliche und schriftliche Aufklärung über die Vorgehensweise und das Ziel der Arbeit. Die Einwilligung an der Teilnahme erfolgte sowohl mündlich als auch schriftlich durch jeden einzelnen Probanden. Die Teilnahme konnte jederzeit und ohne Begründung abgebrochen werden.

Zudem erhielt jeder Proband Informationen zur Datenschutzvereinbarung gemäß der Europäischen Datenschutzgrundverordnung (DS-GVO) vom 25.05.2018, die schriftlich unterzeichnet wurden.

3.2 STUDIENTEILNEHMER

An der Studie nahmen 20 freiwillige funktionsgesunde Probanden im Alter zwischen 21 und 34 Jahren teil. Einschlusskriterien zur Studie waren unter Beachtung der unten dargestellten Ausschlusskriterien ein Alter zwischen 18 und 70 Jahren, Vollbezahnung (mit Ausnahme der Weisheitszähne) oder begrenzte Lücken. Zu den Ausschlusskriterien zählten:

- Alter unter 18 bzw. über 70 Jahren
- Fehlende Deutschkenntnisse
- Symptome/Befunde einer kranio-mandibulären Dysfunktion (CMD) wie eingeschränkte Kieferöffnung, Schmerzen im Bereich der Kaumuskulatur und/ oder der Kiefergelenke, okklusale Auffälligkeiten (offener Biss)
- Schmerzen/Beschwerden dentogener oder parodontaler Ursache
- Schwangerschaft/Stillzeit
- Allergie auf Dentalkunststoff oder Dental-Abformmaterialien
- Herzschrittmacher oder Tiefenhirnstimulatoren
- Erkrankungen mit Beteiligung des Nervensystems
- Erkrankungen des rheumatischen Formenkreises sowie Fibromyalgie
- Sedierende Medikation

- Vigilanzstörungen
- Drogen-, Medikamenten-, Alkoholabusus
- Schwere psychische/psychiatrische Erkrankungen (wie endogene Depression, schizophrene Störungen, schwere Zwangs- und Angststörung)
- Grad III und IV der Graduierung chronischer Schmerzen (GCS)

Das Fehlen der Ausschlusskriterien wurde anhand eines Eingangsgespräches und einer klinischen Untersuchung zu Beginn der Studienteilnahme überprüft.

3.3 ÜBERSICHT

Dieses Kapitel dient der Übersicht aller verwendeten Geräte und Softwarepakete. Zudem werden die angewandten Methoden erläutert und die Arbeitsschritte am Probanden und im Labor aufgezeigt. Auf die genaue Anwendung und Funktion der Geräte und Software sowie die detaillierte Beschreibung der Arbeitsschritte am Probanden und im Labor wird in den nachfolgenden Kapiteln nochmals näher eingegangen (Kapitel 3.4 bis Kapitel 3.6).

Tabelle 4 fasst alle während der Promotionsarbeit verwendeten Geräte und Softwarepakete zusammen (Kapitel 3.4):

Verwendete Geräte:

- Extraoralscanner S600 ARTI (Fa. Zirkonzahn, Gais (BZ), Italien)
- Intraoralscanner Trios 3 Cart (Fa. 3Shape, Kopenhagen, Dänemark)
- Kieferregistriersystem JMA^{Optic} System (Fa. zebris Medical, Isny, Deutschland)
- Canon EOS 500D Spiegelreflexkamera mit Canon Macro 100 mm Objektiv (Fa. Canon, Tokio, Japan) mit Ringblitz (Fa. Yongnuo, Shenzhen, China)

Verwendete Softwarepakete:

- GEDAS (Greifswald Digital Analyzing System, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Deutschland)
- WINJAW⁺ RC (Version 1.5.82, Fa. zebris Medical, Isny, Deutschland)
- GOM Inspect (Version 2018 Hotfix 2, Fa. GOM, Braunschweig, Deutschland)
- SPSS (IBM Version 25, Fa. IBM Deutschland, Ehningen, Deutschland)

Tabelle 4: Übersicht der verwendeten Geräte und Softwarepakete.

Insgesamt untergliederte sich die Promotionsarbeit in drei Teile (Kapitel 3.5).

Im ersten Teil der Arbeit sollten unterschiedliche Arten der digitalen Datenerfassung näher betrachtet und analysiert werden. Die Datensätze aus Extraoralscanner und Intraoralscanner sollten miteinander verglichen und Abweichungen analysiert werden. Für den ersten Teil der Arbeit wurde die GOM Inspect Software verwendet (Kapitel 3.4).

Der Hauptbestandteil der Arbeit war der zweite Teil. Hier bestand die Intention darin, drei verschiedene Methoden zur Bestimmung statischer Okklusionskontakte miteinander zu vergleichen (Abbildung 13). Bei der ersten Methode handelte es sich um die klassische klinische Methode mithilfe von Durchbissregistern und Okklusionsfolie mit anschließender fotografischer Dokumentation der Kontaktpunktsituation. Der klassisch klinischen Methode standen die digitale Okklusionsanalyse mittels eines extraoralen Scanverfahrens und die digitale Okklusionsanalyse mittels eines intraoralen Scanverfahrens gegenüber. Als Extraoralscanner fand der Zirkonzahn Scanner S600 ARTI (Fa. Zirkonzahn, Gais, Italien) Anwendung. Als Intraoralscanner wurde der Trios 3 Scanner (Fa. 3 Shape, Kopenhagen, Dänemark) verwendet (Kapitel 3.4).



Abbildung 13: Übersicht über die angewandten Methoden zur Bestimmung statischer Okklusionskontakte.

Im zweiten Teil der Arbeit fanden die WINJAW⁺ RC Software sowie das GEDAS System Anwendung (Kapitel 3.4).

Im dritten Teil der Arbeit sollten dynamische Okklusionskontakte in der Spätphase von Kausequenzen digital betrachtet und analysiert werden. Der Fokus lag dabei auf der Häufigkeitsanalyse der verwendeten Kontakte während der letzten zehn Kauzyklen. Die Häufigkeitsanalyse der verwendeten Kontakte geschah ausschließlich mit Hilfe der WINJAW⁺ RC Software (Kapitel 3.4).

Die Generierung der Messdaten erfolgte an 20 Studienteilnehmern innerhalb von drei Untersuchungssitzungen (Kapitel 3.5 und 3.6).

Die statistische Auswertung der Messdaten erfolgte mit der Statistik- und Analysesoftware SPSS (Kapitel 3.7).

3.4 VERWENDETE SYSTEME UND SOFTWARE

3.4.1 Scanner

Extraoralscanner

Als Extraoralscanner wurde der S600 ARTI (Fa. Zirkonzahn, Gais, Italien) verwendet. Dabei handelt es sich um einen optischen Streifenlichtscanner mit zwei hochauflösenden Hochgeschwindigkeitskameras. Laut Angaben des Herstellers beträgt die Scanpräzision $\leq 10 \mu\text{m}$ (Zirkonzahn o. J.).

Der Extraoralscanner diente dazu, die Zahnsituation indirekt über zuvor angefertigte Gipsmodelle zu digitalisieren. Um die Kiefer später in der WINJAW⁺ RC Software richtig im Raum zu positionieren, musste das Oberkiefermodell doppelt abgescannt werden. Ein Oberkieferscan erfolgte normal, der andere zusammen mit einem speziell entwickelten Kopplungslöffel (Bissgabel Typ SD REF1960320) der Firma zebris Medical, Isny, Deutschland (Abbildung 14).

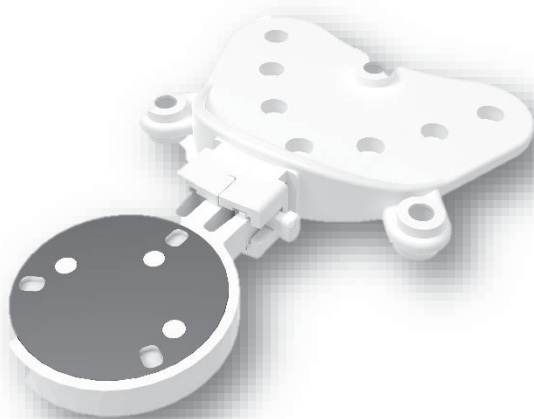


Abbildung 14: Kopplungslöffel für den Extraoralscan.

Quelle: zebris Medical GmbH, Isny, Deutschland.

Pro Studienteilnehmer umfasste die Digitalisierung der Modelle mit dem S600ARTI vier Scans:

- Oberkiefermodell
- Unterkiefermodell

- Ober- und Unterkiefermodell zusammen in Okklusion
- Oberkiefermodell mit Kopplungsöffel

Das Einscannen erfolgte mit dem im Scanzubehör enthaltenen Easy-Fix System. Dieses System half dabei, die Modelle einfach im Scanner einzuspannen. Um die Modelle in Okklusion zu scannen, wurden sie über eine Spannvorrichtung (Modellfixierstift Easy-Fix) im Scanner fixiert (Zirkonzahn o.J.) (Abbildung 15).



Abbildung 15: Easy-Fix-System mit Modellfixierstift und darin eingespannten Gipsmodellen.

Über die Matching Funktion erfolgte die Überlagerung des einfachen Oberkieferscans mit dem Oberkieferscan mit Kopplungsöffel. Anschließend fanden der Export der Scandaten im STL-Format und der Import in WINJAW⁺ RC Software statt.

Intraoralscanner

Beim Intraoralscanner fand der Trios 3 Cart (Fa. 3Shape, Kopenhagen, Dänemark) Anwendung. Beim Trios 3 Cart handelt es sich um einen optischen Scanner, der auf Basis des konfokalen Laserstrahlprinzips arbeitet (Schweiger/Kieschnick 2017).

Die Digitalisierung der Modelle erfolge hier direkt im Mund des Probanden in der zweiten Untersuchungssitzung (Kapitel 3.6). Auch hier war ein doppeltes Abscannen des Oberkiefers (normal und mit Kopplungsöffel) notwendig, um die Kiefer später in der WINJAW⁺ RC Software richtig im Raum positionieren zu können.



Abbildung 16: Kopplungsöffel für den Intraoralscan.

Quelle: zebris Medical GmbH, Isny, Deutschland.

Im Gegensatz zum extraoralen Kopplungsöffel (Bissgabel Typ SD REF1960320) (Abbildung 14) wies der intraorale Kopplungsöffel (Bissgabel Typ IO REF 1960315) an der rechten Kieferhälfte eine Fensterung auf (Abbildung 16). Diese war notwendig, um den Scan mit Kopplungsöffel später in der WINJAW⁺ RC Software richtig mit dem normalen Oberkieferscan überlagern zu können. Auf der linken geschlossenen Seite konnte der Kopplungsöffel an den Okklusalfächen der Zähne im Mund des Probanden befestigt werden. In der Promotionsarbeit wurde hierfür greenbite apple (Fa. DETAX, Ettlingen, Deutschland), ein Material mittlerer Konsistenz auf A-Silikonbasis, verwendet.

Insgesamt umfasste die Arbeit mit dem Intraoralscanner je Proband folgende Scans:

- Oberkieferscan
- Unterkieferscan
- Bukkalscan rechts im Schlussbiss
- Bukkalscan links im Schlussbiss
- Oberkiefer mit Kopplungsöffel

Die beiden Bukkalscans dienten dazu, die Kiefer richtig zueinander zu positionieren.

Das Vorgehen beim Ober- und Unterkiefer Scan sah folgendermaßen aus:

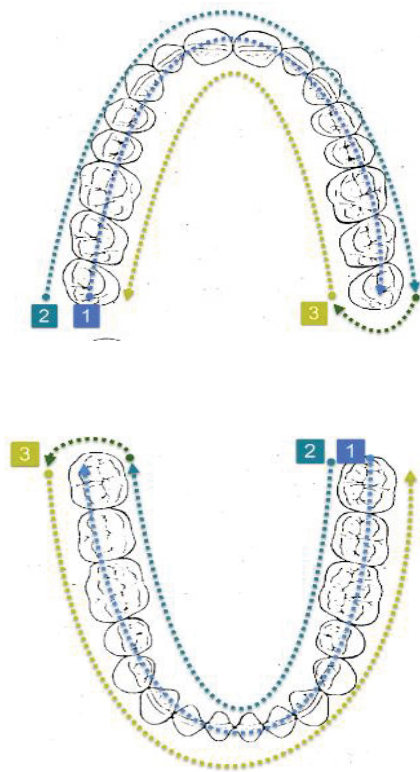


Abbildung 17: Scanreihenfolge beim Trios 3 Cart.

Oberkiefer:

- 1. Okklusal von einer Seite von distal kommend, im Frontalbereich leicht kippend.*
- 2. Erfassen der Buccalseite, wiederum von distal kommend.*
- 3. Erfassen der Palatinalseite in entgegengesetzter Richtung, bis man beim Ausgangspunkt ankommt.*

Unterkiefer:

- 1. Okklusal von einer Seite von distal kommend, im Frontalbereich leicht kippend.*
- 2. Erfassen der Lingualseite, wiederum von distal kommend.*
- 3. Erfassen der Buccalseite in entgegengesetzter Richtung, bis man beim Ausgangspunkt ankommt.*

3.4.2 Kieferregistriersystem

Beim Optic Jaw Motion Analyser (JMA^{Optic} System, Fa. zebris Medical, Isny, Deutschland) handelt es sich um ein Kieferregistriersystem, das die Unterkieferbewegung in allen Freiheitsgraden erfasst. Die Sensorik besteht aus einem Unterkiefer Sensor (Sender) und einem Oberkieferkopfbogen (Empfänger) (Abbildung 18). Im Oberkieferkopfbogen ist ein Stereokamerasystem integriert. Die Markierungspunkte zwischen Oberkiefer- und Unterkiefersensorik bestehen aus Infrarot-Synchronisierungs LED's (IR-Sync LED's). Die aktiven IR-Sync LEDs werden via Infrarot getriggert. Die genauen Raumkoordinaten des Unterkiefersensors werden mit optischem Triangulationsverfahren berechnet (zebris Medical 2020).



Abbildung 18: Optic Jaw Motion Analyser mit Oberkieferkopfbogen und Unterkiefer Sensor.

Mittels des JMA^{Optic} Systems und der dazugehörigen WINJAW⁺ RC Software erfolgte bei jedem Probanden eine Aufzeichnung der Unterkieferbewegungen.

3.4.3 Software

GOM-Inspect

Um die Genauigkeit der digitalen Scans zu beurteilen, erfolgte der Import der STL-Daten aus Extra- und Intraoralscans in die GOM-Inspect Software (Version 2018 Hotfix 2, Fa. GOM, Braunschweig, Deutschland). Der Vergleich fand dabei zum einen anhand der Gipsmodelle statt, die je einmal mit dem Extraoralscanner und je einmal mit dem Intraoralscanner digital erfasst wurden. Zum anderen fand ein Vergleich zwischen dem Extraoralscan (Gipsmodell über Extraoralscanner eingescannt) mit dem Intraoralscan (Zahnreihe direkt im Mund abgescannt) statt. Als Richtwert diente jeweils der aus dem Extraoralscan erhaltene STL-Datensatz. Dieser wurde als Soll-Element in die GOM Software importiert. Der Datensatz des Intraoralscanners wurde als Ist-Datensatz in die GOM Software importiert. Nach dem Import der STL-Daten lagen in der GOM Software zwei Polygonnetze mit gleicher Auflösung vor, die im Folgenden miteinander verglichen werden konnten. Um die Abweichung vom Soll- zum Ist-Datensatz zu erhalten, mussten die Daten zueinander ausgerichtet werden. Mit der Vorausrichtung und zusätzlichem Best-Fit erfolgte zunächst eine automatische Ausrichtung, über die die Modelldaten unabhängig von ihrer Startposition zueinander ausgerichtet wurden (GOM Metrology o. J.). Zur Präzisierung der Vorausrichtung fand noch eine Hauptausrichtung statt. Der maximale Abstand zwischen den Punkten der Soll- und der Ist-Datei wurde auf 10 µm eingegrenzt (Sichwardt 2015).

Nach der Ausrichtung von Soll- zu Ist-Daten konnte die Abweichung zwischen den Datensätzen flächenhaft verglichen werden. Dabei wurde jeder Ist-Punkt mit seinem Soll-Punkt verglichen, indem die Software den senkrechten Abstand jedes Polygonpunktes auf der Ist-Daten zu den Soll-Daten berechnet (GOM Metrology o. J.).

Die Abweichungen wurden im Flächenvergleich farbig angezeigt. Blau bedeutete, dass die Ist-Daten unterhalb der Soll-Daten lagen. Rot bedeutete, dass sie oberhalb der Soll-Daten lagen. Bei grün lagen keine bis geringe Abweichungen vor. Die Zuordnung zu den einzelnen Farben konnte über die Legende betrachtet werden (GOM Metrology o. J.).

In der vorliegenden Promotionsarbeit fanden die Abweichungen im Kauzentrum Betrachtung, das bedeutet jeweils an den Ober- und Unterkiefer Sechsern. Bei jedem Datensatz wurde daher ein Inspektionsschnitt durch die ersten Molaren des Ober- und Unterkiefers gemacht. Entlang des erzeugten Inspektionsschnitts wurden äquidistante Abweichungsfähnchen im Abstand von 4 mm erzeugt, die jeweils die Distanz zwischen Soll- und Ist-Datei an der Position des

Abweichungsfähnchens in der Einheit Mikrometer anzeigen. Das „+“ und „-“ vor jedem Zahlenwert gab an, ob die Ist-Datei an entsprechender Position ober- oder unterhalb der Soll-Datei lag (Abbildung 19). Alle aus den äquidistanten Abweichungsfähnchen erhaltenen Zahlenwerte wurden probandenweise tabellarisch festgehalten.

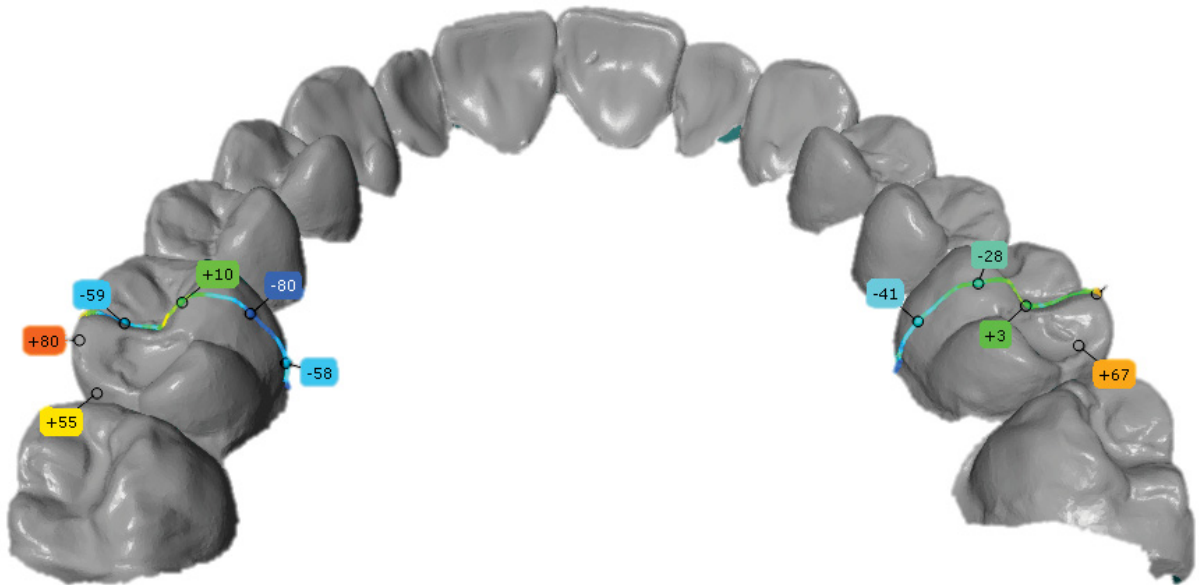


Abbildung 19: Abweichungen anhand äquidistanter Abweichungsfähnchen am Inspektionsschnitt durch die Oberkiefersechser.

Die farbige Linie durch die Zähne 16 und 26 entspricht dem in der Software erzeugten Inspektionsschnitt. Die Farben gelb, orange und rot bedeuten, dass die Ist-Datei oberhalb der Soll-Datei liegt. Die Farben in den Blautönen bedeuten, dass die Ist-Datei unterhalb der Soll-Datei liegt. Die angegebenen Zahlenwerte in den Kästchen sind die Abweichungen an Position der äquidistanten Abweichungsfähnchen. Die Angabe ist in µm. Ist die Zahl mit einem „+“ versehen, bedeutet dies, dass die Soll-Datei an dieser Stelle oberhalb der Ist-Datei liegt. Ist die Zahl mit einem „-“ versehen, liegt die Soll-Datei an entsprechender Stelle unterhalb der Ist-Datei.

WINJAW⁺ RC

Mit Hilfe der WINJAW⁺ RC Software (Version 1.5.82, Firma zebris Medical, Isny, Deutschland) erfolgte die Aufzeichnung von habitueller Okklusion, maximaler Interkuspidation, Öffnungsbewegungen, Laterotrusion rechts und links, Protrusion, freies Kauen sowie rechts- und linksseitiges Kauen. Vor der Bewegungsaufzeichnungen wurden am Probanden jeweils zwei posteriore und ein anteriorer Referenzpunkt bestimmt, um die Referenzebene im Raum zu festzulegen. Bei den Referenzpunkten handelte es sich um die beiden Scharnierachsenpunkte und den rechten Infraorbitalpunkt (Kapitel 3.6). Im Anschluss an die Bewegungsaufzeichnung wurden jeweils die STL-Daten der Extra- und Intraoralscans in die Software importiert und mit den Bewegungsdaten in Beziehung gebracht. Das Vorgehen sah dabei folgendermaßen aus:

Zuerst mussten die gewünschten Zahnschans in die Software importiert werden. Zu beachten war dabei, dass auch innerhalb der WINJAW⁺ RC Software der entsprechende Scanner, in diesem Fall waren es einmal Zirkonzahn für die Methode Extraoralscan und einmal Trios für die Methode Intraoralscan, ausgewählt wurde und die Selektion der dazu passenden Bissgabel erfolgte. Im Anschluss fand der Matchingprozess zwischen dem der Software bekannten Kopplungslöffel und den STL-Daten des mit Kopplungslöffel gescannten Oberkiefers statt (Abbildung 20a). Danach musste noch das Matching des kompletten Oberkieferscans mit dem bereits überlagerten Oberkieferscan mit Kopplungslöffel vollzogen werden (Abbildung 20b). Es wurde also ein zweifacher Matchingprozess durchgeführt. Diese beiden Schritte dienten zur korrekten Positionierung des Oberkiefers im Raum.

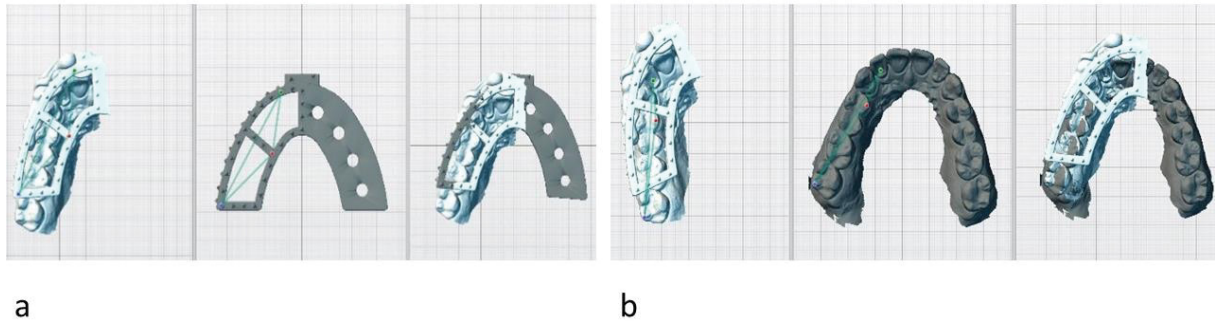


Abbildung 20: Matchingprozess des Oberkiefers in der WINJAW⁺ RC Software zur korrekten Positionierung im Raum am Beispiel eines Scandatensatzes aus dem Intraoralscanner.

- a. Matchingprozess des mit Kopplungslöffel abgescannten Oberkiefers (hellgrau) mit dem entsprechenden Kopplungslöffel innerhalb der Software (dunkelgrau).
- b. Matchingprozess des Oberkieferdatensatzes (dunkelgrau) mit dem Datensatz des bereits vorher überlagerten Oberkiefers mit Kopplungslöffel (hellgrau).

Nachdem der Oberkieferscan durch den zweifachen Matchingprozess korrekt im Raum positioniert worden war, konnte der STL-Datensatz des dazugehörigen Unterkiefers in die Software importiert werden (Abbildung 21). Die Ausrichtung des Unterkiefers zum Oberkiefer wurde durch die beiden Bukkalsans beim Intraoralscan (IOS) und durch den Scan der Modelle in Okklusion beim Extraoralscan (EOS) bestimmt.

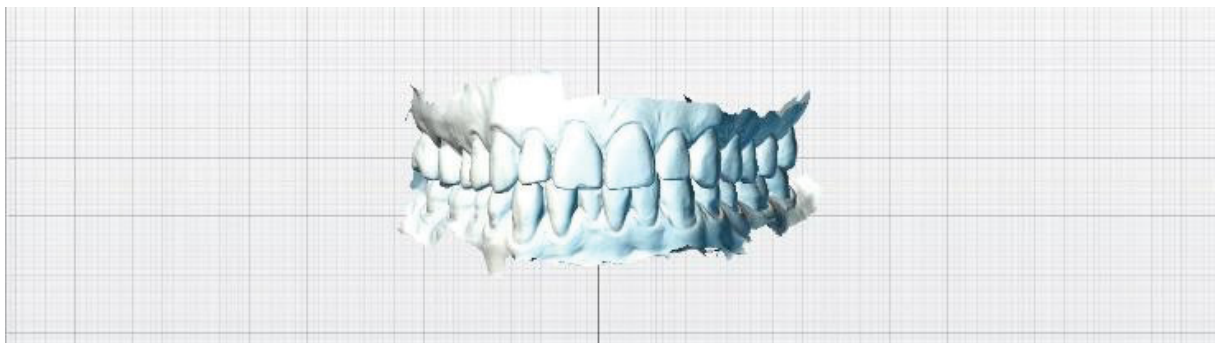


Abbildung 21: In die WINJAW⁺ RC Software importierte und im Raum ausgerichtete Modelle des Ober- und Unterkiefers anhand eines Beispieldatensatzes aus dem Intraoralscan.

Durch den Import der personenbezogenen Scandatensätze aus Extra- und Intraoralscanner in die WINJAW⁺ RC Software hatte eine automatische Überlagerung der Modelle mit den jeweils personenbezogen aufgezeichneten Bewegungsdaten stattgefunden. Auf diese Weise konnten also alle aufgezeichneten Kieferbewegungen (Kapitel 3.6) für die Methoden Extraoralscan und Intraoralscan für jeden einzelnen Probanden miteinander verglichen werden. Die Bewegungen konnten zusammen mit den Modellen in der Software in Echtzeit betrachtet werden.

Vergleichend für die Methoden Extraoralscan und Intraoralscan erfolgte eine digitale Okklusionsanalyse. Der Fokus lag dabei insbesondere auf der statischen Kontaktsituation (Abbildung 22). Die auftretenden Okklusionskontakte aus der Methode Extraoralscan und der Methode Intraoralscan wurden sowohl untereinander als auch mit denen der Durchbissregistratur und der Fotoanalyse verglichen. Daneben fand auch die dynamische Okklusion Betrachtung. In dieser war schwerpunktmäßig die Häufigkeitsanalyse der verwendeten Kontakte aus dem freien Kauversuch während der letzten 10 Kauzyklen von Interesse (Abbildung 23). Als Okklusionskontakte wurden alle Annäherungen der Zahnreihen $\leq 50 \mu\text{m}$ gewertet. Dieser Schwellwert wurde in der Software eingestellt.

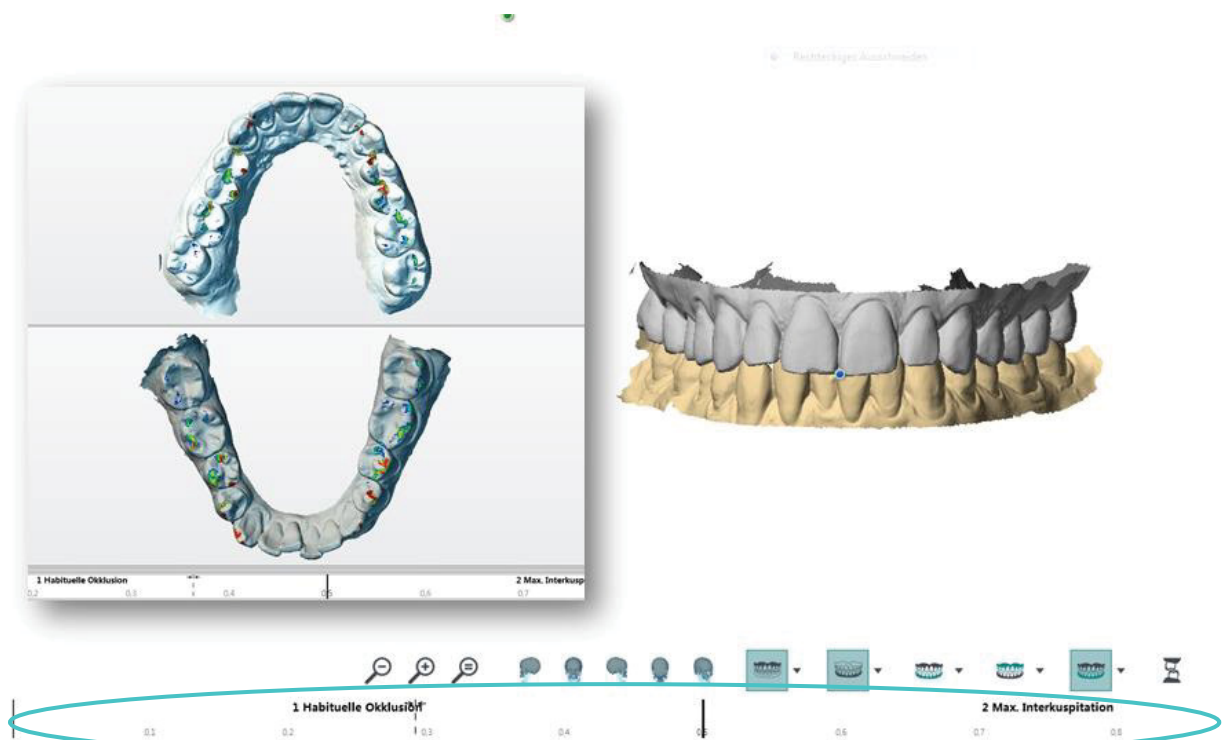


Abbildung 22: Darstellung farbiger markierter Kontaktpunkte in der WINJAW⁺ RC Software aus der habituellen Okklusion mit Scandaten aus dem Intraoralscanner in der Aufsicht auf die Zahnreihen und in Echtzeit während der habituellen Okklusion.

Im linken Bildabschnitt sind die während der habituellen Okklusion auftretenden Kontaktpunkte farbiger in der Aufsicht dargestellt. Im rechten Bildabschnitt ist die reale Positionierung der Kiefer zueinander, hier in der habituellen Okklusion, zu sehen.

Die türkis umkreiste Achse ist die Zeitachse. Hier kann ein gewünschter Zeitraum der Bewegungsaufzeichnung ausgewählt, gestoppt und näher betrachtet werden. Laufen alle Bewegungen in Echtzeit ab, kann man aus der Achse herauslesen, zu welchem Zeitpunkt der Bewegungsaufzeichnung man sich gerade befindet.

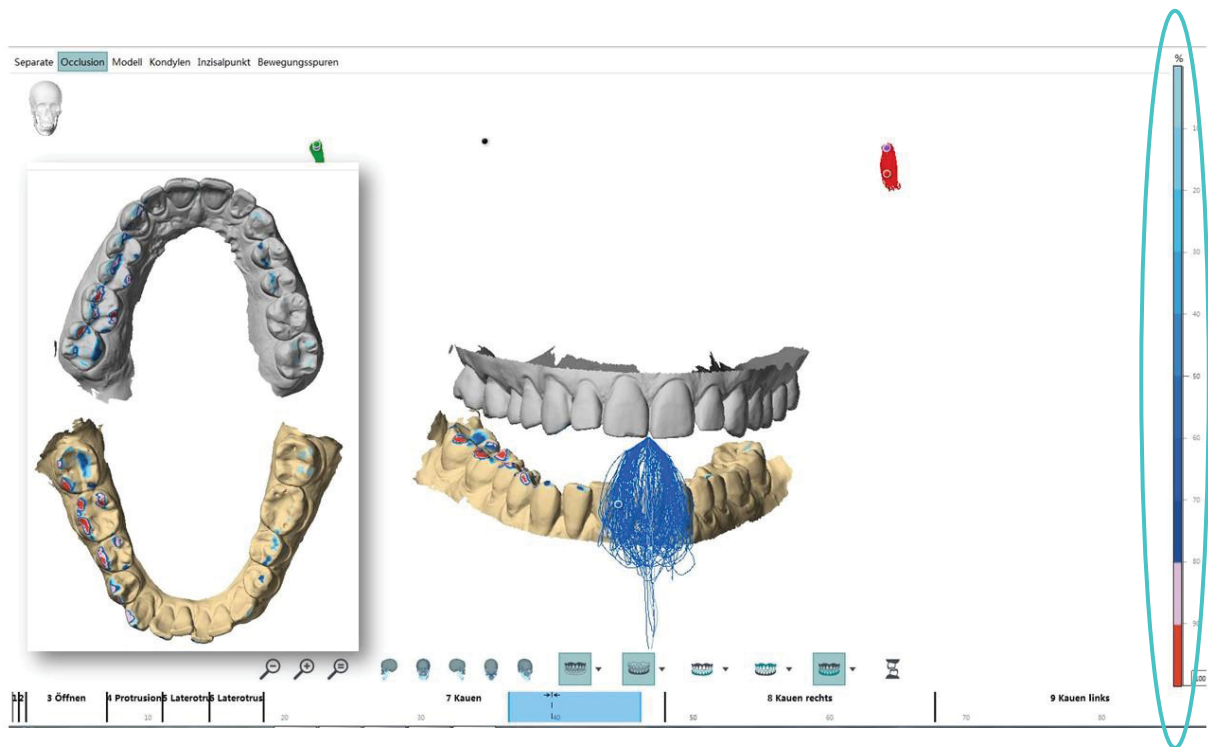


Abbildung 23: Darstellung der häufigsten Kontaktpunkte während der letzten 10 Kauzyklen aus dem freien Kauversuch mit Scandaten aus dem Intraoralscanner in der Aufsicht auf die Zahnreihen und in Echtzeit während der Kaubewegung.

Im linken Bildabschnitt sind die am häufigsten vorkommenden Okklusionskontakte während des freien Kauens in der Aufsicht dargestellt. Konkret waren hier die letzten 10 Kauzyklen aus der Bewegungsaufzeichnung des freien Kauens angewählt worden. Diese wurden vom Ende weg rückwärts gezählt und entsprechen dem Zeitraum des blau markierten Balkens auf der Zeitachse. Im rechten Bildabschnitt ist die reale Position der beiden Kiefer zueinander zum Zeitpunkt des aufgenommenen Screenshots dargestellt. Die dort dargestellten Kontaktareale entsprechen aber dem Gesamtzeitraum über die letzten 10 Kauzyklen und nicht dem Einzelmoment des Screenshots, denn die Zahnreihen befinden sich hier nicht in Okklusion.

Die türkis umkreiste Achse entspricht der Häufigkeitsachse. Sie wird in Prozent angegeben. Die Zahnareale, die rot eingezeichnet sind, wiesen prozentual die häufigsten Okklusionskontakte im entsprechend gewählten Zeitraum auf. Die prozentuale Häufigkeit der auftretenden Okklusionskontakte ist von rot über rosa, dunkel- und hellblau abnehmend.

Für die Bestimmung von Okklusionskontakten wurde folgendes Vorgehen gewählt: Zum entsprechenden Zahn wurde immer die Normale zur Zahnoberfläche zugrunde gelegt. Dies galt auch für den Antagonisten. Der Schwellwert in der Software wurde auf 50 μm gesetzt. Das bedeutete, dass jede Annäherung der Zähne zwischen Ober- und Unterkiefer entlang der Normalen $\leq 50 \mu\text{m}$ als Kontakt gezählt wurde, sofern der Zahn und der Antagonist aufeinander trafen und die Normale nicht daran vorbei passierte (Abbildung 24). Für die Häufigkeitsanalyse galten dann zwei Bedingungen: Erstens musste der Abstand zwischen Zahn und Antagonist $\leq 50 \mu\text{m}$ erfüllt sein, um als Kontakt gewertet zu werden, und zweitens wurde die Anzahl der

auf tretenden Kontakte im gewählten Kauzyklus gezählt. Die am häufigsten auftretenden Kontakte wurden gleich 100% gesetzt und farblich in rot markiert. Alle weiteren auftretenden Kontakte wurden in absteigender Reihenfolge je nach Häufigkeit über rosa, dunkel- und hellblau dargestellt. Beispielhaft traten in Abbildung 24 während der ausgewählten Kauzyklen je 20 Kontakte an den Zähnen 36 und 46 auf. Dies entspricht dann 100% und wird als Hauptkontakt gewertet. Gleichzeitig traten aber an den Zähnen 36 noch 15 Kontakte am distobukkalen Höcker auf, 16 Kontakte an Zahn 37 am mesiobukkalen Höcker, etc. Diese Kontakte lagen prozentual gesehen also niedriger als die beiden Hauptkontakte. Die farbliche Darstellung erfolgte nach abnehmender Kontaktanzahl in rot, rosa, dunkel- und hellblau.

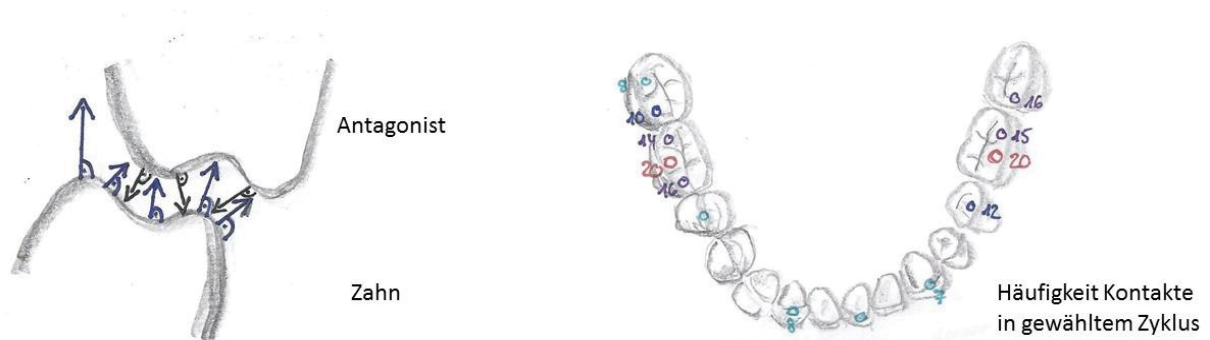


Abbildung 24: Bestimmung von Okklusionskontakten für die Häufigkeitsanalyse.

Links: Die Normalen zur Zahnoberfläche zwischen Zahn und Antagonist.

Rechts: Häufigkeit der auftretenden Kontakte in einem beliebig ausgewählten Kauzyklus.

GEDAS

Das GEDAS System (Greifswald Digital Analyzing System) diente zur objektiven Ermittlung okklusaler Kontaktpunkte in der statischen Okklusion. Insgesamt wurden drei Methoden der okklusalen Kontaktpunkterfassung miteinander verglichen. Dies waren die Methode Klinik, die Methode Extraoralscan und die Methode Intraoralscan (Kapitel 3.3 und 3.5).

Die Ermittlung der klinischen Daten erfolgte über die klassisch analoge Methode mittels Okklusionsfolie und fotografischer Dokumentation sowie über die Erstellung von Bissregistraten. Die Bissregistrate wurden bei jedem Probanden im Schlussbiss (habituelle

Interkuspidation) erstellt (Hützen et al. 2006). Das verwendete Registriermaterial war greenbite apple.

Die Digitalisierung der Bissregistratur erfolgte durch Ansteuerung eines Durchlichtscanners (EPSON PERFECTION 4990 PHOTO) über das GEDAS System. Um die okklusalen Kontakte darzustellen, wurden die Registratur zunächst im Durchlicht und anschließend im Auflicht eingescannt. Im nächsten Schritt wurden die Zahnkonturen des Registrats erfasst. Anschließend fand eine Überlagerung der beiden Scans mit Hilfe des GEDAS Systems statt (Hützen et al. 2006). Als okklusale Annäherung zählten Schichtdicken $\leq 50 \mu\text{m}$. Zur Kalibrierung der Transparenzeigenschaften diente ein $50 \mu\text{m}$ dicker Kalibrierkörper, welcher den Schwellenwert bei $50 \mu\text{m}$ festlegte. Der Kalibrierkörper ist in Abbildung 25 im Auflicht und Durchlicht sowie bei entsprechendem Schwellenwert bei $50 \mu\text{m}$ dargestellt.

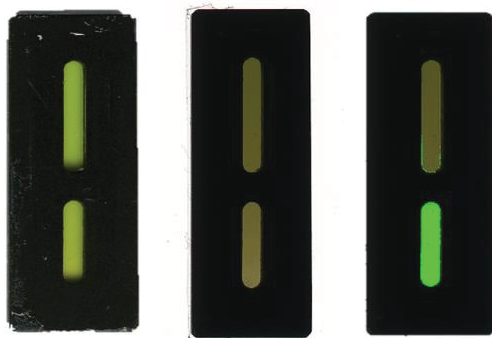


Abbildung 25: Kalibrierkörper ($50 \mu\text{m}$) zur Kalibrierung der Transparenzeigenschaften.

Darstellung im Auflicht (links), im Durchlicht (Mitte) sowie bei entsprechendem Schwellenwert bei $50 \mu\text{m}$ (rechts).

Nachdem die Bissregistratur in das GEDAS System eingelesen waren, konnte mit der Ermittlung der Kontakte begonnen werden. Um eine genaue Anzahl der Kontakte pro Zahn zu erhalten, wurden in einem weiteren Schritt die Einzelzahn Grenzen mesial und distal gesetzt und jeder Region die jeweilige Zahnbezeichnung zugeordnet (Abbildung 26). Dadurch wurde dem System gelehrt bis wohin ein okklusaler Kontaktpunkt zu einem jeweiligen Zahn gezählt werden sollte. Bedingt durch den Scan der Bissregistratur musste bei der Zahnkennzeichnung auf eine gespiegelte Darstellung geachtet werden. Der 2. und 3. Quadrant waren jeweils auf der linken Bildhälfte zu sehen und der 1. und 4. Quadrant jeweils auf der rechten Bildhälfte. Die Software zeigte die Quadranten Einteilung für die Bissregistratur an. In der nachfolgenden Abbildung ist dies links zu erkennen.

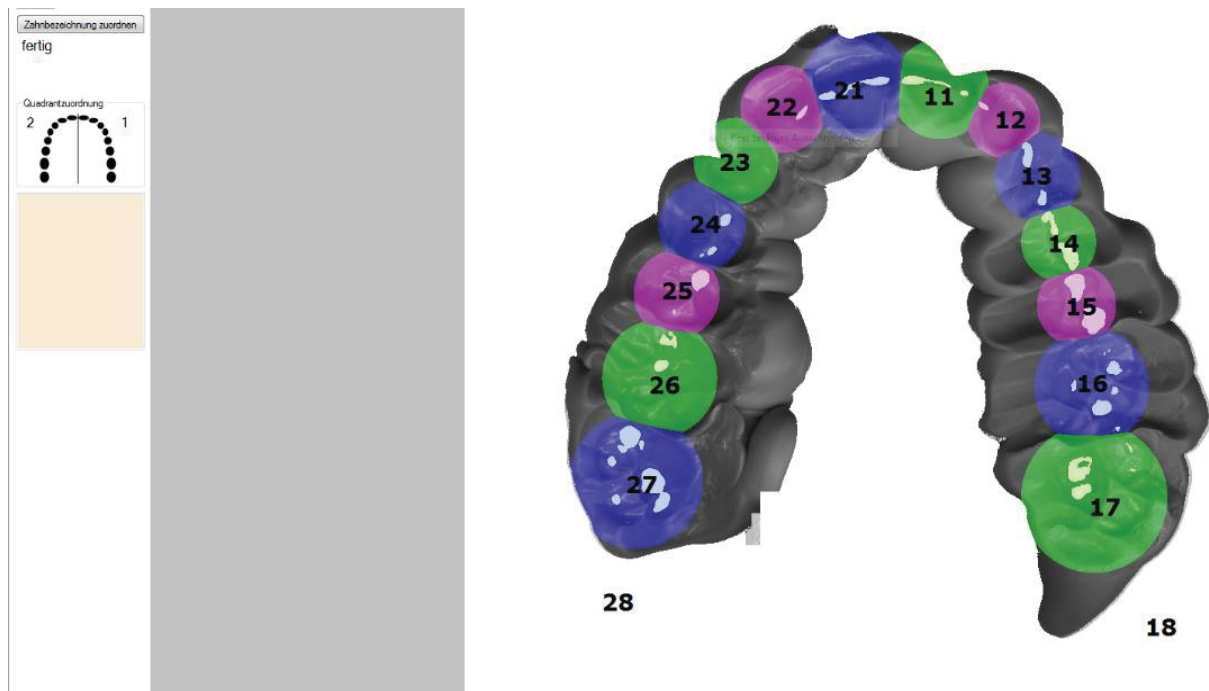


Abbildung 26: Markierung der Zahnflächen und Zuordnung der Zahnkennzeichnung in GEDAS am eingelesenen Bissregistrat.

Die farbig markierten Stellen geben eine Zahnregion auf dem Bissregistrat an. Die im Bild dargestellten weißen Punkte sind die okklusalen Kontaktpunkte bei 50 μ m. Durch die Markierung der Einzelzahngrenzen wird dem System gelehrt, bis wo hin ein okklusaler Kontaktpunkt zu einem bestimmten Zahn gezählt werden kann.

Im nächsten Schritt erfolgte automatisch die Ausgabe der zahnbezogenen Kontakte, welche in Abbildung 27 beispielhaft dargestellt ist. Lokalisation und Anzahl der Kontakte werden pro Zahn in rot dargestellt. In der vorliegenden Abbildung wurden beispielsweise 7 Okklusionskontakte an Zahn 27 gezählt. Die Anzahl 7 konnte aus dem grünen Feld herausgelesen werden. Wurde an einem Zahn kein Kontakt gezählt, erschien das Feld in der Farbe orange (im Beispiel aus Abbildung 27 an Zahn 23).

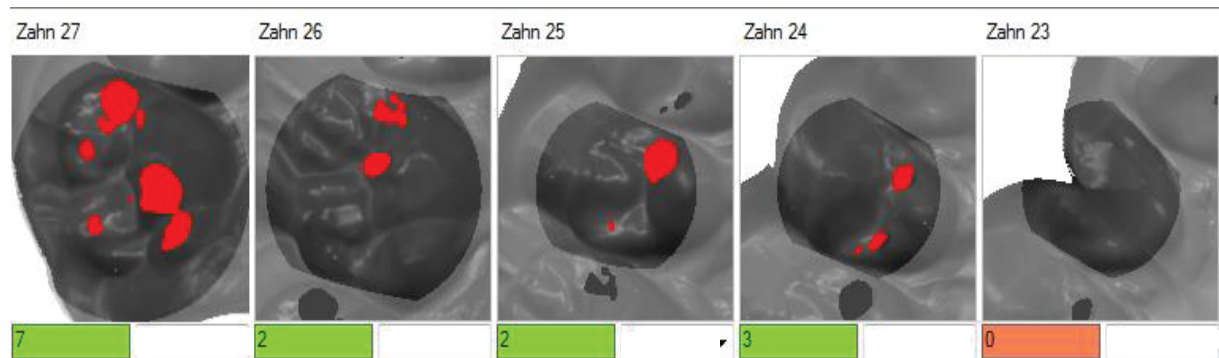


Abbildung 27: Darstellung der ermittelten Kontaktanzahl am Bissregistrat pro Zahn im GEDAS System.

Die roten Flächen stellen die Okklusionskontakte dar. Im grünen Feld erscheint je Zahn die zahlenmäßige Angabe der gezählten Okklusionskontakte, beispielsweise 7 Stück an Zahn 27. Wird kein Kontakt gezählt (im Beispiel an Zahn 23), erscheint das Feld in Orange.

Die Anzahl an zahnbezogenen Okklusionskontakte wurde probandenweise für jeden Zahn tabellarisch festgehalten. Das Ergebnis aus der Methode Klinik diente später als Referenzwert zu dem die Abweichungen aus den Methoden Extra- und Intraoralscan gemessen werden sollten.

Bei den Methoden Extra- und Intraoralscan sollten die okklusalen Kontakte anhand der digitalen Scans der Zahnreihen detektiert werden. Bei der Methode Extraoralscan geschah die Digitalisierung über ein konventionell erstelltes Gipsmodell, bei der Methode Intraoralscan direkt über den Scan der Zahnreihen im Mund der Probanden.

Um auch die Ergebnisse aus den Methoden Extra- und Intraoralscan zu objektivieren, fand das GEDAS Verfahren nicht nur bei der Analyse von Durchbissregistraten Anwendung, sondern auch bei den Methoden Extraoralscan und Intraoralscan. Da das GEDAS System standardmäßig für die Auswertung der Bissregistrat gedacht ist, mussten ein paar Schritte im Verfahren abgeändert werden. Die erste Herausforderung bestand darin, die Daten der Zahnscans (Extraoralscan und Intraoralscan) in das GEDAS System einzulesen. Zudem existierte auch kein Kalibrierkörper, mit dem eine Schichtdicke $\leq 50 \mu\text{m}$ kalibriert hätte werden können.

Hier kam wieder die weiter oben im Kapitel beschriebene WINJAW⁺ RC Software ins Spiel. Die aus dem Extra- und aus dem Intraoralscan gewonnenen STL-Daten konnten in diese eingelesen werden und standen dann sozusagen als digitale Modelle in der Software zur Verfügung. Um die okklusalen Kontaktpunkte anzuzeigen, wurden die Modelle mit den

ebenfalls mittels der WINJAW⁺ RC Software aufgezeichneten Bewegungsdaten überlagert (S.49ff). Zur Ermittlung der statischen Okklusionskontakte war der Zeitpunkt der Bewegungsaufzeichnung von Interesse, bei dem die habituelle Okklusion eingenommen worden war (Abbildung 22). Ein Schwellwert von 50 μm Stärke konnte über die WINJAW⁺ RC Software festgelegt werden.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen der GEDAS und der WINJAW⁺ RC Software bestand noch in der farblichen Darstellung der Okklusionskontakte. Während das GEDAS System nur in rot das Vorhandensein eines Kontaktes ab einem gewissen Schwellwert anzeigte (Abbildung 27), stellte die WINJAW⁺ RC Software die vorhandenen Kontakte in verschiedenen Farben dar (Abbildung 28a). Je nach auftretender Kontaktstärke wurde der Kontakt in rot (= starker Kontakt) über orange, gelb, grün bis blau (= leichter Kontakt) angezeigt. Damit beide Systeme auf die gleiche Art und Weise arbeiteten, wurde die WINJAW⁺ RC Software für diesen Arbeitsschritt speziell abgeändert, so dass auch hier nur noch das Vorhandensein eines Kontaktes ab dem Schwellwert 50 μm einfarbig angezeigt wurde (Version WINJAW⁺ RC 1.5.100) (Abbildung 28b). Um die Verteilung der Okklusalen Kontaktpunkte während der Zeitpunktes der habituellen Okklusion in das GEDAS System einlesen zu können, wurde an entsprechender Stelle ein Screenshot aus der WINJAW⁺ RC Software gemacht. Der Screenshot konnte als Bilddatei in GEDAS eingelesen werden.

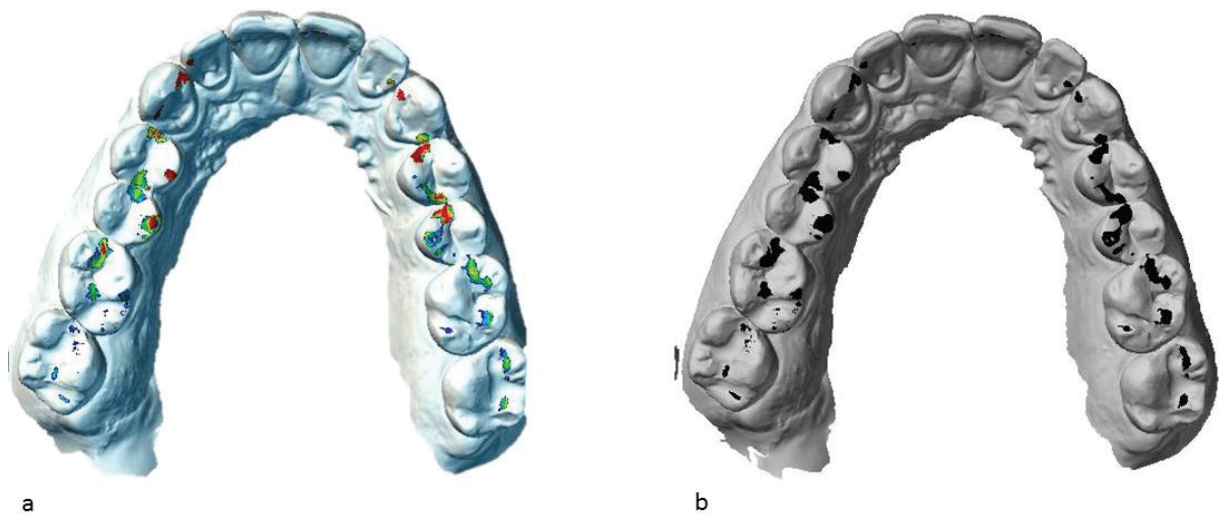


Abbildung 28: Screenshot aus der WINJAW⁺ RC Software während der habituellen Okklusion und Darstellung der vorhandenen okklusalen Kontaktpunkte mehrfarbig und einfarbig bei jeweils gleich gewähltem Schwellwert.

- a. standardmäßige Darstellung der okklusalen Kontaktpunkte in WINJAW⁺. Die Darstellung erfolgt mehrfarbig, je nach auftretender Kontaktstärke.
- b. Screenshot einer für das GEDAS System adaptierten WINJAW⁺ Variante, die alle Kontakte ab dem Schwellwert 50 µm schwarz darstellt.

Das weitere Vorgehen im GEDAS System zur Darstellung der Kontaktpunkte pro Zahn war dann zu großen Teilen gleich dem Vorgehen bei den Bissregistraten, nur dass das Einscannen entfiel. Nach dem Einlesen der Bilddaten über Screenshots erfolgte die Markierung der Zahnflächen in GEDAS. Im Unterschied zum Bissregistrat lag bei den eingelesenen Scandatensätzen eine Abweichung der Quadranten Zuordnung vor. Dies ist darin begründet, dass die normalerweise in das GEDAS System eingelesenen Bissregistrate im Durchlicht und Auflicht eingescannt werden. Die Ansicht auf den eingelesenen Scan dagegen erfolgte in der Draufsicht. Die nachfolgende Abbildung 29 zeigt einen aus dem Intraoralscan eingelesenen Scandatensatz. Das Vorgehen beim Extraoralscan war exakt analog dem des Intraoralscans.

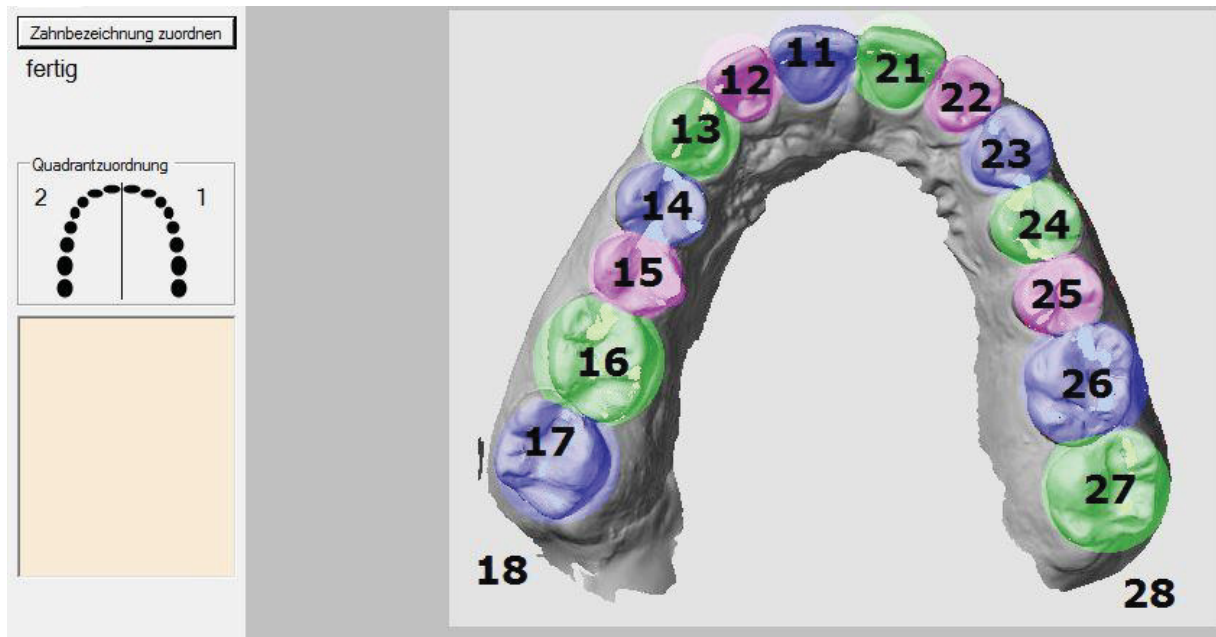


Abbildung 29: Markierung der Zahnflächen in GEDAS am eingelesenen Scandatensatz aus dem Intraoralscanner. Die farbig markierten Stellen geben eine Zahnregion auf dem Scandatensatz an. Die im Bild dargestellten weißen Punkte sind die okklusalen Kontaktpunkte bei 50 µm. Durch die Markierung der Einzelzahngrenzen wird dem System gelehrt, bis wo hin ein okklusaler Kontaktpunkt zu einem bestimmten Zahn gezählt werden kann. Es liegt eine Abweichung der Quadranten Zuordnung vor, da der eingelesene Scandatensatz in der Draufsicht dargestellt ist. Das GEDAS System arbeitet normalerweise mit Bissregistraten, welche im Durchlicht und Auflicht eingescannt werden.

Wie schon bei der Auswertung der Bissregistratur erfolgte auch bei der Auswertung der Scandatensätze im nächsten Schritt die automatische Darstellung der zahnbezogenen Kontakte. Im nachfolgenden Beispiel lagen 3 Okklusionskontakte Zahn 27 vor, 3 Okklusionskontakte an Zahn 26, etc. Die Anzahl der vorhandenen Kontaktpunkte pro Zahn wurde jeweils im grünen Feld dargestellt (Abbildung 30).



Abbildung 30: Darstellung der ermittelten Kontaktanzahl am Scandatensatz des Intraoralscans pro Zahn im GEDAS System.

Die roten Flächen stellen die Okklusionskontakte dar. Im grünen Feld erscheint je Zahn die zahlenmäßige Angabe der gezählten Okklusionskontakte, beispielsweise 3 Kontakte an Zahn 27, 3 Kontakte an Zahn 26, 5 Kontakte an Zahn 25, 3 Kontakte an Zahn 24 und 2 Okklusionskontakte an Zahn 23.

Die Anzahl an zahnbezogenen Okklusionskontakte über alle Einzelzähne wurde probandenweise tabellarisch festgehalten.

Das GEDAS System diente also zur Objektivierung der Auswertung der Anzahl an statischen Okklusionskontakten bei einer Kontaktstärke $\leq 50 \mu\text{m}$. Die Kontaktanzahl wurde weder bei der klinischen Methode über die Bissregistratur noch bei den Scandatensätzen aus Extra- und Intraoralscan rein händisch gezählt, sondern alle Daten wurden dem GEDAS System überführt. So gelang es eine objektive Anzahl aller Kontakte bei drei verschiedenen Methoden (Kapitel 3.5) zu erhalten.

3.5 ANGEWANDTE METHODEN

Wie bereits in Kapitel 3.3 erwähnt, wurde die Promotionsarbeit in drei Teile untergliedert.

Im ersten Teil der Arbeit sollten die Datensätze aus Extraoralscanner und Intraoralscanner miteinander verglichen und Abweichungen analysiert werden. Die Analyse der Abweichungen zwischen Extra- und Intraoralscanner geschah mit Hilfe der GOM Inspect Software (Kapitel 3.4).

Im zweiten Teil der Arbeit bestand die Intention darin, drei verschiedene Methoden zur Bestimmung statischer Okklusionskontakte miteinander zu vergleichen (Abbildung 13). Die erste Methode umfasste die klassische klinische Methode mithilfe von Durchbissregistraten und Okklusionsfolie. Die mittels Okklusionsfolie ermittelte Kontaktpunktsituation wurde für spätere Analysen fotografisch festgehalten und dokumentiert. Neben der klassisch klinischen Methode erfolgte eine digitale Okklusionsanalyse mittels zwei verschiedenen Scanverfahren.

Dabei handelte es sich um ein extraorales Scanverfahren, bei dem der Zirkonzahn Scanner S600 ARTI (Fa. Zirkonzahn, Gais, Italien) Anwendung fand und ein intraorales Scanverfahren, bei dem der Intraoralscanner Trios 3 (Fa. 3 Shape, Kopenhagen, Dänemark) verwendet wurde (Kapitel 3.4). Um eine objektive Aussage über die Anzahl der gezählten Kontaktpunkte zu erhalten, wurden sowohl die aus den Durchbissregistraten ermittelten statischen Okklusionskontakte aus der klinisch analogen Methode als auch die über die beiden Scanverfahren ermittelten statischen Okklusionskontakte in das GEDAS System eingelesen (Kapitel 3.4). Die Anzahl der zahnbezogenen Okklusionskontakte wurden für jeden Probanden tabellarisch festgehalten. Als Schnittstelle zwischen den beiden Scanverfahren und dem GEDAS System diente die WINJAW⁺ RC Software (Kapitel 3.4). Mittels der WINJAW⁺ RC Software wurde die Position der Kiefer zueinander im Schlussbiss erfasst sowie Bewegungsdaten aufgezeichnet. Die Aufgezeichneten Kieferpositionen und Bewegungsdaten wurden jeweils mit den Scandatensätzen des Extra- und Intraoralscanners überlagert. Abbildung 31 stellt nochmals die objektive Erfassung der Anzahl an Okklusionskontakten in der statischen Okklusion grafisch dar:

Objektive Erfassung der Anzahl an Okklusionskontakten in der statischen Okklusion

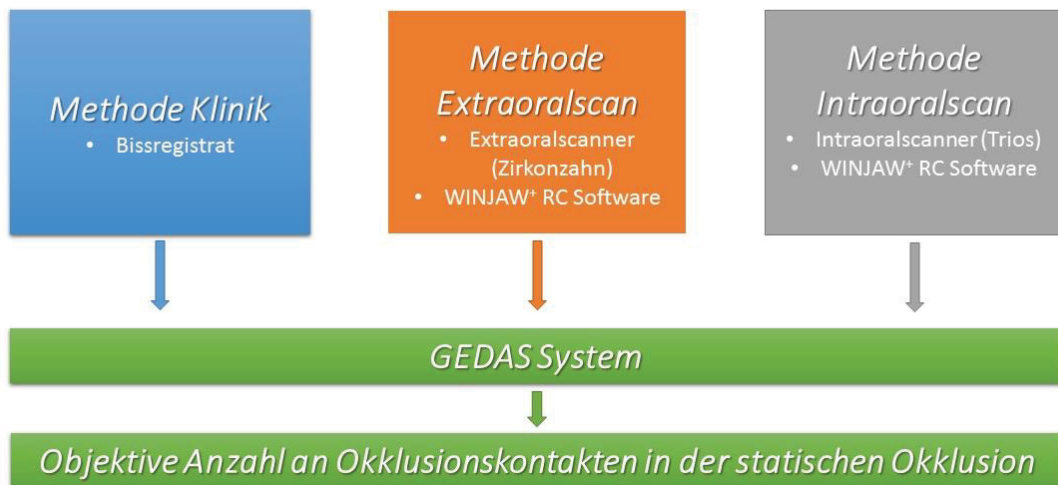


Abbildung 31: Objektive Erfassung der Anzahl an Okklusionskontakten in der statischen Okklusion über drei verschiedene Methoden.

Das GEDAS System diente der objektiven Erfassung der Anzahl an Okklusionskontakten. Die Daten aus der Methode Klinik (Bissregistratur), aus der Methode Extraoralscan (Scandatensätze aus dem Extraoralscan) und aus der Methode Intraoralscan (Scandatensätze aus dem Intraoralscan) wurden alle in das GEDAS System überführt und somit elektronisch gezählt. Die WINJAW+ RC Software diente dazu die Daten der Bewegungsaufzeichnung, für die Statik während der habituellen Okklusion, mit den jeweiligen Scandatensätzen zu überlagern. Außerdem diente sie dazu, den Schwellenwert ab welchem ein Kontakt als solcher gezählt werden sollte bei der Methode Extra- und Intraoralscan einheitlich festzulegen.

Nach der rein softwarebezogenen Auswertung der Okklusionskontakte fiel auf, dass es trotz objektivierter Maßnahmen zur Kontaktpunktzählung zum Teil zu größeren Abweichungen zwischen den Methoden kam. Daher wurden letztendlich alle drei Methoden nochmals auf Plausibilität überprüft. Bei der Methode Klinik wurde das Ergebnis aus GEDAS und den Bissregistraturen nochmals mit der Fotodokumentation über die klassisch analoge Okklusionsprüfung mittels Okklusionsfolie abgeglichen. Dabei fielen einige Ungereimtheiten auf. Beispielsweise, dass manche Studienteilnehmer bereits bei der klinischen Okklusionsprüfung trotz immer gleich lautenden Kommandos (Kapitel 3.6) nicht gleich im Schlussbiss waren. War das Durchbissregistrator zu wenig durchgebissen, rutschten Okklusionskontakte durch den Schwellenwert von 50 µm hindurch und wurden nicht mehr als solche erfasst, obwohl an selber Stelle auf dem Foto ein Kontakt vorhanden war. Nach Plausibilitätskontrolle durch den Abgleich der GEDAS Ergebnisse mit denen der Fotoanalyse lautete der neue Referenzwert für die Methode Klinik „Foto+GEDAS“ (Abbildung 32).

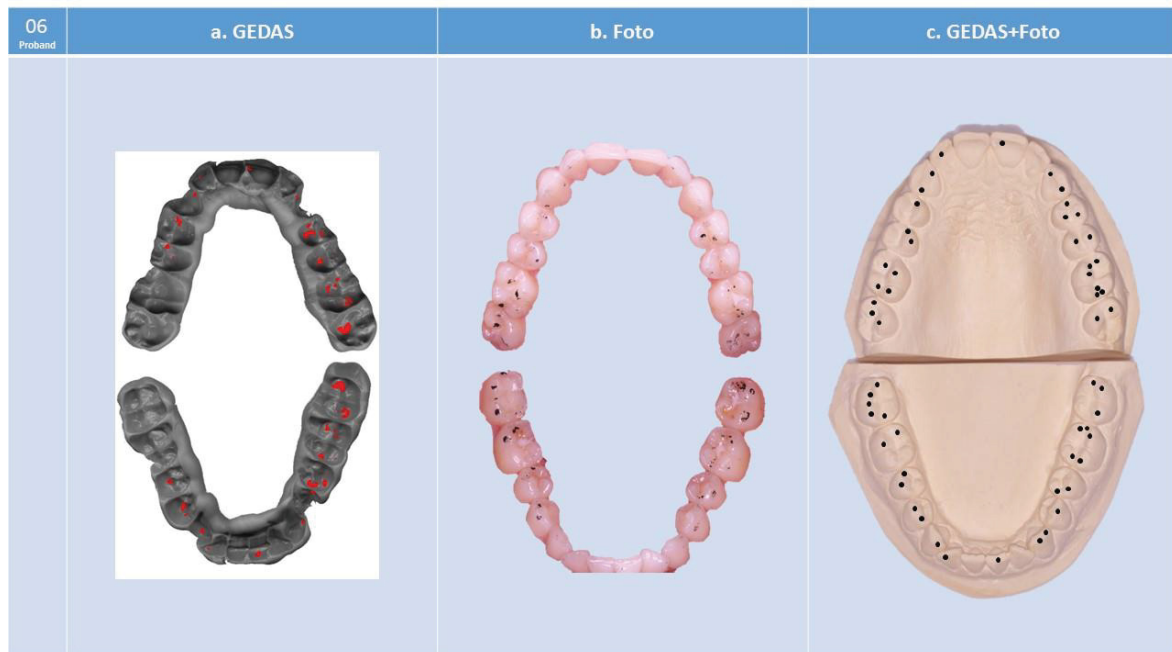


Abbildung 32: Modifizierte klinische Methode „Foto+GEDAS“.

- a. Ergebnisse aus der GEDAS Auswertung mittels Bissregistrator.
- b. Beispiel Foto aus der klassisch analogen Okklusionsanalyse mittels Okklusionsfolie und anschließender Fotodokumentation.
- c. Plausibilitätskontrolle „Foto+GEDAS“ durch den Autor.

Neben der klinischen Methode wurden auch die Methoden Extraoralscan und Intraoralscan mit Hilfe der WINJAW⁺ RC Software einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Der Vorteil innerhalb der WINJAW⁺ RC Software im Vergleich zum verwendeten Screenshot war, dass sehr weit ins Modell hineingezoomt werden konnte, um auch winzig kleine Kontakte zu erfassen.

Die Anzahl an zahnbezogenen Okklusionskontakten nach der Plausibilitätskontrolle wurde wiederum probandenweise tabellarisch festgehalten.

Die nachfolgende Grafik (Abbildung 33) stellt nochmals die Übersicht der drei Methoden nach Plausibilitätskontrolle dar. Für die Methode Klinik bedeutete die Plausibilitätskontrolle den Abgleich der GEDAS Ergebnisse mit der herkömmlichen Methode über Okklusionsfolie und anschließender Fotoanalyse. Bei den Methoden Extra- und Intraoralscan bedeutete das Wort „Plausibilität“ nochmals eine Überprüfung der Anzahl der Okklusionskontakte direkt innerhalb der WINJAW⁺ RC Software durch den Autor.

Plausibilitätskontrolle der Anzahl an Okklusionskontakten in der statischen Okklusion



Abbildung 33: Plausible Anzahl an Okklusionskontakten in der statischen Okklusion.

Hier sind die modifizierten Methoden nach Plausibilitätskontrolle zusammengefasst. Für die Methode Klinik bedeutete dies den Abgleich der GEDAS Ergebnisse mit den Fotos aus der analogen Okklusionsanalyse mittels Okklusionsfolie. Die Methoden Extra- und Intraoralscan wurden innerhalb der WINJAW⁺ RC Software durch den Autor Plausibilität überprüft.

Im dritten Teil der Arbeit sollten neben den statischen Okklusionskontakten auch dynamische Okklusionskontakte in der Spätphase von Kausequenzen digital betrachtet und analysiert werden. Hierbei war insbesondere die Häufigkeitsanalyse der verwendeten Kontakte während der letzten zehn Kauzyklen von Interesse. Die Häufigkeitsanalyse der verwendeten Kontakte geschah mit Hilfe der auf Basis der mittels des Kieferregistriersystems aufgezeichneten Bewegungsdaten und der WINJAW⁺ RC Software (Kapitel 3.4).

Zur Generierung der Messdaten wurden insgesamt drei Untersuchungssitzungen an 20 Probanden durchgeführt (Kapitel 3.6). Die erste Untersuchungssitzung diente dazu, die Okklusionskontakte analog zu erfassen. Hierzu zählten eine klassische Okklusionsanalyse mit Okklusionsfolie und anschließender Fotodokumentation sowie die Erstellung eines Bissregistrats aus Silikon. Ferner wurden Alginatabformungen genommen, um im Anschluss an die erste Sitzung individuelle Löffel für Ober- und Unterkiefer herzustellen. Die zweite und dritte Untersuchungssitzung dienten der Generierung der Daten für die digitale Okklusionsanalyse. Hierzu zählten in der zweiten Untersuchungssitzung der Intraoralscan sowie die Erstellung von Präzisionsabformungen mittels eines Vinylsiloxanethers (Identium Medium und Identium Light, Fa. Kettenbach, Eschenburg, Deutschland) und der zuvor

hergestellten individuellen Löffel. Die Präzisionsabformungen wurden anschließend im Labor mit Präzisionsgips ausgegossen. Die Präzisionsgipsmodelle dienten der indirekten Datenerfassung über den Extraoralscanner. In der dritten Untersuchungssitzung fand eine Bewegungsaufzeichnung mit Hilfe des JMA^{Optic} Systems statt (Kapitel 3.4). Zur Ermittlung der statischen Okklusionskontakte wurde die Unterkieferposition während des Schlussbisses aufgenommen. Zur Ermittlung der dynamischen Okklusionskontakte wurden unter anderem Kauversuche durchgeführt und die dabei auftretenden Unterkieferpositionen und Bewegungsspuren aufgezeichnet. Eine Übersicht der einzelnen Untersuchungssitzungen und der daraus generierten Daten sowie der Arbeitsschritte im Labor findet sich in der nachfolgenden Abbildung 34.

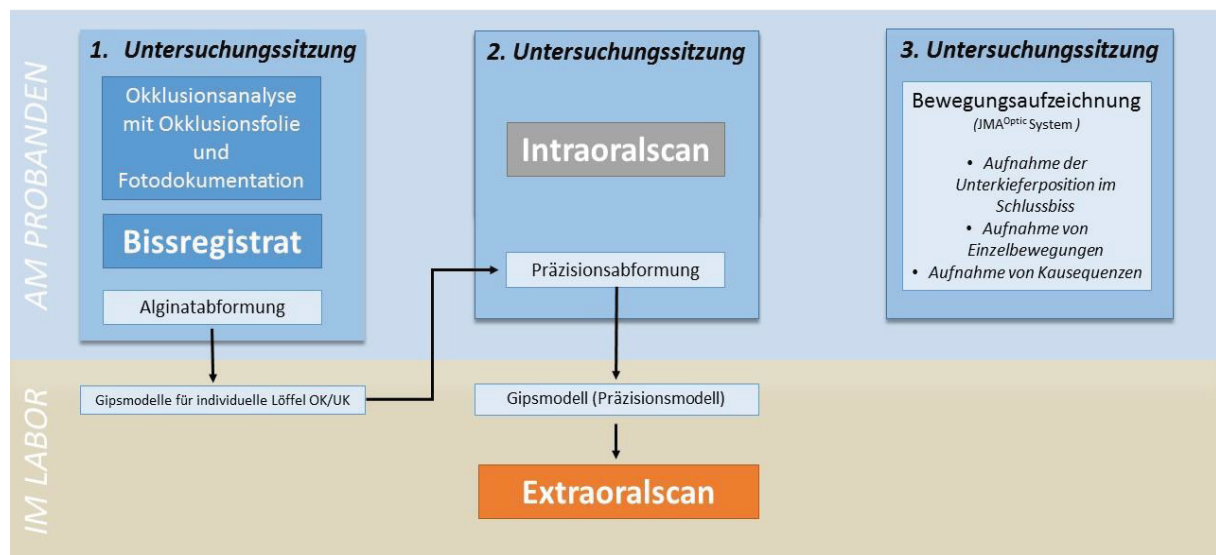


Abbildung 34: Übersicht über die einzelnen Untersuchungssitzungen am Probanden und der daraus generierten Daten sowie über die Arbeitsschritte im Labor.

Es fanden drei Untersuchungssitzungen statt, aus denen die generierten Messdaten hervorgingen. In der 1. Untersuchungssitzung wurden die Daten für die Methode Klinik generiert. In der 2. Untersuchungssitzung waren es die Daten für die Methode Intraoralscan. Zudem wurden Präzisionsabformungen von Ober- und Unterkiefer genommen, aus denen im Labor die Präzisionsgipsmodelle von Ober- und Unterkiefer für die Methode Extraoralscan hergestellt wurden. In der 3. Untersuchungssitzung fand die Bewegungsaufzeichnung mittels des JMA^{Optic} Systems (Fa. zebris Medical, Isny, Deutschland) statt. Aufgezeichnet wurden die Unterkieferposition im Schlussbiss, Einzelbewegungen (Öffnen, Schließen, Protrusion und Laterotrusion) und Kausequenzen.

Zur Ermittlung der Okklusionskontakte aus Statik und Dynamik fand eine Kopplung aller Scandaten aus Methode Extraoralscan und Intraoralscan mit den Daten aus der Bewegungsanalyse über die WINJAW⁺ RC Software statt.

Um eine objektive Analyse der Anzahl an statischen Okklusionskontakten zu erhalten, wurden die Bissregistratrate aus der Methode Klinik und die mit den Bewegungsdaten gekoppelten Scandatensätze der Methoden Extra- und Intraoralscan in das GEDAS System eingelesen und ausgewertet. Wie weiter oben im Kapitel beschrieben, wurden alle Ergebnisse der statischen Okklusion im Nachhinein nochmals einer Plausibilitätskontrolle unterzogen. Abbildung 35 fasst das Kapitel Material und Methode nochmals graphisch zusammen.

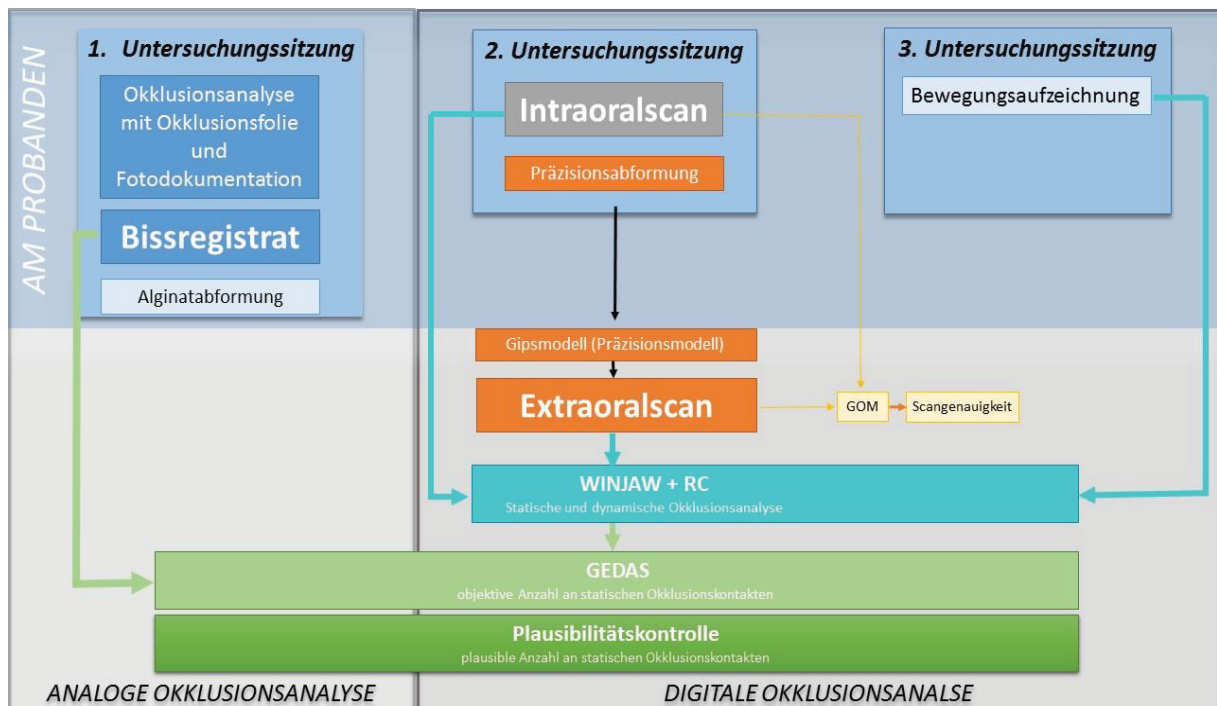


Abbildung 35: Übersicht der einzelnen Untersuchungssitzungen am Probanden und der daraus generierten Daten sowie die zur Analyse der Messergebnisse verwendete Software.

Die drei im Bild blau hinterlegten Untersuchungssitzungen fanden direkt am Probanden statt. In der 1. Untersuchung wurden die Daten für die Methode Klinik generiert. In der 2. Untersuchungssitzung waren es die Daten für die Methode Intraoralscan sowie der Präzisionsabformungen, aus denen später im Labor Präzisionsgipsmodelle von Ober- und Unterkiefer für die Methode Extraoralscan erstellt wurden. In der 3. Untersuchungssitzung fand die Bewegungsaufzeichnung statt. Die Okklusionsanalyse an sich erfolgte zumeist am PC über die WINJAW⁺ RC Software. Zur Objektivierung der Ergebnisse aus der statischen Okklusion wurden alle Bissregistratrate sowie alle Scandatensätze aus Extra- und Intraoralscanner in das GEDAS System eingelesen. Anschließend wurden alle Ergebnisse aus der statischen Okklusionsanalyse einer Plausibilitätskontrolle unterzogen. Die Abweichung der aus Extra- und Intraoralscanner generierten Datensätze zueinander wurde über die GOM Software ermittelt.

3.6 ARBEITSABLÄUFE AM PROBANDEN UND LABOR

Die Arbeitsabläufe am Probanden untergliederten sich in drei Untersuchungssitzungen. Zwischen den Untersuchungssitzungen wurden zum Teil Arbeiten im Labor angefertigt.

Erste Untersuchungssitzung

Hier fand die Generierung der Messdaten für die Methode Klinik statt. Diese umfasste eine klinische zahnärztliche Okklusionsanalyse mit anschließender Fotodokumentation. Die Darstellung statischer Kontaktpunkte erfolgte mit schwarzer Okklusionsfolie, Laterotrusionskontakte mit roter Okklusionsfolie und Protrusionskontakte mit blauer Okklusionsfolie. Die Zahnoberflächen sollten dazu möglichst trocken sein, weshalb vor jeder Anzeichnung der Speichel mit dem Speichelsauger und dem Luftpuster reduziert wurde. Die Einbringung der Okklusionsfolie erfolgte beidseits.

Die Anweisungen für den Probanden lauteten dabei wie folgt:

- Statik: „In den Schlussbiss gehen, aufbeißen und halten“.
- Protrusion: „In den Schlussbiss gehen, aufbeißen und halten. Auf Kommando unter Zahnkontakt nach vorne schieben“.
- Laterotrusion: „In den Schlussbiss gehen, aufbeißen und halten. Auf Kommando unter Zahnkontakt nach rechts/links schieben“.

Es erfolgte jeweils eine fotografische Dokumentation der Okklusionskontakte im Mund (Abbildung 36).

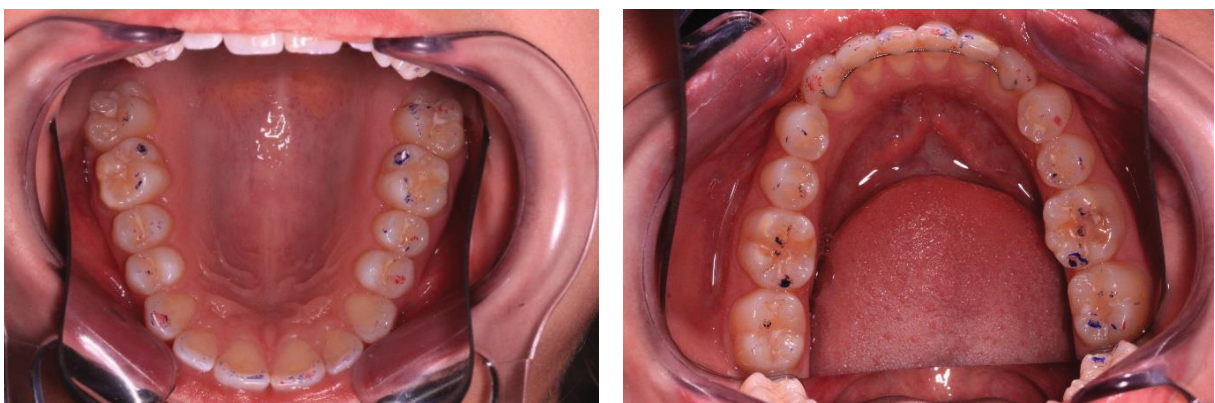


Abbildung 36: Fotodokumentation der okklusalen Kontaktsituation im Ober- und Unterkiefer.

Die statische Okklusion ist Schwarz, die Laterotrusionskontakte Rot und die Protrusionskontakte Blau abgezeichnet.

Zusätzlich zur klassischen klinischen Methode der Okklusionsprüfung mittels Okklusionsfolie erfolgte die Erstellung eines Durchbissregistrats mittels greenbite apple (Fa. DETAX, Ettlingen, Deutschland). Die Arbeitsanweisung für den Probanden lautete dabei wie folgt:

- „In den Schlussbiss gehen, aufbeißen und halten“.

Des Weiteren waren Situationsabformungen mit Alginat und Rimlock-Löffeln Bestandteil der ersten Untersuchungssitzung. Im Anschluss wurden daraus im Labor Situationsmodelle erstellt. Auf den Situationsmodellen erfolgte je Kiefer die Anfertigung eines individuellen Abformlöffels aus lighthärtendem Kunststoff, welcher in der zweiten Untersuchungssitzung Anwendung fand. Abbildung 37 fasst die erste Untersuchungssitzung schematisch zusammen.

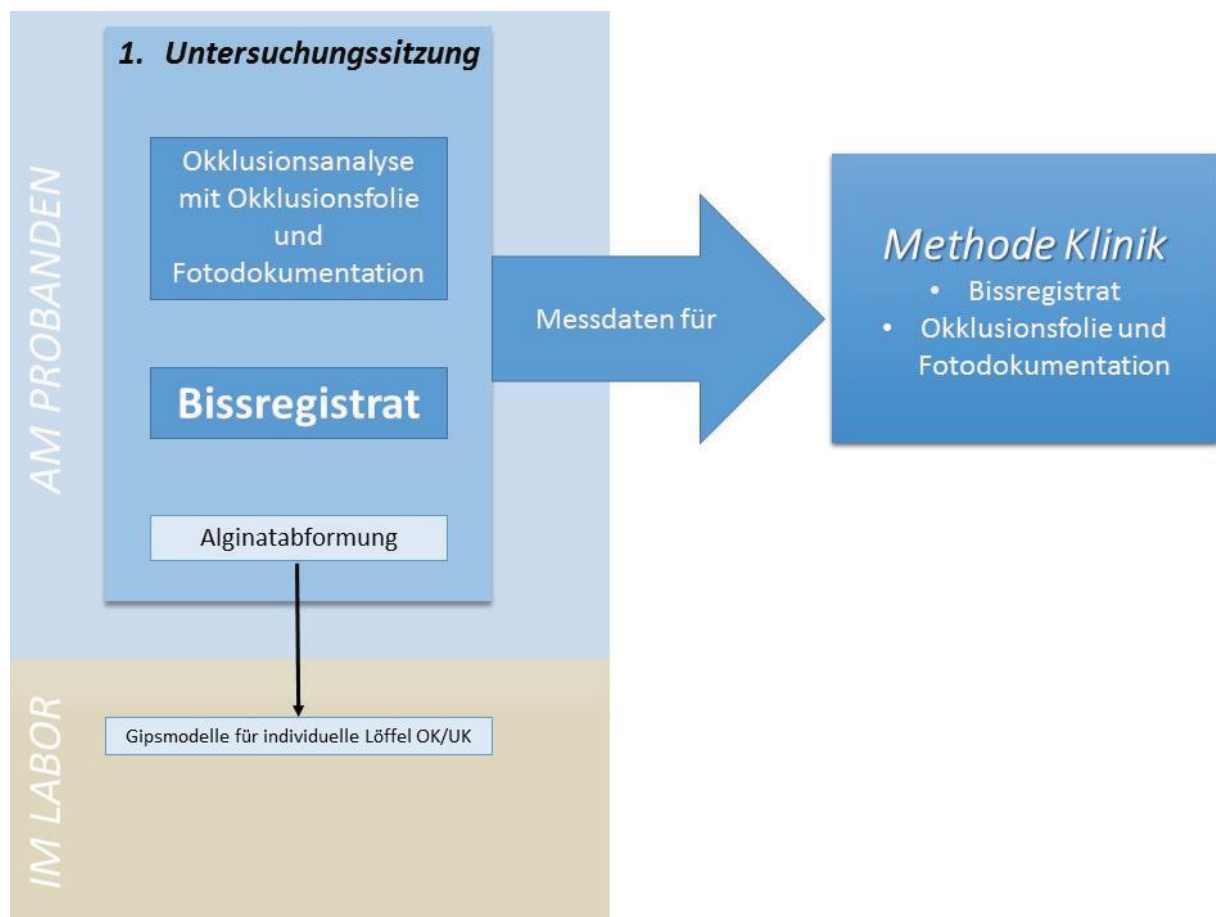


Abbildung 37: Schematische Zusammenfassung der ersten Untersuchungssitzung.

Die Arbeitsschritte im oben dargestellten blauen Feld wurden am Probanden vollzogen, die im braunen Feld im Labor. In der ersten Untersuchungssitzung erfolgte die Generierung der Messdaten für die Methode Klinik.

Zweite Untersuchungssitzung

Aus der zweiten Untersuchungssitzung wurden die Messdaten für die Methoden Intra- und Extraoralscan gewonnen. Dazu fanden mit Hilfe der zuvor im Labor gefertigten individuellen Abformöffel Präzisionsabformungen von Ober- und Unterkiefer statt. Als Abformmaterial diente Identium Medium, ein mittelfließendes, additionsvernetzendes, elastomeres Abformmaterial auf Vinylsiloxanetherbasis und Identium Light, ein dünnfließendes Abformmaterial aus Vinylsiloxanether (Fa. Kettenbach, Eschenburg, Deutschland). Aus den gewonnenen Präzisionsabformungen von Ober- und Unterkiefer erfolgte im Labor die Erstellung der Präzisionsgipsmodelle, die später mittels des Extraoralscanners S600 ARTI digitalisiert wurden. Zudem erfolgten die Intraoralscans von Ober- und Unterkiefer mit dem Trios 3. Abbildung 38 stellt die zweite Untersuchungssitzung schematisch dar.

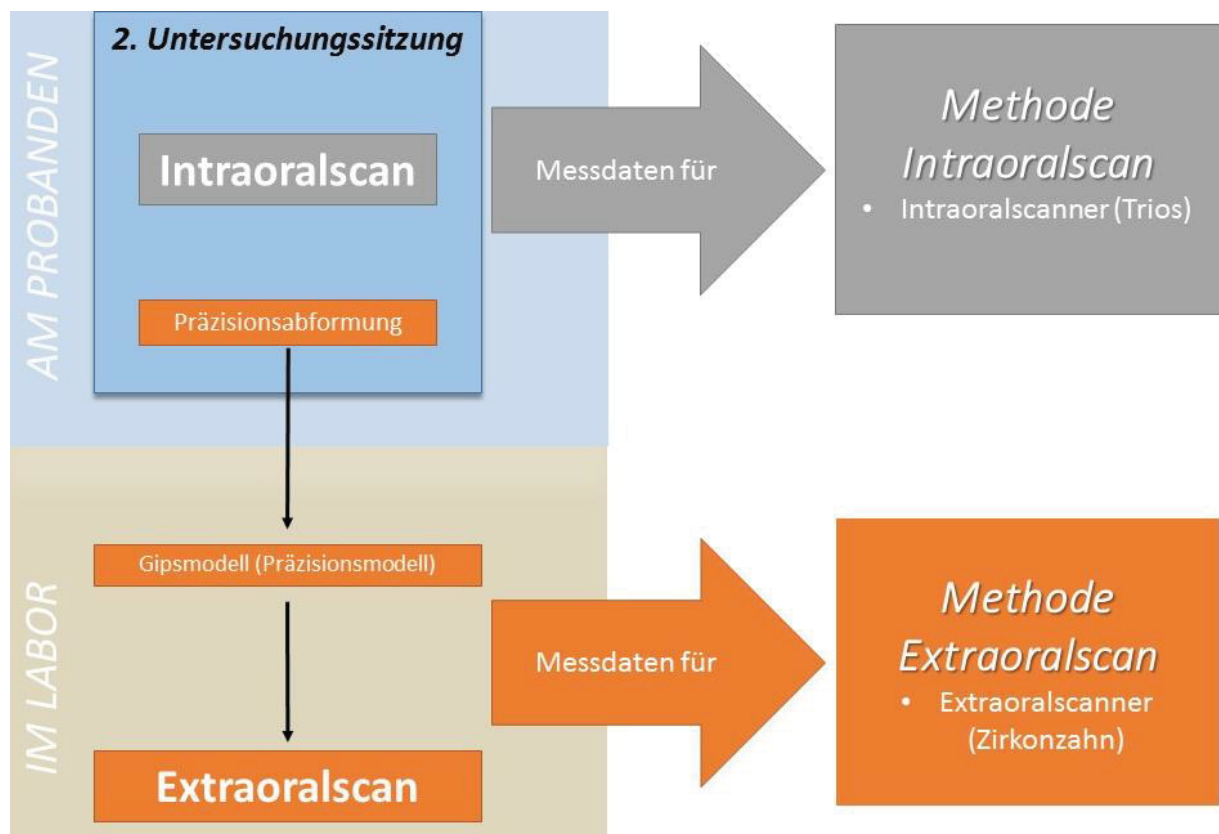


Abbildung 38: Schematische Zusammenfassung der zweiten Untersuchungssitzung.

Die Arbeitsschritte im oben dargestellten blauen Feld wurden am Probanden vollzogen, die im braunen Feld im Labor. In der zweiten Untersuchungssitzung erfolgte die Generierung der Messdaten für die Methoden Extra- und Intraoralscan.

Bei der Aufzeichnung der Intraoralscans waren je Studienteilnehmer fünf Scans notwendig:

- Oberkieferscan
- Unterkieferscan
- Bukkalscan rechts im Schlussbiss
- Bukkalscan links im Schlussbiss
- Oberkiefer mit Kopplungslöffel

Für die beiden Bukkalscans sollte der Studienteilnehmer jeweils die habituelle Okklusion einnehmen und so bis zum Ende des Scanvorgangs verbleiben.

Der Oberkieferscan mit Kopplungslöffel erfolgte mit dem intraoralen Kopplungslöffel der zebris Medical GmbH, Isny, Deutschland (Abbildung 16 und Abbildung 39). Der intraorale Kopplungslöffel wurde mit Hilfe von greenbite apple an den Okklusalfächen des 2. Quadranten sowie unterhalb des skelettierten Anteils an den Bukkalflächen des 1. Quadranten befestigt.

Vorbereitend für die dritte Untersuchungssitzung und den Scan mit dem S600 ARTI wurde der extraorale Kopplungslöffel mittels Futar D, einem additionsvernetzenden Bissregistriermaterial auf Vinylpolysiloxanbasis (A-Silikon), individualisiert (Fa. Kettenbach, Eschenburg, Deutschland) (Kettenbach o. J.).

Eine bildliche Zusammenfassung der zweiten Untersuchungssitzung mit den daraus gewonnenen Materialien ist Abbildung 39 zu entnehmen:

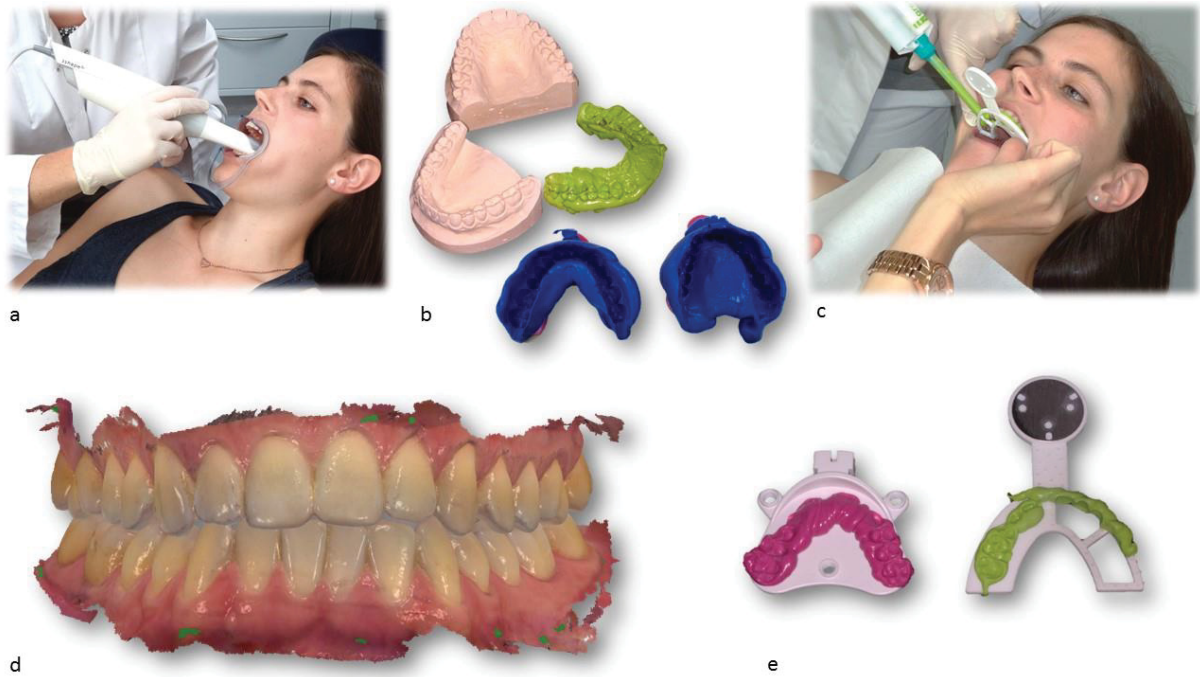


Abbildung 39: Bildliche Zusammenfassung der zweiten Untersuchungssitzung und daraus gewonnene Materialien.

- a. Intraoralscan
- b. Präzisionsabformungen und daraus gewonnene Gipsmodelle für Extraoralscan sowie das Durchbissregistrat (aus der ersten Untersuchungssitzung)
- c. Individualisierung des Oberkieferkopplungslöffels für den Intraoralscan
- d. Ober- und Unterkieferdaten aus Intraoralscan
- e. Individualisierte Kopplungslöffel für Extra- und Intraoralscan

Dritte Untersuchungssitzung

In der dritten Sitzung erfolgte die Aufzeichnung der Kieferbewegungen mittels des JMA^{Optic} Systems.

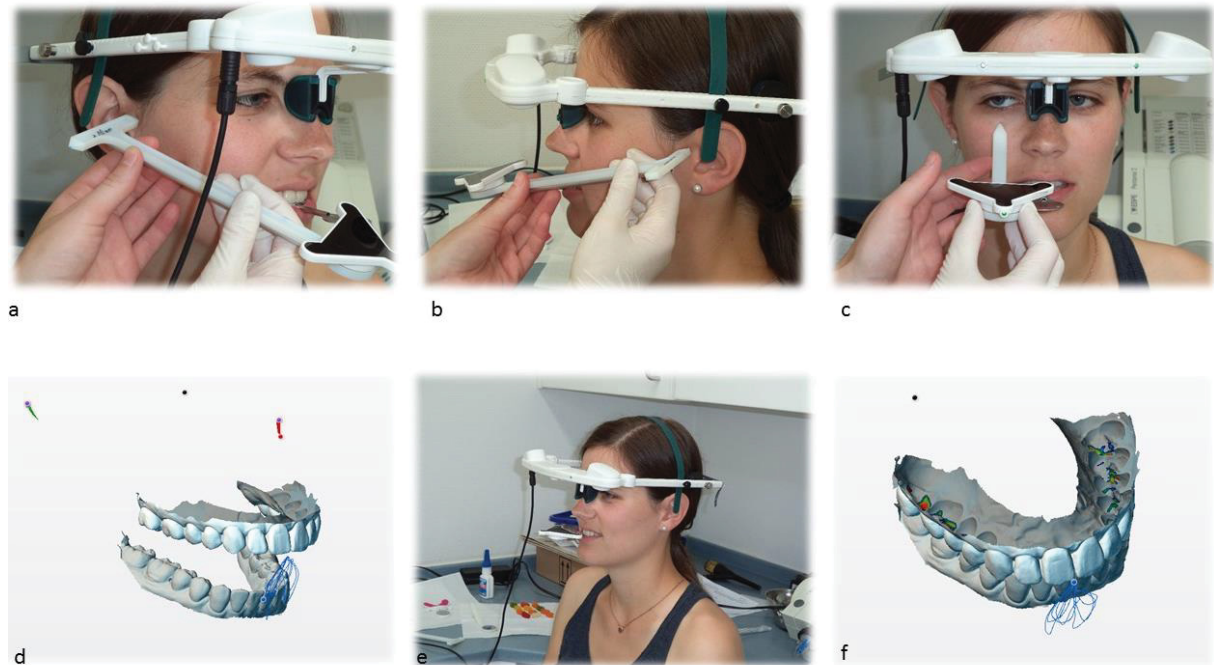


Abbildung 40: Bildliche Zusammenfassung aus der dritten Untersuchungssitzung: Messung mit dem JMA^{Optic} System

- a. Bestimmung des rechten posterioren Referenzpunktes mittels T-Zeiger*
- b. Bestimmung des linken posterioren Referenzpunktes mittels T-Zeiger*
- c. Bestimmung des anterioren Referenzpunktes mittels Infraorbital- Zeiger*
- d. Darstellung der Öffnungsbewegung in Echtzeit*
- e. Ober- und Unterkiefersensorik am Kopf des Probanden während des Schlusssisses*
- f. Darstellung des Schlusssisses in Echtzeit*

Als Vorbereitungsmaßnahme diente die Anbringung eines Unterkieferattachments (Paraoklusales Attachment 90, REF 1960260, Abbildung 41) mittels Luxatemp (Fa. DMG, Hamburg, Deutschland). Dabei war zu beachten, dass weder die statische noch die dynamische Okklusion durch das Attachment behindert wurden. Das Attachment diente zur Anbringung der Unterkiefersensorik. Die Befestigung der dazugehörigen Oberkiefersensorik erfolgte durch Aufsetzen des Kopfbogens auf den Kopf des Probanden. Der Kopfbogen ist über eine Nasionstütze sowie mittels eines Überkopfbandes und zwei Seitenbügeln mit Federwirkung am Kopf des Probanden befestigt (Abbildung 18 und Abbildung 40).



Abbildung 41: Attachment zur Anbringung der Unterkiefersensorik.

Quelle: zebris Medical GmbH, Isny, Deutschland.

Nach Individualisierung des Unterkieferattachments konnte mit den Messungen begonnen werden. Es wurde je eine Messung für die Methode Extraoralscan und dem dafür vorgesehenen extraoralen Kopplungslöffel (Abbildung 14), und eine Messung für die Methode Intraoralscan und dem dafür vorgesehenen intraoralen Kopplungslöffel durchgeführt (Abbildung 16).

Zu Beginn einer jeden Messung erfolgte die Bestimmung der Referenzebene über zwei posteriore und einen anterioren Referenzpunkt über zum System gehörige T- und Infraorbital-Zeiger. Als anteriorer Referenzpunkt diente der rechte Infraorbitalpunkt. Als posteriore Referenzpunkte dienten die beiden Scharnierachsenpunkte, welche über die Linie zwischen oberem Tragus und lateralem Augenwinkel 12 mm anterior und 3 mm kaudal des oberen Tragus mittels eines Denar Lineals (Fa. Whip Mix Europe, Dortmund, Deutschland) ermittelt wurden (Hugger/Kordaß 2018). Zwischen den definierten posterioren Achsenpunkten und dem Orbitabodenpunkt bildete die Software eine Referenzebene im Raum. Zusätzlich erfolgte über den jeweiligen Kopplungslöffel die Bestimmung der Oberkieferposition im Raum.

Nach Festlegung der Referenzebene konnte mit den Messungen begonnen werden. Als erstes wurde die Unterkieferposition in habitueller Okklusion („Schlussbiss“) und anschließend in maximaler Interkuspidation aufgezeichnet. Die Anweisungen für den Probanden lauteten folgendermaßen:

- „In den Schlussbiss gehen, und halten“.
- „Die Zähne fest zusammenzupressen und halten“.

Die durchgeführten Kieferbewegungen waren Öffnen und Schließen, Protrusion, Laterotrusion nach links bzw. rechts, freies Kauen und angewiesenes Rechts- sowie angewiesenes Linkskauen. Die Kauversuche erfolgten jeweils mit einem Gummibärchen (Goldbären, Fa. Haribo, Bonn, Deutschland). Vor Start der Messung wurden die vorgegebenen Unterkieferbewegungen einmal mit dem Probanden geübt. Ausgangsposition vor jeder Einzelmessung war immer die habituelle Okklusion. Die Anweisungen lauteten dabei wie folgt:

- Öffnen: „In den Schlussbiss gehen und halten. Auf Kommando dreimal weit öffnen und schließen“.
- Protrusion: „In den Schlussbiss gehen und halten. Auf Kommando unter Zahnkontakt nach vorne schieben“.
- Laterotrusion: „In den Schlussbiss gehen und halten. Auf Kommando den Unterkiefer nach rechts schieben und zurück. Dann im Schlussbiss bleiben und halten. Auf Kommando den Unterkiefer nach links schieben und zurück“.
- Freies Kauen: „Das Gummibärchen auf der Zunge belassen und in den Schlussbiss gehen und halten. Dann das Gummibärchen auf Kommando frei kauen“.
- Kauen rechts: „Das Gummibärchen auf der Zunge belassen und in den Schlussbiss gehen und halten. Dann das Gummibärchen auf Kommando nur auf der rechten Seite kauen“.
- Kauen links: „Das Gummibärchen auf der Zunge belassen und in den Schlussbiss gehen und halten. Dann das Gummibärchen auf Kommando nur auf der linken Seite kauen.“

3.7 STATISTISCHE AUSWERTUNG

Statistische Analysen wurden mit Hilfe der Statistik- und Analysesoftware SPSS (Version 25, Fa. IBM, Ehningen, Deutschland) durchgeführt.

Der erste Teil der Arbeit umfasste die Auswertung der Konturabweichung des Intraoralscanners zum Extraoralscanner entlang des Inspektionsschnitts. Dazu wurden die mittlere Abweichung aller ausgewerteten Punkte, das 95%-Konfidenzintervall, die Standardabweichung sowie die Minimal- und Maximalwerte ermittelt. Beim arithmetischen Mittel handelt es sich um den Durchschnittswert (Axmann et al. 2006) der hier verwendeten Messpunkte. Die Betrachtung der Abweichung erfolgte als Betrag.

Der zweite Teil der Arbeit beinhaltete die Auswertung der auftretenden Okklusionskontakte in der statischen Okklusion. Die Okklusionskontakte wurden bei 20 Studienteilnehmern anhand

von drei unterschiedlichen Methoden ermittelt. Für die statistische Auswertung wurde der Interklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) mit Bewertung nach Cicchetti (1994) herangezogen. Der ICC gilt als Maß für die Übereinstimmung. Für $ICC = 0$ liegt gar keine Übereinstimmung vor, wohingegen für $ICC = 1$ die vollständige Übereinstimmung vorliegt.

Cicchetti gab folgende Richtlinien für die Interpretation der Intraklassen-Korrelation an (Cicchetti 1994) (Tabelle 5):

Bewertung	ICC
schlecht („poor“):	$< 0,4$
durchschnittlich („fair“):	$0,4 - 0,59$
gut („good“):	$0,6 - 0,74$
sehr gut („excellent“):	$\geq 0,75$

Tabelle 5: Bewertung des ICCs nach Cicchetti (1994).

Die Anzahl der vorliegenden Okklusionskontakte wurde jeweils für einen Zahnbereich, nämlich je Kiefer pro Molaren-, Prämolaren- und Frontzahnbereich zusammengefasst und ausgewertet.

Zur Analyse systematischer Abweichungen zwischen den Methoden wurden Bland-Altman-Diagramme erstellt. Mit Hilfe des Bland-Altman-Verfahrens konnte die Übereinstimmung zwischen zwei Messwertreihen bewertet werden (Axmann et al. 2002). Betrachtet wurde dabei die mit den unterschiedlichen Methoden ermittelte Gesamtzahl an statischen Okklusionskontakten.

Der dritte Teil der Arbeit umfasste die Auswertung der dynamischen Okklusionskontakte. Die statistische Auswertung erfolgte über die Betragsdifferenzen der Ergebnisse aus Extra- und Intraoralscanner. Auch hier wurden die Hauptkontakte pro Zahnbereich, nämlich je Kiefer pro Molaren-, Prämolaren- und Frontzahnbereich, gezählt.

4 ERGEBNISSE

4.1 KONTURABWEICHUNG DES INTRAORALSCANNERS ZUM EXTRAORAL-SCANNER

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Konturabweichungen zwischen Extraoralscanner und Intraoralscanner dargestellt. Die vollständigen Tabellen, auf welchen die hier dargestellten Ergebnisse beruhen, sind im Anhang in Kapitel 8.1 zu finden. Die Abweichungen wurden entlang des Inspektionsschnitts durch das Kauzentrum an den jeweils ersten Molaren des Ober- und Unterkiefers gemessen. Als Referenz diente der aus dem Extraoralscanner erhaltene Scan. Die aus dem Intraoralscanner gewonnenen Daten wurden dazu mit Hilfe der GOM-Inspect Software in Relation gesetzt. Beide Male wurden die Gipsmodelle der 20 Probanden gescannt (Tabelle 6):

	Oberkiefer	Unterkiefer
mittlere Abweichung:	40,72 μm	33,84 μm
95%-Konfidenzintervall:	Untergrenze: 31,17 μm	Untergrenze: 26,79 μm
	Obergrenze: 50,27 μm	Obergrenze: 40,90 μm
Standardabweichung:	20,40 μm	15,07 μm
Minimum:	15,00 μm	14,70 μm
Maximum:	86,10 μm	61,33 μm

Tabelle 6: Konturabweichung zwischen Extraoralscanner und Intraoralscanner anhand der Scans über die Gipsmodelle entlang des Inspektionsschnitts im Ober- und Unterkiefer.

Die Angaben beziehen sich auf die Betragsmittelwerte der Einzelmessungen.

Entlang des Inspektionsschnitts durch die Zähne 16 und 26 ergab sich im Oberkiefer eine mittlere Abweichung von 40,72 μm zwischen den mittels Extraoralscanner digitalisiertem Gipsmodellen und dem mittels Intraoralscanner digitalisierten Gipsmodellen. Das 95%-Konfidenzintervall wies eine Untergrenze von 31,17 μm und eine Obergrenze von 50,27 μm auf. Die Standardabweichung betrug 20,40 μm . Das Minimum lag dabei 15,00 μm , das Maximum 86,10 μm .

Im Unterkiefer ergab sich eine mittlere Abweichung von 33,84 μm entlang des Inspektionsschnitts durch die Zähne 36 und 46. Das 95%-Konfidenzintervall wies eine Untergrenze von 26,79 μm und eine Obergrenze von 40,90 μm auf. Die Standardabweichung betrug 15,07 μm . Minimum und Maximum lagen bei 14,70 μm und 61,33 μm . Die angegebenen Werte bezogen sich jeweils auf die Betragsmittelwerte der einzelnen Abweichungen durch den Inspektionsschnitt.

Beim Vergleich Extraoralscan über das Gipsmodell und Intraoralscan in vivo ergaben sich folgende Ergebnisse (Tabelle 7):

	Oberkiefer	Unterkiefer
mittlere Abweichung:	49,50 μm	53,30 μm
95%-Konfidenzintervall:	Untergrenze: 41,16 μm Obergrenze: 57,85 μm	Untergrenze: 29,56 μm Obergrenze: 77,05 μm
Standardabweichung:	17,83 μm	50,73 μm
Minimum:	15,25 μm	12,90 μm
Maximum:	86,50 μm	252,33 μm

Tabelle 7: Konturabweichung zwischen Extraoralscanner (Gipsmodell) und Intraoralscanner (in vivo) entlang des Inspektionsschnitts im Ober- und Unterkiefer.

Die Angaben beziehen sich auf die Betragsmittelwerte der Einzelmessungen bei 20 Probanden.

Entlang des Inspektionsschnitts durch die Zähne 16 und 26 ergab sich im Oberkiefer eine mittlere Abweichung von 49,50 μm zwischen den mittels Extraoralscanner digitalisierten Gipsmodellen und den mittels Intraoralscanner aufgenommenen Zahnreihen im Mund der einzelnen Probanden. Die Untergrenze des 95%-Konfidenzintervalls lag bei 41,16 μm , die Obergrenze bei 57,85 μm . Die Standardabweichung betrug 17,83 μm . Minimum und Maximum lagen bei 15,25 μm und 86,50 μm .

Die mittlere Abweichung im Unterkiefer entlang des Inspektionsschnitts durch die Zähne 36 und 46 befand sich hier bei 53,30 μm . Das 95%-Konfidenzintervall wies eine Untergrenze von 29,56 μm und eine Obergrenze von 77,05 μm auf. Die Standardabweichung betrug 50,73 μm . Das Minimum wies einen Wert von 12,90 μm auf, das Maximum einen Wert von 252,33 μm . Die angegebenen Werte bezogen sich wiederum auf die Betragsmittelwerte der einzelnen Abweichungen durch den Inspektionsschnitt.

4.2 KONTAKTPUNKTAUSWERTUNG IN DER STATISCHEN OKKLUSION

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die Anzahl der statischen Okklusionskontakte (Tabelle 8 bis Tabelle 13). Es wurden jeweils die Kontakte pro Zahnregion, nämlich für den Molaren-, Prämolaren- und Frontzahnbereich zusammengefasst. Die Farben hellblau und mittelblau stehen für die Methode Klinik. In der hellblauen Spalte ist die Anzahl der Kontakte dargestellt, wie sie über die Bissregistratur aus GEDAS ausgegeben wurde. In der Spalte mit dem dunkleren blau sind die Kontakte nach der Plausibilitätsprüfung, nämlich aus dem Vergleich GEDAS und Fotoanalyse aufgelistet. Die Farben hellorange und mittelorange stehen für die Ergebnisse aus der Methode Extraoralscan (EOS). In der Spalte im hellorangenen Ton sind die Ergebnisse aufgeführt, wie sie aus GEDAS geliefert wurden, in der Spalte mit dem dunkleren Orangeton die Ergebnisse nach der Plausibilitätskontrolle. Die beiden Spalten im Grauton liefern die Ergebnisse für die Methode Intraoralscan (IOS). Die hellere Spalte gibt wiederum die direkt aus GEDAS gewonnenen Ergebnisse an, die dunklere die Ergebnisse nach Plausibilitätskontrolle.

Die farbliche Hinterlegung der Tabellen steht also für die Ergebnisse aus den Methoden:

-  GEDAS
-  GEDAS+FOTO
-  Extraoralscan (EOS)
-  EOS+Plausibilität
-  Intraoralscan (IOS)
-  IOS+Plausibilität

Die Tabellenzeile „Summe“ gibt die Summe aller Okklusionskontakte je Zahnregion und je Methode an. Der Mittelwert gibt die mittlere Anzahl an Okklusionskontakten je Zahnregion und je Methode an.

Nach jeder Tabelle sind jeweils zwei Balkendiagramme aufgeführt, anhand denen die Ergebnisse nochmals veranschaulicht werden (Abbildung 42 bis Abbildung 53). Das obere Balkendiagramm zeigt die Summe aller Kontakte je Zahnregion und Methode, das untere Balkendiagramm die mittlere Anzahl an Okklusionskontakten je Zahnregion und Methode.

Kontaktpunktauswertung an den Oberkiefermolaren in der statischen Okklusion

Proband	MolarenOK-GEDAS	MolarenOK-Foto+GEDAS	MolarenOK-EOS	MolarenOK-EOS+Plaus	MolarenOK-IOS	MolarenOK-IOS+Plaus
1	21	20	29	24	31	26
2	17	13	6	6	8	8
3	11	9	7	7	13	10
4	9	12	12	12	17	14
5	26	20	13	13	14	11
6	8	15	13	13	12	14
7	2	15	17	16	16	16
8	12	15	10	10	20	20
9	20	14	15	15	21	20
10	23	18	18	18	14	14
11	25	19	15	16	19	14
12	10	11	16	15	10	10
13	16	13	11	12	18	17
14	8	8	8	8	9	9
15	19	15	12	13	16	14
16	26	22	18	18	18	17
17	13	10	17	17	13	11
18	18	14	11	11	16	15
19	25	22	14	15	20	19
20	22	22	22	22	14	14
Summe	331	307	284	281	319	293
Mittelwert	16,55	15,35	14,2	14,05	15,95	14,65

Tabelle 8: Kontaktpunktverteilung an den Oberkiefermolaren in der statischen Okklusion.

MolarenOK-GEDAS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Molaren im Oberkiefer über die Methode GEDAS.

MolarenOK-Foto+GEDAS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Molaren im Oberkiefer über die Methode Fotodokumentation aus der klassisch analogen Okklusionsanalyse mittels Okklusionsfolie und dem Vergleich aus den Ergebnissen aus der Methode GEDAS.

MolarenOK-EOS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Molaren im Oberkiefer über die Methode Extraoralscan (EOS).

MolarenOK-EOS+Plaus: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Molaren im Oberkiefer über die Methode Extraoralscan (EOS) und anschließender Plausibilitätskontrolle durch händisches Zählen der Kontaktpunkte.

MolarenOK-IOS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Molaren im Oberkiefer über die Methode Intraoralscan (IOS).

MolarenOK-IOS+Plaus: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Molaren im Oberkiefer über die Methode Extraoralscan (EOS) und anschließender Plausibilitätskontrolle durch händisches Zählen der Kontaktpunkte.

Bei der Methode GEDAS wurden im Oberkiefermolarenbereich 331 Okklusionskontakte in der statischen Okklusion über alle 20 Probanden gezählt. Dabei ergab sich eine mittlere Okklusionskontakanzahl von 16,55 Kontakten über alle 20 Probanden. Bei der Methode GEDAS+Foto ergab sich eine gesamte Anzahl an Okklusionskontakten von 307 über den

Molarenbereich aller 20 Probanden. Die mittlere Kontaktanzahl lag hier bei 15,35. Die Methode Extraoralscan kam auf 284 statische Okklusionskontakte im Molarenbereich aller 20 Studienteilnehmer. Die mittlere Anzahl der Kontakte umfasste bei dieser Methode 14,2 Kontakte. Die Methode Extraoralscan + Plausibilität zählte im Gesamten 281 Okklusionskontakte. Die mittlere Kontaktanzahl betrug 14,05. Die Methode Intraoralscan zählte im Gesamten 319 Okklusionskontakte in der statischen Okklusion während die mittlere Anzahl an Kontakten bei 15,95 lag. Die Methode Intraoralscan + Plausibilität kam auf 293 Kontakte. Die mittlere Anzahl an Kontakten war bei 14,65 (Tabelle 8). Die nachfolgenden Balkendiagramme (Abbildung 42 und Abbildung 43) veranschaulichen diese Ergebnisse nochmals.

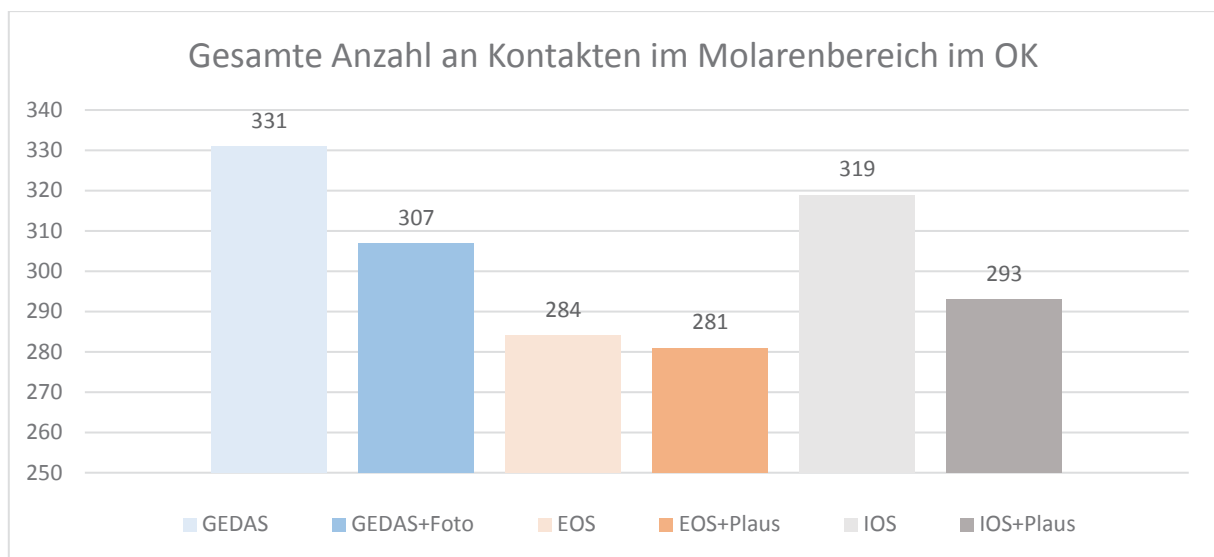


Abbildung 42: Balkendiagramm über die gesamte Anzahl an Okklusionskontakten im Molarenbereich in der statischen Okklusion im Oberkiefer.

GEDAS: Methode GEDAS, GEDAS+Foto: Methode GEDAS+Foto, EOS: Methode Extraoralscan, EOS+Plaus: Methode Extraoralscan und Plausibilitätskontrolle, IOS: Methode Intraoralscan, IOS+Plaus: Methode Intraoralscan und Plausibilitätskontrolle.

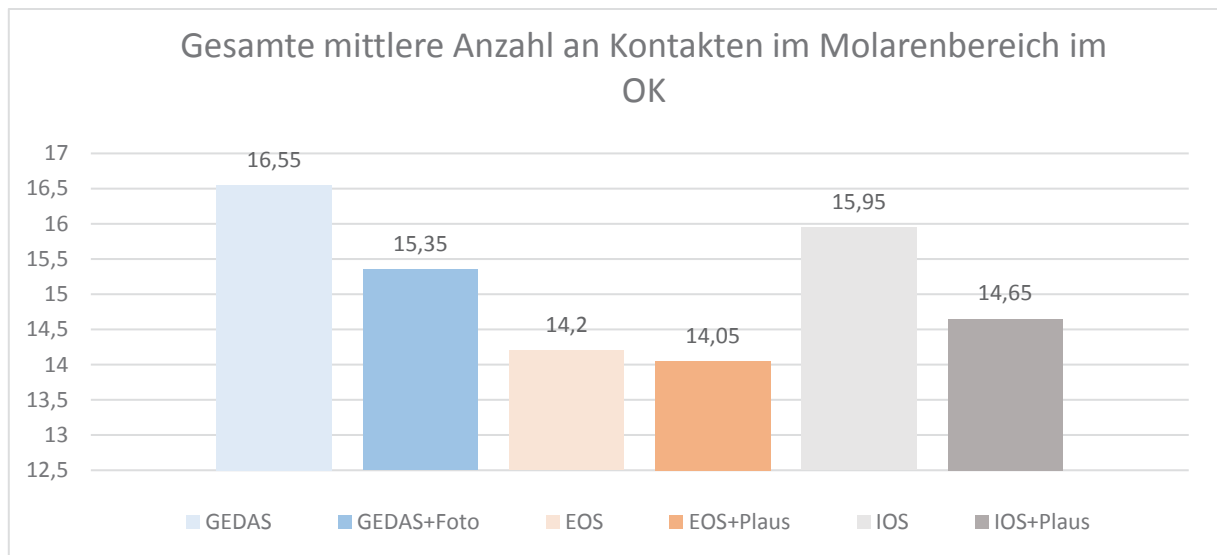


Abbildung 43: Balkendiagramm über die gesamte mittlere Anzahl an Okklusionskontakten im Molarenbereich in der statischen Okklusion im Oberkiefer.

GEDAS: Methode GEDAS, GEDAS+Foto: Methode GEDAS+Foto, EOS: Methode Extraoralscan, EOS+Plaus: Methode Extraoralscan und Plausibilitätskontrolle, IOS: Methode Intraoralscan, IOS+Plaus: Methode Intraoralscan und Plausibilitätskontrolle.

Kontaktpunktauswertung an den Oberkieferprämolaren in der statischen Okklusion

Proband	PräMoOK-GEDAS	PräMoOK-Foto+GEDAS	PräMoOK-EOS	PräMoOK-EOS+Plaus	PräMoOK-IOS	PräMoOK-IOS+Plaus
1	16	10	11	9	13	12
2	8	7	8	7	8	7
3	5	5	3	3	5	5
4	2	2	1	1	2	2
5	10	8	6	6	10	9
6	12	8	11	11	11	10
7	5	11	11	11	12	12
8	12	10	11	10	8	8
9	2	3	6	6	3	3
10	4	4	6	6	3	3
11	10	10	4	4	8	7
12	3	5	4	4	1	1
13	3	3	3	3	3	3
14	4	4	4	4	4	4
15	8	7	7	7	5	5
16	10	9	10	10	10	10
17	4	4	8	8	15	12
18	4	4	6	5	5	4
19	9	7	5	5	9	8
20	8	8	8	8	9	8
Summe	139	129	133	128	144	133
Mittelwert	6,95	6,45	6,65	6,4	7,2	6,65

Tabelle 9: Kontaktpunktverteilung an den Oberkieferprämolaren in der statischen Okklusion.

PräMoOK-GEDAS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Prämolaren im Oberkiefer über die Methode GEDAS.

PräMoOK-Foto+GEDAS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Prämolaren im Oberkiefer über die Methode Fotodokumentation aus der klassisch analogen Okklusionsanalyse mittels Okklusionsfolie und dem Vergleich aus den Ergebnissen aus der Methode GEDAS.

PräMoOK-EOS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Prämolaren im Oberkiefer über die Methode Extraoralscan (EOS).

PräMoOK-EOS+Plaus: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Prämolaren im Oberkiefer über die Methode Extraoralscan (EOS) und anschließender Plausibilitätskontrolle durch händisches Zählen der Kontaktpunkte.

PräMoOK-IOS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Prämolaren im Oberkiefer über die Methode Intraoralscan (IOS).

PräMoOK-IOS+Plaus: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Prämolaren im Oberkiefer über die Methode Extraoralscan (EOS) und anschließender Plausibilitätskontrolle durch händisches Zählen der Kontaktpunkte.

Im Prämolarenbereich im Oberkiefer wurden bei der Methode GEDAS 139 Okklusionskontakte in der statischen Okklusion gezählt. Bei der Methode GEDAS+Foto waren es 129 Okklusionskontakte, bei der Methode Extraoralscan 133 Okklusionskontakte. Die Methode Extraoralscan und Plausibilität kam auf 129 Kontakte, während die Methode Intraoralscan 144 Okklusionskontakte in der statischen Okklusion zählte. Die Methode Intraoralscan und Plausibilität kam auf 133 Kontakte. Die mittlere Anzahl an Okklusionskontakten über alle 20 Studienteilnehmer lag bei der Methode GEDAS bei 6,95 Kontakten, bei der Methode GEDAS+Foto bei 6,45 und bei der Methode Extraoralscan bei 6,65 Kontakten. Die Methoden Extraoralscan und Plausibilität kam auf eine mittlere Anzahl von 6,4 Kontakten, die Methode Intraoralscan auf 7,2 Kontakte und die Methode Intraoralscan und Plausibilität auf 6,65 Kontakte (Tabelle 9). Alle Ergebnisse aus dem Prämolarenbereich im Oberkiefer sind in den nachfolgenden beiden Abbildungen nochmals in Form von Balkendiagrammen dargestellt (Abbildung 44 und Abbildung 45).

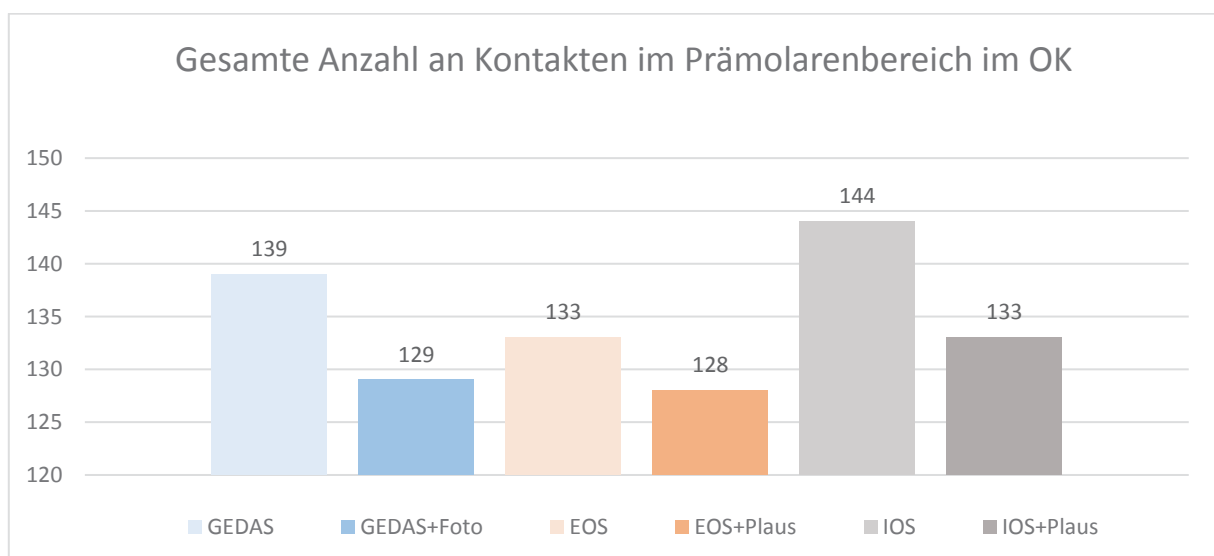


Abbildung 44: Balkendiagramm über die gesamte Anzahl an Okklusionskontakten im Prämolarenbereich in der statischen Okklusion im Oberkiefer.

GEDAS: Methode GEDAS, GEDAS+Foto: Methode GEDAS+Foto, EOS: Methode Extraoralscan, EOS+Plaus: Methode Extraoralscan und Plausibilitätskontrolle, IOS: Methode Intraoralscan, IOS+Plaus: Methode Intraoralscan und Plausibilitätskontrolle.

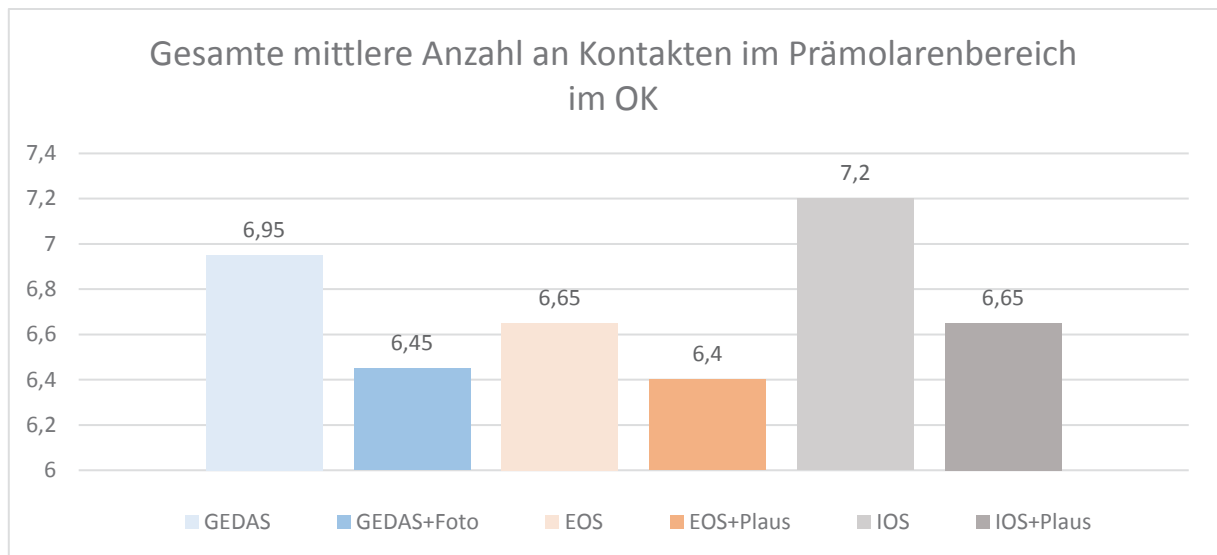


Abbildung 45: Balkendiagramm über die gesamte mittlere Anzahl an Okklusionskontakten im Prämolarenbereich in der statischen Okklusion im Oberkiefer.

GEDAS: Methode GEDAS, GEDAS+Foto: Methode GEDAS+Foto, EOS: Methode Extraoralscan, EOS+Plaus: Methode Extraoralscan und Plausibilitätskontrolle, IOS: Methode Intraoralscan, IOS+Plaus: Methode Intraoralscan und Plausibilitätskontrolle.

Kontaktpunktauswertung an den Oberkieferfrontzähnen in der statischen Okklusion

Proband	FrontOK-GEDAS	FrontOK-Foto+GEDAS	FrontOK-EOS	FrontOK-EOS+Plaus	FrontOK-IOS	FrontOK-IOS+Plaus
1	15	8	10	6	10	10
2	12	10	8	8	9	9
3	10	8	7	7	4	4
4	0	0	0	0	0	0
5	6	5	1	1	3	4
6	5	6	8	8	8	7
7	6	6	2	2	3	3
8	5	4	6	6	4	4
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	6	6	6	6	5	5
12	2	3	3	2	2	2
13	2	1	1	1	4	4
14	1	1	1	1	0	0
15	6	6	5	5	3	3
16	3	2	5	5	4	3
17	0	1	4	4	1	1
18	5	3	3	3	2	2
19	6	5	7	6	6	6
20	4	5	6	5	8	7
Summe	94	80	83	76	76	74
Mittelwert	4,7	4	4,15	3,8	3,8	3,7

Tabelle 10: Kontaktpunktverteilung an den Oberkieferfrontzähnen in der statischen Okklusion.

FrontOK-GEDAS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Frontzähnen im Oberkiefer über die Methode GEDAS.

FrontOK-Foto+GEDAS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Frontzähnen im Oberkiefer über die Methode Fotodokumentation aus der klassisch analogen Okklusionsanalyse mittels Okklusionsfolie und dem Vergleich aus den Ergebnissen aus der Methode GEDAS.

FrontOK-EOS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Frontzähnen im Oberkiefer über die Methode Extraoralscan (EOS).

FrontOK-EOS+Plaus: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Frontzähnen im Oberkiefer über die Methode Extraoralscan (EOS) und anschließender Plausibilitätskontrolle durch händisches Zählen der Kontaktpunkte.

FrontOK-IOS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Frontzähnen im Oberkiefer über die Methode Intraoralscan (IOS).

FrontOK-IOS+Plaus: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Frontzähnen im Oberkiefer über die Methode Extraoralscan (EOS) und anschließender Plausibilitätskontrolle durch händisches Zählen der Kontaktpunkte.

Im Frontzahnbereich des Oberkiefers wurden über die Methode GEDAS 94 Okklusionskontakte in der statischen Okklusion bei allen 20 Studienteilnehmern gezählt. Bei der Methode GEDAS+Foto waren es 80 Okklusionskontakte und bei der Methode Extraoralscan 83 Okklusionskontakte. Bei der Methode Extraoralscan und Plausibilität wurden 76 Okklusinskontakte gezählt, bei der Methode Intraoroalscan 76 Kontakte und 74 bei der Methode Introralscan und Plausibilität. Die gesamte mittlere Anzahl an Okklusionskontakten über alle 20 Probanden lag bei der Methode GEDAS bei 4,7 Kontakten, bei der Methode GEDAS+Foto bei 4 Kontakten und bei der Methode Extraoralscan bei 4,15. Die Methode Extraoralscan und Plausibilität kam auf eine gesamte mittlere Anzahl von 3,8 Okklusionskontakten, genauso wie die Methode Intraoralscan. Die Methode Intraoralscan und Plausibilität zählte eine gesamte mittlere Anzahl von 3,7 Okklusionskontakten (Tabelle 10). Die Ergebnisse aus dem Oberkieferfrontzahnbereich sind in den nachfolgenden beiden Abbildungen nochmals graphisch in Form von Balkendiagrammen veranschaulicht (Abbildung 46 und Abbildung 47).

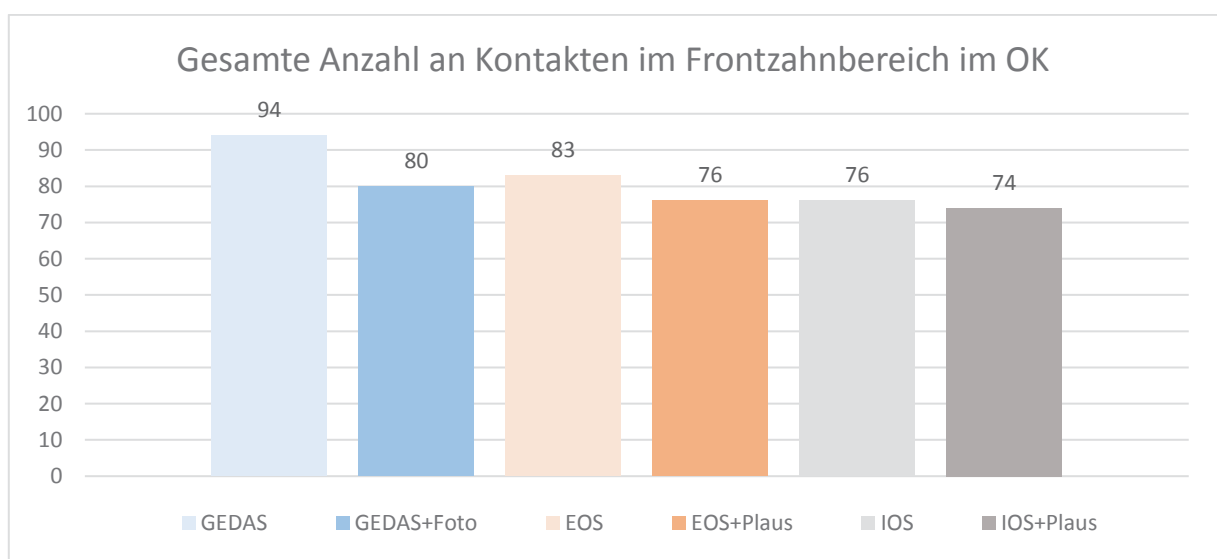


Abbildung 46: Balkendiagramm über die gesamte Anzahl an Okklusionskontakten im Frontzahnbereich in der statischen Okklusion im Oberkiefer.

GEDAS: Methode GEDAS, GEDAS+Foto: Methode GEDAS+Foto, EOS: Methode Extraoralscan, EOS+Plaus: Methode Extraoralscan und Plausibilitätskontrolle, IOS: Methode Intraoralscan, IOS+Plaus: Methode Intraoralscan und Plausibilitätskontrolle.

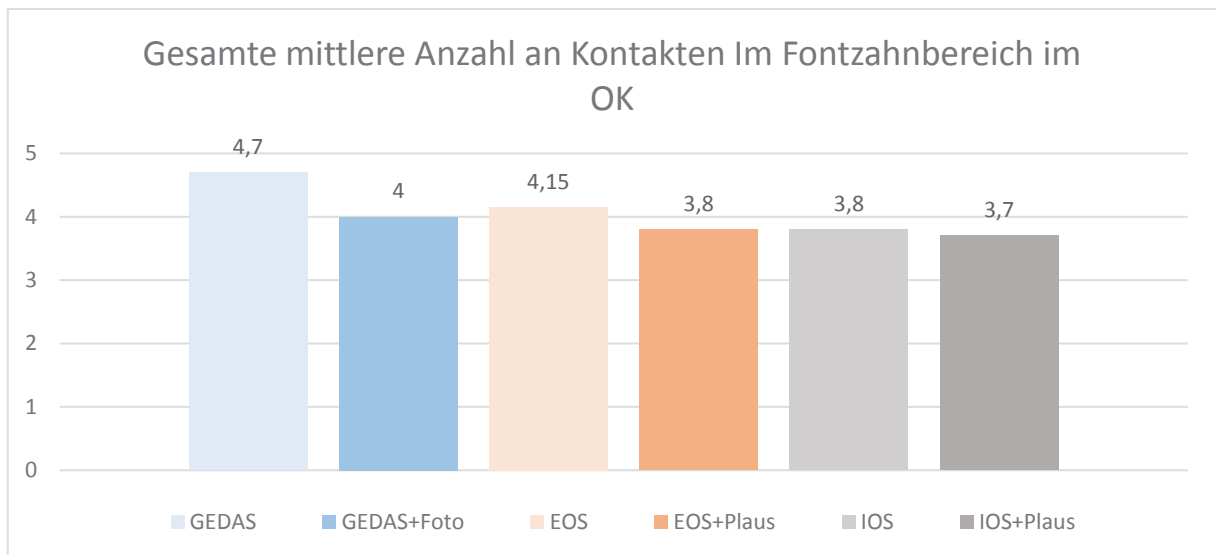


Abbildung 47: Balkendiagramm über die gesamte mittlere Anzahl an Okklusionskontakten im Frontzahnbereich in der statischen Okklusion im Oberkiefer.

GEDAS: Methode GEDAS, GEDAS+Foto: Methode GEDAS+Foto, EOS: Methode Extraoralscan, EOS+Plaus: Methode Extraoralscan und Plausibilitätskontrolle, IOS: Methode Intraoralscan, IOS+Plaus: Methode Intraoralscan und Plausibilitätskontrolle.

Kontaktpunktauswertung an den Unterkiefermolaren in der statischen Okklusion

Proband	MolarenUK-GEDAS	MolarenUK-Foto+GEDAS	MolarenUK-EOS	MolarenUK-EOS+Plaus	MolarenUK-IOs	MolarenUK-IOs+Plaus
1	22	22	29	24	35	29
2	20	13	7	7	8	10
3	11	11	9	9	13	12
4	10	12	11	11	14	14
5	26	18	15	15	14	14
6	10	15	14	14	16	15
7	4	18	18	18	19	18
8	10	17	9	10	20	20
9	21	16	17	17	25	23
10	23	18	17	19	15	18
11	21	18	11	13	16	16
12	9	10	15	13	12	12
13	17	13	13	13	19	17
14	8	8	8	8	10	9
15	20	15	12	14	16	14
16	23	21	21	20	17	17
17	11	10	16	16	14	13
18	18	14	12	11	15	15
19	21	20	16	18	20	20
20	30	23	26	22	15	14
Summe	335	312	296	292	333	320
Mittelwert	16,75	15,6	14,8	14,6	16,65	16

Tabelle 11: Kontaktpunktverteilung an den Unterkiefermolaren in der statischen Okklusion.

MolarenUK-GEDAS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Molaren im Unterkiefer über die Methode GEDAS.

MolarenUK-Foto+GEDAS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Molaren im Unterkiefer über die Methode Fotodokumentation aus der klassisch analogen Okklusionsanalyse mittels Okklusionsfolie und dem Vergleich aus den Ergebnissen aus der Methode GEDAS.

MolarenUK-EOS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Molaren im Unterkiefer über die Methode Extraoralscan (EOS).

MolarenUK-EOS+Plaus: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Molaren im Unterkiefer über die Methode Extraoralscan (EOS) und anschließender Plausibilitätskontrolle durch händisches Zählen der Kontaktpunkte.

MolarenUK-IOs: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Molaren im Unterkiefer über die Methode Intraoralscan (IOs).

MolarenUK-IOs+Plaus: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Molaren im Unterkiefer über die Methode Extraoralscan (EOS) und anschließender Plausibilitätskontrolle durch händisches Zählen der Kontaktpunkte.

Im Unterkiefermolarenbereich wurde über die Methode GEDAS eine gesamte Anzahl von 335 statischen Okklusionskontakten über alle 20 Studienteilnehmer gezählt. Bei der Methode GEDAS+Foto waren es 312 statische Okklusionskontakte und bei der Methode Extraoralscan 292. Bei der Methode Extraoralscan und Plausibilität wurden 292 statische Okklusionskontakte

gezählt und bei der Methode Intraoralscan waren es 333 Kontakte. Die Methode Intraoralscan und Plausibilität zählte 320 statische Okklusionskontakte. Die gesamte mittlere Anzahl an Okklusionskontakten über alle 20 Studienteilnehmer lag bei der Methode GEDAS bei 16,75 Kontakten im Unterkiefermolarenbereich, bei der Methode GEDAS+Foto waren es 15,6 Kontakte und bei der Methode Extraoralscan 14,8 Kontakte. Die Methoden Extraoralscan und Plausibilität, Intraoralscan und Intraoralscan und Plausibilität zählten jeweils eine gesamte mittlere Kontaktanzahl von 14,6 Kontakten, 16,65 Kontakten und 16 Kontakten über alle 20 Studienteilnehmer (Tabelle 11). Die nachfolgenden beiden Abbildungen veranschaulichen die Ergebnisse aus dem Unterkiefermolarenbereich nochmals in Form von Balkendiagrammen (Abbildung 48 und Abbildung 49).

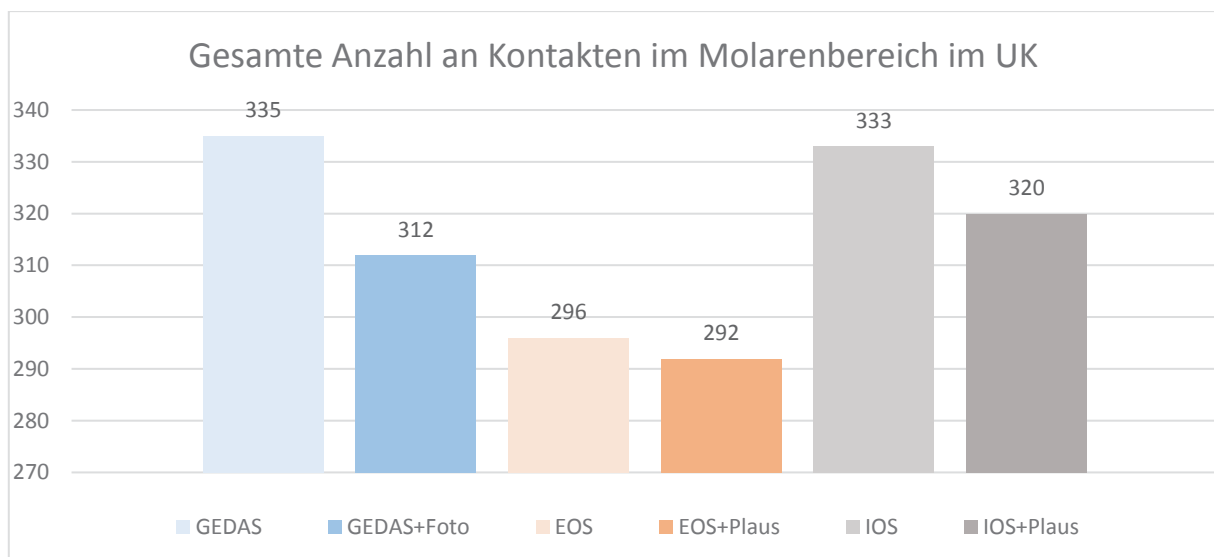


Abbildung 48: Balkendiagramm über die gesamte Anzahl an Okklusionskontakten im Molarenbereich in der statischen Okklusion im Unterkiefer.

GEDAS: Methode GEDAS, GEDAS+Foto: Methode GEDAS+Foto, EOS: Methode Extraoralscan, EOS+Plaus: Methode Extraoralscan und Plausibilitätskontrolle, IOS: Methode Intraoralscan, IOS+Plaus: Methode Intraoralscan und Plausibilitätskontrolle.

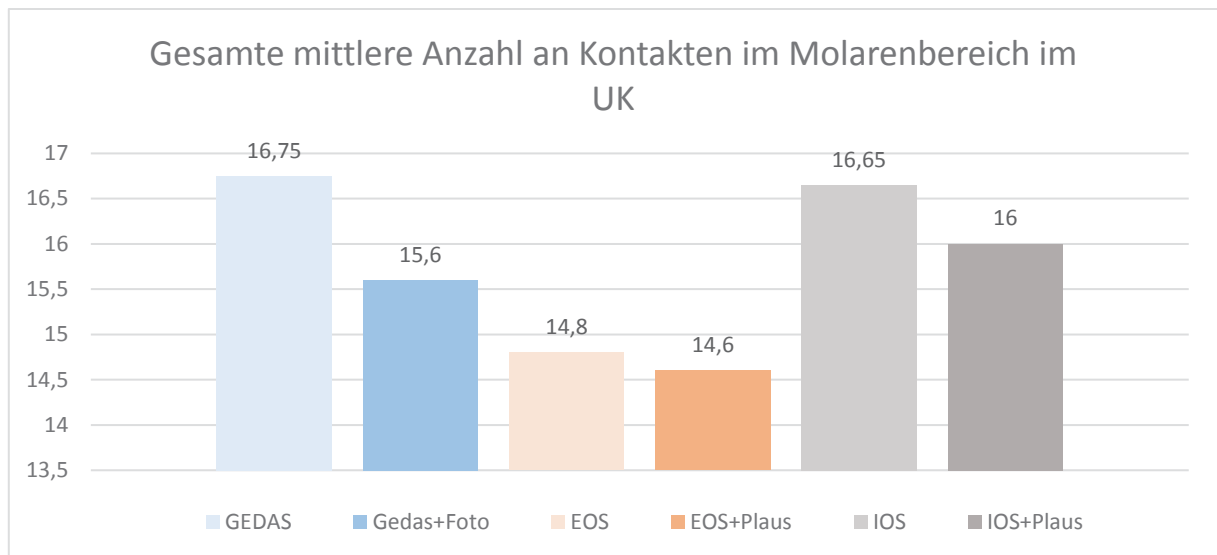


Abbildung 49: Balkendiagramm über die gesamte mittlere Anzahl an Okklusionskontakten im Molarenbereich in der statischen Okklusion im Unterkiefer.

GEDAS: Methode GEDAS, GEDAS+Foto: Methode GEDAS+Foto, EOS: Methode Extraoralscan, EOS+Plaus: Methode Extraoralscan und Plausibilitätskontrolle, IOS: Methode Intraoralscan, IOS+Plaus: Methode Intraoralscan und Plausibilitätskontrolle.

Kontaktpunktauswertung an den Unterkieferprämolaren in der statischen Okklusion

Proband	PräMoUK-GEDAS	PräMoUK-Foto+GEDAS	PräMoUK-EOS	PräMoUK-EOS+Plaus	PräMoUK-IOs	PräMoUK-IOs+Plaus
1	10	10	10	7	11	11
2	7	7	9	8	7	7
3	4	4	2	2	6	3
4	3	3	2	2	3	3
5	9	9	5	6	10	9
6	9	8	11	11	12	10
7	3	8	8	8	9	8
8	11	9	10	10	7	7
9	0	1	3	3	0	0
10	4	5	6	6	4	3
11	10	6	4	4	8	6
12	4	4	3	3	1	1
13	2	2	2	2	2	2
14	4	4	4	4	4	4
15	8	8	7	7	5	5
16	10	9	10	10	9	9
17	4	4	8	8	14	14
18	5	6	7	7	6	6
19	10	7	7	8	9	9
20	9	9	7	7	10	10
Summe	126	123	125	123	137	127
Mittelwert	6,3	6,15	6,25	6,15	6,85	6,35

Tabelle 12: Kontaktpunktverteilung an den Unterkieferprämolaren in der statischen Okklusion.

PräMoUK-GEDAS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Prämolaren im Unterkiefer über die Methode GEDAS.

PräMoUK-Foto+GEDAS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Prämolaren im Unterkiefer über die Methode Fotodokumentation aus der klassisch analogen Okklusionsanalyse mittels Okklusionsfolie und dem Vergleich aus den Ergebnissen aus der Methode GEDAS.

PräMoUK-EOS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Prämolaren im Unterkiefer über die Methode Extraoralscan (EOS).

PräMoUK-EOS+Plaus: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Prämolaren im Unterkiefer über die Methode Extraoralscan (EOS) und anschließender Plausibilitätskontrolle durch händisches Zählen der Kontaktpunkte.

PräMoUK-IOs: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Prämolaren im Unterkiefer über die Methode Intraoralscan (IOs).

PräMoUK-IOs+Plaus: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Prämolaren im Unterkiefer über die Methode Extraoralscan (EOS) und anschließender Plausibilitätskontrolle durch händisches Zählen der Kontaktpunkte.

Im Unterkieferprämolarenbereich wurde über alle 20 Probanden bei der Methode GEDAS eine gesamte Anzahl von 126 statischen Okklusionskontakten erzielt. Bei der Methode GEDAS+Foto wurden 123 statische Okklusionskontakte gezählt während es bei der Methode Extraoralscan 125 Kontakte waren. Die Methoden Extraoralscan und Plausibilität, Intraoralscan und Intraoralscan und Plausibilität zählten 123, 137 und 127 Okklusionskontakte über alle 20

Studienteilnehmer. Die gesamte mittlere Anzahl an statischen Okklusionskontakten lag bei der Methode GEDAS bei 6,3 Kontakten, bei der Methode GEDAS+Foto bei 6,15 Kontakten, bei der Methode Extraoralscan bei 6,25 Kontakten, bei der Methode Extraoralscan und Plausibilität bei 6,15 Kontakten und bei der Methode Intraoralscan bei 6,85 Kontakten. Die Methode Intraoralscan und Plausibilität zählte eine gesamte mittlere Anzahl von 6,35 Okklusionskontakten für den Unterkieferprämolarenbereich (Tabelle 12). Graphisch in Form von Balkendiagrammen sind die Ergebnisse aus dem Unterkieferprämolarenbereich in den nachfolgenden beiden Abbildungen nochmals aufgeführt (Abbildung 50 und Abbildung 51).

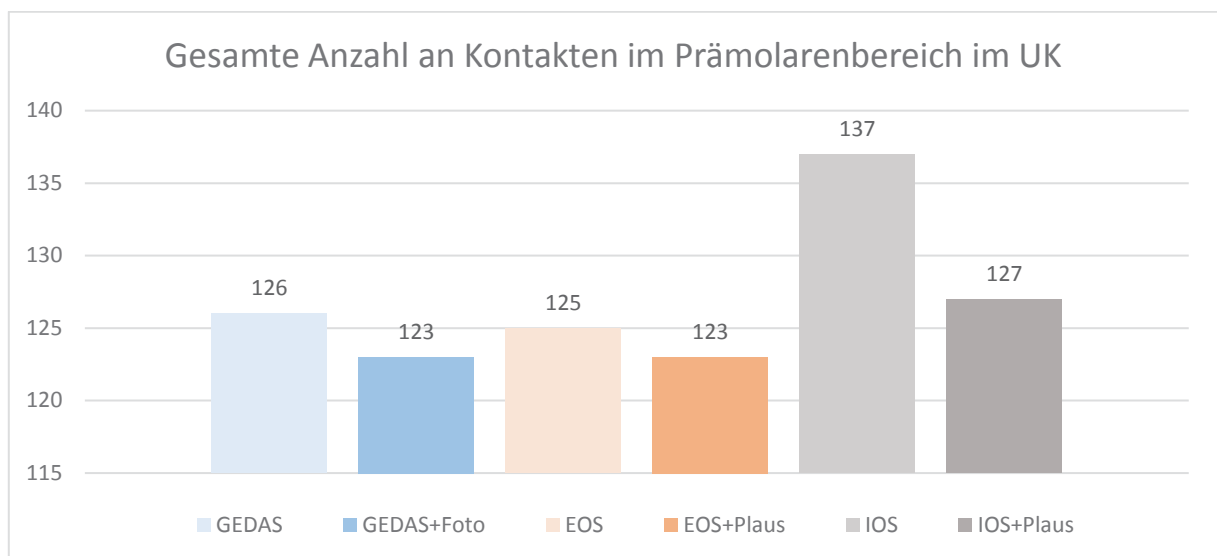


Abbildung 50: Balkendiagramm über die gesamte Anzahl an Okklusionskontakten im Prämolarenbereich in der statischen Okklusion im Unterkiefer.

GEDAS: Methode GEDAS, GEDAS+Foto: Methode GEDAS+Foto, EOS: Methode Extraoralscan, EOS+Plaus: Methode Extraoralscan und Plausibilitätskontrolle, IOS: Methode Intraoralscan, IOS+Plaus: Methode Intraoralscan und Plausibilitätskontrolle.

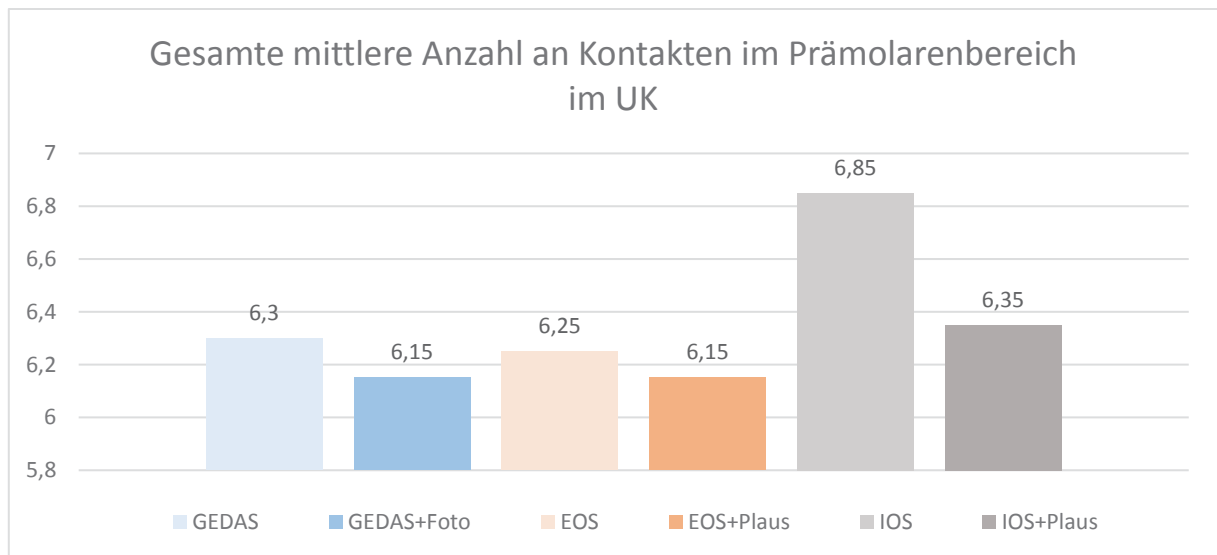


Abbildung 51: Balkendiagramm über die gesamte mittlere Anzahl an Okklusionskontakten im Prämolarenbereich in der statischen Okklusion im Unterkiefer.

GEDAS: Methode GEDAS, GEDAS+Foto: Methode GEDAS+Foto, EOS: Methode Extraoralscan, EOS+Plaus: Methode Extraoralscan und Plausibilitätskontrolle, IOS: Methode Intraoralscan, IOS+Plaus: Methode Intraoralscan und Plausibilitätskontrolle.

Kontaktpunktauswertung an den Unterkieferfrontzähnen in der statischen Okklusion

Proband	FrontUK-GEDAS	FrontUK-Foto+GEDAS	FrontUK-EOS	FrontUK-EOS+Plaus	FrontUK-IOS	FrontUK-IOS+Plaus
1	6	6	8	5	8	8
2	7	7	7	6	8	7
3	7	6	6	6	3	3
4	0	0	0	0	0	0
5	3	5	1	1	4	3
6	6	5	6	6	5	5
7	4	4	3	3	3	3
8	6	4	6	6	4	4
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	5	6	6	6	9	7
12	3	3	0	2	2	2
13	2	1	1	1	5	4
14	1	1	1	1	0	0
15	8	6	5	5	4	4
16	3	2	5	5	4	4
17	0	1	4	4	1	1
18	2	2	2	2	1	1
19	3	4	5	5	8	6
20	5	5	6	5	6	5
Summe	71	68	72	69	75	67
Mittelwert	3,55	3,4	3,6	3,45	3,75	3,35

Tabelle 13: Kontaktpunktverteilung an den Unterkieferfrontzähnen in der statischen Okklusion.

FrontUK-GEDAS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Frontzähnen im Unterkiefer über die Methode GEDAS.

FrontUK-Foto+GEDAS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Frontzähnen im Unterkiefer über die Methode Fotodokumentation aus der klassisch analogen Okklusionsanalyse mittels Okklusionsfolie und dem Vergleich aus den Ergebnissen aus der Methode GEDAS.

FrontUK-EOS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Frontzähnen im Unterkiefer über die Methode Extraoralscan (EOS).

FrontUK-EOS+Plaus: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Frontzähnen im Unterkiefer über die Methode Extraoralscan (EOS) und anschließender Plausibilitätskontrolle durch händisches Zählen der Kontaktpunkte.

FrontUK-IOS: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Frontzähnen im Unterkiefer über die Methode Intraoralscan (IOS).

FrontUK-IOS+Plaus: Ermittelte Kontaktpunktzahl an den Frontzähnen im Unterkiefer über die Methode Intraoralscan (IOS) und anschließender Plausibilitätskontrolle durch händisches Zählen der Kontaktpunkte.

Im Unterkieferfrontzahnbereich zählte die Methode GEDAS über alle 20 Studienteilnehmer eine gesamte Kontaktanzahl von 71 statischen Okklusionskontakten, die Methode GEDAS+Foto zählte 68 Kontakte, die Methode Extraoralscan 72 Okklusionskontakte und die Methode Extraoralscan und Plausibilität 69 Okklusionskontakte in der statischen Okklusion. Die Methoden Intraoralscan und Intraoralscan und Plausibilität kamen auf 75 und 67 statische

Okklusionskontakte bei allen 20 Probanden. Eine gesamte mittlere Anzahl von 3,55 Kontakten wurde bei der Methode GEDAS gezählt. Bei den Methoden GEDAS+Foto, Extraoralscan, Extraoralscan und Plausibilität, Intraoralscan und Intraoralscan und Plausibilität waren es jeweils 3,4 Kontakte, 3,6 Kontakte, 3,45 Kontakte, 3,75 und 3,35 statische Okklusionskontakte (Tabelle 13). In den folgenden beiden Abbildungen sind alle Ergebnisse zur gesamten und gesamten mittleren Anzahl an Okklusionskontakten für den Unterkieferfrontzahnbereich nochmals graphisch in Form von Balkendiagrammen dargestellt und veranschaulicht (Abbildung 52 und Abbildung 53).

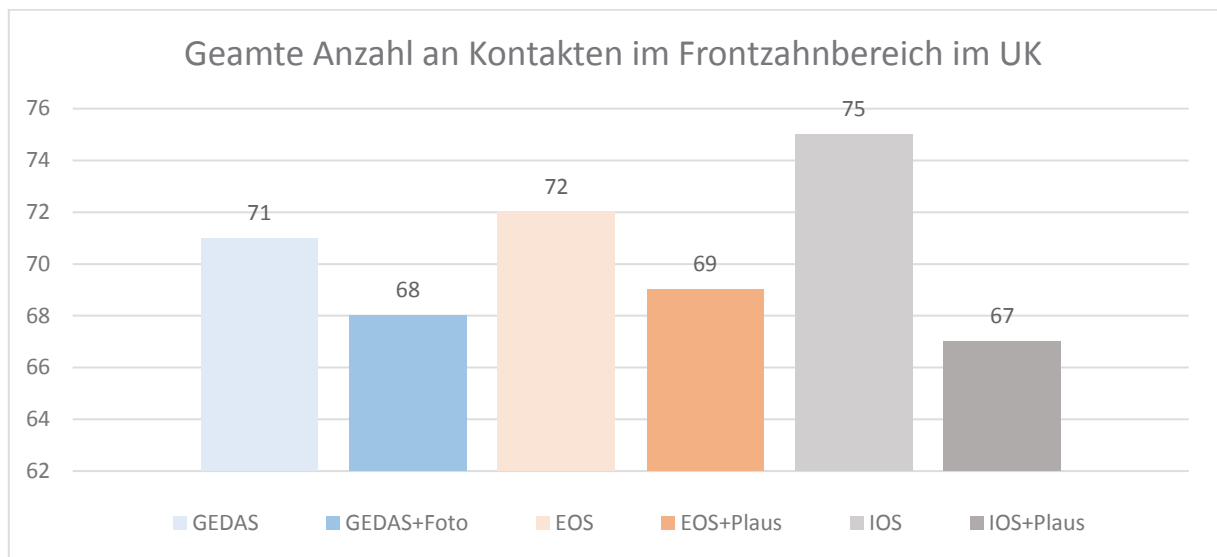


Abbildung 52: Balkendiagramm über die gesamte Anzahl an Okklusionskontakten im Frontzahnbereich in der statischen Okklusion im Unterkiefer.

GEDAS: Methode GEDAS, GEDAS+Foto: Methode GEDAS+Foto, EOS: Methode Extraoralscan, EOS+Plaus: Methode Extraoralscan und Plausibilitätskontrolle, IOS: Methode Intraoralscan, IOS+Plaus: Methode Intraoralscan und Plausibilitätskontrolle.

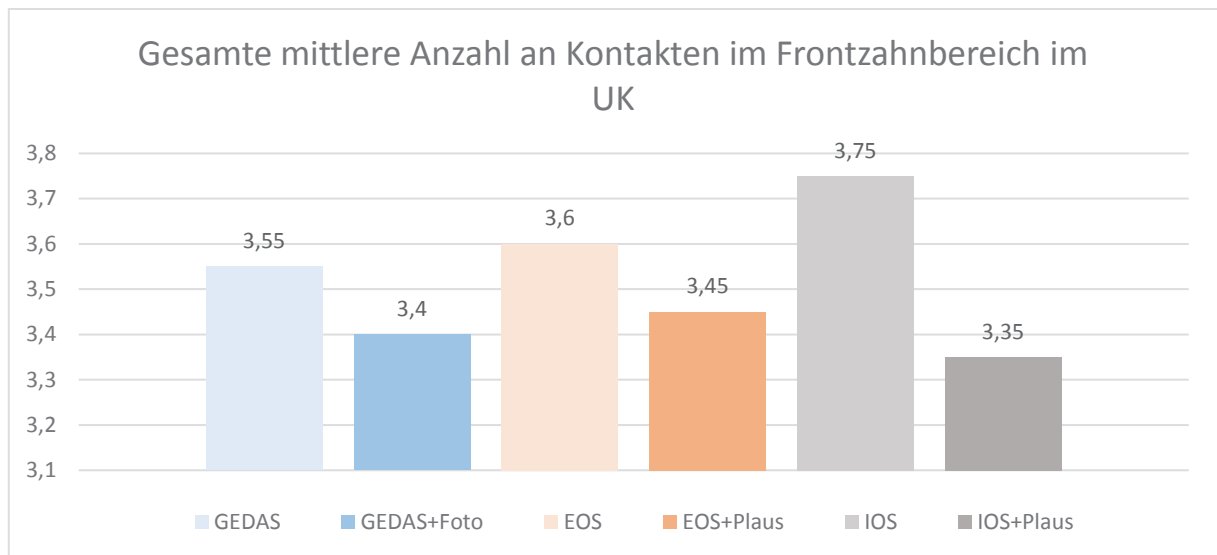


Abbildung 53: Balkendiagramm über die gesamte mittlere Anzahl an Okklusionskontakten im Frontzahnbereich in der statischen Okklusion im Unterkiefer.

GEDAS: Methode GEDAS, GEDAS+Foto: Methode GEDAS+Foto, EOS: Methode Extraoralscan, EOS+Plaus: Methode Extraoralscan und Plausibilitätskontrolle, IOS: Methode Intraoralscan, IOS+Plaus: Methode Intraoralscan und Plausibilitätskontrolle.

Summe aller Kontakte in der statischen Okklusion im Oberkiefer

Region	OK_GEDAS	OK-Foto+GEDAS	OK-EOS	OK-EOS+Plaus	OK-IO	OK-IO+Plaus
Molaren	331	307	284	281	319	293
Prämolaren	139	129	133	128	144	133
Front	94	80	83	76	76	74
Summe	564	516	500	485	539	500

Tabelle 14: Gesamte Anzahl an statischen Okklusionskontakten je Methode im Oberkiefer.

OK: Oberkiefer, GEDAS: Methode GEDAS, GEDAS+Foto: Methode GEDAS+Foto, EOS: Methode Extraoralscan, EOS+Plaus: Methode Extraoralscan und Plausibilitätskontrolle, IO: Methode Intraoralscan, IO+Plaus: Methode Intraoralscan und Plausibilitätskontrolle.

Über alle Zahnregionen zusammen (Molaren, Prämolaren und Frontzähne) wurden bei der Methode GEDAS 564 statische Okklusionskontakte, bei der Methode GEDAS+Foto 516 statische Okklusionskontakte und bei der Methode Extraoralscan 500 statische Okklusionskontakte gezählt. Bei den Methoden Extraoralscan und Plausibilität waren es 485 Kontakte, Intraoralscan 539 Kontakte und Intraoralscan und Plausibilität 500 Kontakte in der statischen Okklusion zusammengefasst über alle 20 Studienteilnehmer (Tabelle 14). Abbildung 54 veranschaulicht dieses Ergebnis für den Oberkiefer noch einmal in Form eines Balkendiagramms.

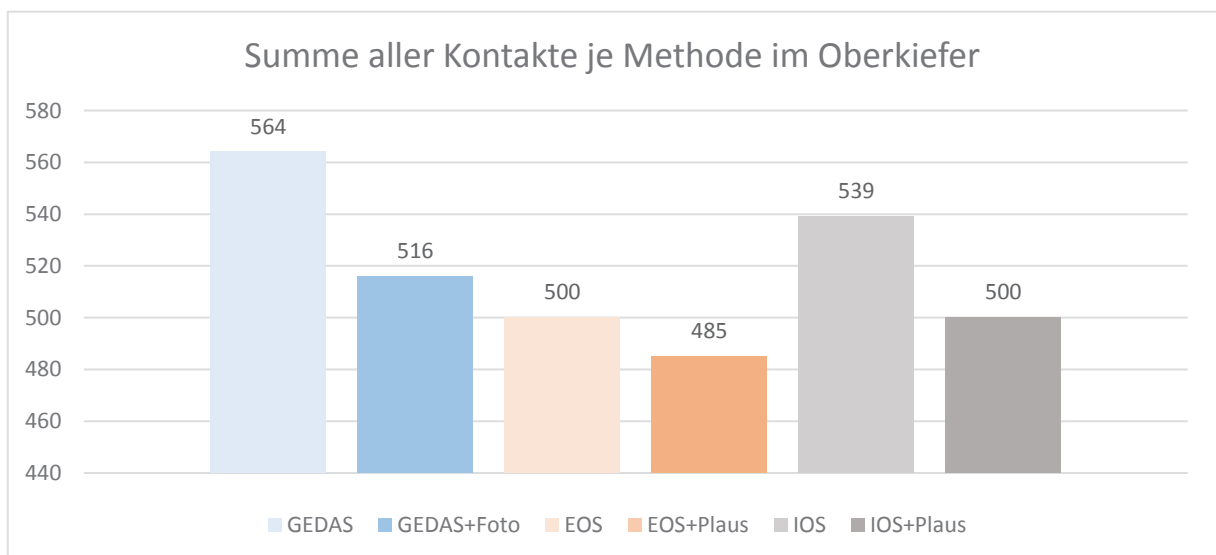


Abbildung 54: Summe aller statischen Okklusionskontakte je Methode im Oberkiefer.

GEDAS: Methode GEDAS, GEDAS+Foto: Methode GEDAS+Foto, EOS: Methode Extraoralscan, EOS+Plaus: Methode Extraoralscan und Plausibilitätskontrolle, IO: Methode Intraoralscan, IO+Plaus: Methode Intraoralscan und Plausibilitätskontrolle.

Summe aller Kontakte in der statischen Okklusion im Unterkiefer

Region	UK_GEDAS	UK-Foto+GEDAS	UK-EOS	UK-EOS+Plaus	UK-IOS	UK-IOS+Plaus
Molaren	335	312	296	292	333	320
Prämolaren	126	123	125	123	137	127
Front	71	68	72	69	75	67
Summe	532	503	493	484	545	514

Tabelle 15: Gesamte Anzahl an statischen Okklusionskontakten je Methode im Unterkiefer.

UK: Unterkiefer, GEDAS: Methode GEDAS, GEDAS+Foto: Methode GEDAS+Foto, EOS: Methode Extraoralscan, EOS+Plaus: Methode Extraoralscan und Plausibilitätskontrolle, IOS: Methode Intraoralscan, IOS+Plaus: Methode Intraoralscan und Plausibilitätskontrolle.

Im Unterkiefer ergab sich eine gesamte Anzahl von 532 statischen Okklusionskontakten für die Methode GEDAS, 503 Kontakten für die Methode GEDAS+Foto und 493 statische Okklusionskontakten für die Methode Extraoralscan über alle drei Zahnregionen (Molaren, Prämolaren und Frontzähne). Bei den Methoden Extraoralscan und Plausibilität, Intraoralscan und Intraoralscan und Plausibilität wurden jeweils 484 Kontakte, 545 Kontakte und 514 Kontakte in der statischen Okklusion gezählt (Tabelle 15). Nachfolgende Abbildung veranschaulicht dieses Ergebnis nochmals für den Unterkiefer in Form eines Balkendiagramms (Abbildung 55).

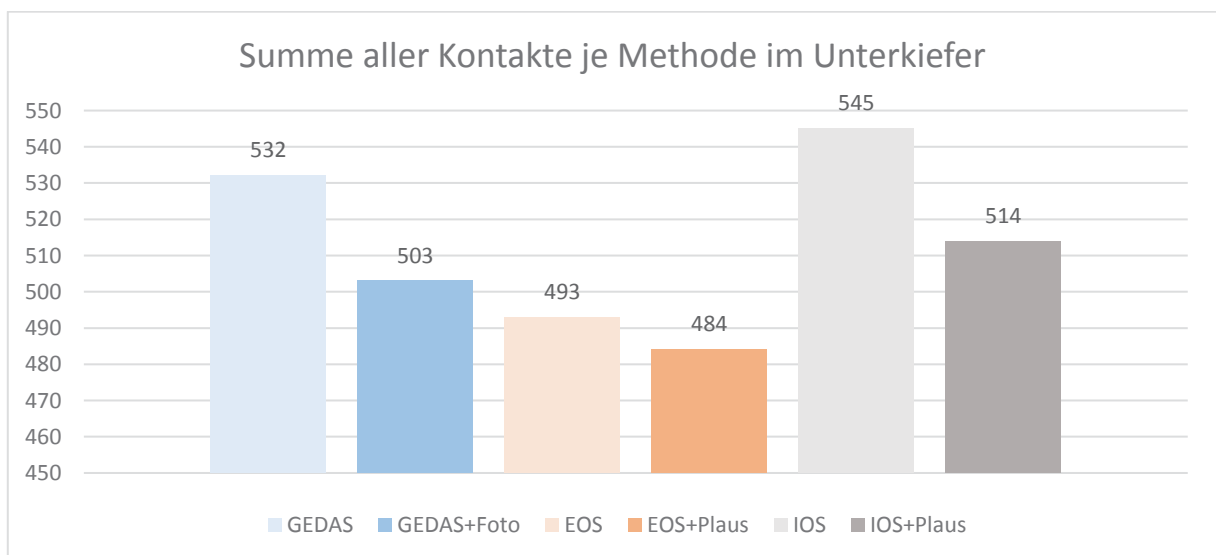


Abbildung 55: Summe aller statischen Okklusionskontakte je Methode im Unterkiefer.

GEDAS: Methode GEDAS, GEDAS+Foto: Methode GEDAS+Foto, EOS: Methode Extraoralscan, EOS+Plaus: Methode Extraoralscan und Plausibilitätskontrolle, IOS: Methode Intraoralscan, IOS+Plaus: Methode Intraoralscan und Plausibilitätskontrolle

Da es bei der rein softwarebezogenen Auswertung der statischen Okklusionskontakte über die Methoden Klinik, bestehend aus dem über das GEDAS System ausgewerteten Bissregistrar, und den ebenfalls über das GEDAS-System ausgewerteten Methoden Extra- und Intraoralscan zu größeren Abweichungen zwischen den Methoden kam, wurden alle drei Methoden nochmals auf Plausibilität überprüft. Daraus entstanden die drei modifizierten Methoden GEDAS+Foto für die Methode Klinik, Extraoralscan und Plausibilität für die Methode Extraoralscan (EOS) und Intraoralscan und Plausibilität für die Methode Intraoralscan (IOS) (nähere Beschreibung in Kapitel 3.5 und in Abbildung 31 und Abbildung 33). Für alle weiteren Auswertungen im Ergebnisteil wurden daher nur noch die Ergebnisse aus den drei modifizierten Methoden GEDAS+Foto, Extraoralscan und Plausibilität und Intraoralscan und Plausibilität zu Grunde gelegt (Abbildung 33). Die weiter aufgeführten Begriffe „Klinik“ stehen für die Methode GEDAS+Foto, „Extraoralscan (EOS)“ für die Methode Extraoralscan nach Plausibilitätsprüfung und „Intraoralscan (IOS)“ für die Methode Intraoralscan nach Plausibilitätsprüfung (Abbildung 56).



Abbildung 56: Übersicht über die Neubezeichnung der Methoden „Klinik“, „Extraoralscan (EOS)“ und „Intraoralscan (IOS)“.

Neben den Grundlagentabellen (Tabelle 8 bis Tabelle 15) wurde im Weiteren die Übereinstimmung der Anzahl der statischen Okklusionskontakte zwischen den verschiedenen Methoden anhand des Interklassen-Korrelationskoeffizienten (ICC) mit 95% Konfidenzintervall bestimmt. Zudem wurde anhand von Bland-Altman-Diagrammen betrachtet, wie gut die klinischen Ergebnisse mit jeweils einer Scanmethode übereinstimmen.

Bewertung der Übereinstimmung der Anzahl an statischen Okklusionskontakte anhand des Interklassen- Korrelationskoeffizienten (ICC)

Hier erfolgten einmal der Vergleich zwischen allen drei Methoden, Klinik zu Extraoralscan (EOS) und Intraoralscan (IOS) und einmal der paarweise Vergleich zwischen den Methoden Klinik zu Extraoralscan und Klinik zu Intraoralscan. Bewertet wurde nach Cicchetti (1994).

Für den Vergleich zwischen den Methoden Klinik zu Extraoralscan und Intraoralscan ergaben sich für die Übereinstimmung der statischen Okklusionskontakte folgende Ergebnisse (Tabelle 16):

<i>Übereinstimmung zwischen den Methoden Klinik, EOS und IOS anhand der ICC-Berechnung</i>		
	Oberkiefer	Unterkiefer
Molarenbereich:	0,569 [0,314; 0,779]	0,682 [0,462; 0,845]
Prämolarenbereich:	0,733 [0,529; 0,873]	0,715 [0,502; 0,864]
Frontbereich:	0,795 [0,626; 0,905]	0,795 [0,624; 0,905]

Tabelle 16: Übereinstimmung der Anzahl an Okklusionskontakten zwischen den Methoden Klinik EOS und IOS anhand der ICC-Berechnung mit 95% Konfidenzintervall.

ICC: Intraklassen-Korrelationskoeffizient, EOS: Methode Extraoralscan, IOS: Methode Intraoralscan. In Klammern angegeben ist das 95% Konfidenzintervall.

Für den Molarenbereich ergab sich ein ICC von 0,569 für den Oberkiefer und 0,682 für den Unterkiefer. Der ICC im Prämolarenbereich betrug im Oberkiefer 0,733, im Unterkiefer 0,715. Im Frontbereich ergaben sich Werte von 0,795 jeweils für den Ober- als auch für den Unterkiefer. Folgte man der Bewertung des ICCs nach Cicchetti (1994) ergab sich für den Molarenbereich des Oberkiefers eine durchschnittliche Zuverlässigkeit zwischen den Methoden Klinik, Extraoralscan und Intraoralscan. Für den Molarenbereich des Unterkiefers und die Prämolarenbereiche des Ober- und Unterkiefers ergab sich jeweils eine gute Zuverlässigkeit zwischen den drei Methoden und für die Frontzahnbereiche wiesen beide Kiefer eine sehr gute Zuverlässigkeit in der Übereinstimmung zwischen den drei Methoden auf.

Bei der Übereinstimmung der Okklusionskontakte im paarweisen Vergleich, Klinik zu Extraoralscan und Klinik zu Intraoralscan ergaben sich die nachfolgenden Werte (Tabelle 17):

Übereinstimmung zwischen den Methoden Klinik-EOS und Klinik-IOS des anhand der ICC- Berechnung

<i>Oberkiefer</i>	Klinik-EOS	Klinik-IOS
Molarenbereich:	0,634 [0,291; 0,835]	0,513 [0,103; 0,774]
Prämolarenbereich:	0,707 [0,390; 0,873]	0,720 [0,414; 0,879]
Frontbereich:	0,784 [0,532; 0,909]	0,829 [0,621; 0,928]
<i>Unterkiefer</i>	Klinik-EOS	Klinik-IOS
Molarenbereich:	0,761 [0,495; 0,897]	0,651 [0,300; 0,846]
Prämolarenbereich:	0,769 [0,500; 0,902]	0,661 [0,315; 0,851]
Frontbereich:	0,792 [0,544; 0,912]	0,817 [0,592; 0,924]

Tabelle 17: Übereinstimmung der Anzahl an Okklusionskontakten zwischen den Methoden Klinik-EOS und Klinik-IOS im paarweisen Vergleich anhand der ICC-Berechnung mit 95% Konfidenzintervall.

ICC: Intraklassen-Korrelationskoeffizient, EOS: Methode Extraoralscan, IOS: Methode Intraoralscan. In Klammern angegeben ist das 95% Konfidenzintervall.

Für den Vergleich Klinik zu Extraoralscan ergaben sich im Oberkiefer Werte von 0,634 für den Molarenbereich, 0,707 für den Prämolarenbereich und 0,784 für den Frontbereich. Folgte man der ICC-Bewertung nach Cicchetti (1994) ergab sich hier für den Molaren- und Prämolarenbereich eine gute Zuverlässigkeit in der Übereinstimmung zwischen den Methoden Klinik und Extraoralscan. Für den Frontbereich ergab sich mit einem ICC von 0,784 eine sehr gute Zuverlässigkeit in der Übereinstimmung zwischen den Methoden Klinik und Extraoralscan. Im Unterkiefer wurden Werte von 0,761 für den Molarenbereich, 0,769 für den Prämolarenbereich und 0,792 für den Frontbereich erzielt, was jeweils für eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Methoden Klinik und Extraoralscan sprach.

Im Vergleich Klinik zu Intraoralscan lag der ICC im Oberkiefer im Molarenbereich bei 0,513, im Prämolarenbereich bei 0,720 und im Frontbereich bei 0,829. Nach Cicchetti bedeutete dies für die Übereinstimmung zwischen der Methode Klinik und Intraoralscan eine durchschnittliche Zuverlässigkeit für den Molarenbereich, eine gute Zuverlässigkeit für den Prämolarenbereich und eine sehr gute Zuverlässigkeit für den Frontbereich. Im Unterkiefer lag der ICC im Molarenbereich bei 0,651, im Prämolarenbereich bei 0,661 und im Frontbereich bei

0,817. Für den Molaren- und Prämolarenbereich ergab sich daraus eine gute Zuverlässigkeit in der Übereinstimmung zwischen den Methoden Klinik und Intraoralscan und eine sehr gute Zuverlässigkeit in der Übereinstimmung für den Frontbereich.

Zuverlässigkeit Klinik zu Extraoralscan und Klinik zu Intraoralscan anhand Bland-Altman-Diagrammen

In Abbildung 57 bis Abbildung 60 wurde anhand von Streudiagrammen nach Bland-Altman ermittelt, ob systematische Abweichungen zwischen den Messmethoden vorlagen. Dabei wurden immer zwei Messpaare einander gegenübergestellt. Im Gegensatz zur Auswertung über den Interklassen-Korrelationskoeffizienten erfolgte hier keine Unterteilung in Zahnregionen (Molaren, Prämolaren und Frontzähne). Grundlage der Diagramme nach Bland-Altman war die Anzahl an Gesamtkontakten über alle 20 Studienteilnehmer. Die Aufteilung erfolgte lediglich nach Ober- und Unterkiefer. Verglichen wurden jeweils die Methoden Klinik zu Extraoralscan und Klinik zu Intraoralscan.

Bland-Altman-Diagramme für den Vergleich zwischen den Methoden Klinik und Extraoralscan (EOS)

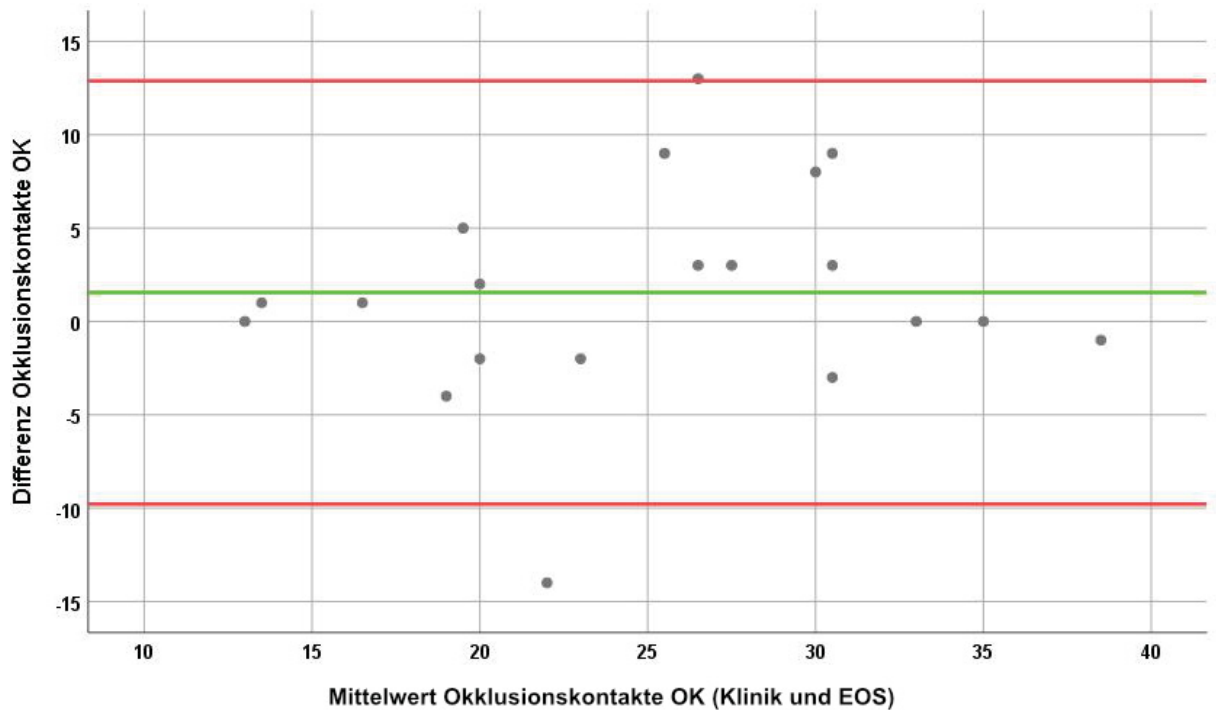


Abbildung 57: Bland-Altman-Diagramm für die Zuverlässigkeit zwischen Klinik und EOS im Oberkiefer.

— : Mittelwert der Differenz der Okklusionskontakte

— : 95% Übereinstimmungsgrenzen

x-Achse : Mittelwert der Okklusionskontakte

y-Achse : Differenz der Okklusionskontakte

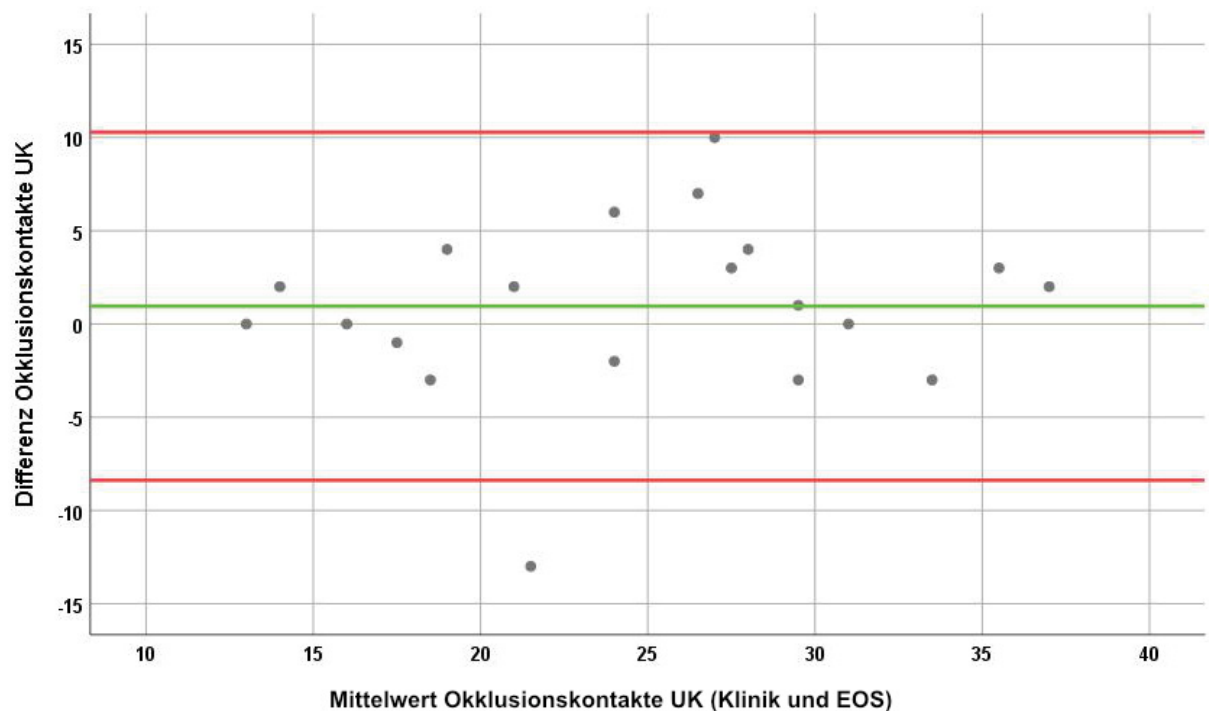


Abbildung 58: Bland-Altman-Diagramm für die Zuverlässigkeit zwischen Klinik und EOS im Unterkiefer.

— : Mittelwert der Differenz der Okklusionskontakte

— : 95% Übereinstimmungsgrenzen

x-Achse : Mittelwert der Okklusionskontakte

y-Achse : Differenz der Okklusionskontakte

Die Bland-Altman-Diagramme zeigen, dass es beim Vergleich zwischen den Methoden Klinik und Extraoralscan weder beim Ober- noch beim Unterkiefer zu systematischen Abweichungen zwischen den Messverfahren kam. Abgesehen von zwei Ausreißern im Oberkiefer und einem Ausreißer im Unterkiefer lagen bei beiden Kiefern alle Werte innerhalb der 95% Übereinstimmungsgrenzen. Im Oberkiefer lag der Mittelwert der Differenz der Okklusionskontakte bei 1,55 Kontakten, die untere Übereinstimmungsgrenze bei -9,78 Kontakten und die obere Übereinstimmungsgrenze bei 12,88 Kontakten. Im Unterkiefer lag der Mittelwert der Differenz bei 0,95 Kontakten, die untere Übereinstimmungsgrenze bei -8,38 Kontakten und die obere Übereinstimmungsgrenze bei 10,28 Kontakten.

Bland-Altman-Diagramme für den Vergleich zwischen den Methoden Klinik und Intraoralscan (IOS)

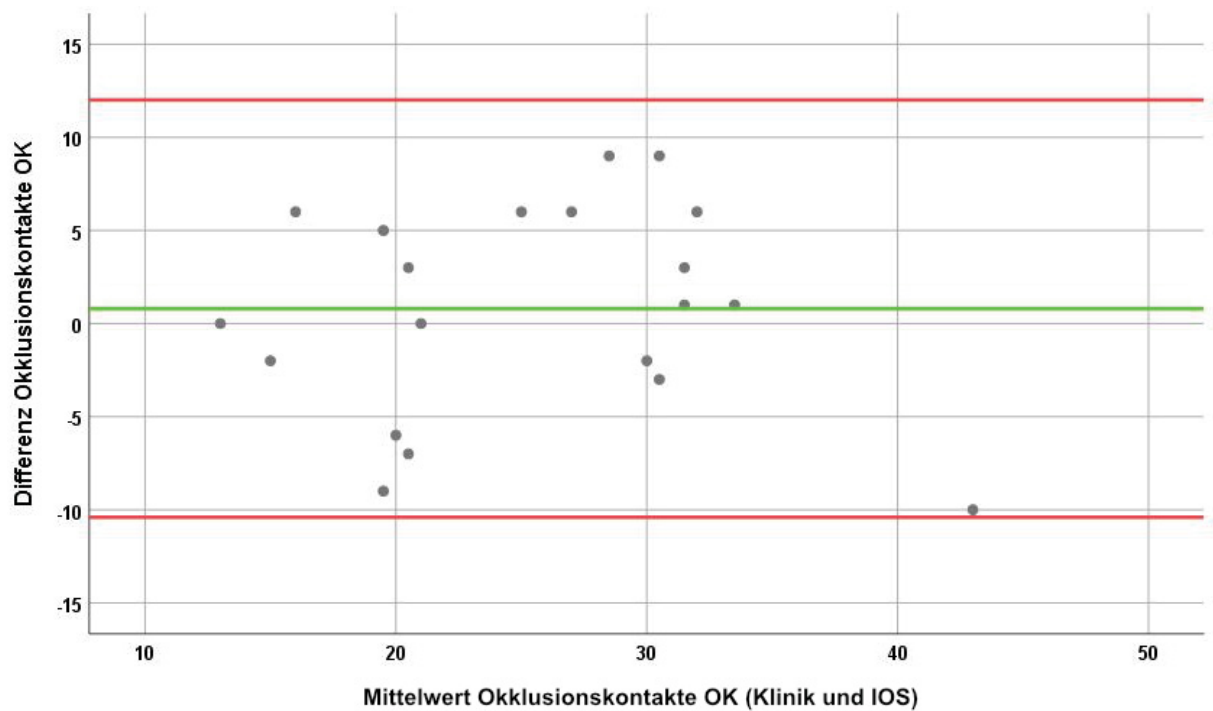


Abbildung 59: Bland-Altman-Diagramm für die Zuverlässigkeit zwischen Klinik und IOS im Oberkiefer.

— : Mittelwert der Differenz der Okklusionskontakte

— : 95% Übereinstimmungsgrenzen

x-Achse : Mittelwert der Okklusionskontakte

y-Achse : Differenz der Okklusionskontakte

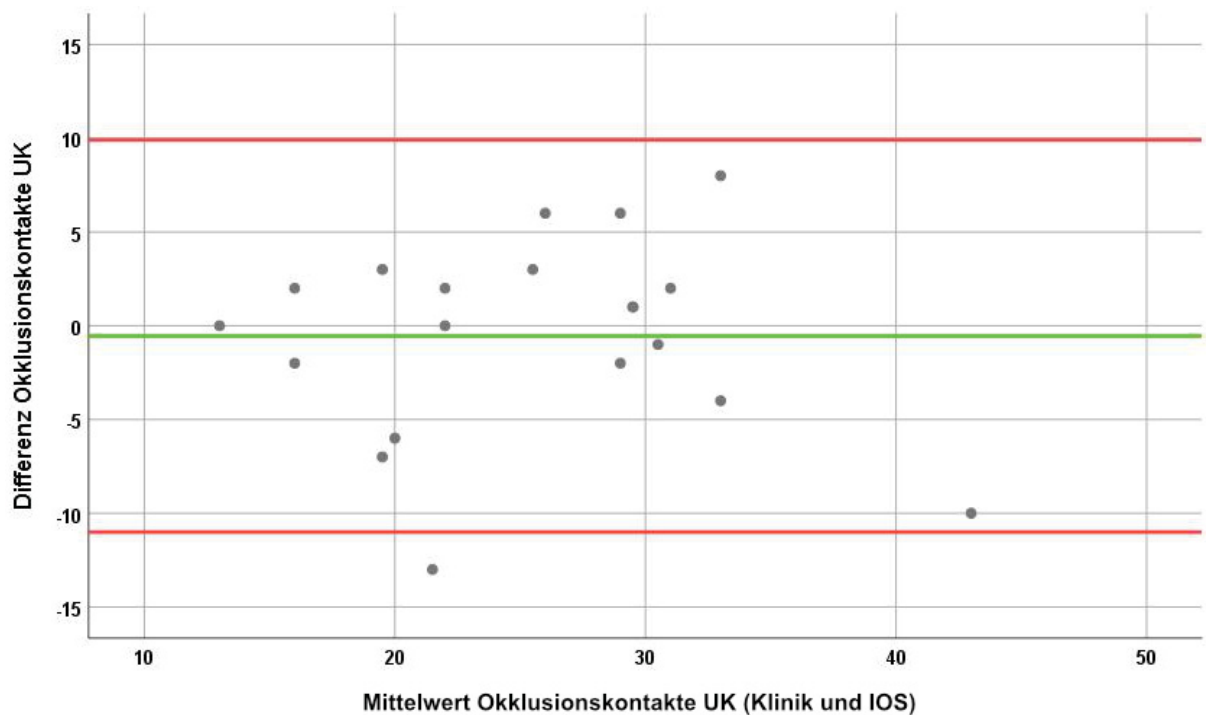


Abbildung 60: Bland-Altman-Diagramm für die Zuverlässigkeit zwischen Klinik und IOS im Unterkiefer.

— : Mittelwert der Differenz der Okklusionskontakte

— : 95% Übereinstimmungsgrenzen

x-Achse : Mittelwert der Okklusionskontakte

y-Achse : Differenz der Okklusionskontakte

Die Bland-Altman-Diagramme zeigen, dass es auch beim Vergleich zwischen den Methoden Klinik und Intraoralscan zu keinen systematischen Abweichungen zwischen den Messverfahren kam. Abgesehen von einem Ausreißer im Unterkiefer lagen bei beiden Kiefern alle Werte innerhalb der 95% Übereinstimmungsgrenzen. Im Oberkiefer lagen der Mittelwert der Differenz der Okklusionskontakte bei 0,8 Kontakten, die untere Übereinstimmungsgrenze lag bei -10,41 Kontakten und die obere Übereinstimmungsgrenze bei 12,01 Kontakten. Im Unterkiefer lag der Mittelwert der Differenz der Okklusionskontakte bei -0,55 Kontakten, die untere Übereinstimmungsgrenze bei -11,01 Kontakten und die obere Übereinstimmungsgrenze bei 9,91 Kontakten.

4.3 KONTAKTPUNKTAUSWERTUNG IN DER DYNAMISCHEN OKKLUSION

Für die Kontaktpunktauswertung in der Dynamik wurden die letzten 10 Kauzyklen dreier Kauversuche mit Gummibärchen (Fa. Haribo, Bonn, Deutschland) ausgewertet. Die drei Kauversuche setzten sich zusammen aus dem freien Kauen (FK), einem angewiesenen Rechtskauen (RK) und einem angewiesenen Linkskauen (LK). Mit Hilfe der WINJAW⁺ RC Software konnten die Kauversuche in Echtzeit wiedergegeben werden. Die am häufigsten auftretenden Kontakte wurden durch die Software rot markiert und konnten so durch den Autor gezählt und über Screenshots dokumentiert werden.

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die Kontaktpunktverteilung im Ober- und Unterkiefer in der Dynamik beim freien Kauen (FK), Rechtskauen (RK) und Linkskauen (LK) für die Methode IOS (Trios-Scanner, TR) und Methode EOS (Zirkonzahn-Scanner, ZZ) auf. Die Spalte „Bdiff“ zeigt die jeweilige Betragsdifferenz zwischen Methode IOS und Methode EOS. „Mittel.Bdiff“ zeigt den Mittelwert der Betragsdifferenz an.

Die farbliche Hinterlegung der Tabellen steht für die Ergebnisse aus:

-  Methode Extraoralscan mit dem Zirkonzahn-Scanner (ZZ)
-  Methode Intraoralscan mit dem Trios-Scanner (TR)
-  Betragsdifferenz zwischen Methode EOS und IOS

Kontaktpunktverteilung an den Oberkiefermolaren in der Dynamik

PROBAND	TR_FK	ZZ_FK	BDIFF_FK	TR_RK	ZZ_RK	BDIFF_RK	TR_LK	ZZ_LK	BDIFF_LK
1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
2	1	1	0	0	1	1	0	3	3
3	1	0	1	2	1	1	1	1	0
4	0	0	0	1	0	1	1	0	1
5	2	1	1	2	1	1	1	1	0
6	1	1	0	1	1	0	1	2	1
7	1	0	1	1	1	0	3	2	1
8	1	2	1	1	2	1	1	1	0
9	5	3	2	3	4	1	3	10	7
10	1	0	1	1	0	1	2	2	0
11	2	0	2	2	3	1	0	0	0
12	1	2	1	4	2	2	1	3	2
13	4	2	2	2	1	1	4	2	2
14	2	1	1	2	1	1	1	0	1
15	0	0	0	0	0	0	1	1	0
16	1	0	1	1	2	1	1	2	1
17	2	4	2	3	2	1	5	4	1
18	1	1	0	2	1	1	2	4	2
19	3	1	2	7	0	7	5	4	1
20	0	10	10	0	1	1	0	5	5
MITTEL	1,45	1,45	1,4	1,75	1,2	1,15	1,7	2,35	1,45

Tabelle 18: Kontaktpunktverteilung an den Oberkiefermolaren in der Dynamik.

TR: Trios, ZZ: Zirkonzahn, FK: Freies Kauen, RK: Rechtskauen, LK: Linkskauen, BDIFF: Betragsdifferenz, MITTEL: Mittelwert

Für die Molaren im Oberkiefer ergab sich für das freie Kauen ein Mittelwert von 1,45 Kontakten für die Methode IOS (TR) und ebenso ein Mittelwert von 1,45 Kontakten für die Methode EOS (ZZ). Der Mittelwert der Betragsdifferenz lag bei 1,4 Kontakten zwischen den Methoden IOS (TR) und EOS (ZZ). Für das Rechtskauen wurde ein Mittelwert von 1,75 Kontakten für die Methode IOS errechnet und ein Mittelwert von 1,2 Kontakten für die Methode EOS. Der Mittelwert der Betragsdifferenz lag 1,15 Kontakten zwischen den beiden Methoden. Beim Linkskauen wurde für die Methode IOS ein Mittelwert von 1,7 Kontakten und für die Methode EOS ein Mittelwert von 2,35 Kontakten erzielt. Der Mittelwert der Betragsdifferenz lag bei 1,45 Kontakten (Tabelle 18).

Kontaktpunktverteilung an den Oberkieferprämolaren in der Dynamik

PROBAND	TR_FK	ZZ_FK	BDIFF_FK	TR_RK	ZZ_RK	BDIFF_RK	TR_LK	ZZ_LK	BDIFF_LK
1	0	0	0	1	2	1	1	2	1
2	1	0	1	0	0	0	1	0	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	1	0	1
6	0	0	0	0	0	0	0	1	1
7	0	1	1	1	1	0	0	1	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	2	2	0	0	0	0	4	4
10	0	0	0	0	1	1	0	0	0
11	0	2	2	0	0	0	2	2	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	1	1
15	3	1	2	0	0	0	0	1	1
16	0	2	2	0	3	3	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	1	0	1
18	0	1	1	0	1	1	0	1	1
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	2	0	2	5	0	5	2	0	2
MITTEL	0,3	0,45	0,65	0,35	0,4	0,55	0,4	0,65	0,75

Tabelle 19: Kontaktpunktverteilung an den Oberkieferprämolaren in der Dynamik.

TR: Trios, ZZ: Zirkonzahn, FK: Freies Kauen, RK: Rechtskauen, LK: Linkskauen, BDIFF: Betragsdifferenz, MITTEL: Mittelwert

Für die Prämolaren im Oberkiefer errechnete sich für das freie Kauen ein Mittelwert von 0,3 Kontakten für die Methode IOS (TR) und 0,45 Kontakten für die Methode EOS (ZZ). Der Mittelwert der Betragsdifferenz lag bei 0,65 Kontakten zwischen beiden Methoden. Für das Rechtskauen ergab sich ein Mittelwert von 0,35 Kontakten für die Methode EOS und 0,4 Kontakten für die Methode IOS. Der Mittelwert der Betragsdifferenz lag bei 0,55 Kontakten zwischen den Methoden IOS und EOS. Für das Linkskauen wurde ein jeweils Mittelwert von 0,4 Kontakten für die Methode IOS und 0,65 Kontakten für die Methode EOS erzielt. Für den Mittelwert der Betragsdifferenz errechneten sich 0,75 Kontakte (Tabelle 19).

Kontaktpunktverteilung an den Oberkieferfrontzähnen in der Dynamik

PROBAND	TR_FK	ZZ_FK	BDIFF_FK	TR_RK	ZZ_RK	BDIFF_RK	TR_LK	ZZ_LK	BDIFF_LK
1	3	0	3	1	0	1	6	0	6
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	2	2	0	0	0	0	1	1
4	0	1	1	0	0	0	0	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	2	2	0	1	1	0	3	3
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1	0	1	0	0	0	1	0	1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	1	1	0	3	1	2	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	1	1	0	0	0	0	3	3
19	0	7	7	5	1	4	0	1	1
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MITTEL	0,25	0,7	0,85	0,45	0,15	0,4	0,35	0,45	0,8

Tabelle 20: Kontaktpunktverteilung an den Oberkieferfrontzähnen in der Dynamik.

TR: Trios, ZZ: Zirkonzahn, FK: Freies Kauen, RK: Rechtskauen, LK: Linkskauen, BDIFF: Betragsdifferenz, MITTEL: Mittelwert

Im Oberkiefer erzielte die Kontaktpunktverteilung im Frontzahnbereich beim freien Kauen einen Mittelwert von 0,25 Kontakten bei der Methode IOS (TR) und 0,7 Kontakten bei der Methode EOS (ZZ). Der Mittelwert der Betragsdifferenz lag bei 0,85 Kontakten zwischen den Methoden IOS (TR) und EOS (ZZ). Für das Rechtskauen ergab sich ein Mittelwert von 0,45 Kontakten für die Methode IOS und 0,15 Kontakten für die Methode EOS. Der Mittelwert der Betragsdifferenz lag bei 0,4 Kontakten. Für das Linkskauen waren es Mittelwerte von 0,35 und 0,45 für die Methoden IOS und EOS. Für den Mittelwert der Betragsdifferenz wurden 0,8 Kontakte errechnet (Tabelle 20).

Kontaktpunktverteilung an den Unterkiefermolaren in der Dynamik

PROBAND	TR_FK	ZZ_FK	BDIFF_FK	TR_RK	ZZ_RK	BDIFF_RK	TR_LK	ZZ_LK	BDIFF_LK
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	1	0	1	1	0	0	0
3	2	0	2	1	1	0	1	1	0
4	0	0	0	0	1	1	2	0	2
5	2	2	0	2	1	1	1	1	0
6	1	1	0	1	1	0	1	3	2
7	3	1	2	1	0	1	3	1	2
8	1	2	1	3	2	1	1	2	1
9	4	3	1	3	5	2	3	9	6
10	1	0	1	1	0	1	2	3	1
11	2	0	2	1	3	2	0	0	0
12	0	1	1	4	7	3	1	3	2
13	1	2	1	3	1	2	4	2	2
14	2	0	2	2	0	2	2	0	2
15	0	0	0	1	0	1	1	1	0
16	1	0	1	1	2	1	4	1	3
17	1	3	2	2	3	1	6	3	3
18	0	1	1	1	1	0	2	3	1
19	5	1	4	8	0	8	8	4	4
20	1	10	9	0	3	3	0	5	5
MITTEL	1,4	1,35	1,55	1,75	1,6	1,55	2,1	2,1	1,8

Tabelle 21: Kontaktpunktverteilung an den Unterkiefermolaren in der Dynamik.

TR: Trios, ZZ: Zirkonzahn, FK: Freies Kauen, RK: Rechtskauen, LK: Linkskauen, BDIFF: Betragsdifferenz, MITTEL: Mittelwert

Für die Molaren im Unterkiefer ergab sich ein Mittelwert für das freie Kauen von 1,4 Kontakten für die Methode IOS (TR) und 1,35 Kontakten für die Methode EOS (ZZ). Der Mittelwert der Betragsdifferenz lag bei 1,55 Kontakten für das freie Kauen zwischen den beiden Methoden. Für das Rechtskauen wurde ein Mittelwert von 1,75 Kontakten für die Methode IOS und ein Mittelwert von 1,6 Kontakten für die Methode EOS errechnet. Für den Mittelwert der Betragsdifferenz ergab sich ein Wert von 1,55 Kontakten zwischen den einzelnen Methoden. Für das Linkskauen wurden jeweils Mittelwerte von 2,1 Kontakten erzielt und eine Betragsdifferenz von 1,8 Kontakten (Tabelle 21).

Kontaktpunktverteilung an den Unterkieferprämolaren in der Dynamik

PROBAND	TR_FK	ZZ_FK	BDIFF_FK	TR_RK	ZZ_RK	BDIFF_RK	TR_LK	ZZ_LK	BDIFF_LK
1	1	0	1	0	1	1	1	0	1
2	1	0	1	1	0	1	3	1	2
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	0	1	1	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	1	1	0	0	0	0	2	2
7	1	1	0	1	1	0	0	1	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	2	2	0	0	0	0	0	0
10	0	2	2	0	1	1	0	0	0
11	0	2	2	0	0	0	2	1	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	2	2
15	1	1	0	0	0	0	0	0	0
16	0	2	2	0	3	3	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	1	1	0	1	1	0	3	3
19	0	0	0	1	0	1	0	0	0
20	2	0	2	7	0	7	2	0	2
MITTEL	0,35	0,6	0,75	0,55	0,4	0,75	0,4	0,5	0,7

Tabelle 22: Kontaktpunktverteilung an den Unterkieferprämolaren in der Dynamik.

TR: Trios, ZZ: Zirkonzahn, FK: Freies Kauen, RK: Rechtskauen, LK: Linkskauen, BDIFF: Betragsdifferenz, MITTEL: Mittelwert

Für die Prämolaren im Unterkieferkiefer errechnete sich für das freie Kauen ein Mittelwert von 0,35 Kontakten für die Methode IOS (TR) und 0,6 Kontakten für die Methode EOS (ZZ). Für den Mittelwert der Betragsdifferenz errechneten sich 0,75 Kontakte. Für das Rechtskauen ergaben sich Mittelwerte von 0,55 und 0,4 Kontakten für die Methoden IOS und EOS. Der Mittelwert der Betragsdifferenz lag hier bei 0,75 Kontakten. Für das Rechtskauen ergab sich ein Mittelwert von 0,4 Kontakten für die Methode IOS und 0,5 Kontakten für die Methode EOS. Der Mittelwert der Betragsdifferenz lag bei 0,7 Kontakten (Tabelle 22).

Kontaktpunktverteilung an den Unterkieferfrontzähnen in der Dynamik

PROBAND	TR_FK	ZZ_FK	BDIFF_FK	TR_RK	ZZ_RK	BDIFF_RK	TR_LK	ZZ_LK	BDIFF_LK
1	3	1	2	2	0	2	6	0	6
2	0	0	0	3	0	3	0	6	6
3	0	0	0	0	0	0	0	1	1
4	0	0	0	0	0	0	0	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	2	2	0	3	3	0	4	4
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	1	0	1
12	1	0	1	0	0	0	3	0	3
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	2	2	0	5	1	4	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	1	1
19	0	11	11	3	3	0	3	1	2
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MITTEL	0,3	0,8	0,8	0,65	0,35	0,6	0,65	0,7	1,25

Tabelle 23: Kontaktpunktverteilung an den Unterkieferfrontzähnen in der Dynamik.

TR: Trios, ZZ: Zirkonzahn, FK: Freies Kauen, RK: Rechtskauen, LK: Linkskauen, BDIFF: Betragsdifferenz, MITTEL: Mittelwert

Für die Frontzähne im Unterkiefer ergab sich für das freie Kauen ein Mittelwert von 0,3 Kontakten für die Methode IOS (TR) und 0,8 Kontakten für die Methode EOS (ZZ). Es errechnete sich ein Mittelwert der Betragsdifferenz von 0,8 Kontakten. Für das Rechtskauen wurde ein Mittelwert von 0,6 und 0,65 Kontakten für die Methoden IOS und EOS erzielt. Der Mittelwert der Betragsdifferenz lag bei 0,6 Kontakten. Für das Linkskauen errechneten sich Mittelwerte von 0,65 und 0,7 Kontakten für die Methoden IOS und EOS. Beim Mittelwert der Betragsdifferenz wurden 1,25 Kontakte erzielt (Tabelle 23).

Allgemeine Feststellungen zur Kontaktpunktauswertung in der Dynamik

Betrachtete man die reinen Bildergebnisse aller 20 Probanden aus der Dynamik, fiel auf, dass bei den angewiesenen Rechts- und Linkskauversuchen vermehrt die Zähne der Balanceseite okkludierten. Ein spezifischer Hauptkontakt konnte dabei nicht ausgemacht werden. In der Diskussion (Kapitel 5.2) wird anhand dreier Fallbeispiele genauer auf dieses Thema eingegangen (Abbildung 67 bis Abbildung 72). Weitere Bildbeispiele aller 20 Studienteilnehmer sind im Anhang (Kapitel 8.2) zu finden.

5 DISKUSSION

5.1 METHODENDISKUSSION

5.1.1 Materialbedingte Einflussfaktoren

5.1.1.1 Beurteilung der Scangenaugigkeit von Extra- und Intraoralscanner beim Gesamtkiefer

Um die Genauigkeit der Scans zu beurteilen, wurden die STL-Daten der Extra- und der Intraoralscans in eine Analyse Software importiert. Als Referenz diente immer der aus dem Extraoralscanner erhaltene Datensatz. Abweichungen des aus dem Intraoralscanner erhaltenen Datensatzes zum Referenzmodell wurden mit Hilfe der GOM Inspect Software berechnet. Um gleiche Scanbedingungen zu erhalten, fand zuerst ein in vitro Vergleich statt, indem mit beiden Scannern immer das Gipsmodell der 20 Probanden abgescannt wurde. Zum anderen fand auch ein Vergleich unter standardmäßigem Gebrauch statt. Das heißt bei Methode Extraoralscan fand die Digitalisierung nach wie vor über das Gipsmodell statt, bei Methode Intraoralscan geschah die Datenerfassung direkt im Mund des Studienteilnehmers. Im Vergleich zu anderen Studien erfolgte die Überprüfung der Scangenaugigkeit nicht gegen ein „Ur“-oder „Referenzmodell“, wie es beispielsweise bei Sichwardt (Sichwardt 2015) oder Ender, Zimmermann und Mehl (Ender et al. 2019) der Fall war. Im Gegensatz zu diesen stand hier aber auch nicht die Scangenaugigkeit alleine, sondern viel mehr die Machbarkeit und Umsetzung der digitalen Okklusionsanalyse an verschiedenen Scanner-Typen und Probanden im Vordergrund. Zudem sollten die Ergebnisse auch dazu dienen Rückschlüsse zu ziehen, warum Okklusionskontakte gegebenenfalls voneinander abweichen können. Im Gesamten wurde die Studie in vivo durchgeführt.

Nachteilig bei der Gipsmodell-Methode im Vergleich zum direkten Intraoralscan sind verfahrensbedingte Ungenauigkeiten bei der Herstellung der Gipsmodelle. So sind angefangen von der Abformung bis hin zum fertigen Gipsmodell mehrere Arbeitsschritte erforderlich, die allesamt zu Fehlerquellen führen können. Die Genauigkeit der Abformung ist von äußeren Faktoren wie beispielsweise der Temperatur und den Materialeigenschaften des Abformmaterials abhängig. Zu den Materialeigenschaften des Abformmaterials zählen unter anderem Rückstellungsvermögen, Dimensionsstabilität, Viskosität und Hydrophilie (Hamalian et al. 2011; Sichwardt 2015). Auch die Genauigkeit des Gipsmodells selbst unterliegt verschiedenen Einflüssen der Herstellungs- und Lagerungsprozesse. So spielen zum Beispiel

das richtige Anrühren und die Verarbeitung des Gipses eine entscheidende Rolle in Bezug auf die spätere Modellgenauigkeit (Sichwardt 2015). Einigen Studien zufolge werden bezogen auf den Gesamtkiefer heutzutage aber immer noch mit analogen Methoden die genaueren Ergebnisse erzielt als mit einem Intraoralscan (Ender et al. 2016, 2019; Ender/Mehl 2011; Kuhr et al. 2016; Mangano et al. 2017), andere Studien kommen durchaus zu dem Schluss, dass es sich bei Intraoralscannern mittlerweile um Alternativen zur konventionellen Abformung handelt (Baghani et al. 2020). In Kapitel 5.2 wird nochmals genauer auf dieses Thema eingegangen.

5.1.1.2 Die verschiedenen Materialien zur Okklusionsprüfung

Klinische Okklusionsprüfung mittels Okklusionsfolie

Die klinische Okklusionsanalyse wurde mit Artikulationsfolie durchgeführt und anschließend mit Fotos dokumentiert. Laut Reiber et al. ist bei der Okklusionsprüfung mittels Folie nachteilig, dass die Methode von Faktoren wie der Feuchtigkeit im Mund oder anderen biologischen Gegebenheiten wie zum Beispiel dem Zustand des neuromuskulären Systems, der Zahnbeweglichkeit oder Störungen durch Weichteile beeinflusst wird. Auch auf Abrasionsfacetten ist das Anzeichnungsverhalten schlechter als auf spitzen Höckern. Im Vergleich zum dickeren Okklusionspapier oder zur Okklusionsseide zeichnen Okklusionsfolien genauer, färben bei geringer Belastung jedoch schlechter (Reiber et al. 1989). Einige dieser Aussagen konnten auch in der vorliegenden Studie bestätigt werden. Obwohl vor jeder Anzeichnung mittels Okklusionsfolie der Speichel im Mund des Probanden mittels Speichelsauger und Luftpuster reduziert wurde, waren bei Probanden mit höherem Speichelfluss die Okklusionskontakte häufig schlechter zu erkennen als bei Probanden mit geringerem Speichelfluss. Die verbale Instruktion lautete für jeden Probanden gleich. Für die Statik hieß sie: „In den Schlussbiss gehen, aufbeißen und halten“. Für die Protrusion lautete sie: „In den Schlussbiss gehen, aufbeißen und halten. Auf Kommando unter Zahnkontakt nach vorne schieben“. Für die Laterotrusion war die Anweisung „in den Schlussbiss gehen, aufbeißen und halten. Auf Kommando unter Zahnkontakt nach rechts/links schieben“. Die Interpretation des Wortes „Schlussbiss“ fiel jedoch bei den Studienteilnehmern sehr unterschiedlich aus und die Messung musste bei zaghaft zubeißenden Probanden wiederholt werden, da die Okklusionsfolie kaum oder gar nicht färbte.

Klinische Okklusionsprüfung mittels Bissregistrat und computergestützter Auswertung

Neben den klinisch üblichen Methoden der Okklusionsdarstellung über Papiere, Seiden und Folien besteht auch die Möglichkeit statische Okklusionskontakte über ein Silikonmaterial zu erfassen. Im Gegensatz zu den Farbpunkten, die bei Folie, Papier oder Seide entstehen, können die Okklusionskontakte, die im Bissregistrat festgehalten sind, auch indirekt digitalisiert werden. Hierzu müssen die Silikonregistrate mit Hilfe eines handelsüblichen Durch- und Auflichtscanners eingescannt werden. Im Anschluss besteht die Möglichkeit, die Scandaten anhand des GEDAS Systems auszuwerten. Es können Stärke, Lokalisation und Ausdehnung statischer Okklusionskontakte in der Interkuspidation (IP) dargestellt werden (Hützen et al. 2006). Im Gegensatz zur klinischen Okklusionsanalyse mittels Folie kann hier ein Schwellwert, wie beispielsweise 50 µm in der vorliegenden Studie, vorgegeben werden. Ab Erreichen des vorgegebenen Schwellwerts wird ein Kontakt dann als okklusaler Kontakt gezählt. Im Anschluss kann die so erfolgte Okklusionsanalyse mit anderen digitalen Methoden über Scanverfahren genauer verglichen werden. In der vorliegenden Arbeit wurde dazu das zebri System als Schnittstelle verwendet, über das ebenfalls ein Schwellwert eingestellt werden kann.

Nachteilig bei der GEDAS Methode ist, dass Werte, die geringfügig oberhalb des definierten Schwellwertes liegen (das Silikonregistrat ist hier dicker als die vorgegebenen 50 µm), durch die Analyse hindurchrutschen und nicht mehr als okklusaler Kontakt gewertet wurden. Beißt ein Studienteilnehmer also zu leicht zu, werden bei der späteren Auswertung zu wenige Kontakte angezeigt. Häufig fiel dies aber erst in der Auswertung auf und war am Registrat selbst nicht ersichtlich. Ein Beispiel ist in Abbildung 61 a-d dargestellt. Die Kontakte bei Registrat Nummer eins (Abbildung 61a) scheinen nahezu gleich denen in Registrat Nummer zwei (Abbildung 61c) zu sein. Bei der Auswertung mit GEDAS fallen jedoch deutliche Diskrepanzen in Bezug auf die Anzahl an gewerteten Okklusionskontakten auf (Abbildung 61b und d). Hier war offensichtlich der Fall aufgetreten, dass der Studienteilnehmer zu schwach zugebissen hatte. Registrat Nummer zwei wurde erst im Nachhinein erstellt, als die Diskrepanz durch GEDAS aufgefallen war.

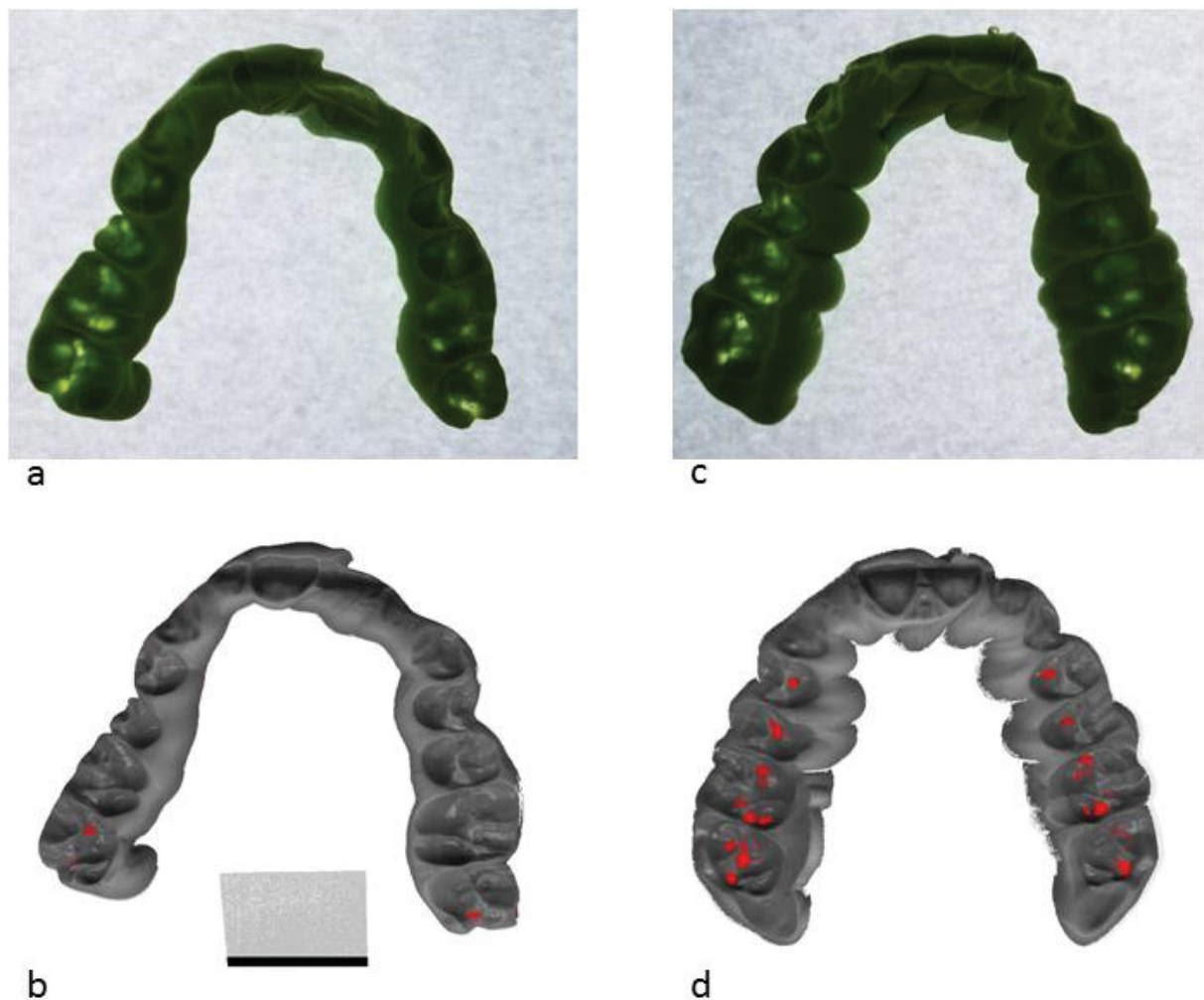


Abbildung 61: Vergleich zweier nahezu identischer Registrate in Bezug auf die Auswertung okklusaler Kontakte.

- a. Augenscheinlich vorhandene Kontakte bei Registrat 1 im Molaren- und Prämolarenbereich
- b. Auswertung Registrat 1 mit tatsächlich gewerteten Okklusionskontakten
- c. Registrat 2 mit augenscheinlich ähnlich bis gleichen Kontakten zu Registrat 1
- d. Auswertung Registrat 2 mit tatsächlich gewerteten Okklusionskontakten

Durch die Erkenntnis, dass auch die Digitalisierung der Registrate nicht zwangsläufig zu reproduzierbaren Ergebnissen führte, wurde im Verlauf der Studie entschieden, den ursprünglichen Plan, GEDAS als alleinige Referenz in Bezug auf die restlichen Ergebnisse heranzuziehen, nochmals zu überdenken. Schlussendlich wurden alle Ergebnisse aus GEDAS nochmals einer Plausibilitätskontrolle unterzogen, indem sie durch den Autor mit der Fotodokumentation aus der klassisch klinischen Okklusionsanalyse mittels Okklusionsfolie abgeglichen wurden. Aus diesem Abgleich entstand der neue Referenzwert „GEDAS+Foto“. Die Abweichungen der Methoden Extra- und Intraoralscan zur Methode Klinik in der Statik

bezogen sich dann auf eben diesen neuen Referenzwert „GEDAS+Foto“ (Kapitel 4.2, Abbildung 56).

Die Modellokkklusion

Neben der klinischen Okklusionsanalyse fand auch eine digitale Okklusionsanalyse statt. Dabei wurden zwei Methoden unterschieden: Bei der Methode Extraoralscan wurden die Daten indirekt über ein Gipsmodell und einen Extraoralscanner (S600 ARTI, Fa. Zirkonzahn) digitalisiert, bei der Methode Intraoralscan erfolgte die Datenerfassung direkt im Mund der Studienteilnehmer über einen Intraoralscanner (Trios 3, Fa. 3Shape). Die Gipsmodelle wurden beim Extraoralscan über eine entsprechende Vorrichtung manuell zueinander in Okklusion gebracht. Reiber und Trbola zufolge ist die klinische Okklusion durch die Modellokkklusion nur relativ ungenau zu reproduzieren, wobei manuell zentrierte Modelle die besseren Ergebnisse erzielten als diejenigen, die über ein Registrat zueinander gebracht wurden (Reiber/Trbola 1993). Sie berichteten, dass in Bereichen größter okklusaler Genauigkeit die okklusalen Kontakte nur bis zu 40% wiedergegeben werden. Für die Diskrepanzen zwischen klinischer Okklusion und Modellokkklusion spielen einige Faktoren aus Biologie, Werkstoffkunde und Methodik eine Rolle. Zu den biologischen Faktoren zählen wiederum das neuromuskuläre System, die Resilienz der Kiefergelenke, die elastische Deformation der Kiefer, die Zahneigenbeweglichkeit und ein Vielpunktkontakt, der nicht eindeutig ist. Zudem fallen auch herstellungsbedingte Faktoren wie die Abformung, Modellherstellung, Kieferrelationsbestimmung oder die Modellmontage ins Gewicht. Außerdem sind das Abform- und Modellmaterial von Relevanz (Reiber/Trbola 1993). Durch die Starrheit der Gipsmodelle können Zahnbewegungen beim Kieferschluss nicht wiedergegeben werden. Zudem kann auch nicht überprüft werden, ob der „schauelfreie Sitz“ der Modelle der tatsächlichen klinischen Interkuspidation entspricht (Reiber/Trbola 1993).

Okklusion beim Intraoralscan

Beim Intraoralscan wurde die Okklusion über den Bukkalscan von beiden Seiten ermittelt. Dazu sollte der Studienteilnehmer jeweils in die habituelle Okklusion gehen und so bis zum Ende des Scanvorgangs verbleiben. Gescannt wurden dabei der 1. und 4. Quadrant in Okklusion zueinander und der 2. und 3. Quadrant in Okklusion zueinander. Die Bedienung des Scanners erfolgte nach Angaben des Herstellers. Biologische Faktoren wie das neuromuskuläre System, welche beim Gipsmodell fehlen, können hier mit eingebunden werden, da der Proband sozusagen „live“ die Zähne in Okklusion bringt. Zudem kann die Eigenbeweglichkeit der Zähne und die Resilienz der Kiefergelenke mit berücksichtigt werden, da auch die Starrheit des

Gipsmodells nicht in die Summation an Fehlerquellen mit einfließt. Das Ergebnis hängt hier vorwiegend vom Scanner und von der Reproduzierbarkeit der Okklusion durch den Studienteilnehmer ab. Über das Ausmaß der Aufbisskraft in habitueller Okklusion kann allerdings keine Aussage gemacht werden. Eine Studie zur Reproduzierbarkeit der Okklusion lieferten Jaschouz und Mehl. Sie überprüften anhand eines Intraoralscanners wie gut 15 Probanden ihre habituelle Okklusion einnehmen konnten. Ihnen zufolge lag die klinische Reproduzierbarkeit der Interkuspidation in vivo bei $42 \pm 34 \mu\text{m}$, unabhängig von der Tageszeit oder der Positionierung der Probanden. Erzielt wurde dieses Ergebnis über Bukkalscans, gemessen mit der Cerec Bluecam. Als Vergleichswert wurde Reproduzierbarkeit der Modelloklusion anhand von Gipsmodellen gemessen. Diese lag bei $135 \pm 77 \mu\text{m}$ (Jaschouz/Mehl 2014).

Digitale Okklusionsanalyse

Dias et al. verglichen konventionelle und computergestützte Methoden bei der Beurteilung eines Okklusionsschemas (Dias et al. 2020). Als konventionelle Methode wurde wie in der vorliegenden Arbeit eine Fotoanalyse der Okklusionskontakte gemacht. Zur computergestützten Okklusionsanalyse diente das T-Scan III (Fa. Tekscan, South Boston, MA, USA), mit dessen Hilfe die Okklusionskontakte in Position und vorhandener Druckintensität angezeigt werden sollten. Die Auswertung der okklusalen Kontaktpunkte aus der Fotoanalyse erfolgte mittels spezieller Software. Es folgte eine Überlagerung mit den Ergebnissen der computergestützten Analyse. Die Korrelation zwischen konventionellen und computergestützten Methoden erwies sich dabei als schwach (Dias et al. 2020).

In der vorliegenden Arbeit wurden zwei weitere Systeme zur computergestützten Okklusionsanalyse verwendet. Zum einen handelte es sich um das Greifswald Digital Analyzing System (GEDAS) und zum anderen um die WINJAW⁺ RC Software. Das GEDAS System diente dazu, die Auswertung der statischen Okklusionskontakte zwischen den drei Methoden (Klinik, Extra- und Intraoralscan) zu objektivieren. Über die WINJAW⁺ RC Software wurden die mittels Extra- und Intraoralscanner aufgezeichneten STL-Datensätze mit den Daten der Bewegungsaufzeichnung gekoppelt. Die Unterkieferbewegungen konnten zusammen mit den eingelesenen Modelldaten innerhalb der WINJAW⁺ RC Software in Echtzeit dargestellt und betrachtet werden. Da bei der Bewegungsdatenerfassung die Position im Schlussbiss mit aufgezeichnet wurde, konnten auch die zu diesem Zeitpunkt vorhandenen okklusalen Kontakte betrachtet werden. Über einen Screenshot konnte die vorhandene Kontaktsituation als Bild gespeichert werden. Sowohl beim GEDAS System als auch bei der

WINJAW⁺ RC Software konnte der Schwellwert auf 50 µm eingestellt werden. Ab diesem Schwellwert wurde ein okklusaler Kontakt als solcher gewertet. Den Screenshot aus der WINJAW⁺ RC Software konnte man wiederum in das GEDAS System einlesen. Durch die Verwendung der zwei Softwaremodule GEDAS und WINJAW⁺ RC gelangte man zu einer objektiven, rein softwaregesteuerten Auswertung in der Anzahl an okklusalen Kontakten in der statischen Okklusion. Nach Auswertung der Kontaktanzahl fiel auf, dass es zwischen den drei Methoden zu Abweichungen kam, die nicht allein auf die Messsysteme zurückzuführen waren, sondern personenbezogen waren (Kapitel 5.1). Aus diesem Grund wurden alle verwendeten Methoden einer Plausibilitätskontrolle unterzogen und dann nochmals miteinander verglichen. Hier ergab sich je nach ausgewerteter Zahn- und Kieferregion eine durchschnittliche bis hin zu einer sehr guten Zuverlässigkeit in der Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Methoden der Okklusionsanalyse.

5.1.2 Personenbedingte Einflussfaktoren

5.1.2.1 Der Einfluss des Anwenders auf die Erstellung der Gipsmodelle und die Digitalisierung der Daten

Bei der Erstellung der Gipsmodelle gibt es nicht nur materialbedingt Einflussfaktoren, sondern auch der Anwender spielt eine Rolle in Bezug auf die Genauigkeit der späteren Ergebnisse. Wie in Kapitel 5.1 bereits erwähnt, sind von der Abformung bis hin zum fertigen Gipsmodell mehrere Arbeitsschritte notwendig, die allesamt zu Fehlerquellen führen können. Je genauer die einzelnen Arbeitsschritte von der Abformung bis zum fertigen Gipsmodell gelingen, desto besser ist das spätere Ergebnis.

Neben der Erstellung von konventionellen Gipsmodellen war es in nahezu jedem Arbeitsschritt notwendig Daten zu digitalisieren. Beispielsweise mussten die Gipsmodelle mittels des Extraoralscanners eingescannt, die Situation im Mund durch den Intraoralscanner digitalisiert oder die Kieferbewegung anhand des JMA^{Optic} Systems aufgezeichnet werden. Auch die analog gewonnenen Bissregistrare wurden mit Hilfe des GEDAS Systems digital ausgewertet. Bei all diesen Einzelschritten, auch wenn die Ausführung jeweils nach Angaben des Herstellers erfolgte, spielt wiederum die praktische Umsetzung des Anwenders eine wesentliche Rolle und jeder Einzelschritt kann wiederum zu Fehlerquellen führen.

5.1.2.2 Die Einwirkung der Studienteilnehmer auf die Ergebnisse

Auch der Studienteilnehmer selbst hat einen wesentlichen Einflussfaktor auf das Ergebnis. Hierzu zählen beispielsweise wie reproduzierbar der Proband seine habituelle Okklusion

einnehmen kann. Das Einnehmen der habituellen Okklusion war in mehreren Arbeitsschritten in unterschiedlichen Untersuchungssitzungen gefragt, so zum Beispiel bei der Erstellung der Bissregistrat in der ersten Untersuchungssitzung, beim Bukkalscan während der Datenerfassung für den Intraoralscan in der zweiten Untersuchungssitzung und auch bei der Bewegungsaufzeichnung in der dritten Untersuchungssitzung, wo der Proband mehrmals in den „Schlussbiss“ gehen musste. Jaschouz und Mehl zufolge lag die klinische Reproduzierbarkeit der Interkuspidation bei $42 \pm 34 \mu\text{m}$ und war weder abhängig von der Tageszeit, noch von der Positionierung des Probanden (Jaschouz/Mehl 2014). Diese Aussage konnte in der vorliegenden Promotionsarbeit nicht bestätigt werden. Auch wenn die Arbeitsanweisung immer gleich lautete, nämlich „in den Schlussbiss gehen, aufbeißen und halten“, fiel die Interpretation des Begriffs „Schlussbiss“ innerhalb derselben Person und den verschiedenen Messungen häufig unterschiedlich aus. Beim Vergleich zwischen Methode Klinik, die aus der Fotoanalyse und dem Bissregistrat bestand, der Methode Extraoralscan und der Methode Intraoralscan kam es zu Abweichungen der intraindividuellen Okklusion, die nicht ausschließlich auf die Messmethoden und Systeme an sich zurückzuführen waren. Häufig konnten zwischen zwei Methoden, zum Beispiel zwischen dem Foto aus der Methode Klinik und Methode Extraoralscan Übereinstimmungen gefunden werden, während zu Methode Intraoralscan und Bissregistrat deutliche Abweichungen in Anzahl und Position von statischen Okklusionskontakten vorzufinden waren, letztere aber untereinander doch wieder größtenteils übereinstimmten. Erkenntnisse wie diese ließen darauf schließen, dass die Probanden ihren „Schlussbiss“ nicht immer gleich einnahmen. Zudem wurde die Kraft, die beim „Schlussbiss“ jeweils aufgewendet wurde, nicht in Zahlen gemessen. Diese hatte aber einen Einfluss darauf, wie stark der Durchbiss beim Bissregistrat erfolgte (Abbildung 61) und im Folgenden auch auf die Ergebnisse der statischen Okklusionsanalyse.

Bei der Datengewinnung für die dynamische Okklusion in der dritten Untersuchungssitzung wurde bei den durchgeführten Kauversuchen immer dasselbe Kaugut verwendet. Je Studienteilnehmer mussten zwei Messungen durchgeführt werden, eine für die Methode Extraoralscan und eine für die Methode Intraoralscan. Zwischen den beiden Messungen war die Anzahl der für das Kaugut verwendeten Kauzyklen jedoch nicht immer identisch. Interindividuell schwankten die dafür benötigten Kauzyklen noch wesentlich stärker als es bei den einzelnen Probanden selbst der Fall war. Während manche Studienteilnehmer das Gummibärchen schon nach relativ kurzer Zeit schluckten, benötigten andere wesentlich mehr Kauzyklen bis sie schluckten. Die unterschiedliche Anzahl an Kauzyklen kann möglicherweise

Auswirkung auf das Ergebnis der okklusalen Annäherung der Kontakte während der finalen Phase des Kauvorgangs haben.

5.2 ERGEBNIS DISKUSSION

5.2.1 Studienlage zur analogen und digitalen Abformung

In der Studienlage zur analogen und digitalen Abformung ergibt sich ein sehr heterogenes Bild, mit welcher Methode sich die genaueren Ergebnisse liefern lassen.

Beurteilt man die Scangenaugigkeit beim Abscannen des Gesamtkiefers wurden einigen Studien zufolge auf analogem Weg die genaueren Ergebnisse erzielt als es beim Intraoralscan der Fall war. Nach ISO Standard 5725-1 wird der Terminus „Genauigkeit“ durch die Begriffe „Richtigkeit“ und „Präzision“ definiert, wobei sich die „Richtigkeit“ auf die Abweichung des Mittelwerts vom wahren Wert und die „Präzision“ sich auf die Übereinstimmung zwischen unabhängigen Messergebnissen unter gleichen Bedingungen bezieht (International Organization for Standardization o. J.). Laut Ender und Mehl ergab die konventionelle Methode, bei der ein in vitro Oberkiefermodell mittels eines Materials auf Polyvinylsiloxanbasis abgeformt und anschließend ein Gipsmodell gefertigt wurde, eine signifikant höhere Richtigkeit und Präzision als es bei acht getesteten Intraoralscannern und unterschiedlichen Softwaremodulen der Fall war. Zu den acht getesteten Intraoralscannern zählten: Trios 3, Trios 3 insane (beide Fa.3Shape) , Carestream CS 3600 (Fa. Carestream), Medit i500 (Fa. Medit), iTero Element 2 (Fa. Align Technology), Cerec Omnicam 4.6.1, Cerec Omnicam 5.0.0 und der Primescan (alle drei Fa. Densply Sirona) (Ender et al. 2019). Bei einer weiteren in vitro Studie kamen sie bei der Genauigkeit digitaler Abformungen auf ähnliche Ergebnisse denen der konventionellen Abformungen. Bei der konventionellen Abformung wurde als Abformmaterial Impregum verwendet. Bei der digitalen Abformung fanden die Scanner Cerec AC Bluecam (Fa. Densply Sirona) und Lava C.O.S. (Fa. 3M ESPE) Verwendung. Für die Richtigkeit ergaben sich folgende Ergebnisse: Konventionelle Abformung: $55 \pm 21,8 \mu\text{m}$; Cerec AC Bluecam: $49 \pm 14,2 \mu\text{m}$; Lava C.O.S.: $40,3 \pm 14,1 \mu\text{m}$. Für die Präzision ergaben sich bei der konventionellen Abformung Werte von $61,3 \pm 17,9 \mu\text{m}$, bei der digitalen Abformung Werte von $30,9 \pm 7,1 \mu\text{m}$ für die Cerec AC Bluecam und $60,1 \pm 31,3 \mu\text{m}$ für Lava C.O.S. (Ender/Mehl 2011).

Bei einer in vivo Studie verglichen sie die Präzision konventioneller und digitaler Abformungen über den kompletten Zahnbogen. Die Präzision wurde über den $(90\%-10\%)/2$ Perzentilwert

ermittelt. Bei fünf Probanden nahmen sie fünf konventionelle Abformungen mit fünf verschiedenen Materialien und sieben digitale Abformungen mit sieben verschiedenen Intraoralscannern. Als Abformmaterialien kamen zum Einsatz: Polyether, Vinylsiloxanether, direkt scannbare Vinylsiloxanether, digitalisiert scannbare Vinylsiloxanether und irreversibles Hydrokolloid. Als Intraoralscanner wurden verwendet: Cerec Bluecam, Cerec Omnicam (Fa. Densply Sirona), iTero (damals Fa. Cadent), Lava C.O.S., Lava True Definition Scanner (Firma 3M ESPE), Trios und Trios Color (Fa. 3Shape). Die Präzision reichte von 12,3 µm für Vinylsiloxanether bis 167,2 µm für Alginat. Die höchste Genauigkeit erreichten dabei die Gruppen Vinylsiloxanether und direkt scannbare Vinylsiloxanether. Über den gesamten Zahnbogen betrachtet zeigten konventionelle Abformungen, abgesehen von der Alginat-Gruppe, die höhere Genauigkeit (Ender et al. 2016).

Eine sehr aktuelle in vitro Studie lieferten Baghani et al. indem sie die Genauigkeit dreier Intraoralscanner (CEREC Omnicam, Fa. Densply Sirona; Trios 3, Fa. 3Shape und Carestream CS 600, Fa. Carestream) mit der eines Extraoralscanners (Deluxe Scanner, Fa. Open Technologies) verglichen. Es wurden statistisch relevante Abweichungen bei sowohl Mukosa- als auch Zahnschans zwischen dem Carestream Scanner und den anderen drei Scannern erzielt. Die Ergebnisse der anderen Scanner stellten eine Alternative zur konventionellen Abformung dar (Baghani et al. 2020).

Waldecker et al. verglichen die Genauigkeit zweier Intraoralscanner (Trios 3, Fa.3Shape und CEREC Omnicam, Fa. Densply Sirona) in vitro miteinander. Zur Messung wurden insgesamt drei Präzisionskugeln im Molaren und Frontzahnbereich angebracht. Beide Scanner erzielten akzeptable Resultate für die Versorgung von Inlays oder kleineren Restaurationen, konnten aber für festsitzende Arbeiten über eine größere Zahnspanne aufgrund von maximalen Abweichungen von 192,5 bis 294,5 µm über Gesamtkiefer nicht empfohlen werden (Waldecker et al. 2020).

Alzahrani et al. beurteilten die Scangenauigkeit zweier Intraoralscanner (Trios 3, Fa. 3 Shape und Emerald, Fa. Planmeca) über die Scanweite eines Sextanten und die über eines Quadranten. Dabei zeigte der Trios 3 keine signifikanten Unterschiede in Richtigkeit und Präzision zwischen den beiden Scanweiten. Der Emerald Scanner wies eine signifikant höhere Richtigkeit beim Scan eines Sextanten auf (Alzahrani et al. 2020).

Welche Abformung nun tatsächlich genauer ist, digital oder konventionell, das hängt im Wesentlichen auch vom vorgesehenen Verwendungszweck ab (Wöstmann/Schlenz 2020).

Besteht die Indikation darin, Präparationsgrenzen und Zahnstümpfe für festsitzenden Zahnersatz darzustellen, ist die Leistungsfähigkeit intraoraler Scanner heutzutage bereits so groß, dass die der konventionellen Methode mindestens ebenbürtig ist oder diese in der Genauigkeit sogar etwas übertrifft (Boeddinghaus et al. 2015; Bosniac et al. 2019; Mostafa et al. 2018; Wöstmann/Schlenz 2020). Bezogen auf den Gesamtkiefer lassen sich heutzutage mit einer üblichen Einphasenabformung jedoch noch genauere Ergebnisse erzielen (Kuhr et al. 2016; Mangano et al. 2017). Wöstmann und Schlenz zufolge zählen Bohrschablonen, Schienen und Modellherstellung zu Indikationen, für die ein Gesamtkieferscan in Bezug auf Genauigkeit bereits gut geeignet ist (Wöstmann/Schlenz 2020).

Insgesamt ist es schwierig die verschiedenen Studien miteinander zu vergleichen, da unterschiedliche Dinge miteinander verglichen und andere Referenzstrecken gemessen wurden. Manche der oben genannten Studien verglichen die Scanergebnisse verschiedener Intraoralscanner untereinander und andere die Scanergebnisse von Extraoralscannern mit denen von Intraoralscannern. Einigen der oben genannten Studien ist gemeinsam, dass sie die digitale mit der analogen Abformung vergleichen. Vergleicht man den kompletten Weg der direkten Digitalisierung (Intraoralscan) mit dem Weg der indirekten Digitalisierung (konventionelle Abformung und Extraoralscan) in Bezug auf die Passgenauigkeit von CAD/CAM-hergestellten Kronen, ermittelten Ahrberg et. al. eine signifikant bessere Passgenauigkeit für Zirkonoxidkronen, welche auf Basis direkter Digitalisierung erstellt wurden gegenüber denen, die auf Basis indirekter Digitalisierung erstellt wurden (Ahrberg et al. 2016; Muallah et al. 2017). Insgesamt liefert die indirekte Digitalisierung mehr Fehlerquellen als die direkte Digitalisierung (Muallah et al. 2017), da sie mehrere Arbeitsschritte umfasst. Für den initialen Schritt einer A-Silikonabformung ermittelten Ender et al. eine Abweichung von $13,0 \pm 2,9 \mu\text{m}$ (Ender/Mehl 2015). Im weiteren Verlauf kommt es nochmals auf die Genauigkeit des Extraoralscanners (Muallah et al. 2017) und zusätzlich auf die Genauigkeit des Gipsmodells an.

Muallah et al. konnten zeigen, dass die direkte Digitalisierung als gleichwertig der indirekten Digitalisierung anzusehen ist und dieser nicht nach steht. Hierzu wurde ein dreidimensional gedrucktes Studienmodell mit 5 Bohrungen mit einem Koordinatenmessgerät (Zeiss O-Inspect 422) vermessen, was als Goldstandard diente. Die Bohrungen erlaubten in ihrer Anordnung die Definition der Strecke der Intermolarenweite, Intercaninenweite und Zahnbogenlänge. Anschließend wurde es jeweils 37-mal mit verschiedenen Intraoralscannern (Apollo DI, Fa. Densply Sirona; CS3500, Fa. Carestream; iTero, damals Fa. Cadent; PlanScan, Fa. Planmeca;

Trios, Fa. 3Shape; TrueDefinition, Fa. 3M ESPE) und dem Modellscanner OrthoX Scan, Fa. Dentauro digitalisiert. Trios, iTero, OrthoX und TrueDefinition zeigten bezogen auf die Standardabweichung die besten Ergebnisse und wiesen untereinander keine signifikanten Unterschiede auf (Muallah et al. 2017).

5.2.2 Studienlage zur digitalen Kontaktpunktauswertung

Während konventionelle Methoden zur Kontaktpunktauswertung auf einer qualitativen Bewertung beruhen, versuchen computergestützte Methoden eine quantitative Evaluation [...] zu ermöglichen (Dias et al. 2020).

Dias et. al verglichen konventionelle und computergestützte Methoden bei der Beurteilung eines Okklusionsschemas und kamen zu dem Ergebnis, dass es nur eine schwache bis moderate Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Methoden gibt. Jeder Proband erhielt dabei eine flache Schiene für den Unterkiefer. Die Beurteilung der Kontaktpunkte in den posterioren Bereichen fand einmal mittels Okklusionsfolie (Hanel, Fa. Coltène/Whaledent) und einmal computergestützt mittels des T-Scan Systems (Fa. Tekscan) statt (Dias et al. 2020).

Stavness et al. simulierten Zahnkollisionen und die okklusale Dynamik in der virtuellen Umgebung und kamen zu dem Schluss, dass die mathematische Simulation unter Verwendung interokklusaler Bissregistrare die primären Bewegungen von Modellen in einem teiladjustierbaren Artikulator nahezu wiedergeben kann (Stavness et al. 2016).

Heuser et al. verglichen Anzahl, Stärke und Position von Kontaktpunkten mittels dreier verschiedener Methoden. Dazu zählten wie in der vorliegenden Promotionsarbeit als Goldstandard Okklusionsfolie sowie ein Intraoralscanner (Trios 3, Fa. 3Shape). Abweichend wurde als dritte Methode das T-Scan System (T-Scan Novus, Fa. Tekscan) verwendet. Als Resultat wurden drei verschiedene Ergebnisse in Bezug auf Anzahl, Stärke und Position der okklusalen Kontakte erzielt. Bei der digitalen Datenerfassung wurden signifikant mehr Kontakte gezählt, als es bei der Okklusionsfolie der Fall war. Auch das T-Scan System differierte in den Ergebnissen in Bezug auf Anzahl und Kontaktstärke zu den mittels Okklusionsfolie erzielten Ergebnissen. Heuser et al. zufolge ist es zwar geeignet um Vorkontakte zu detektieren, nicht jedoch zur Aufzeichnung der statischen Okklusion (Heuser et al. 2020).

Bei der klinischen Reproduzierbarkeit des GEDAS Systems stellten Hützen et al. über den Kappa-Wert eine Reproduzierbarkeit der Registrare zwischen 0,9 und 1,0 fest (Hützen et al.

2006). Wie in Kapitel 5.1 bereits erwähnt, wurde hier jedoch als nachteilig festgestellt, dass manche Probanden unterschiedlich in der Stärke zubissen und somit Kontaktpunkte unter den Schwellwert rutschten, wodurch sie nicht mehr als Kontaktpunkte gewertet wurden.

In Bezug auf die virtuelle realdynamische Okklusion zeichneten Ruge et al. mehrere Kauvorgänge auf, bei denen ein Gummibärchen nur rechts oder nur links gekaut werden durfte. Alle in der Dynamik auftretenden Kontakte wurden ausgehend von der habituellen Interkuspidation erfasst und bildlich auf der Zahnreihe festgehalten. Es konnte so gezeigt werden, welche Bereiche beim Kauen eine Rolle spielten und welche vom Okkludieren ausgenommen waren. Neben der räumlichen Kontaktpunktverteilung wurde auch wie in der vorliegenden Arbeit die Häufigkeit der Zahnnutzung farblich dargestellt. Über die Kauzyklen hinweg wurde gezählt, welche Zahnbereiche sich besonders annäherten, und je nach Häufigkeit von rosa und dunkel- bis hellblau markiert. Die 10% der Kontakte, die am häufigsten auftraten, wurden rot dargestellt (Ruge et al. 2014). Über dieses Verfahren konnte optisch ermittelt werden, wo sich die häufigsten Kontakte befinden, eine statistische Auswertung liegt in dieser Veröffentlichung allerdings nicht vor.

Ein entscheidender Unterschied zwischen der analogen Okklusion im Mund oder auch im Artikulator zur digitalen Okklusion besteht darin, dass es keinen „Okklusionskontakt“ im Sinne eines klaren „Kontaktes“ gibt. Vielmehr interagieren digitale Punktwolken der rekonstruierten Dreiecksnetze miteinander. Nähern sich die virtuellen Modelle des Ober- und Unterkiefers einander an, kommt es im Gegensatz zur realen Okklusion nicht zu einer Berührung der Modelle, die ein Abstoppen der Bewegung nach sich zieht. Die virtuellen Flächen durchdringen sich, was im Realen unmöglich ist. Daher stellt sich auch die Frage, ab welcher Annäherung der Modelle zueinander ein Okklusionskontakt auch als ein solcher gesehen wird (Kordaß/Ruge 2019a, 2019b). Nach Kordaß und Ruge bestehe die Lösung darin, „die Verengung des Spaltraums zu quantifizieren“ (Kordaß/Ruge 2019a). Dabei muss ein Bereich definiert werden, ab dem ein Kontakt auch als Kontakt gewertet werden kann. Abhängig ist dieser Bereich unter anderem auch vom Auflösungsvermögen der verwendeten Systeme. Vom Auflösungsvermögen des Scanners hängt ab, mit welcher Auflösung die digitalen Modelle generiert werden können, und vom Auflösungsvermögen der elektronischen Bewegungsmesssysteme hängt ab, wie gut die Auflösung der Bewegung selbst ist und wie gut die Ankopplung an die virtuelle Welt stattgefunden hat. Eine genaue Aussage darüber zu treffen, mit welcher Genauigkeit eine solche Okklusionsanalyse durchzuführen ist, ist schwierig (Kordaß/Ruge 2019a). Als ersten Anhaltspunkt konnten aus einer

Grundlagenanalyse, bei der Ober- und Unterkiefer eingescannt und mit Bewegungsdaten gekoppelt wurden, 50-70 μm gewonnen werden (Kordaß/Ruge 2019a, 2019b). 50 μm wurden auch in der vorliegenden Promotionsarbeit als Schwellwert gewählt, ab der eine Annäherung der digitalen Modelle als „Kontakt“ zu werten ist.

5.2.3 Erzielte Ergebnisse bei der Konturabweichung zwischen Extra- und Intraoralscanner

Für den Oberkiefer ergab sich eine mittlere Abweichung in der ermittelten Oberflächenkonfiguration von 40,72 μm und eine Standardabweichung von 20,40 μm . Für den Unterkiefer eine mittlere Abweichung von 33,84 μm und eine Standardabweichung von 15,07 μm . Als Referenz diente der Extraoralscanner. Zur Generierung gleicher Messbedingungen, wurden sowohl mit dem Extraoralscanner als auch mit dem Intraoralscanner die Gipsmodelle aller 20 Probanden gescannt. Die so erzielten Ergebnisse gaben den Unterschied zwischen den Scannern in vitro an, zeigten im Vergleich zu anderen Studien aber nicht, welcher Scanner ein sogenanntes „Urmodell“ präziser wiedergab (Ender et al. 2016; Sichwardt 2015). In der vorliegenden Arbeit bestand das Ziel des Vergleichs der Scangenaugigkeit darin, Rückschlüsse zu ziehen, warum die Zahl von Okklusionskontakten gegebenenfalls abweichen können.

Beim Vergleich zwischen Extraoralscan (Gipsmodell über Extraoralscanner eingescannt) und Intraoralscan (Zahnreihe direkt im Mund abgescannt), ergab sich für den Oberkiefer eine mittlere Abweichung von 49,50 μm und eine Standardabweichung von 17,83 μm . Für den Unterkiefer ergab sich eine mittlere Abweichung von 53,30 μm und eine Standardabweichung von 50,73 μm . Die Ergebnisse waren hier etwas schlechter als im Vergleich der Gipsmodelle untereinander. Dies ist dadurch erklärbar, dass nicht dieselben Messbedingungen vorlagen, da einmal das Gipsmodell abgescannt wurde und einmal die Zahnreihe im Mund des jeweiligen Studienteilnehmers. Ob die größeren Konturabweichungen auf eine Ungenauigkeit der Gipsmodelle oder die Messbedingungen in vivo zurückzuführen waren, lässt sich so nur schwer beurteilen. Die hier vergleichsweise schlechteren Ergebnisse im Unterkiefer sind größtenteils auf einen Ausreißer bei einem Probanden zurückzuführen. Möglicherweise lag in diesem Fallbeispiel eine besonders ausgeprägte elastische Verbiegung der Unterkieferspange vor. Während eine Überlagerung der Datensätze aus Extra- und Intraoralscanner der Gipsmodelle problemlos möglich war, ergaben sich hier Schwierigkeiten bei der Überlagerung der Datensätze zwischen Extraoralscan und Intraoralscan in vivo. In Abbildung 62 wird dieses Fallbeispiel nochmals aufgeführt. Abbildung 62b zeigt das Ergebnis der Überlagerung

zwischen Extra- und Intraoralscanner, wobei der Intraoralscan hier direkt im Mund des Probanden stattgefunden hat. Die Abweichung ist deutlich größer als bei Abbildung 62a, wo sowohl beim Extra- als auch beim Intraoralscanner die Digitalisierung der Daten über das Gipsmodell stattgefunden hat. Je dunkler die Farbe im Bild, desto mehr weicht hier der Intraoralscan vom Extraoralscan ab.

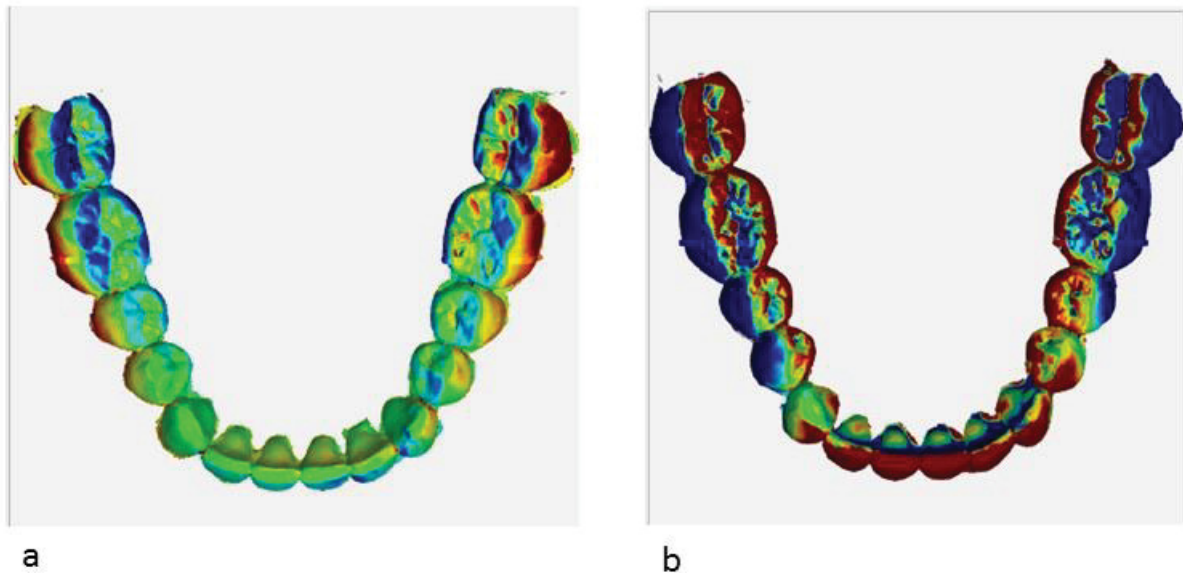


Abbildung 62: Abweichung Extraoralscan (EOS) zu Intraoralscan (IOS).

- a. Überlagerung EOS-IOS, beide Male die Gipsmodelle gescannt
- b. Überlagerung EOS (Gipsmodell) – IOS (im Mund des Probanden)

Die Farbcodierung steht für die Stärke der Abweichung der überlagerten STL-Datensätze zueinander. Referenzdatensatz (Soll-Datei) war der aus dem Extraoralscanner gewonnene STL-Datensatz. Die Farben gelb und orange und rot bedeuten, dass der aus dem Intraoralscanner erhaltene STL-Datensatz (Ist-Datei) oberhalb des Referenzdatensatzes liegt, die Farben in den Blautönen bedeuten, dass der aus dem Intraoralscanner erhaltene Datensatz (Ist-Datei) unterhalb des Referenzdatensatzes (Soll-Datei) liegt. Grün steht für eine an sich geringe Abweichung. Je weiter das Farbspektrum in Richtung dunkelblau oder dunkelrot geht, desto größer ist die Abweichung.

5.2.4 Erzielte Ergebnisse bei der Kontaktpunktauswertung

5.2.4.1 Statik

Die Auswertung der Okklusionskontakte in der Statik erfolgte nach Methode Klinik, Extraoralscan (EOS) und Intraoralscan (IOS). Die Methode Klinik beinhaltete die Anzahl der Okklusionskontakte aus Durchbissregistrar und Fotoanalyse. Die Methode Extraoralscan stand für die Anzahl der Okklusionskontakte der über das Gipsmodell digitalisierten Daten und die Methode Intraoralscan umfasste die Anzahl der Okklusionskontakte über die direkte Datenerfassung im Mund der Studienteilnehmer. Die Bewertung der Übereinstimmung der Anzahl an statischen Okklusionskontakte erfolgte anhand des Interklassen-Korrelationskoeffizienten (ICC). Es wurde abhängig von der ausgewerteten Zahnregion eine durchschnittliche, gute bis hin zu einer sehr guten Zuverlässigkeit zwischen den verschiedenen Methoden erzielt. Im Vergleich zu der Studie von Dias et al. in der nur eine schwache Korrelation zwischen konventionellen und computergestützten Methoden ermittelt wurde (Dias et al. 2020), gelangte man mit den Systemen in der vorliegenden Promotionsarbeit zu den besseren Ergebnissen. Vergleicht man die Ergebnisse von Oberkiefer und Unterkiefer, werden im Unterkiefer laut ICC immer die etwas besseren Werte erlangt. Je näher beim ICC das Ergebnis in Richtung 1 geht, desto besser ist der Wert der Übereinstimmung (zur genauen Definition vgl. Tabelle 5, Kapitel 3.7).

Für die Übereinstimmung der Okklusionskontakte nach Methode Klinik, EOS und IOS ergaben sich beispielsweise die folgenden Werte für den ICC im Oberkiefer: 0,569 im Molarenbereich, 0,733 im Prämolarenbereich und 0,795 im Frontzahnbereich. Im Unterkiefer ergaben sich für den ICC Werte von: 0,682 im Molarenbereich, 0,795 im Prämolarenbereich und 0,795 im Frontzahnbereich. Ähnlich sahen die Ergebnisse auch im paarweisen Vergleich „Klinik-IOS“ und „Klinik-EOS“ aus.

Dass im Unterkiefer die besseren Werte für den ICC erzielt wurden als im Oberkiefer, hängt möglicherweise auch mit den erzielten Konturabweichungen zwischen Extra- und Intraoralscan aus der GOM-Software zusammen. Zwar lag hier einmal ein schlechteres Gesamtergebnis für den Unterkiefer vor (mittlere Konturabweichung von 53,30 µm im Unterkiefer und 49,50 µm im Oberkiefer zwischen den Methoden EOS am Gipsmodell und IOS in vivo), jedoch war dieses vor allem auf einen Ausreißer zurückzuführen, der in Kapitel 5.2 und in Abbildung 62 beschrieben wurde. Im Allgemeinen lagen auch bei der Konturabweichung im Unterkiefer die besseren Werte als im Oberkiefer vor. Die Einzelergebnisse sind zur besseren Nachvollziehbarkeit im Anhang tabellarisch aufgeführt (Kapitel 8.1). Bei den

Konturabweichungen zwischen Extra- und Intraoralscanner am Gipsmodell wurde direkt im Unterkiefer das bessere Gesamtergebnis erzielt (mittlere Abweichung von 33,84 μm im Unterkiefer und 40,72 μm im Oberkiefer).

Nach Analyse durch Bland-Altman-Diagramme kam es weder beim Vergleich der Methoden Klinik und Extraoralscan noch beim Vergleich der Methoden Klinik und Intraoralscan zu systematischen Abweichungen.

Die Methode Klinik zählte meist mehr okklusale Kontaktpunkte als die Methode EOS. Im Oberkiefer zählte sie meist weniger Kontaktpunkte als die Methode IOS, im Unterkiefer meist mehr als die Methode IOS. Beim Vergleich der Methoden Extra- zu Intraoralscan wurden bei der Methode EOS bei allen Zahnbereichen weniger statischen Kontaktpunkte gezählt als bei der Methode IOS. Dass bei der Methode EOS durchschnittlich am wenigsten okklusale Kontaktpunkte gezählt wurden, ist möglicherweise durch der Starrheit der Gipsmodelle bedingt, oder könnte mit der manuellen Fixation der Gipsmodelle durch das Easy-Fix-System (Abbildung 15) im Scanner in Zusammenhang stehen.

Nachfolgend sollen anhand von Bildern exemplarisch die Ergebnisse dreier Studienteilnehmer als Fallbeispiele diskutiert werden. Alle weiteren Bilderergebnisse sind im Anhang (Kapitel 8.2) zu finden.

Die farbliche Hinterlegung in blau, orange und grau steht jeweils für:

- Ergebnisse aus Methode Klinik in der statischen Okklusion, bestehend aus
 - a. GEDAS
 - b. Foto
 - c. GEDAS+Foto
- Ergebnisse aus Methode EOS in der statischen Okklusion
- Ergebnisse aus Methode IOS in der statischen Okklusion

Die Durchführung der Methode Klinik erfolgte mittels Okklusionsfolie und Fotoanalyse sowie über die Auswertung der Bissregistratur über das GEDAS System. Die Methode Extraoralscan (EOS) wurde mit Hilfe einer konventionellen Abformung und anschließender Digitalisierung des Gipsmodells mit Hilfe des Zirkonzahn-Scanners durchgeführt, die Methode Intraoralscan (IOS) mit Hilfe des Trios-Scanners.

In Fallbeispiel 1 (Abbildung 63) ist eine gute bildliche Übereinstimmung zwischen allen Varianten der Okklusionsanalyse zu sehen. Bei genauerer Betrachtung fällt im Vergleich

zwischen der Methode Extra- und der Methode Intraoralscan auf, dass die Kontakte bei Methode Intraoralscan etwas stärker angezeigt werden. Dies war bei fast allen Probanden so zu beobachten. Ursächlich können verschiedene anatomische und materialbedingte Faktoren sein, zum Beispiel die Starrheit der Gipsmodelle. Biologische Faktoren wie die parodontale Eigenbeweglichkeit der Zähne, die Verbiegung der Unterkieferspange, die Resilienz im Bereich der Kiefergelenke oder der Einfluss der Aufbisskraft können am Gipsmodell nicht berücksichtigt werden (Hugger 2019; Reiber/Trbola 1993). Des Weiteren fällt auf, dass im ersten Fallbeispiel vor allem bei den Zähnen 12 und 42 bei Methode Extraoralscan Kontakte angezeigt werden und bei Methode Intraoralscan nicht. Vergleicht man beide Varianten mit GEDAS und der Fotoanalyse und nimmt dies als Standard, ist an den Zähnen 12 und 42 wahrscheinlich kein Kontakt vorhanden. Zudem ist demnach auch kein Kontakt an den Zähnen 13 und 43 vorhanden. Diese Unterschiede können einerseits wie oben genannt mit den biologischen Faktoren und der Starrheit des Gipsmodells zusammenhängen, andererseits aber auch damit, dass der Proband seine Okklusion nicht jedes Mal zu 100% gleich eingenommen hat. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Abweichung der Messsysteme zueinander.

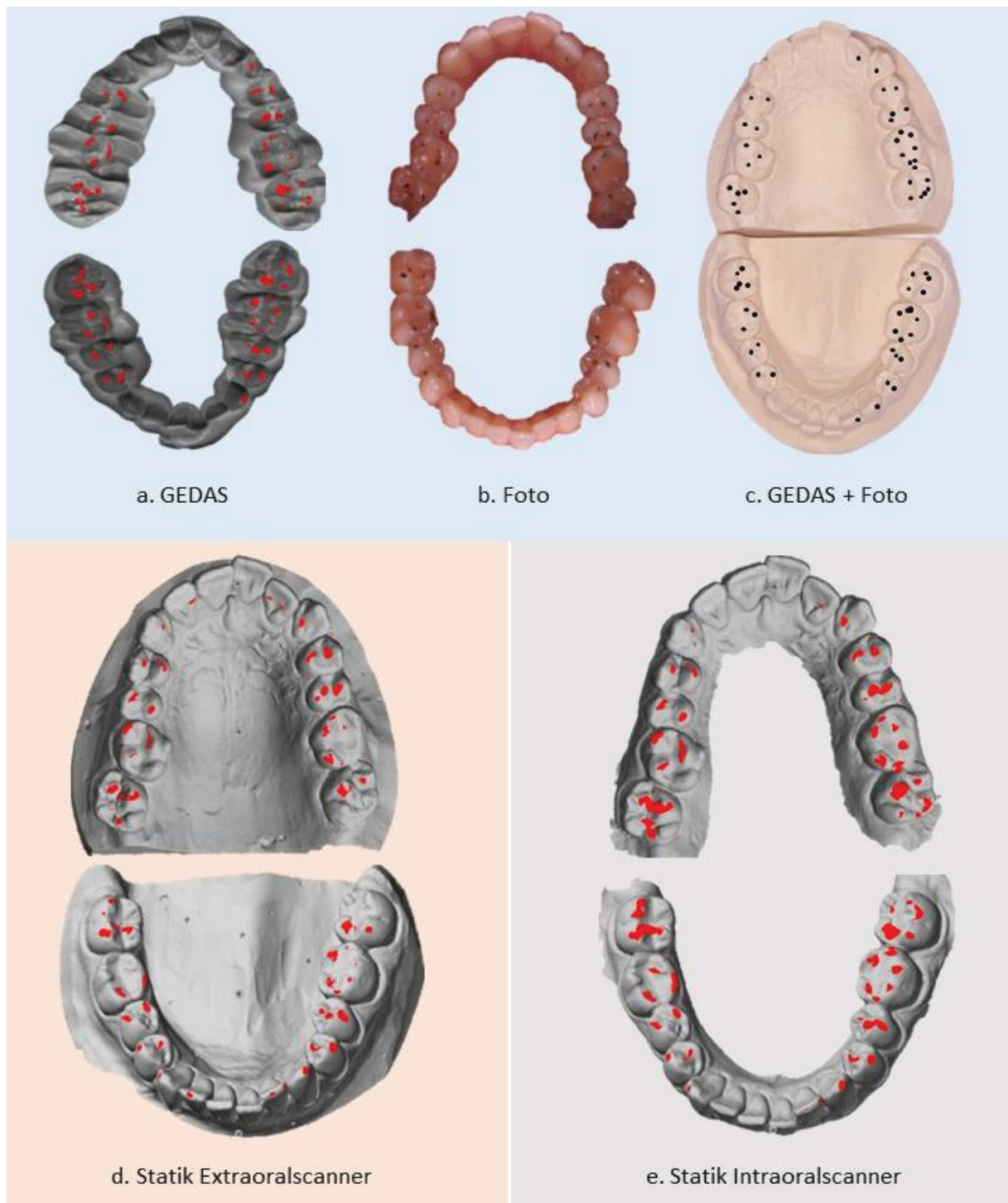


Abbildung 63: Fallbeispiel 1: Bildvergleich der Ergebnisse aus den Methoden Klinik, EOS und IOS in der statischen Okklusion.

Zu sehen ist eine gute Übereinstimmung der statischen Okklusionskontakte zwischen den drei Methoden. Auch innerhalb der Methode Klinik stimmen Fotoanalyse und Bissregistrat in Anzahl und Lokalisation von Kontaktpunkten weitestgehend überein.

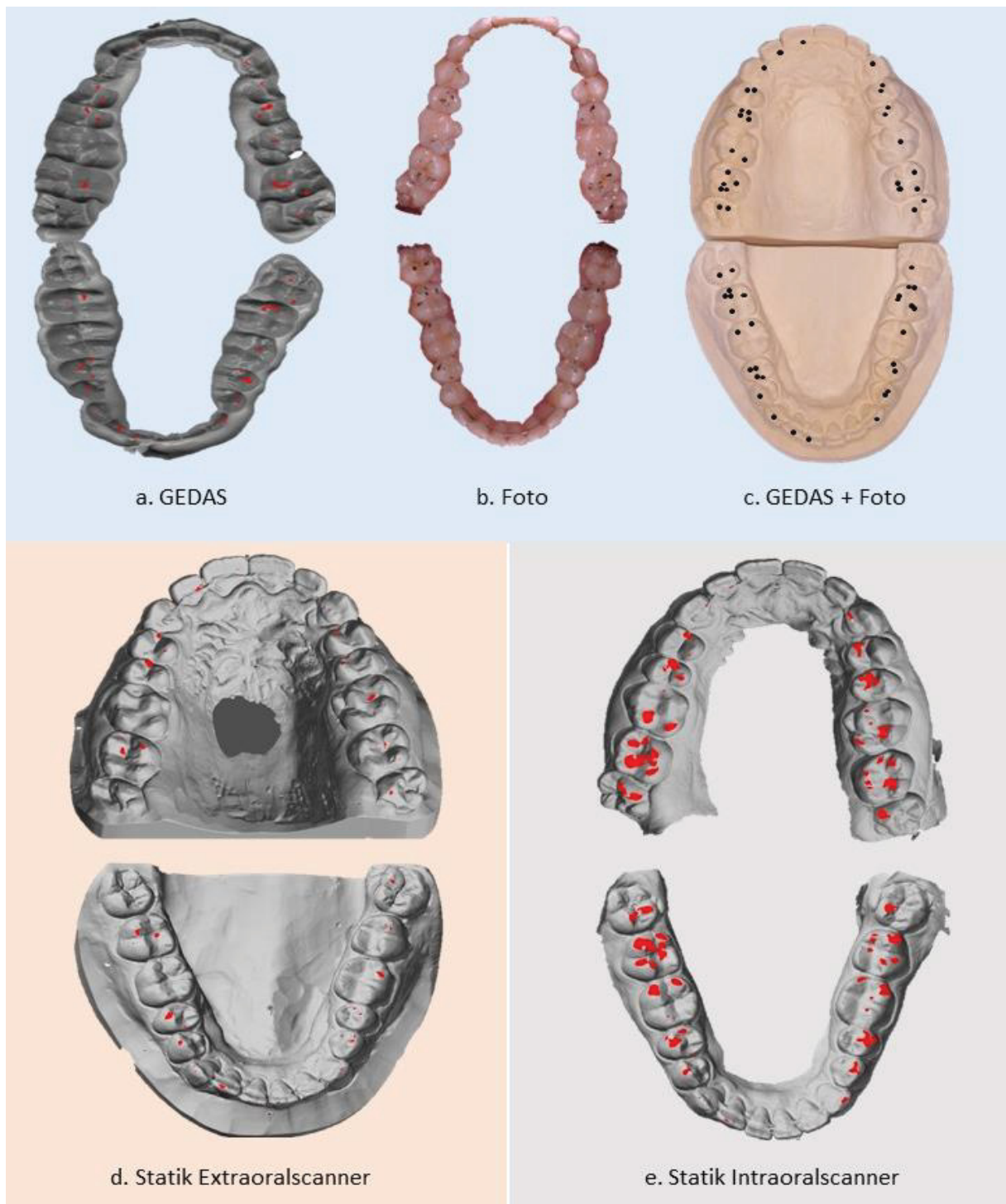


Abbildung 64: Fallbeispiel 2: Bildvergleich der Ergebnisse aus den Methoden Klinik, EOS und IOS in der statischen Okklusion.

Zu sehen ist eine gute Übereinstimmung der statischen Okklusionskontakte zwischen den Methoden GEDAS und EOS sowie zwischen der Fotoanalyse und Methode IOS, jedoch nicht untereinander.

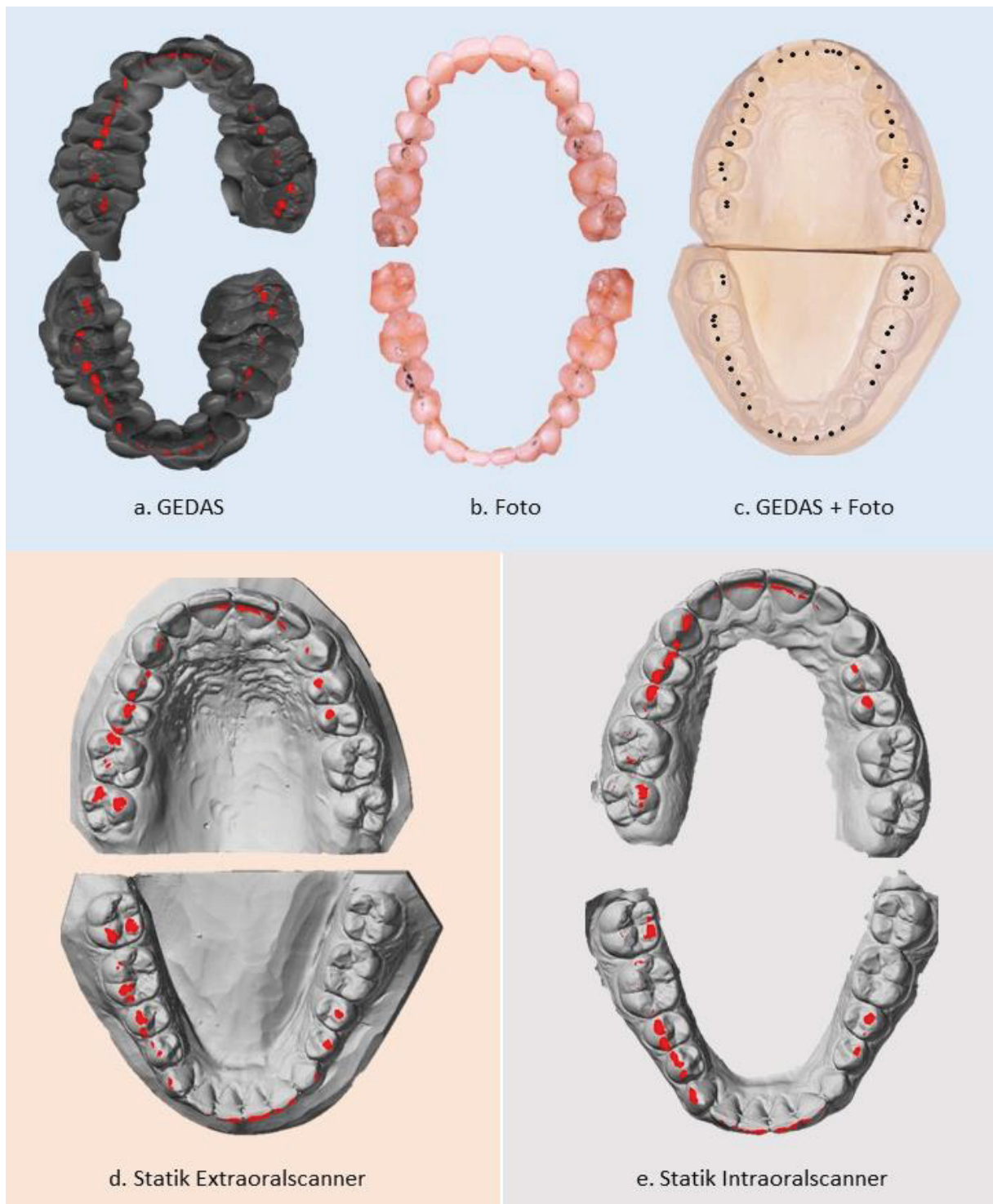


Abbildung 65: Fallbeispiel 3: Bildvergleich der Ergebnisse aus den Methoden Klinik, EOS und IOS in der statischen Okklusion.

Zu sehen ist eine gute Übereinstimmung der statischen Okklusionskontakte innerhalb der klinischen Aufzeichnungen sowie zwischen den Methoden EOS und IOS, jedoch nicht untereinander.

In Fallbeispiel 2 (Abbildung 64) sind die statischen Okklusionskontakte zwischen den Methoden GEDAS und Extraoralscan sowie zwischen der Fotoanalyse und der Methode Intraoralscan augenscheinlich übereinstimmend. Möglicherweise konnte der Studienteilnehmer die Position der habituellen Okklusion nicht immer gleich einnehmen. Es besteht auch die Möglichkeit, dass der Proband beim Kommando „In den Schlussbiss gehen, aufbeißen und halten“ nicht bei jeder Messung gleich fest zugebissen hat. Bei den Bissregistraten hätte dies zur Folge, dass einige Kontakte unter den Schwellwert rutschten und so nicht mehr gewertet wurden (Kapitel 5.1 und Abbildung 61). Das Gipsmodell konnte aufgrund seiner Starrheit womöglich weniger „fest“ über die Spannvorrichtung im Scanner in Okklusion gebracht werden (Abbildung 15), als der Studienteilnehmer muskulär gesteuert beim Bukkalscan für den Intraoralscan und bei der Aufzeichnung der Okklusionskontakte mittels Okklusionsfolie zugebissen hat. Dies würde erklären, warum es jeweils zwischen den Methoden GEDAS und Extraoralscan und zwischen der Fotoanalyse und der Methode Intraoralscan zu einer weitest gehenden Übereinstimmung der statischen Okklusionskontakte gekommen ist. Für die Beurteilung wurden sowohl die Ergebnisse aus GEDAS als auch aus der Fotoanalyse herangezogen, wobei die Entscheidung hier eher zugunsten der Fotoanalyse ausfiel, da die Vermutung nahe lag, dass beim Silikonregistrator nicht vollends durchgebissen wurde. Eine weitere Möglichkeit besteht auch in der Abweichung der Messmethode Extraoralscan zur Messmethode Intraoralscan. Diese erklärt aber nicht, warum jeweils eine Methode mit dem Bissregistrator und die andere mit der Fotoanalyse weitestgehend übereinstimmt.

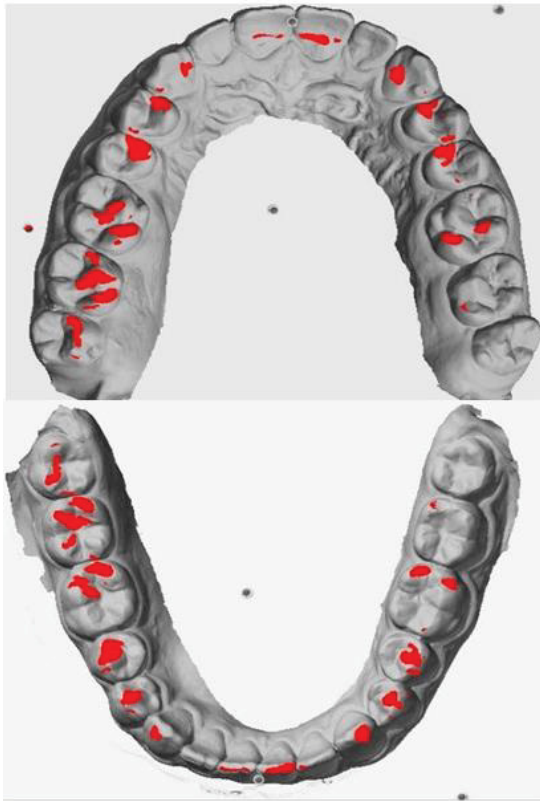
In Fallbeispiel 3 (Abbildung 65) sind sich die Ergebnisse aus Methode GEDAS und der Fotoanalyse (beides Methode Klinik) sehr ähnlich und ebenfalls die Ergebnisse aus den Methoden Extra- und Intraoralscan. Nicht ganz so deutlich wie bei GEDAS, aber bei stärkerer Vergrößerung im Foto dennoch erkennbar sind hier jeweils Kontakte an den Molaren des zweiten und dritten Quadranten gegeben. Weder bei der Okklusionsanalyse über den Extra- noch über den Intraoralscanner sind diese Kontakte vorhanden. Hier stellt sich nun wieder die Frage, ob beide Scanner zu wenige okklusale Kontakte und damit ein „falsches“ Ergebnis anzeigten, oder ob bei der Aufnahme der klinischen Okklusionskontakte anders zugebissen wurde, als die Gipsmodelle zueinander in Okklusion gebracht wurden und als dies beim Bukkalscan beim Intraoralscan der Fall war. Es ist davon auszugehen, dass der Proband nicht reproduzierbar aufgebissen hat und eine gewisse Freiheit in der Okklusionsfindung aufwies.

5.2.4.2 Dynamik

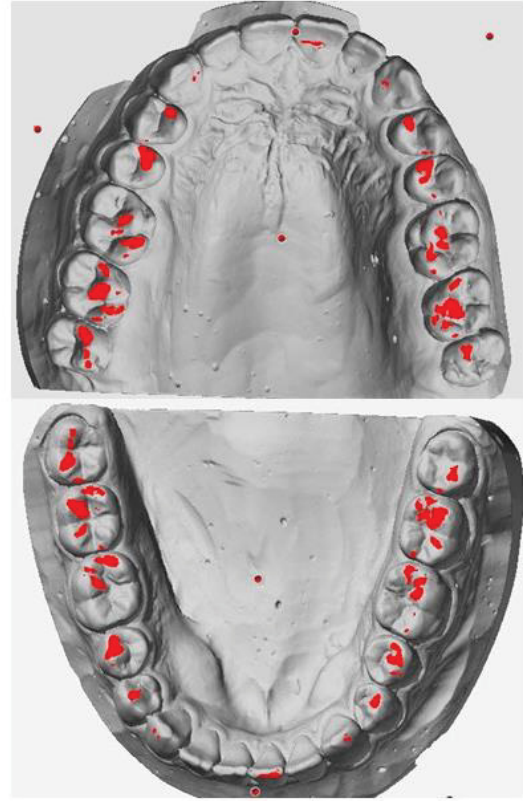
Ähnlich wie bei Ruge et al. oder Kordaß et al. wurden die Probanden angewiesen, ein Gummibärchen nur auf einer bestimmten Seite (Kordaß/Ruge 2019a; Ruge et al. 2014) oder ohne weitere Anweisung zu kauen. In der Promotionsarbeit fanden vor allem die letzten zehn Kauzyklen Betrachtung, da es gegen Ende des Kauvorgangs immer mehr zu einer okklusalen Annäherung zwischen den Zähnen des Oberkiefers und den Zähnen des Unterkiefers kommt. Über diese letzten zehn Kauzyklen hinweg wurde gezählt, wie oft welche Zahnareale okkludierten. Die Messung erfolgte mit der WINJAW⁺ RC Software (Fa. zebris Medical). Der Punkt mit den am häufigsten vorkommenden Kontakten wurde auf 100% gesetzt und rot markiert. Davon abgestuft wurden Kontakte, die zwar vorhanden waren, aber weniger oft auftraten. Je nach auftretender Häufigkeit wurden diese in den Farben rosa, dunkel- oder hellblau markiert. Über die Farbcodierung konnte betrachtet werden, welche Zahnareale prozentual gesehen am meisten okkludierten. Bei jedem Studienteilnehmer wurden sowohl bei der Methode Extraoralscan als auch bei der Methode Intraoralscan jeweils für den Molaren-, Prämolaren und Frontzahnbereich alle rot markierten Bereiche gezählt und tabellarisch festgehalten. Aus der Anzahl an auftretenden Hauptkontakte wurde die Betragsdifferenz beider Methoden für jeden Zahnbereich gebildet. Ausgewertet wurde der Mittelwert der Betragsdifferenz (mittlere Betragsdifferenz) aller 20 Studienteilnehmer.

Für die Kontaktpunktverteilung an den Oberkiefermolaren ergab sich in der Dynamik zwischen den Methoden Extraoralscan und Intraoralscan eine mittlere Betragsdifferenz von 1,4 für das freie Kauen, 1,15 für das angewiesene Rechtskauen und 1,45 für das angewiesene Linkskauen. Beim angewiesenen Linkskauen differierte die Anzahl der okkludierenden Areale stärker als beim angewiesenen Rechtskauen oder beim freien Kauen. Für die Kontaktverteilung an den Oberkieferprämolaren wurde eine mittlere Betragsdifferenz von 0,65 für das freie Kauen, 0,55 für das angewiesene Rechtskauen und 0,75 für das angewiesene Linkskauen erzielt. An den Oberkieferfrontzähnen wurden Betragsdifferenzen von 0,85 für das freie Kauen, 0,4 für das angewiesene Rechtskauen und 0,8 für das angewiesene Linkskauen ermittelt. Im Unterkiefer ergaben sich ähnliche Werte: Die mittleren Betragsdifferenzen lagen bei 1,55 für das freie Kauen und das angewiesene Rechtskauen sowie 1,8 für das angewiesene Linkskauen bei den Molaren. Die Anzahl der okkludierenden Areale differierte beim angewiesenen Linkskauen wiederum mehr als beim angewiesenen Rechtskauen oder beim freien Kauen. Die Unterkieferprämolaren erzielten mittlere Betragsdifferenzen von 0,75 für das freie Kauen und angewiesene Rechtskauen und 0,7 für das angewiesene Linkskauen. Für die

Unterkieferfrontzähne wurden Werte von 0,8 für das freie Kauen, 0,6 für das angewiesene Rechtskauen und 1,25 für das angewiesene Linkskauen erzielt (Kapitel 4.3). Im Molarenbereich wurden für beide Kiefer mittlere Betragsdifferenzen von einem Wert ≥ 1 erzielt. Wie in Tabelle 18 Tabelle 23 zu sehen ist, könnten die vergleichsweise hohen Werte durch die großen Betragsdifferenzen bei den Probanden 9,19 und 20 erklärbar sein. Greift man sich die Bilder von Proband 20 exemplarisch heraus und betrachtet das Bild der statischen Kontaktpunktverteilung, fällt auf, dass hier insgesamt sehr viele und sehr stark ausgeprägte Kontakte vorhanden waren (Abbildung 66). Ähnlich sah es auch bei den Probanden 9 und 19 aus. Möglicherweise lag bei diesen Studienteilnehmern bedingt durch die ausgeprägte Anzahl an okklusalen Kontakten kein bevorzugtes Kauareal vor, sondern variierte von Messung zu Messung. Zudem lag auch keine konkrete Anweisung vor, mit welchem Zahnareal das Gummibärchen gekaut hätte werden sollen. Bei der Methode Intraoralscan lagen bei allen drei Kauversuchen die Hauptkontakte vorwiegend im Prämolarenbereich, während sie bei Methode Extraoralscan fast ausschließlich im Molarenbereich zu finden waren (Abbildung 67 und Abbildung 68) Alternativ könnte die Abweichung auch durch die verwendeten Systeme bedingt sein.



**a: statische Kontaktpunktverteilung
bei der Methode IOS**



**b: statische Kontaktpunktverteilung
bei der Methode EOS**

Abbildung 66: Statische Kontaktpunktverteilung bei den Methoden IOS und EOS am Probandenbeispiel.

Bei Proband 20 liegt sowohl bei der Methode IOS als auch bei der Methode EOS eine ausgeprägte statische Kontaktpunktsituation sowohl im Molaren-, Prämolaren- und Frontzahnbereich vor.

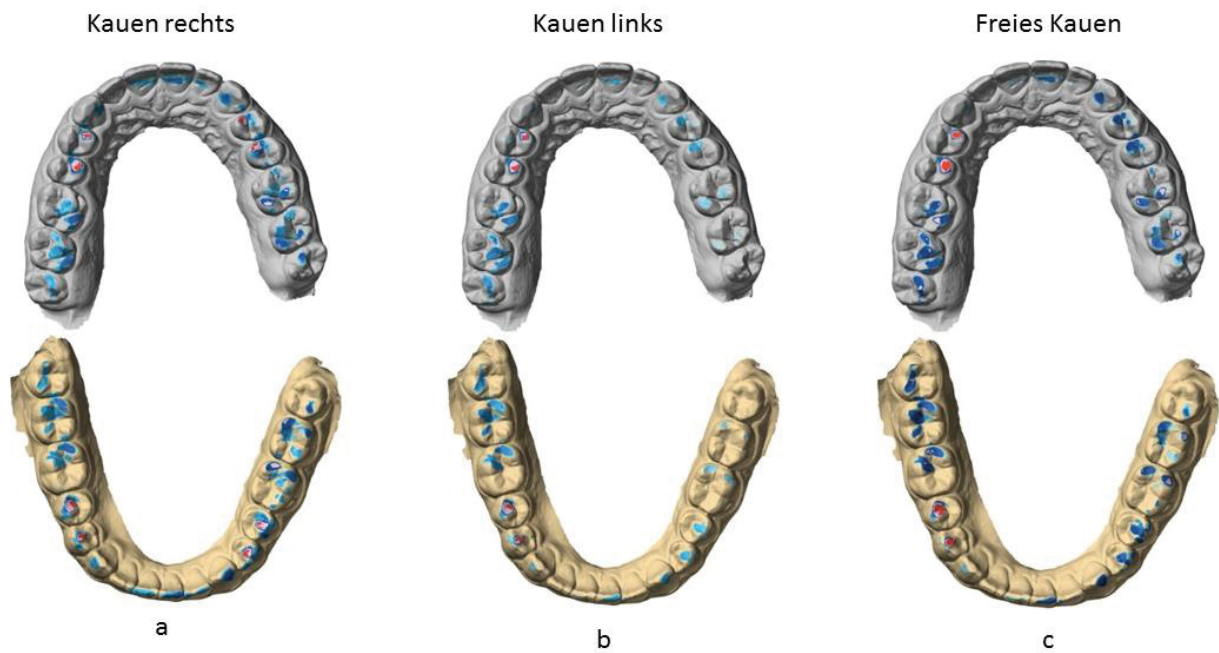


Abbildung 67: Fallbeispiel 1 zur dynamischen Kontaktpunktverteilung bei Methode IOS.

Die Hauptkontakte sind jeweils in rot dargestellt.

- a. angewiesenes Rechtskauen
- b. angewiesenes Linkskauen
- c. freies Kauen

Bei allen drei Kauversuchen okkludierte der Prämolarenbereich am stärksten. Beim Rechtskauversuch war dies sowohl auf der Arbeits- als auch auf der Balanceseite der Fall. Beim Linkskauversuch und beim freien Kauen okkludierte vor allem die Balanceseite.

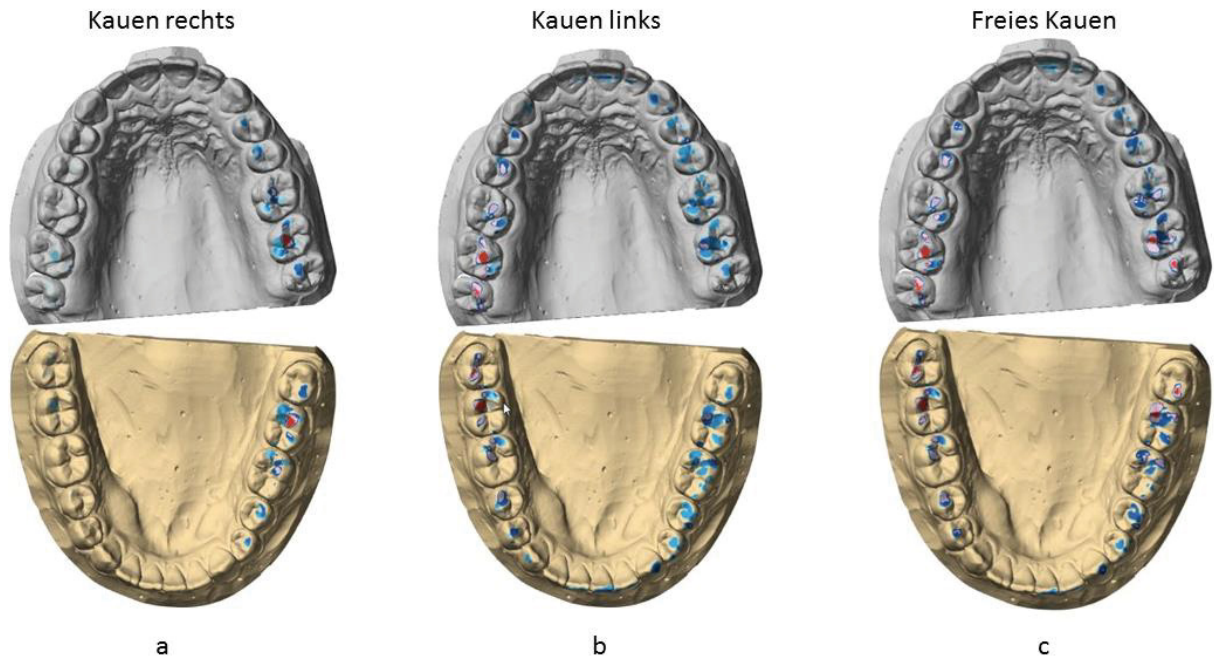


Abbildung 68: Fallbeispiel 1 zur dynamischen Kontaktpunktverteilung bei Methode EOS.

Die Hauptkontakte sind jeweils in rot dargestellt.

- a. angewiesenes Rechtskauen
- b. angewiesenes Linkskauen
- c. freies Kauen

Bei allen drei Kauversuchen okkludierte der Molarenbereich am stärksten. Beim Rechts- und beim Linkskauversuch war dies auf der Balanceseite der Fall. Beim freien Kauen okkludierten beide Kauseiten im Molarenbereich.

Bei Abbildung 67 ist des Weiteren auffällig, dass beim Rechtskauversuch sowohl Kontakte auf der Arbeits- als auch auf der Balanceseite vorzufinden ist. Ruge et al. kamen bei ähnlichen Kauversuchen zu dem Ergebnis, dass hauptsächlich die Zähne auf der Balanceseite okkludierten (Ruge et al. 2014). Es liegt die Vermutung nahe, dass bei diesem Studienteilnehmer beim Rechtskauversuch nicht ausschließlich auf der rechten Seite gekaut wurde. Der nachfolgende Linkskauversuch sowie der Rechts- und Linkskauversuch bei der Methode Extraoralscan (Abbildung 68) bestätigen wiederum das Ergebnis von Ruge et al. mit der vornehmlich okkludierenden Balanceseite (Ruge et al. 2014).

Eine weitere Erklärung für die jeweils höheren Betragsdifferenzen an den Molaren des Ober- und Unterkiefers im Gegensatz zu den Prämolaren und Frontzähnen besteht auch darin, dass die Molaren aufgrund ihrer Form vor allem für das Zerquetschen und Zerdrücken von Nahrung geeignet sind (Türp et al. 2006). Voraussichtlich hat bei den meisten Probanden die

hauptsächliche Kautätigkeit im Bereich der Molaren stattgefunden, weswegen es hier auch zu größeren Abweichungen kam als bei den weniger verwendeten Zahnbereichen.

Wie auch bei der Statik sollen im Folgenden zwei weitere bildliche Fallbeispiele zur dynamischen Kontaktpunktverteilung diskutiert werden. Unterschieden wurde dabei immer zwischen den Methoden Extraoralscan und Intraoralscan sowie zwischen drei Kauversuchen (Abbildung 69 bis Abbildung 72):

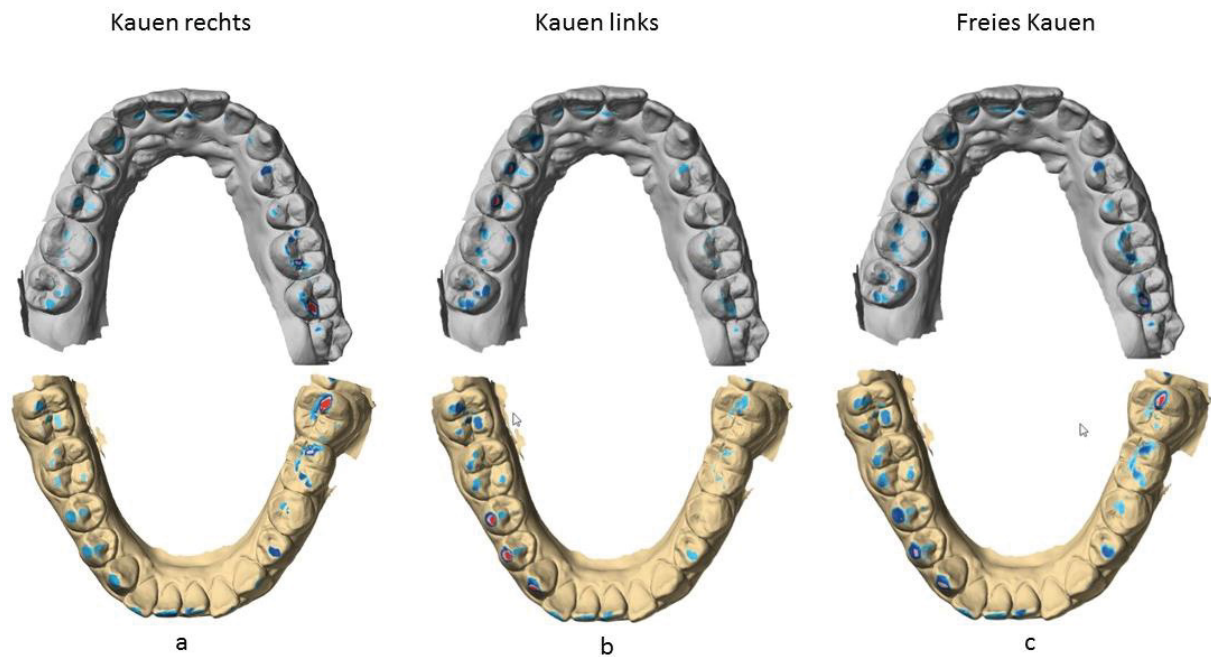


Abbildung 69: Fallbeispiel 2 zur dynamischen Kontaktpunktverteilung bei der Methode IOS.

Die Hauptkontakte sind jeweils in rot dargestellt.

- a. angewiesenes Rechtskauen
- b. angewiesenes Linkskauen
- c. freies Kauen

Der am häufigsten vorkommende Kontakt beim Kauversuch mit einem Gummibärchen liegt hier beim angewiesenen Rechtskauen auf der Balance-Seite an Zahn 37, beim angewiesenen Linkskauen liegen die am häufigsten auftretenden Kontakte im Prämolarenbereich des vierten Quadranten, ebenfalls auf der Balance-Seite. Beim freien Kauen liegt der Hauptkontakt ebenso wie beim Rechtskauversuch an Zahn 37.

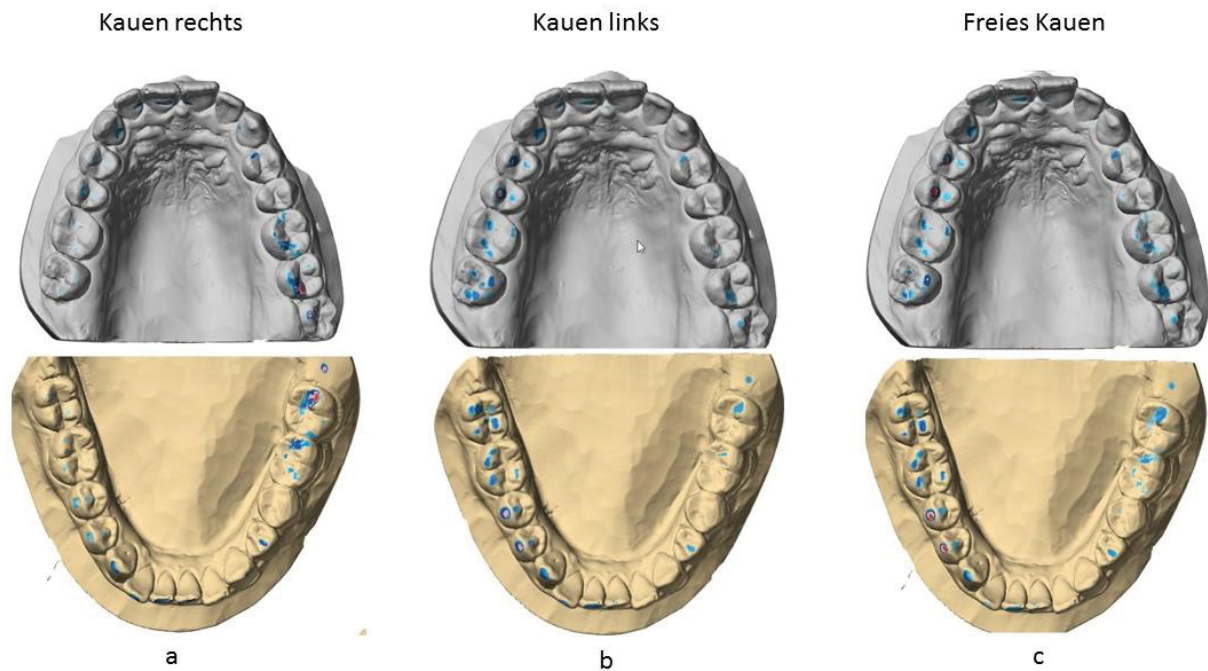


Abbildung 70: Fallbeispiel 2 zur dynamischen Kontaktpunktverteilung bei der Methode EOS.

Die Hauptkontakte sind jeweils in rot dargestellt.

- a. angewiesenes Rechtskauen
- b. angewiesenes Linkskauen
- c. freies Kauen

Der am häufigsten vorkommende Kontakt beim Kauversuch mit einem Gummibärchen liegt hier beim angewiesenen Rechtskauen auf der Balanceseite an Zahn 37, beim angewiesenen Linkskauen liegen die am häufigsten auftretenden Kontakte im Prämolarenbereich des vierten Quadranten, ebenfalls auf der Balanceseite. Beim freien Kauen liegen die Hauptkontakte ebenso wie beim Linkskauversuch im Prämolarenbereich des vierten Quadranten.

Bei Fallbeispiel 2 lag beim Kauversuch mit dem Gummibärchen (Fallbeispiel 2, Abbildung 69 und Abbildung 70) beim Rechtskauversuch der Hautkontakt an Zahn 37. Zahn 37 war in diesem Falle auf der Balanceseite. Beim angewiesenen Linkskauen lagen die Hauptkontakte im Prämolarenbereich des vierten Quadranten, also wiederum auf der Balanceseite. Das Ergebnis ist im vorliegenden Fall bei beiden Scannern gleich. Das Vorkommen der Hauptkontakte auf der Balanceseite hängt vermutlich damit zusammen, dass sich auf der Arbeitsseite das Kaugut zwischen den Zähnen befindet und diese Seite somit weniger okkludiert. Dieses Fallbeispiel bestätigt wiederum die Vermutung von Ruge et al. (Ruge et al. 2014), dass vornehmlich die Balanceseite okkludiert. Beim freien Kauversuch differierten die Ergebnisse zwischen den Methoden Extra- und Intraoralscan. Bei der Methode Intraoralscan entsprachen die Hauptkontakte denen des angewiesenen Rechtskauens, bei der Methode Extraoralscan

entsprachen die Hauptkontakte denen des angewiesenen Linkskauens. Es ist davon auszugehen, dass beim freien Kauen das Kaugut zwischen den Seiten hin und her geschoben wurde und bei diesem Studienteilnehmer keine präferierte Kauseite vorlag, da das Ergebnis des freien Kauens einmal mit dem des Rechtskauversuchs und einmal mit dem des Linkskauversuchs übereinstimmte. Die beim freien Kauen auftretenden Hauptkontakte waren jeweils reproduzierbar mit denen der Rechts- bzw. Linkskauversuche.

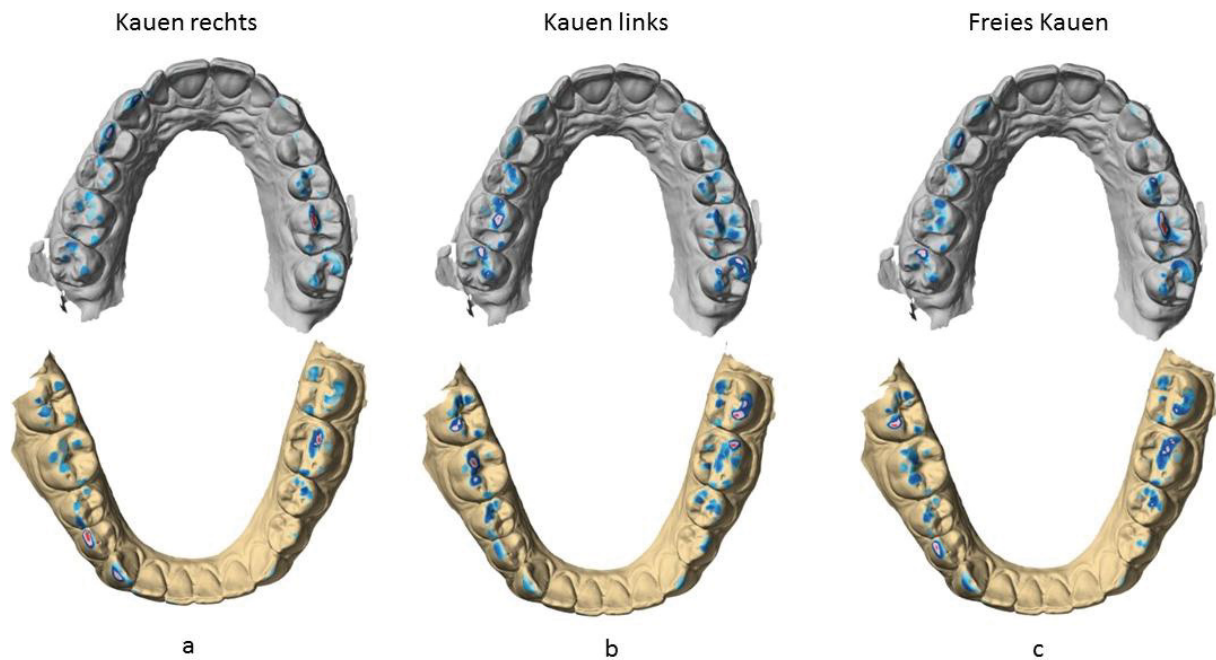


Abbildung 71: Fallbeispiel 3 zur dynamischen Kontaktpunktverteilung bei der Methode IOS.

Die Hauptkontakte sind jeweils in rot dargestellt.

- a. angewiesenes Rechtskauen
- b. angewiesenes Linkskauen
- c. freies Kauen

Die am häufigsten vorkommenden Kontakte beim Rechtskauversuch liegen an den Vierern der Arbeitsseite sowie im Molarenbereich auf der Balanceseite. Beim Linkskauversuch liegen die am häufigsten vorkommenden Kontakte beidseits im Molarenbereich. Beim freien Kauen liegen die am häufigsten verwendeten Kontakte im Molarenbereich des 3. Quadranten sowie im Molaren- und Prämolarenbereich des 4. Quadranten.

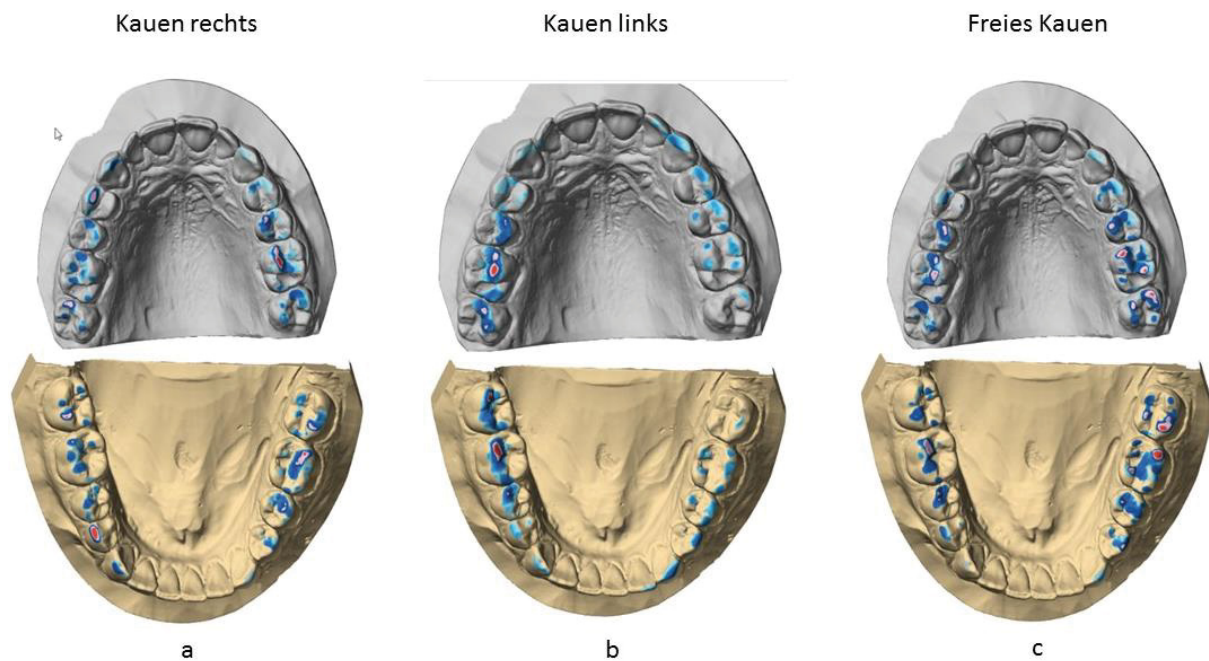


Abbildung 72: Fallbeispiel 3 zur dynamischen Kontaktpunktverteilung bei der Methode EOS.

Die Hauptkontakte sind jeweils in rot dargestellt.

- a. angewiesenes Rechtskauen
- b. angewiesenes Linkskauen
- c. freies Kauen

Die am häufigsten vorkommenden Kontakte beim Rechtskauversuch liegen am Zahn 44 sowie im Molarenbereich auf der Balanceseite. Beim Linkskauversuch liegen die am häufigsten vorkommenden Kontakte beidseits im Molarenbereich. Beim freien Kauversuch liegen die am häufigsten verwendeten Kontakte im Molarenbereich des 3. Quadranten sowie im Molarenbereich des 4. Quadranten.

Bei Fallbeispiel 3 stimmen die am häufigsten verwendeten Kontaktareale bei den Methoden Extra- und Intraoralscan weitestgehend überein. Bei der Methode Intraoralscan waren es beim Rechtskauversuch die Molaren der Balanceseite sowie die Vierer der Arbeitsseite, die am meisten okkludierten. Beim Linkskauversuch waren es die Molaren beider Seiten. Das Ergebnis des freien Kauversuchs wies Hauptkontakte sowohl aus dem Rechts- als auch aus dem Linkskauversuch auf (Abbildung 71). Bei der Methode Extraoralscan lagen die Hauptkontakte beim Rechtskauversuch ebenso wie bei der Methode Intraoralscan an den Vierern der Arbeitsseite sowie an den Molaren der Balanceseite. Beim Linkskauversuch wurden die meisten Kontakte an den Molaren der Balanceseite gezählt. Beim freien Kauversuch waren wieder Hauptkontakte aus beiden vorangehenden Kauversuchen vorzufinden, allen voran im Molarenbereich des 2. und 3. Quadranten (Abbildung 72). Insgesamt wurden bei diesem Studienteilnehmer die Anweisungen des ausschließlichen Rechts- oder Linkskauens

voraussichtlich nicht komplett eingehalten, das Kaumuster schien aber an sich reproduzierbar zu sein, da beide Methoden ähnliche Ergebnisse aufzeigten.

6 SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Die klassische Okklusionsanalyse bleibt nach wie vor eine Grundlage, die durch digitale Methoden komplementär ergänzt und spezifiziert werden kann. Auch wenn nicht jedes System hundertprozentig genau arbeitet, ergibt sich durch die zunehmende Digitalisierung ein Zugewinn an Informationen. Es können eine Reihe an Faktoren gemessen werden, die analog nicht erfasst werden können. Durch die dreidimensionale Bewegung und Inspektion von Modellen innerhalb der Software sowie das Erzeugen von Inspektionsschnitten können Bereiche betrachtet werden, die am realen Modell nicht einsehbar sind. Mit der Kopplung von Modelldaten mit Bewegungsdaten ist es gelungen einen Einblick in die dynamische Komponente der Okklusion zu erhalten. Es können Informationen darüber gewonnen werden, welche Zahnareale beim Kauvorgang am häufigsten Verwendung finden und welche möglicherweise gar nicht benutzt werden. Areale mit besonders häufiger Ansteuerung können klinisch beobachtet oder durch selektives Einschleifen optimiert werden (Kordaß/Ruge 2019a). Neben den Kontaktarealen kann auch eine Analyse der Bewegungsbahnen erfolgen und wie bei einem virtuellen FGP-Registrierat eine Hüllkurve über die Bewegungsbahnen des Kiefers errechnet werden (Kordaß/Ruge 2019a; Ruge et al. 2014). In der Prothetik könnten so Areale ermittelt werden, welche besonders Fraktur- oder Chipping anfällig sein könnten (Kordaß/Ruge 2019a). Im digitalen Workflow bestehen für den Techniker neue Möglichkeiten Zahnersatz möglichst optimal an die bestehende Okklusionssituation oder vielmehr deren funktioneller „Nutzung“ anzupassen. Auf Basis der Hüllkurve könnte zudem die Anfertigung von Funktionsschienen erfolgen, in denen die natürliche Bewegung des Unterkiefers bereits „eingearbeitet“ ist.

7 VERZEICHNISSE

7.1 LITERATURVERZEICHNIS

3M ESPE AG (2019): Lava™ Chairside Oral Scanner C.O.S. Technical Data Sheet. Text abrufbar unter: <https://multimedia.3m.com/mws/media/632323O/lava-cos-technical-data-sheet.pdf> (Zugriff am 25.1.2019).

Ahlers, M.O./Biffar, R./Bumann, A./Freesmeyer, W.B./Fuchs, B./Hugger, A./Kordaß, B./Klett, R./Koeck, B./Meyer, G./et al. (2005): Terminologie & Nomenklatur - DGFDt. Terminologie & Nomenklatur. Text abrufbar unter: <https://www.dgfdt.de/terminologie-nomenklatur> (Zugriff am 20.1.2019).

Ahrberg, D./Lauer, H.C./Ahrberg, M./Weigl, P. (2016): Evaluation of fit and efficiency of CAD/CAM fabricated all-ceramic restorations based on direct and indirect digitalization: a double-blinded, randomized clinical trial. In: *Clin Oral Investig.*, 20 (2), 291–300.

Alzahrani, S. J./EL-Hammali, H./Morgano, S. M./Elkassaby, H. (2020): Evaluation of the accuracy of 2 digital intraoral scanners: A 3D analysis study. In: *J Prosthet Dent.*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.10.004>. Text abrufbar unter: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022391320305096>.

Arcan, M./Zandman, F. (1984): A method for in vivo quantitative occlusal strain and stress analysis. In: *J Biomech.*, 17 (2), 67–79.

Axmann, D./Gomez, G./Groten, M. (2002): Der Bland und Altman Plot - eine einfache graphische Methode zur Einschätzung der Verlässlichkeit von Messverfahren. In: *Dtsch Zahnärztl Z.*, 57, 613–616.

Axmann, D./Gorten, M./Rupp, F./Scheideler, L. (2006): Wozu „Mittelwert $\pm$ Standardabweichung?“ Und Verwandtes. In: *Dtsch Zahnärztl Z.*, 61 (4), 214–219.

Baghani, M.T./Shayegh, S.S./Johnston, W.M./Shidfar, S./Hakimaneh, S.M. (2020): In vitro evaluation of the accuracy and precision of intraoral and extraoral complete-arch scans. In: *J Prosthet Dent.*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.08.017>. Text abrufbar unter: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022391320304777>.

Bausch, J. (o. J.): OccluSense Die Zukunft der Occlusionsprüfung. Text abrufbar unter: https://docs.wixstatic.com/ugd/21c6bc_9d8e5048dcdd4545940ab43a391e9d99.pdf (Zugriff am 16.5.2020).

Boeddinghaus, M./Breloer, E.S./Rehmann, P./Wöstmann, B. (2015): Accuracy of single-tooth restorations based on intraoral digital and conventional impressions in patients. In: *Clin Oral Investig.*, 19 (8), 2027–2034.

Bosniac, P./Rehmann, P./Wöstmann, B. (2019): Comparison of an indirect impression scanning system and two direct intraoral scanning systems in vivo. In: *Clin Oral Investig.*, 23 (5), 2421–2427.

- Böttger, H./Kolndorffer, K./Marxkors, R./Pfütz, E./Riethe, P./Stüttgen, U. (1982): Funktionelle Okklusion - Gleitbahnbezogene Diagnostik und Therapie. Berlin: Quintessenz.
- Boyd, R.L./Gibbs, C.H./Mahan, P.E./Richmond, A.F./Laskin, J.L. (1990): Temporomandibular joint forces measured at the condyle of *Macaca arctoides*. In: *Am J Orthod Dentofacial Orthop.*, 97 (6), 472–479.
- Breuckmann, B. (1993): Bildverarbeitung und optische Meßtechnik in der industriellen Praxis: Grundlagen der 3D-Meßtechnik, Farbbildanalyse, Holografie und Interferometrie mit zahlreichen praktischen Applikationen. München: Franzis.
- Carey, J.P./Craig, M./Kerstein, R.B./Radke, J. (2007): Determining a relationship between applied occlusal load and articulating paper mark area. In: *Open Dent J.*, 1, 1–7.
- Cicchetti, D.V. (1994): Guidelines, Criteria, and Rules of Thumb for Evaluating Normed and Standardized Assessment Instruments in Psychology. In: *Psychological Assessment*, 6 (4), 284–290.
- Dangel, R. (2017): Spritzgießwerkzeuge für Einsteiger. 2. Aufl. München: Hanser. Text abrufbar unter: http://files.hanser.de/Files/Article/ARTK_LPR_9783446450431_0001.pdf (Zugriff am 15.1.2021).
- Dias, R.A.B./Rodrigues, M.J.P./A, Messias/Guerra, F.A.D.A. (2020): Comparison between Conventional and Computerized Methods in the Assessment of an Occlusal Scheme. In: *J Oral Rehabil.*, 47 (2), 221–228.
- Dinçer, M./Meral, O./Tümer, N. (2003): The Investigation of Occlusal Contacts During the Retention Period. In: *Angle Orthod.*, 73 (6), 640–646.
- Duminil, G./Laplanche, O. (2016): Occlusion Made Easy. Espace ID.
- Ehrlich, J./Taicher, S. (1981): Intercuspal contacts of the natural dentition in centric occlusion. In: *J Prosthet Dent.*, 45 (4), 419–421.
- Ender, A./Attin, T./Mehl, A. (2016): In vivo precision of conventional and digital methods of obtaining complete-arch dental impressions. In: *J Prosthet Dent.*, 115 (3), 313–320.
- Ender, A./Mehl, A. (2011): Full Arch Scans: Conventional versus Digital Impressions--an in-Vitro Study. In: *Int J Comput Dent.*, 14 (1), 11–21.
- Ender, A./Mehl, A. (2015): In-Vitro Evaluation of the Accuracy of Conventional and Digital Methods of Obtaining Full-Arch Dental Impressions. In: *Quintessence Int.*, 46 (1), 9–17.
- Ender, A./Zimmermann, M./Mehl, A. (2019): Accuracy of complete- and partial-arch impressions of actual intraoral scanning systems in vitro. In: *Int J Comput Dent.*, 22 (1), 11–19.
- Fakultät für Physik Technische Universität München (2019): Interferometrie. Text abrufbar unter: <https://www.ph.tum.de/academics/org/labs/mw/INT.pdf> (Zugriff am 24.1.2019).
- Gandyra, M. (2002): Entwicklung eines 3D-Sensors zur Erfassung spiegelnder Freiformflächen auf Basis gemessener Oberflächennormalen für die CAD-Flächenrekonstruktion. Technische Universität Kaiserslautern.

- Gärtner, C./Kordaß, B. (2003): The virtual articulator: development and evaluation. In: *Int J Comput Dent.*, 6 (1), 11–24.
- GOM Metrology (o. J.): GOM Inspect 2016 Video Tutorial - 3 - Einfache Inspektion. Text abrufbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=EiMuUL4C8go&feature=youtu.be> (Zugriff am 15.1.2019).
- Gruber, M./Häusler, G. (1992): Simple, Robust and Accurate Phase-Measuring Triangulation. In: *Optik*, 89 (3), 118–122.
- Gurdsapsri, W./Ai, M./Baba, K./Fueki, K. (2000): Influence of clenching level on intercuspal contact area in various regions of the dental arch. In: *J Oral Rehabil.*, 27 (4), 239–244.
- Hamalian, T.A./Nasr, E./Chidiac, J.J. (2011): Impression Materials in Fixed Prosthodontics: Influence of Choice on Clinical Procedure. In: *J Prosthodont.*, 20 (2), 153–160.
- Heuser, F./Bourauel, C./Stark, H./Dörsam, I. (2020): Clinical investigations of the comparability of different methods used to display occlusal contact points. In: *Int J Comput Dent.*, 23 (3), 245–255.
- Hidaka, O./Iwasaki, M./Saito, M./Morimoto, T. (1999): Influence of clenching intensity on bite force balance, occlusal contact area, and average bite pressure. In: *J Dent Res.*, 78 (7), 1336–1344.
- Hohmann, A./Hielscher, W. (2012): Lehrbuch der Zahntechnik Band, Bd. 1. 8. Aufl. Berlin: Quintessenz.
- Hugger, A. (2019): Vortrag über: Klinische Okklusionsanalyse und ihre digitale Realisierung. Leutkirch, 2019.
- Hugger, A./Kordaß, B. (2018): Handbuch Instrumentelle Funktionsanalyse und funktionelle Okklusion : wissenschaftliche Evidenz und klinisches Vorgehen. Berlin: Quintessenz.
- Hugger, A./Schindler, H.J. (2006): Unterkieferbewegungen und deren Simulation. In: Hugger, A./Türp, J.C./Kerschbaum, T. (Hrsg.), Curriculum orale Physiologie. Berlin: Quintessenz, 53–83.
- Hugger, A./Türp, J.C./Kerschbaum, Th. (2006): Curriculum Orale Physiologie. Berlin: Quintessenz.
- Hützen, D./Proff, P./Gedrange, T./Biffar, R./Bernhard, O./Kocher, T./Kordass, B. (2007): Occlusal contact patterns--population-based data. In: *Ann Anat.*, 189 (4), 407–411.
- Hützen, D./Rebau, M./Kordaß, B. (2006): Clinical reproducibility of GEDAS -"Greifswald Digital Analyzing System" for displaying occlusal contact patterns. In: *Int J Comput Dent.*, 9 (2), 137–142.
- Hylander, W.L. (1979): Experimental analysis of temporomandibular joint reaction force in macaques. In: *Am J Phys Anthropol.*, 51, 433–456.
- Jaschouz, S./Mehl, A. (2014): Reproducibility of habitual intercuspation in vivo. In: *J Dent.*, 42 (2), 210–218.

- Kai, C.C./Jacob, G.G.K./Mei, T. (1997): Interface between CAD and Rapid Prototyping systems. Part 2: LMI — An improved interface. In: *Int J Adv Manuf Technol.*, 13, 571–576.
- Kettenbach (o. J.): Futar D (1:1) - Kettenbach GmbH & Co. KG. Text abrufbar unter: <http://www.kettenbach.de/dental/produkte/bissregistrierung/futar-d-11.html> (Zugriff am 15.1.2019a).
- Kettenbach (o. J.): Identium Medium (5:1) - Kettenbach GmbH & Co. KG. Text abrufbar unter: <http://www.kettenbach.de/dental/produkte/praezisionsabformung/vinylsiloxanether/identium-medium-51.html> (Zugriff am 16.1.2019b).
- Kordaß, B./Gärtner, C. (1999): Matching von digitalisierten Kauflächen und okklusalen Bewegungsaufzeichnungen. In: *Dtsch Zahnärztl Z.*, 54, 399–403.
- Kordaß, B./Lotze, M. (2013): Aufbiss, Zähne und Gehirn. In: Böhme, H./Slominski, B. (Hrsg.), *Das Orale. Die Mundhöhle in Kulturgeschichte und Zahnmedizin*. Wilhelm Fink, 147–158.
- Kordaß, B./Ruge, S. (2019a): Instrumentelle Okklusionsanalyse digital und analog - Aufgaben und Herausforderungen. In: *teamwork*, 22 (1), 30–39.
- Kordaß, B./Ruge, S. (2019b): Lösungsansätze Für Einen Virtuellen Artikulator. In: *wissen kompakt*, 13, 21–33.
- Korioth, T.W. (1990): Number and location of occlusal contacts in intercuspal position. In: *J Prosthet Dent.*, 64 (2), 206–210.
- Kuhr, F./Schmidt, A./Rehmann, P./Wöstmann, B. (2016): A new method for assessing the accuracy of full arch impressions in patients. In: *J Dent.*, 55, 68–74.
- Lehmann, K.M./Hellwig, E./Wenz, H.J. (2012): *Zahnärztliche Propädeutik. Einführung in die Zahnheilkunde*. 12. Aufl. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag.
- Logozzo, S./Zanetti, E.M./Franceschini, G./Kilpelä, A./Mäkynen, A. (2014): Recent Advances in Dental Optics – Part I: 3D Intraoral Scanners for Restorative Dentistry. In: *Optics and Lasers in Engineering*, 54, 203–221.
- Lovrov, S./Kordaß, B. (2013): Methoden zur Bestimmung okklusaler Kontakte. In: *J CranioMand Func.*, 5 (3), 247–264.
- Mainzer, K. (1980): *Geschichte der Geometrie*. Mannheim Wien Zürich: BI Wissenschaftsverlag.
- Maness, W.L./Benjamin, M./Podoloff, R. (1987): Computerized occlusal analysis: a new technology. In: *Quintessence Int.*, 18 (4), 287–292.
- Mangano, F./Gandolfi, A.A./Luongo, G./Logozzo, S. (2017): Intraoral scanners in dentistry: a review of the current literature. In: *BMC Oral Health*, 17 (1), 149.
- Maschinski, G. (2000): *Lexikon Zahnmedizin, Zahntechnik*. München: Urban & Fischer.
- Matsui, Y./Ohno, K./Michi, K./Suzuki, Y./Yamagata, K. (1996): A computerized method for evaluating balance of occlusal load. In: *J Oral Rehabil.*, 23, 530–535.

- Meyer, F.S. (1959): The generated path technique in reconstruction dentistry. In: *J Prosthet Dent.*, 9 (3), 432–440.
- Millar, B.J./Halata, Z./Linden, R.W. (1989): The structure of physiologically located periodontal ligament mechanoreceptors of the cat canine tooth. In: *J Anat.*, 167, 117–127.
- Millstein, P.L. (1984): A method to determine occlusal contact and noncontact areas: preliminary report. In: *J Prosthet Dent.*, 52 (1), 106–110.
- Mostafa, N.Z./Ruse, N.D./Ford, N.L./Carvalho, R.M./Wyatt, C.C.L. (2018): Marginal Fit of Lithium Disilicate Crowns Fabricated Using Conventional and Digital Methodology: A Three-Dimensional Analysis. In: *J Prosthodont.*, 27 (2), 145–152.
- Muallah, J./Wesemann, C./Nowak, R./Robben, J./Mah, J./Pospiech, P./Bumann, A. (2017): Accuracy of full-arch scans using intraoral and extraoral scanners: an in vitro study using a new method of evaluation. In: *Int J Comput Dent.*, 20 (2), 151–164.
- Müller, F. (2006a): Orale Mechanosensorik - Tastempfindlichkeit und Stereognosie. In: Hugger, A./Türp, J.C./Kerschbaum, T. (Hrsg.), Curriculum orale Physiologie. Berlin: Quintessenz, 35–51.
- Müller, H. (2006b): FGP technique with Cerec 3D. In: *Int J Comput Dent.*, 9 (4), 333–338.
- Myers, G.E./Anderson, J.R. (1971): Nature of contacts in centric occlusion in 32 adults. In: *J Dent Res.*, 50 (1), 7–13.
- Putz, R./Pabst, R. (Hrsg.) (2004): Atlas der Anatomie des Menschen. Sobotta. Limitierte Jubiläumsausgabe: der komplette Atlas in einem Band. 21. Aufl. München: Urban & Fischer.
- Redelberger, H. (2019): OccluSense – ein Erfahrungsbericht. In: *Digital Dental Magazin*, 6, 42–43.
- Reiber, T./Fuhr, K./Hartmann, H./Leicher, D. (1989): Das Zeichnungsverhalten von Okklusionsindikatoren. In: *Dtsch Zahnärztl Z.*, 44, 90–93.
- Reiber, T./Trbola, U. (1993): Vergleich der klinischen Okklusion und der Modellokkklusion. In: *Dtsch Zahnärztl Z.*, 48, 170–173.
- Riise, C. (1982): A Clinical Study of the Number of Occlusal Tooth Contacts in the Intercuspal Position at Light and Hard Pressure in Adults. In: *J Oral Rehabil.*, 9 (6), 469–477.
- Ruge, S. (2013): Zur Quantifizierung der funktionellen Okklusion – Entwicklung spezieller Analyseverfahren für den Einsatz digitaler Technologien in der Zahnmedizin. Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald.
- Ruge, S./John, D./Kordaß, B. (2014): Virtuelle realdynamische Okklusion für Funktionsanalyse und CAD/CAM-Prozesse. In: *Digital Dental News*, 8 (8), 6–12.
- Sakaguchi, R.L./Anderso, G.C./DeLong, R. (1994): Digital imaging of occlusal contacts in the intercuspals position. In: *J Prosthodont.*, 3 (4), 193–197.

- Schindler, H.J./Hugger, A. (2006): Kauphysiologie und Kieferreflexe. In: Kerschbaum, T. (Hrsg.), Curriculum Orale Physiologie. Berlin: Quintessenz, 113–142.
- Schweiger, J./Kieschnick, A. (2017): CAD/CAM in der digitalen Zahnheilkunde. 1. Auflage. Fuchstal: Teamwork Media.
- Sichwardt, V. (2015): Vergleichende Studie zur Untersuchung der Genauigkeit von vier unterschiedlichen intraoralen Scannern. Justus-Liebig-Universität Gießen.
- Stavness, I.K./Hannam, A.G./Tobias, D.L./Zhang, X. (2016): Simulation of dental collisions and occlusal dynamics in the virtual environment. In: *J of Oral Rehabil.*, 43 (4), 269–278.
- Stern, K./Kordaß, B. (2010): Comparison of the Greifswald Digital Analyzing System with the T-Scan III. In: *J CranioMand Func.*, 2 (2), 107–119.
- Strub, J.R./Kern, M./Türp, J.C./Witkowski, S./Heydecke, C./Wolfart, S. (1999): Curriculum Prothetik, Bd. II. 2. Aufl. Berlin: Quintessenz.
- Suzuki, T./Kumagai, H./Watanabe, T./Uchida, T./Nagao, M. (1997): Evaluation of complete denture occlusal contacts using pressuresensitive sheets. In: *Int J Prosthodont.*, 10 (4), 386–391.
- Suzuki T./Kumagai H./Yoshitomi N./Minakuchi S./Watanabe T./Uchida T. (1994): Clinical evaluation of measuring system of occlusal force. In: *Kokubyo Gakkai Zasshi*, 61 (3), 437–445.
- Tekscan (2017): Cosmetic Dentistry Beautify & Balance Bites with T-Scan™ The Mysteries of Occlusion Revealed in 3 Cosmetic Cases. Text abrufbar unter: <https://www.tekscan.com/resources/ebook/cosmetic-ebook> (Zugriff am 18.5.2019).
- Tekscan (2020): T-Scan Novus. Text abrufbar unter: <https://www.tekscan.com/products-solutions/systems/t-scan> (Zugriff am 16.5.2020).
- Tipler, P.A. (2000): Physik. 3. korrigierter Nachdruck der 1. Auflage 1994. Heidelberg: Spektrum.
- Türp, J.C./Alt, K.W./Schindler, H.J. (2006): Okklusion. In: Hugger, A./Türp, J.C./Kerschbaum, T. (Hrsg.), Curriculum Orale Physiologie. Berlin: Quintessenz, 1–34.
- Waldecker, M./Rues, S./Rammelsberg, P./Bömicke, W. (2020): Accuracy of complete-arch intraoral scans based on confocal microscopy versus optical triangulation: A comparative in vitro study. In: *J Prosthet Dent.*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.04.019>. Text abrufbar unter: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022391320302985>.
- Woda, A./Gourdon, A.M./Faraj, M. (1987): Occlusal contacts and tooth wear. In: *J Prosthet Dent.*, 57 (1), 85–93.
- Wöstmann, B./Schlenz, M.A. (2020): Digitale, digitalisierte oder konventionelle Abformung? In: *Quintessenz Zahnmedizin*, 71 (2), 150–159.
- zebris Medical (2020): Optic JMA. Text abrufbar unter: https://www.zebris.de/fileadmin/Editoren/zebris-PDF/zebris-Prospekte-DE/JMA_Optic_de_190128_web.pdf (Zugriff am 16.5.2020).

Zimmermann, M./Mehl, A./Mörmann, W.H./Reich, S. (2015): Intraoral Scanning Systems – a Current Overview Intraoralscanner: Eine Aktuelle Übersicht. In: *Int J Comput Dent.*, 18 (2), 101–129.

Zirkonzahn (o. J.): CAD/CAM-Scanner für Dentallabore S600 Arti | Zirkonzahn. Text abrufbar unter: <https://www.zirkonzahn.com/de/cad-cam-systeme/scanner-s600-arti> (Zugriff am 15.1.2019a).

Zirkonzahn (o. J.): Easy-Fix-System für Scanner | Zirkonzahn. Text abrufbar unter: <https://www.zirkonzahn.com/de/cad-cam-systeme/zubehoer/scanner/easy-fix-system> (Zugriff am 16.1.2019b).

7.2 TABELLENVERZEICHNIS

<i>Tabelle 1: Aufgaben der Okklusion</i>	<i>17</i>
<i>Tabelle 2: Unterteilung des Begriffs „Okklusion“</i>	<i>18</i>
<i>Tabelle 3: elektronische Messsysteme zur Aufzeichnung von Unterkieferbewegungen</i>	<i>29</i>
<i>Tabelle 4: Übersicht der verwendeten Geräte und Softwarepakete.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabelle 5: Bewertung des ICCs nach Cicchetti (1994)</i>	<i>78</i>
<i>Tabelle 6: Konturabweichung zwischen Extraoralscanner und Intraoralscanner anhand der Scans über die Gipsmodelle entlang des Inspektionsschnitts im Ober- und Unterkiefer.</i>	<i>79</i>
<i>Tabelle 7: Konturabweichung zwischen Extraoralscanner (Gipsmodell) und Intraoralscanner (in vivo) entlang des Inspektionsschnitts im Ober- und Unterkiefer.</i>	<i>80</i>
<i>Tabelle 8: Kontaktpunktverteilung an den Oberkiefermolaren in der statischen Okklusion</i>	<i>82</i>
<i>Tabelle 9: Kontaktpunktverteilung an den Oberkieferprämolaren in der statischen Okklusion</i>	<i>85</i>
<i>Tabelle 10: Kontaktpunktverteilung an den Oberkieferfrontzähnen in der statischen Okklusion</i>	<i>88</i>
<i>Tabelle 11: Kontaktpunktverteilung an den Unterkiefermolaren in der statischen Okklusion</i>	<i>91</i>
<i>Tabelle 12: Kontaktpunktverteilung an den Unterkieferprämolaren in der statischen Okklusion</i>	<i>94</i>
<i>Tabelle 13: Kontaktpunktverteilung an den Unterkieferfrontzähnen in der statischen Okklusion.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabelle 14: Gesamte Anzahl an statischen Okklusionskontakten je Methode im Oberkiefer</i>	<i>100</i>
<i>Tabelle 15: Gesamte Anzahl an statischen Okklusionskontakten je Methode im Unterkiefer</i>	<i>101</i>
<i>Tabelle 16: Übereinstimmung der Anzahl an Okklusionskontakten zwischen den Methoden Klinik EOS und IOS anhand der ICC-Berechnung mit 95% Konfidenzintervall.</i>	<i>103</i>
<i>Tabelle 17: Übereinstimmung der Anzahl an Okklusionskontakten zwischen den Methoden Klinik-EOS und Klinik-IOS im paarweisen Vergleich anhand der ICC-Berechnung mit 95% Konfidenzintervall.</i>	<i>104</i>
<i>Tabelle 18: Kontaktpunktverteilung an den Oberkiefermolaren in der Dynamik.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabelle 19:Kontaktpunktverteilung an den Oberkieferprämolaren in der Dynamik</i>	<i>112</i>
<i>Tabelle 20:Kontaktpunktverteilung an den Oberkieferfrontzähnen in der Dynamik.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabelle 21: Kontaktpunktverteilung an den Unterkiefermolaren in der Dynamik.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabelle 22: Kontaktpunktverteilung an den Unterkieferprämolaren in der Dynamik</i>	<i>115</i>
<i>Tabelle 23: Kontaktpunktverteilung an den Unterkieferfrontzähnen in der Dynamik</i>	<i>116</i>
<i>Tabelle 24: Auswertung entlang des Inspektionsschnitts im Oberkiefer-Vergleich Gipsmodelle (EOS-IOS).....</i>	<i>164</i>
<i>Tabelle 25: Auswertung entlang des Inspektionsschnitts im Unterkiefer-Vergleich Gipsmodelle (EOS-IOS).....</i>	<i>165</i>
<i>Tabelle 26: Auswertung entlang des Inspektionsschnitts im Oberkiefer-Vergleich Gipsmodell (EOS) zu Intraoral in vivo (IOS).....</i>	<i>166</i>
<i>Tabelle 27: Auswertung entlang des Inspektionsschnitts im Unterkiefer-Vergleich Gipsmodell (EOS) zu Intraoral in vivo (IOS).....</i>	<i>167</i>

7.3 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Kaumuskulatur.	10
Abbildung 2: Kaumuskulatur und Unterkieferbewegungen.	11
Abbildung 3: Grenzbewegungen des Unterkiefers in der Sagittalebene.	14
Abbildung 4: Grenzbewegungen des Unterkiefers in der Frontal- und Horizontalebene.	15
Abbildung 5: Aufzeichnung statischer Okklusionskontakte mit schwarzer Okklusionsfolie.	22
Abbildung 6: Silikonregistrator mit dargestellten Okklusionskontakten.	23
Abbildung 7: Messprinzipien optischer Scanner	31
Abbildung 8: Konfokales Laserstrahlprinzip.	32
Abbildung 9: Triangulationsprinzip nach Thales.....	33
Abbildung 10: Sequentielle Projektion von Masken zur Lichtcodierung für einen Bildpunkt.....	35
Abbildung 11: Darstellung von 3D-Körpern mittels einer Punktwolke.	39
Abbildung 12: Darstellung von 3D-Körpern mittels Dreiecksnetzen.....	40
Abbildung 13: Übersicht über die angewandten Methoden zur Bestimmung statischer Okklusionskontakte.....	44
Abbildung 14: Kopplungslöffel für den Extraoralscan.	45
Abbildung 15: Easy-Fix-System mit Modellfixierstift und darin eingespannten Gipsmodellen.	46
Abbildung 16: Kopplungslöffel für den Intraoralscan.	47
Abbildung 17: Scanreihenfolge beim Trios 3 Cart.....	48
Abbildung 18: Optic Jaw Motion Analyser mit Oberkieferkopfbogen und Unterkiefer Sensor.....	49
Abbildung 19: Abweichungen anhand äquidistanter Abweichungsfähnchen am Inspektionsschnitt durch die Oberkiefersechser.	51
Abbildung 20: Matchingprozess des Oberkiefers in der WINJAW ⁺ RC Software zur korrekten Positionierung im Raum am Beispiel eines Scandatensatzes aus dem Intraoralscanner.	53
Abbildung 21: In die WINJAW ⁺ RC Software importierte und im Raum ausgerichtete Modelle des Ober- und Unterkiefers anhand eines Beispieldatensatzes aus dem Intraoralscan.	53
Abbildung 22: Darstellung farbig markierter Kontaktpunkte in der WINJAW ⁺ RC Software aus der habituellen Okklusion mit Scandaten aus dem Intraoralscanner in der Aufsicht auf die Zahnreihen und in Echtzeit während der habituellen Okklusion	54
Abbildung 23: Darstellung der häufigsten Kontaktpunkte während der letzten 10 Kauzyklen aus dem freien Kauversuch mit Scandaten aus dem Intraoralscanner in der Aufsicht auf die Zahnreihen und in Echtzeit während der Kaubewegung.....	55
Abbildung 24: Bestimmung von Okklusionskontakten für die Häufigkeitsanalyse.....	56
Abbildung 25: Kalibrierkörper (50 µm) zur Kalibrierung der Transparenzeigenschaften.	57
Abbildung 26: Markierung der Zahnflächen und Zuordnung der Zahnkennzeichnung in GEDAS am eingelesenen Bissregistrator.....	58
Abbildung 27: Darstellung der ermittelten Kontaktanzahl am Bissregistrator pro Zahn im GEDAS System.	59

Abbildung 28: Screenshot aus der WINJAW ⁺ RC Software während der habituellen Okklusion und Darstellung der vorhandenen okklusalen Kontaktpunkte mehrfarbig und einfarbig bei jeweils gleich gewähltem Schwellwert.	61
Abbildung 29: Markierung der Zahnflächen in GEDAS am eingelesenen Scandatensatz aus dem Intraoralscanner.	62
Abbildung 30: Darstellung der ermittelten Kontaktanzahl am Scandatensatz des Intraoralscans pro Zahn im GEDAS System.	63
Abbildung 31: Objektive Erfassung der Anzahl an Okklusionskontakten in der statischen Okklusion über drei verschiedene Methoden.	65
Abbildung 32: Modifizierte klinische Methode „Foto+GEDAS“ 66	66
Abbildung 33: Plausible Anzahl an Okklusionskontakten in der statischen Okklusion.	67
Abbildung 34: Übersicht über die einzelnen Untersuchungssitzungen am Probanden und der daraus generierten Daten sowie über die Arbeitsschritte im Labor.	68
Abbildung 35: Übersicht der einzelnen Untersuchungssitzungen am Probanden und der daraus generierten Daten sowie die zur Analyse der Messergebnisse verwendete Software.	69
Abbildung 36: Fotodokumentation der okklusalen Kontaktsituation im Ober- und Unterkiefer.	70
Abbildung 37: Schematische Zusammenfassung der ersten Untersuchungssitzung.	71
Abbildung 38: Schematische Zusammenfassung der zweiten Untersuchungssitzung.	72
Abbildung 39: Bildliche Zusammenfassung der zweiten Untersuchungssitzung und daraus gewonnene Materialien.	74
Abbildung 40: Bildliche Zusammenfassung aus der dritten Untersuchungssitzung: Messung mit dem JMA ^{Optic} System 75	75
Abbildung 41: Attachment zur Anbringung der Unterkiefersensorik.	76
Abbildung 42: Balkendiagramm über die gesamte Anzahl an Okklusionskontakten im Molarenbereich in der statischen Okklusion im Oberkiefer.	83
Abbildung 43: Balkendiagramm über die gesamte mittlere Anzahl an Okklusionskontakten im Molarenbereich in der statischen Okklusion im Oberkiefer.	84
Abbildung 44: Balkendiagramm über die gesamte Anzahl an Okklusionskontakten im Prämolarenbereich in der statischen Okklusion im Oberkiefer.	86
Abbildung 45: Balkendiagramm über die gesamte mittlere Anzahl an Okklusionskontakten im Prämolarenbereich in der statischen Okklusion im Oberkiefer.	87
Abbildung 46: Balkendiagramm über die gesamte Anzahl an Okklusionskontakten im Frontzahnbereich in der statischen Okklusion im Oberkiefer.	89
Abbildung 47: Balkendiagramm über die gesamte mittlere Anzahl an Okklusionskontakten im Frontzahnbereich in der statischen Okklusion im Oberkiefer.	90
Abbildung 48: Balkendiagramm über die gesamte Anzahl an Okklusionskontakten im Molarenbereich in der statischen Okklusion im Unterkiefer.	92

Abbildung 49: Balkendiagramm über die gesamte mittlere Anzahl an Okklusionskontakten im Molarenbereich in der statischen Okklusion im Unterkiefer.....	93
Abbildung 50: Balkendiagramm über die gesamte Anzahl an Okklusionskontakten im Prämolarenbereich in der statischen Okklusion im Unterkiefer.....	95
Abbildung 51: Balkendiagramm über die gesamte mittlere Anzahl an Okklusionskontakten im Prämolarenbereich in der statischen Okklusion im Unterkiefer.....	96
Abbildung 52: Balkendiagramm über die gesamte Anzahl an Okklusionskontakten im Frontzahnbereich in der statischen Okklusion im Unterkiefer.....	98
Abbildung 53: Balkendiagramm über die gesamte mittlere Anzahl an Okklusionskontakten im Frontzahnbereich in der statischen Okklusion im Unterkiefer.....	99
Abbildung 54: Summe aller statischen Okklusionskontakte je Methode im Oberkiefer.....	100
Abbildung 55: Summe aller statischen Okklusionskontakte je Methode im Unterkiefer.....	101
Abbildung 56: Übersicht über die Neubezeichnung der Methoden „Klinik“, „Extraoralscan (EOS)“ und „Intraoralscan (IOS)“.....	102
Abbildung 57: Bland-Altman-Diagramm für die Zuverlässigkeit zwischen Klinik und EOS im Oberkiefer.....	106
Abbildung 58: Bland-Altman-Diagramm für die Zuverlässigkeit zwischen Klinik und EOS im Unterkiefer.....	107
Abbildung 59: Bland-Altman-Diagramm für die Zuverlässigkeit zwischen Klinik und IOS im Oberkiefer.....	108
Abbildung 60: Bland-Altman-Diagramm für die Zuverlässigkeit zwischen Klinik und IOS im Unterkiefer.....	109
Abbildung 61: Vergleich zweier nahezu identischer Registrare in Bezug auf die Auswertung okklusaler Kontakte.....	121
Abbildung 62: Abweichung Extraoralscan (EOS) zu Intraoralscan (IOS).....	132
Abbildung 63: Fallbeispiel 1: Bildvergleich der Ergebnisse aus den Methoden Klinik, EOS und IOS in der statischen Okklusion.....	136
Abbildung 64: Fallbeispiel 2: Bildvergleich der Ergebnisse aus den Methoden Klinik, EOS und IOS in der statischen Okklusion.....	137
Abbildung 65: Fallbeispiel 3: Bildvergleich der Ergebnisse aus den Methoden Klinik, EOS und IOS in der statischen Okklusion.....	138
Abbildung 66: Statische Kontaktpunktverteilung bei den Methoden IOS und EOS am Probandenbeispiel.....	142
Abbildung 67: Fallbeispiel 1 zur dynamischen Kontaktpunktverteilung bei Methode IOS.....	143
Abbildung 68: Fallbeispiel 1 zur dynamischen Kontaktpunktverteilung bei Methode EOS.....	144
Abbildung 69: Fallbeispiel 2 zur dynamischen Kontaktpunktverteilung bei der Methode IOS.....	145
Abbildung 70: Fallbeispiel 2 zur dynamischen Kontaktpunktverteilung bei der Methode EOS.....	146
Abbildung 71: Fallbeispiel 3 zur dynamischen Kontaktpunktverteilung bei der Methode IOS.....	147
Abbildung 72: Fallbeispiel 3 zur dynamischen Kontaktpunktverteilung bei der Methode EOS.....	148
Abbildung 73: Ergebnisse Proband 1 aus Methode Klinik in der Statik.....	169
Abbildung 74: Ergebnisse Proband 1 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.....	169
Abbildung 75: Ergebnisse Proband 2 aus Methode Klinik in der Statik.....	170
Abbildung 76: Ergebnisse Proband 2 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.....	170

Abbildung 77: Ergebnisse Proband 3 aus Methode Klinik in der Statik.	171
Abbildung 78: Ergebnisse Proband 3 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.	171
Abbildung 79: Ergebnisse Proband 4 aus Methode Klinik in der Statik.	172
Abbildung 80: Ergebnisse Proband 4 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.	172
Abbildung 81: Ergebnisse Proband 5 aus Methode Klinik in der Statik.	173
Abbildung 82: Ergebnisse Proband 5 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.	173
Abbildung 83: Ergebnisse Proband 6 aus Methode Klinik in der Statik.	174
Abbildung 84: Ergebnisse Proband 6 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.	174
Abbildung 85: Ergebnisse Proband 7 aus Methode Klinik in der Statik.	175
Abbildung 86: Ergebnisse Proband 7 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.	175
Abbildung 87: Ergebnisse Proband 8 aus Methode Klinik in der Statik.	176
Abbildung 88: Ergebnisse Proband 8 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.	176
Abbildung 89: Ergebnisse Proband 9 aus Methode Klinik in der Statik.	177
Abbildung 90: Ergebnisse Proband 9 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.	177
Abbildung 91: Ergebnisse Proband 10 aus Methode Klinik in der Statik.	178
Abbildung 92: Ergebnisse Proband 10 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.	178
Abbildung 93: Ergebnisse Proband 11 aus Methode Klinik in der Statik.	179
Abbildung 94: Ergebnisse Proband 11 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.	179
Abbildung 95: Ergebnisse Proband 12 aus Methode Klinik in der Statik.	180
Abbildung 96: Ergebnisse Proband 12 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.	180
Abbildung 97: Ergebnisse Proband 13 aus Methode Klinik in der Statik.	181
Abbildung 98: Ergebnisse Proband 13 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.	181
Abbildung 99: Ergebnisse Proband 14 aus Methode Klinik in der Statik.	182
Abbildung 100: Ergebnisse Proband 14 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.	182
Abbildung 101: Ergebnisse Proband 15 aus Methode Klinik in der Statik.	183
Abbildung 102: Ergebnisse Proband 15 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.	183
Abbildung 103: Ergebnisse Proband 16 aus Methode Klinik in der Statik.	184
Abbildung 104: Ergebnisse Proband 16 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.	184
Abbildung 105: Ergebnisse Proband 17 aus Methode Klinik in der Statik.	185
Abbildung 106: Ergebnisse Proband 17 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.	185
Abbildung 107: Ergebnisse Proband 18 aus Methode Klinik in der Statik.	186
Abbildung 108: Ergebnisse Proband 18 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.	186
Abbildung 109: Ergebnisse Proband 19 aus Methode Klinik in der Statik.	187
Abbildung 110: Ergebnisse Proband 19 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.	187
Abbildung 111: Ergebnisse Proband 20 aus Methode Klinik in der Statik.	188
Abbildung 112: Ergebnisse Proband 20 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.	188

Alle Zeichnungen, Bilder und Grafiken wurden, wenn nicht anders in der Bildunterschrift verzeichnet, durch den Autor angefertigt.

8 ANHANG

8.1 KONTURABWEICHUNG DES INTRAORALSCANNERS ZUM EXTRAORALSCANNER – GESAMTE TABELLARISCHE ZUSAMMENFASSUNG

Proband/ Fähnchen	Abweichungen Oberkiefer													je Proband		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Summe	Mittelwert	STW
1	53	42	5	6	59	14	6	73	21	9	40			328	29,82	24,53
2	54	72	32	49	64	48	16	15	61	71				482	48,20	20,91
3	54	2	3	33	3	30	7	34	29	23				218	21,80	17,48
4	133	70	100	76	72	99	133	44	31	103				861	86,10	34,01
5	30	38	7	10	37	31	14	43	3					213	23,67	15,15
6	155	102	7	2	71	172	134	12	10					665	73,89	69,08
7	80	55	10	67	63	59	80	58	41	28				541	54,10	22,17
8	31	36	72	35	11	22	10	30	9	12	44	6		318	26,50	19,17
9	11	43	22	46	72	19	3	83	82	17				398	39,80	30,16
10	49	14	85	102	25	14	1	4	131	3				428	42,80	47,04
11	35	29	46	33	35	1	18	21	12	38				268	26,80	13,61
12	12	4	29	28	40	31	41	48	46	0	2	34	13	328	25,23	17,08
13	20	34	25	33	53	102	87	23	39	19	8			443	40,27	25,03
14	30	48	46	20	40	22	3	53	7	20	29			318	28,91	16,49
15	32	47	85	82	87	62	3	38	8	74				518	51,80	31,19
16	23	14	32	56	23	7	35	29	6	37	55			317	28,82	16,80
17	95	86	18	19	15	33	40	36	24	92	95			553	50,27	34,03
18	2	8	7	32	46	19	18	2	12	4				150	15,00	14,36
19	81	125	88	115	56	69	83	74	106	49	72	42		960	80,00	25,59
20	36	80	22	2	19	7	11	22	13	11	4			227	20,64	21,96
Mittelwert														40,72		
STW														20,40		
Summe														814,41		

Tabelle 24: Auswertung entlang des Inspektionsschnitts im Oberkiefer-Vergleich Gipsmodelle (EOS-IOS).

Zahlenangaben in Mikrometern; Mittel = Mittelwert, STW= Standardabweichung

- : Werte der Ist-Datei (IOS) liegen oberhalb der Soll-Datei (EOS)
- : Werte der Ist-Datei (IOS) liegen unterhalb der Soll-Datei (EOS)
- : Maximum des Mittelwerts
- : Minimum des Mittelwerts

Proband/ Fähnchen	Abweichungen Unterkiefer													je Proband		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Summe	Mittelwert	STW
1	11	4	26	19	12	27	8	66	38	51				262	26,20	20,13
2	64	67	20	78	23	45	53	66	99					515	57,22	25,30
3	17	50	67	39	86	20	38	32	5	22	13			389	35,36	24,46
4	21	5	17	30	18	15	14	27	32					179	19,89	8,61
5	17	35	65	4	21	41	13	16	19	1				232	23,20	19,10
6	6	23	27	33	0	16	13	17	2					137	15,22	11,27
7	6	26	41	41	17	8	9	30	4	26				208	20,80	14,04
8	7	18	50	26	26	1	41	20	32	15				236	23,60	14,86
9	18	28	41	29	23	61	14	7	37	66				324	32,40	19,30
10	22	85	77	7	50	49	51	172	19					532	59,11	49,61
11	85	62	5	57	31	8	21	48	27	0				344	34,40	27,91
12	74	41	7	22	60	8	55	17	74	18	47	13		436	36,33	25,23
13	78	76	5	4	116	50	98	62	55	-8				536	53,60	41,72
14	22	48	20	7	24	61	72	38	0	2				294	29,40	24,77
15	39	19	14	25	94	55	99	106	76	14				541	54,10	36,98
16	46	98	55	93	68	2	4	83	103					552	61,33	38,21
17	59	20	12	9	53	46	7	13	14	17				250	25,00	19,68
18	5	20	8	23	16	37	11	23	2	2				147	14,70	11,26
19	3	35	47	43	26	20	11	10	37	75	39			346	31,45	20,54
20	2	27	20	30	9	23	19	14	42	49				235	23,50	14,31
Mittelwert														33,84		
STW														15,07		
Summe														676,83		

Tabelle 25: Auswertung entlang des Inspektionsschnitts im Unterkiefer-Vergleich Gipsmodelle (EOS-IOS).

Zahlenangaben in Mikrometern; Mittel = Mittelwert, STW= Standardabweichung

 : Werte der Ist-Datei (IOS) liegen oberhalb der Soll-Datei (EOS) : Werte der Ist-Datei (IOS) liegen unterhalb der Soll-Datei (EOS) : Maximum des Mittelwerts : Minimum des Mittelwerts

Abweichungen Oberkiefer														je Proband		
Proband/ Fähnchen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Summe	Mittelwert	STW
1	101	21	17	20	38	71	5	39	40	20	36			409	37,09	27,43
2	1	20	95	64	18	29	33	141	24	86				511	51,10	44,12
3	64	5	9	88	35	14	31	41	39	35	12			373	33,91	25,00
4	17	12	1	16	29	1	11	35						122	15,25	12,06
5	48	26	98	51	27	0	66	103	441	5				865	86,50	129,34
6	87	72	68	149	52	51	35	24	42	16				596	59,60	38,27
7	124	8	33	62	107	67	35	23	60	18	3			540	49,09	39,36
8	11	18	30	30	177	13	69	44	36	394	94			916	83,27	113,81
9	36	13	36	63	7	243	23	28	22	17				488	48,80	70,00
10	112	114	96	60	101	44	38	12	29	27				633	63,30	38,85
11	17	22	30	39	48	34	127	49	132	45	35			578	52,55	39,35
12	38	70	59	42	100	86	42	42	6	73	46	75		679	56,58	25,58
13	70	10	47	21	68	22	111	17	10	18	36	90		520	43,33	33,92
14	106	134	49	11	11	98	75	93	57	79				713	71,30	39,95
15	52	61	44	26	1	198	16	9	106					513	57,00	61,82
16	5	26	106	48	8	22	1	5	45	33	61			360	32,73	31,41
17	11	38	54	29	33	10	31	17	37	4	33			297	27,00	14,89
18	28	42	102	72	17	17	16	1	58	38				391	39,10	30,72
19	29	94	40	37	143	25	9	17	47	30	21	24		516	43,00	38,17
20	74	14	76	56	34	23	46	2	31					356	39,56	25,66
Mittel															49,50	
STW															17,83	
Summe															990	

Tabelle 26: Auswertung entlang des Inspektionsschnitts im Oberkiefer-Vergleich Gipsmodell (EOS) zu Intraoral in vivo (IOS).

Zahlenangaben in Mikrometern; Mittel = Mittelwert, STW= Standardabweichung

- : Werte der Ist-Datei (IOS) liegen oberhalb der Soll-Datei (EOS)
- : Werte der Ist-Datei (IOS) liegen unterhalb der Soll-Datei (EOS)
- : Maximum des Mittelwerts
- : Minimum des Mittelwerts

Proband/ Fähnchen	Abweichungen Unterkiefer													je Proband		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Summe	Mittelwert	STW
1	55	64	30	87	60	22	15	0	24	2				359	35,90	29,04
2	77	18	17	108	40	11	27	80						378	47,25	36,24
3	156	69	39	92	107	107	73	42	86					771	85,67	36,09
4	75	23	32	34	15	11	92	66	2					350	38,89	31,41
5	60	21	15	35	62	26	34	23	5					281	31,22	19,19
6	58	13	16	43	36	24	16	39	11	23				279	27,90	15,47
7	15	0	30	41	70	27	19	22	13					237	26,33	20,02
8	92	17	7	11	50	11	83	99	7	13				390	39,00	38,36
9	28	14	54	22	42	9	38	4	4	16				231	23,10	17,06
10	68	43	16	28	66	46	61	39	55					422	46,89	17,55
11	70	24	115	70	7	190	11	16						503	62,88	63,81
12	32	19	24	7	29	54	29	29	53	54	15			345	31,36	31,36
13	377	344	314	371	78	74	95	198	420					2271	252,33	141,35
14	22	45	4	7	90	50	32	33	8					291	32,33	27,25
15	1	9	5	11	13	27	28	5	3	27				129	12,90	10,59
16	40	32	23	33	22	33	29	40	54					306	34,00	9,80
17	31	16	33	16	20	1	14	38	49	181				399	39,90	51,47
18	87	134	60	59	42	79	72	69						602	75,25	27,40
19	150	140	27	205	123	29	36	34	42	20	99			905	82,27	63,86
20	25	70	5	43	76	24	58	2	63					366	40,67	27,85
Mittel														53,30		
STW														50,73		
Summe														1066,04		

Tabelle 27: Auswertung entlang des Inspektionsschnitts im Unterkiefer-Vergleich Gipsmodell (EOS) zu Intraoral in vivo (IOS).

Zahlenangaben in Mikrometern; Mittel = Mittelwert, STW= Standardabweichung

— : Werte der Ist-Datei (IOS) liegen oberhalb der Soll-Datei (EOS)

— : Werte der Ist-Datei (IOS) liegen unterhalb der Soll-Datei (EOS)

— : Maximum des Mittelwerts

— : Minimum des Mittelwerts

8.2 BILDERGEBNISSE ALLER 20 PROBANDEN AUS DER STATISCHEN UND DYNAMISCHEN OKKLUSION

In den nachfolgenden Abbildungen und Tabellen werden alle Bildergebnisse aus der statischen und dynamischen Okklusion aller 20 Probanden nochmals zusammengefasst. Die Durchführung der Methode Klinik erfolgte mittels Okklusionsfolie und Fotoanalyse sowie über die Auswertung der Bissregistratur über das GEDAS System. Die Methode IOS (Intraoralscan) wurde mit Hilfe des Trios-Scanners durchgeführt und die Methode EOS (Extraoralscan) mit Hilfe konventioneller Abformungen und anschließender Digitalisierung der Gipsmodelle mittels des Zirkonzahn-Scanners. Die farbliche Hinterlegung in blau, grau und orange steht jeweils für:

- Ergebnisse aus Methode Klinik in der Statik
 - a. GEDAS
 - b. Foto
 - c. GEDAS+Foto
- Ergebnisse aus Methode IOS in Dynamik während der letzten 10 Kauzyklen und in der Statik
- Ergebnisse aus Methode EOS in Dynamik während der letzten 10 Kauzyklen und in der Statik

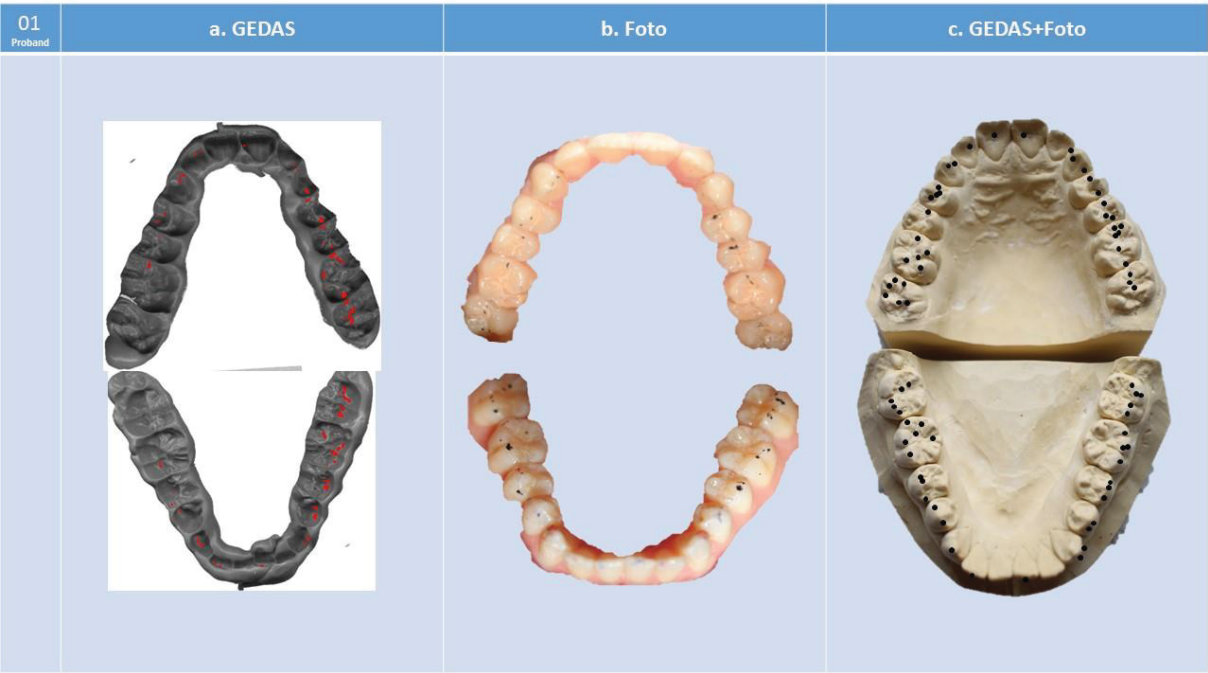


Abbildung 73: Ergebnisse Proband 1 aus Methode Klinik in der Statik.

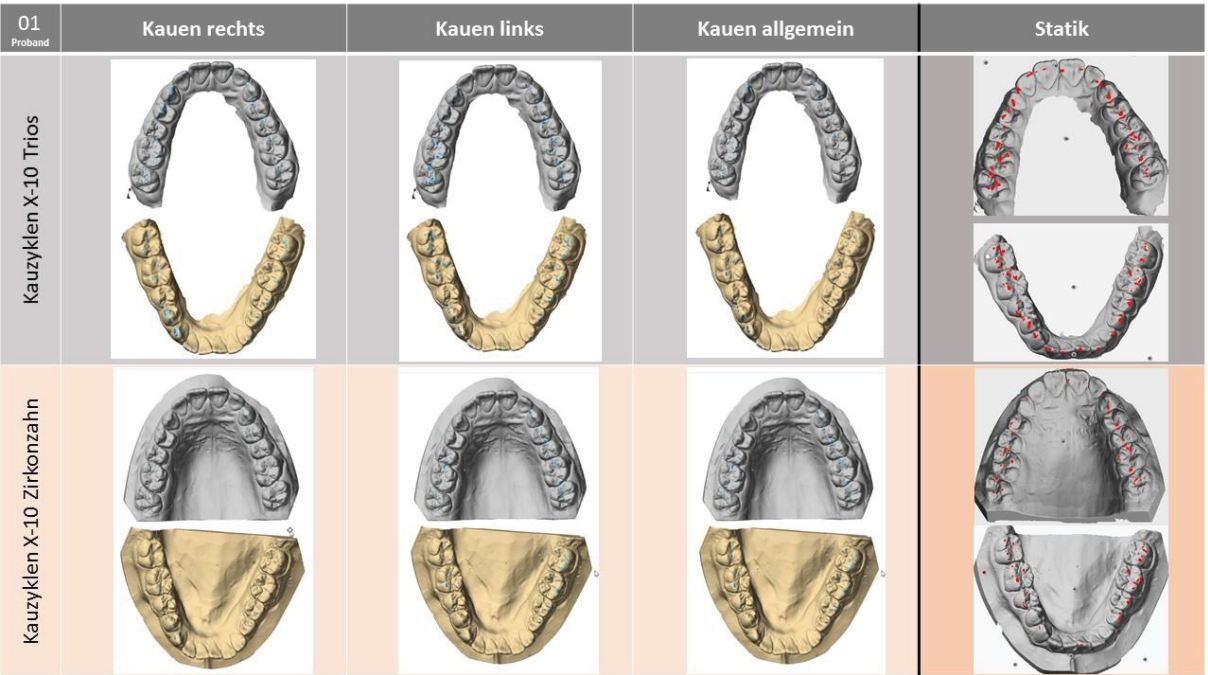


Abbildung 74: Ergebnisse Proband 1 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

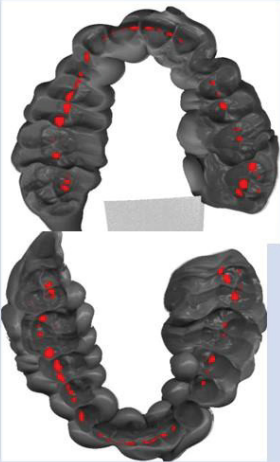
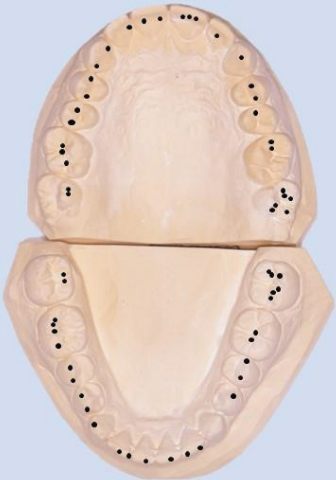
02 Proband	a. GEDAS	b. Foto	c. GEDAS+Foto
			

Abbildung 75: Ergebnisse Proband 2 aus Methode Klinik in der Statik.

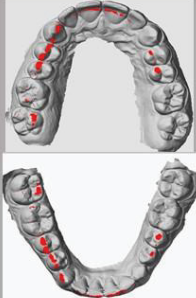
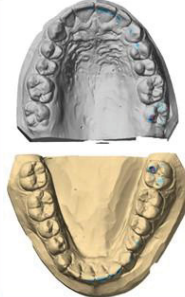
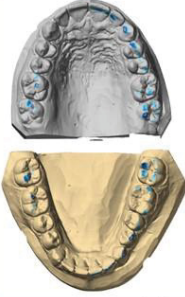
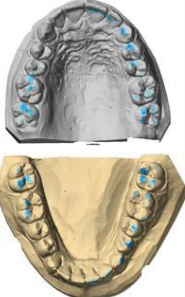
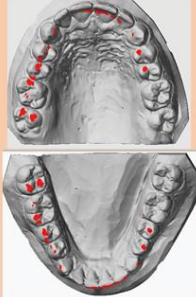
02 Proband	Kauen rechts	Kauen links	Kauen allgemein	Statik
Kauzyklen X-10 Trios				
Kauzyklen X-10 Zirkonzahn				

Abbildung 76: Ergebnisse Proband 2 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

03 Proband	a. GEDAS	b. Foto	c. GEDAS+Foto

Abbildung 77: Ergebnisse Proband 3 aus Methode Klinik in der Statik.

03 Proband	Kauen rechts	Kauen links	Kauen allgemein	Statik
Kauzyklen X-10 Trios				
Kauzyklen X-10 Zirkonzahn				

Abbildung 78: Ergebnisse Proband 3 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

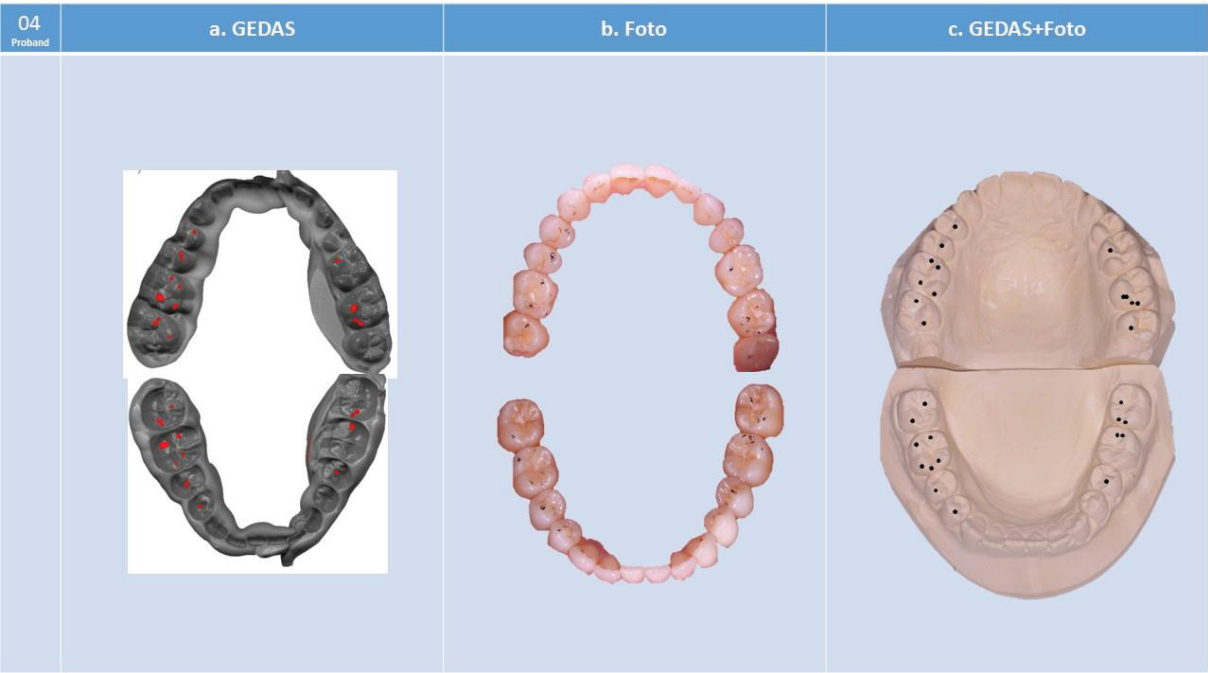


Abbildung 79: Ergebnisse Proband 4 aus Methode Klinik in der Statik.



Abbildung 80: Ergebnisse Proband 4 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

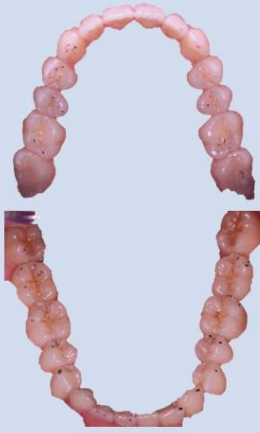
05 Proband	a. GEDAS	b. Foto	c. GEDAS+Foto
			

Abbildung 81: Ergebnisse Proband 5 aus Methode Klinik in der Statik.

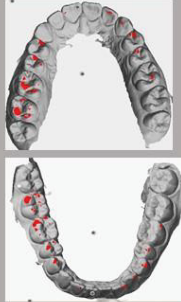
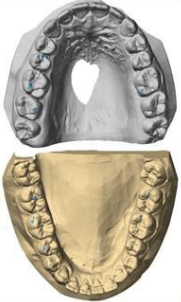
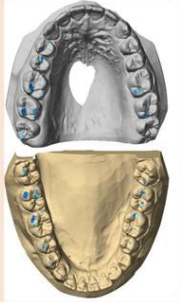
05 Proband	Kauen rechts	Kauen links	Kauen allgemein	Statik
Kauzyklen X-10 Trios				
Kauzyklen X-10 Zirkonzahn				

Abbildung 82: Ergebnisse Proband 5 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

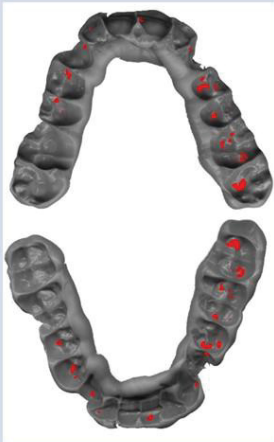
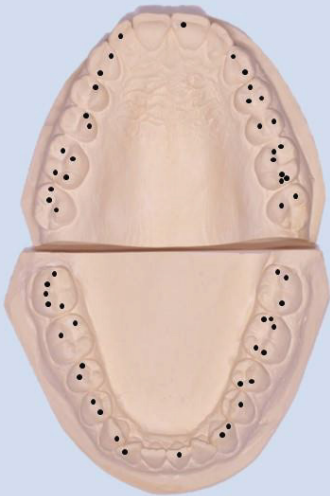
06 Proband	a. GEDAS	b. Foto	c. GEDAS+Foto
			

Abbildung 83: Ergebnisse Proband 6 aus Methode Klinik in der Statik.

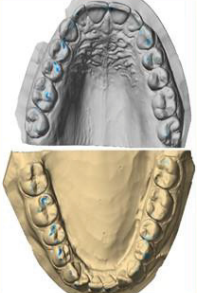
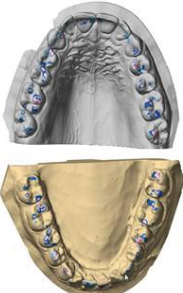
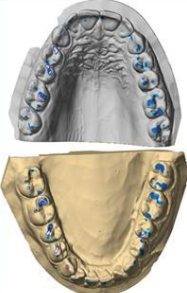
06 Proband	Kauen rechts	Kauen links	Kauen allgemein	Statik
Kauzyklen X-10 Trios				
Kauzyklen X-10 Zirkonzahn				

Abbildung 84: Ergebnisse Proband 6 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

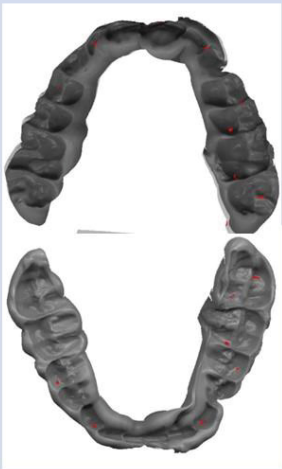
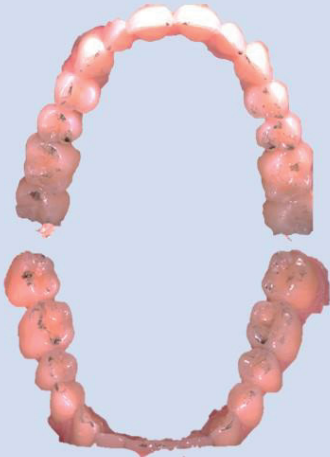
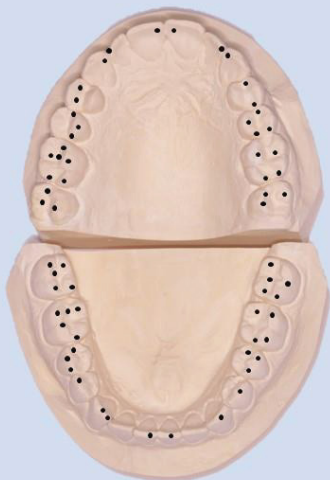
07 Proband	a. GEDAS	b. Foto	c. GEDAS+Foto
			

Abbildung 85: Ergebnisse Proband 7 aus Methode Klinik in der Statik.

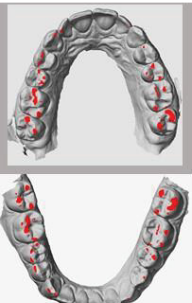
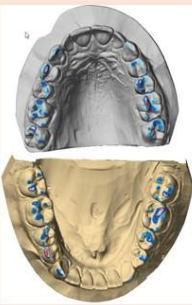
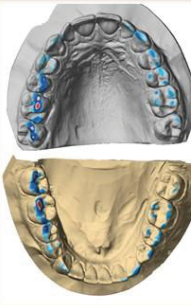
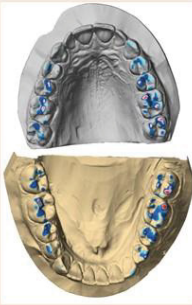
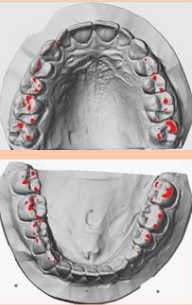
07 Proband	Kauen rechts	Kauen links	Kauen allgemein	Statik
Kauzyklen X-10 Trios				
Kauzyklen X-10 Zirrkonzahn				

Abbildung 86: Ergebnisse Proband 7 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

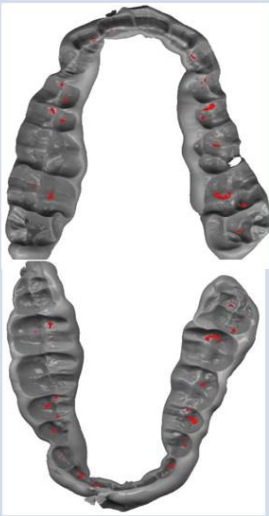
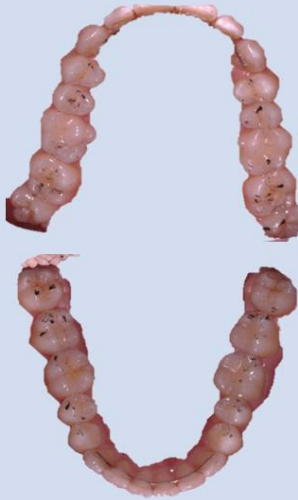
08 Proband	a. GEDAS	b. Foto	c. GEDAS+Foto
			

Abbildung 87: Ergebnisse Proband 8 aus Methode Klinik in der Statik.

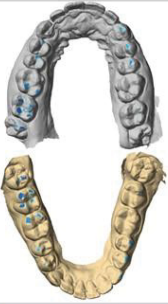
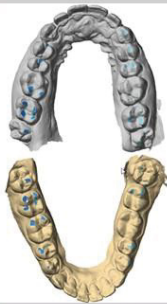
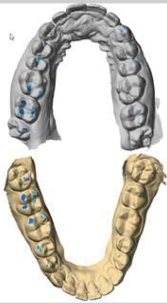
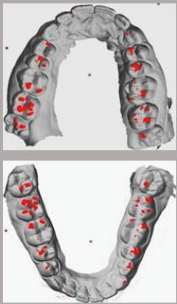
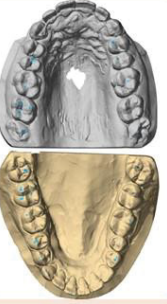
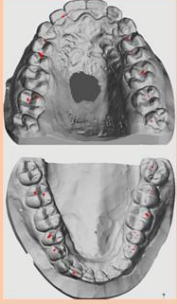
08 Proband	Kauen rechts	Kauen links	Kauen allgemein	Statik
Kauzyklen X-10 Trios				
Kauzyklen X-10 Zirkonzahn				

Abbildung 88: Ergebnisse Proband 8 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

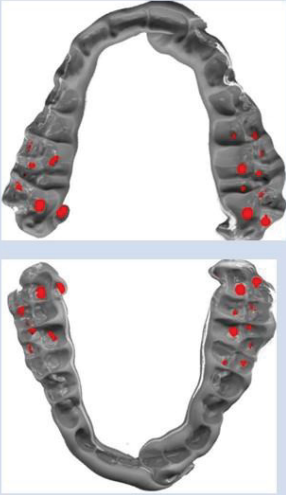
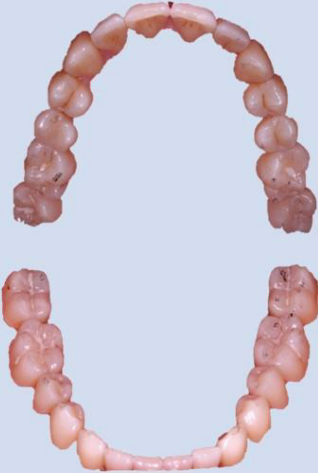
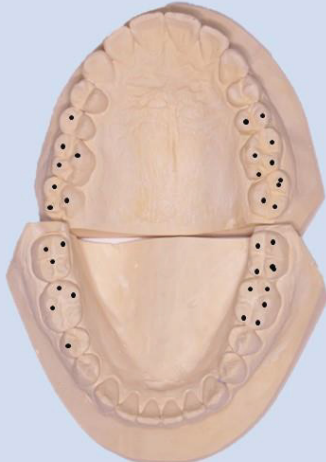
09 Proband	a. GEDAS	b. Foto	c. GEDAS+Foto
			

Abbildung 89: Ergebnisse Proband 9 aus Methode Klinik in der Statik.

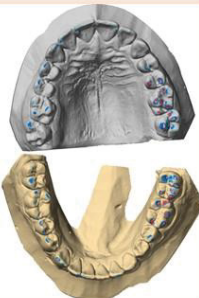
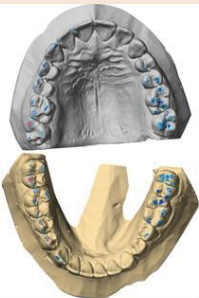
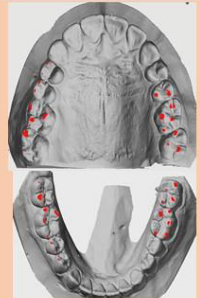
09 Proband	Kauen rechts	Kauen links	Kauen allgemein	Statik
Kauzyklen X-10 Trios				
Kauzyklen X-10 Zirrkonzahn				

Abbildung 90: Ergebnisse Proband 9 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

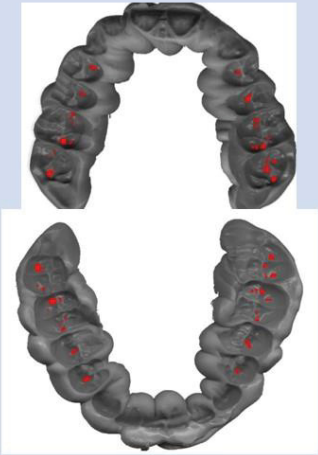
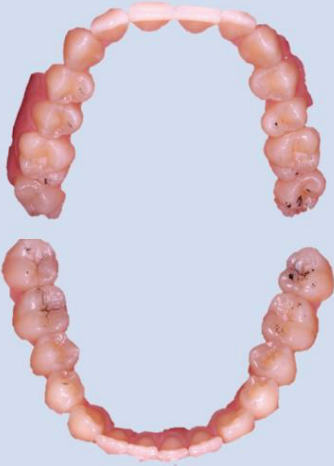
10 Proband	a. GEDAS	b. Foto	c. GEDAS+Foto
			

Abbildung 91: Ergebnisse Proband 10 aus Methode Klinik in der Statik.

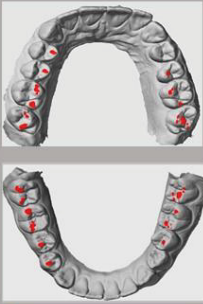
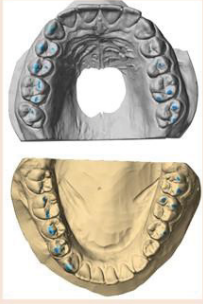
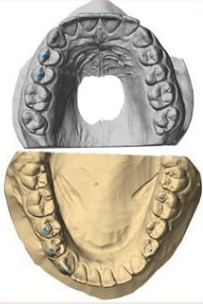
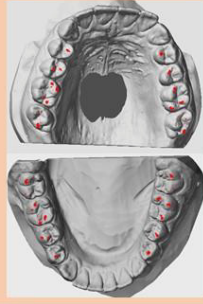
10 Proband	Kauen rechts	Kauen links	Kauen allgemein	Statik
Kauzyklen X-10 Trios				
Kauzyklen X-10 Zirkonzahn				

Abbildung 92: Ergebnisse Proband 10 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

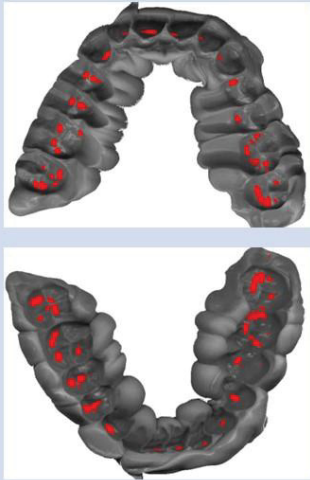
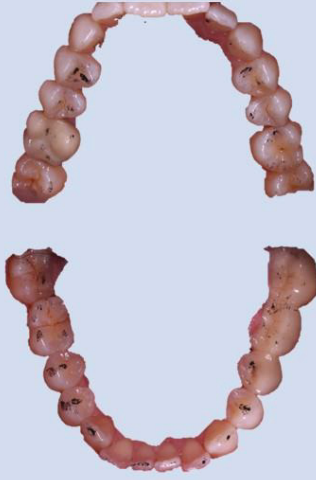
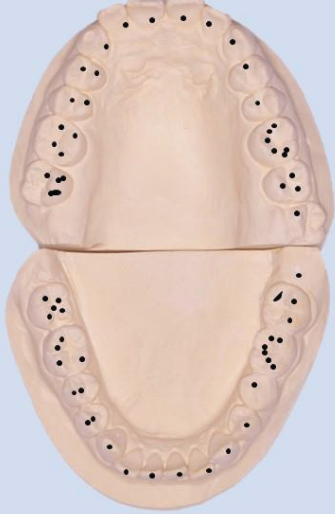
11 Proband	a. GEDAS	b. Foto	c. GEDAS+Foto
			

Abbildung 93: Ergebnisse Proband 11 aus Methode Klinik in der Statik.

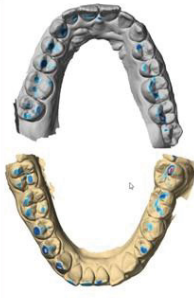
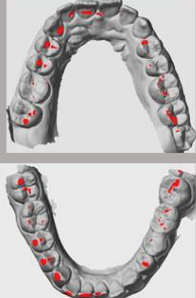
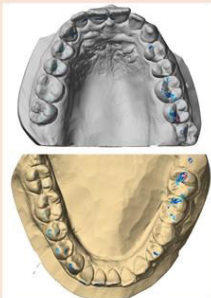
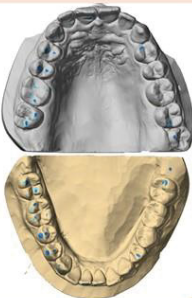
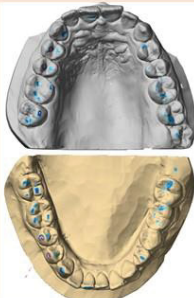
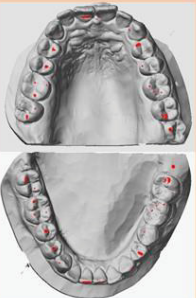
11 Proband	Kauen rechts	Kauen links	Kauen allgemein	Statik
Kauzyklen X-10 Trios				
Kauzyklen X-10 Zirkonzahn				

Abbildung 94: Ergebnisse Proband 11 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

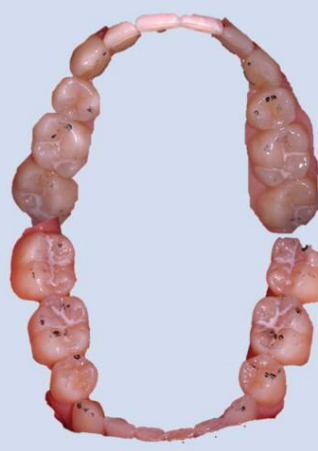
12 Proband	a. GEDAS	b. Foto	c. GEDAS+Foto
			

Abbildung 95: Ergebnisse Proband 12 aus Methode Klinik in der Statik.

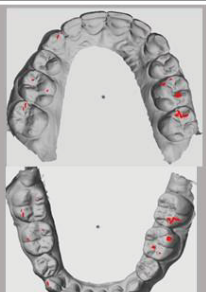
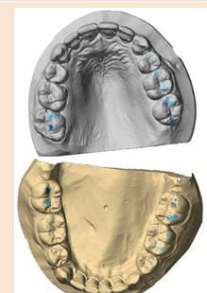
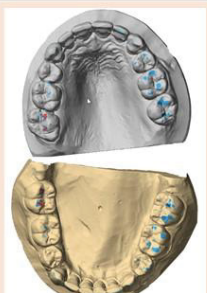
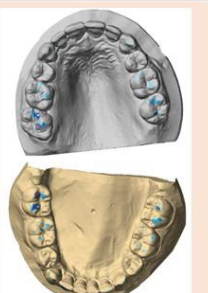
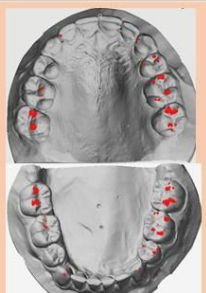
12 Proband	Kauen rechts	Kauen links	Kauen allgemein	Statik
Kauzyklen X-10 Trios				
Kauzyklen X-10 Zirkonzahn				

Abbildung 96: Ergebnisse Proband 12 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

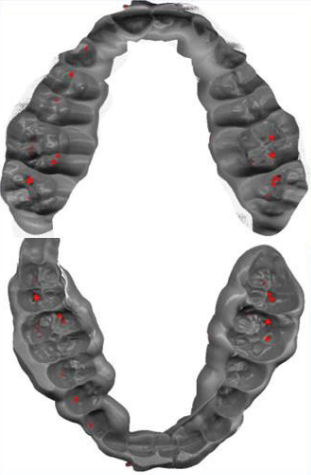
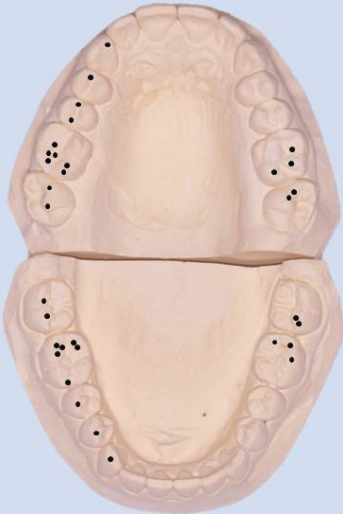
13 Proband	a. GEDAS	b. Foto	c. GEDAS+Foto
			

Abbildung 97: Ergebnisse Proband 13 aus Methode Klinik in der Statik.

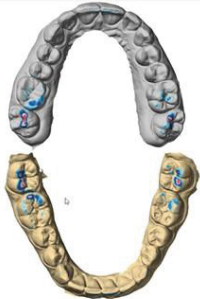
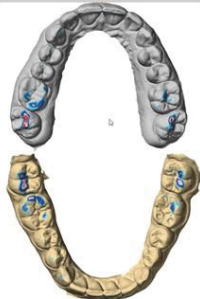
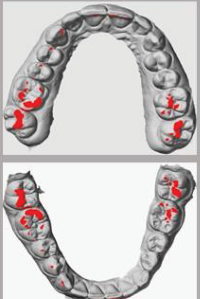
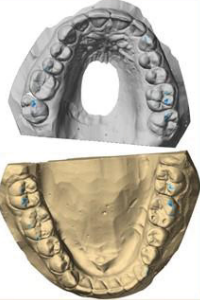
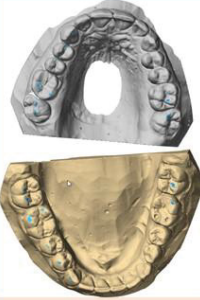
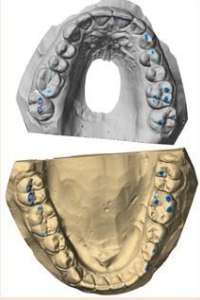
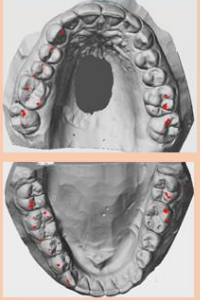
13 Proband	Kauen rechts	Kauen links	Kauen allgemein	Statik
Kauzyklen X-10 Trios				
Kauzyklen X-10 Zirkonzahn				

Abbildung 98: Ergebnisse Proband 13 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

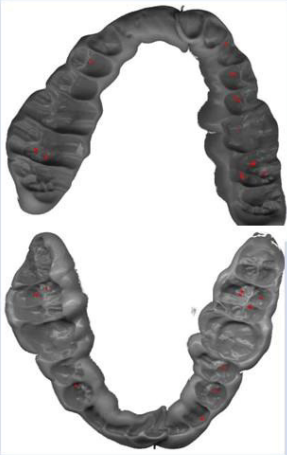
14 Proband	a. GEDAS	b. Foto	c. GEDAS+Foto
			

Abbildung 99: Ergebnisse Proband 14 aus Methode Klinik in der Statik.

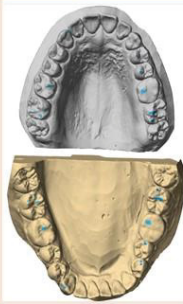
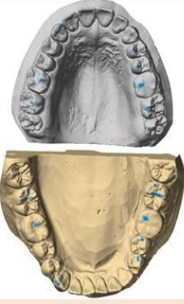
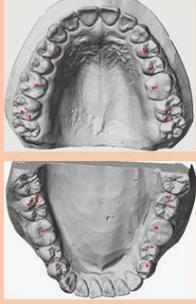
14 Proband	Kauen rechts	Kauen links	Kauen allgemein	Statik
Kauzyklen X-10 Trios				
Kauzyklen X-10 Zirkonzahn				

Abbildung 100: Ergebnisse Proband 14 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

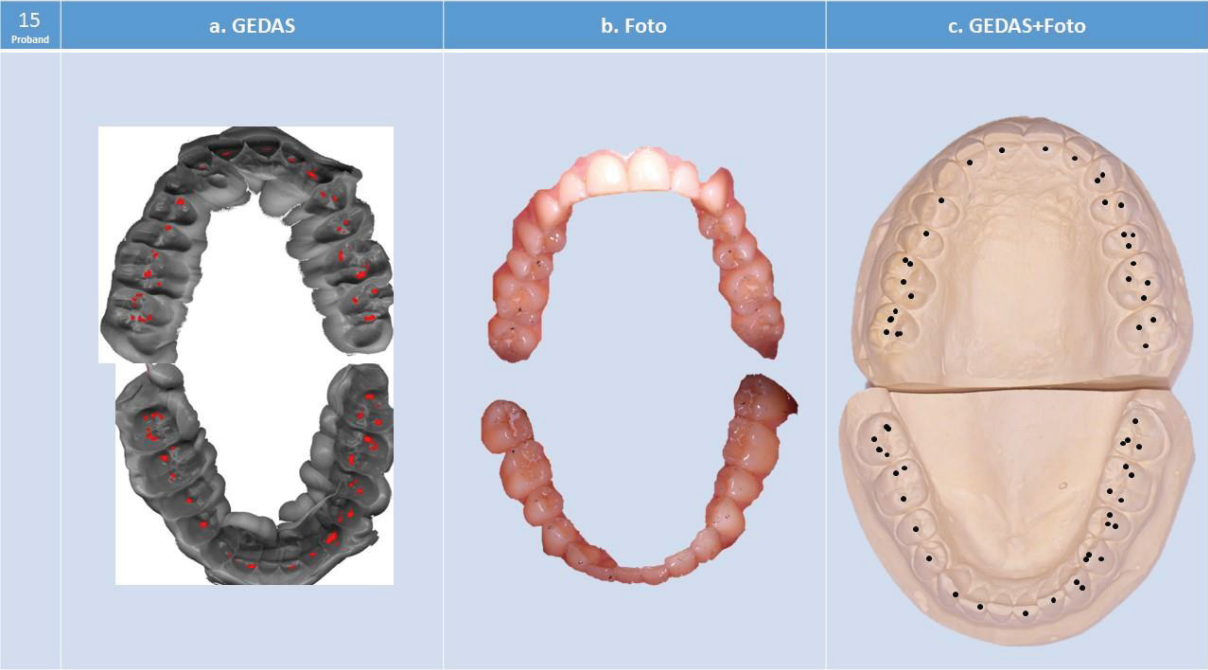


Abbildung 101: Ergebnisse Proband 15 aus Methode Klinik in der Statik.

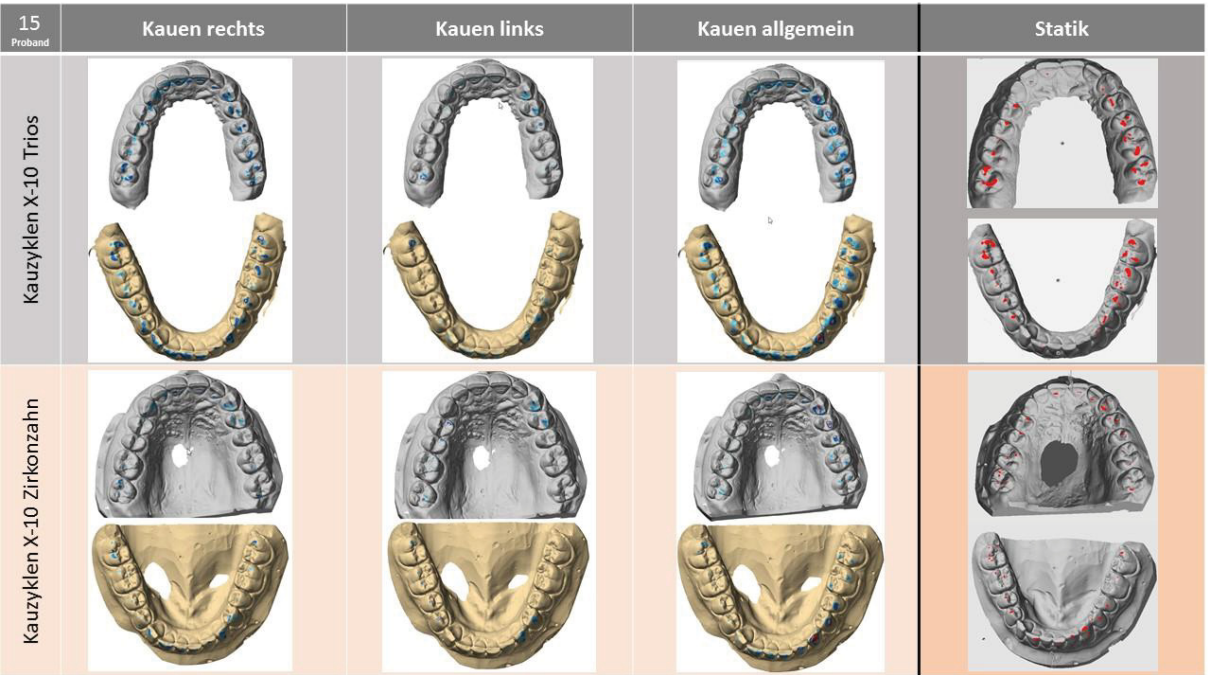


Abbildung 102: Ergebnisse Proband 15 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

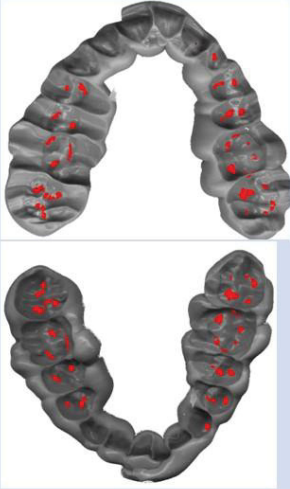
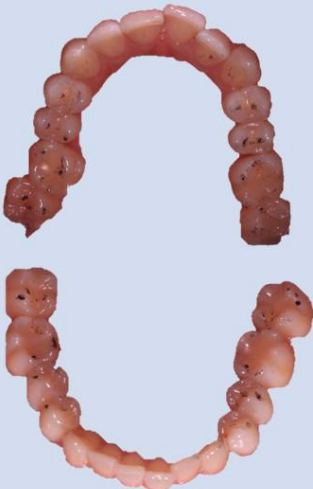
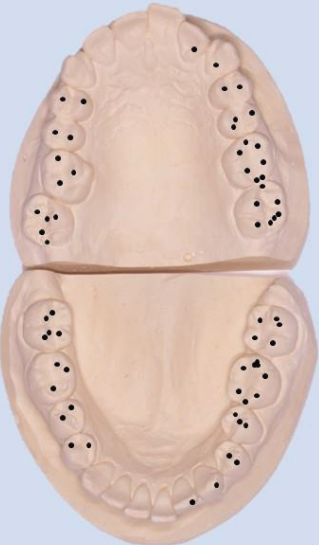
16 Proband	a. GEDAS	b. Foto	c. GEDAS+Foto
			

Abbildung 103: Ergebnisse Proband 16 aus Methode Klinik in der Statik.

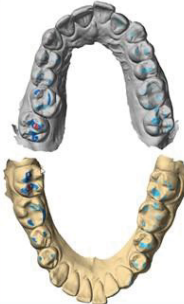
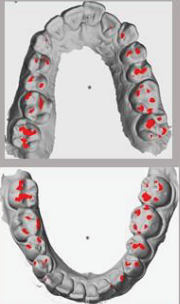
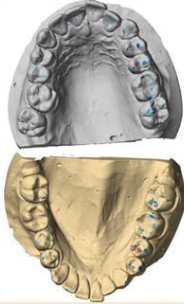
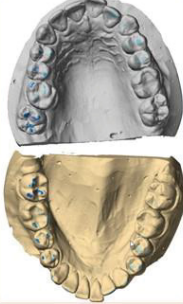
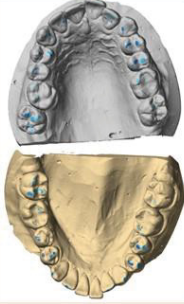
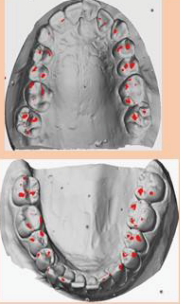
16 Proband	Kauen rechts	Kauen links	Kauen allgemein	Statik
Kauzyklen X-10 Trios				
Kauzyklen X-10 Zirkonzahn				

Abbildung 104: Ergebnisse Proband 16 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

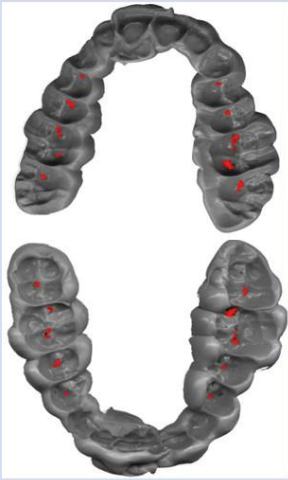
17 Proband	a. GEDAS	b. Foto	c. GEDAS+Foto
			

Abbildung 105: Ergebnisse Proband 17 aus Methode Klinik in der Statik.

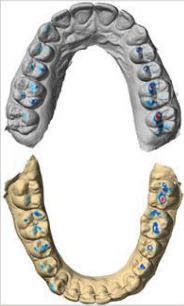
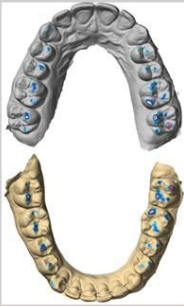
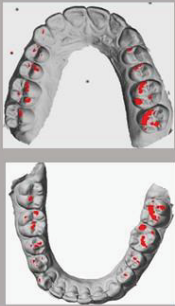
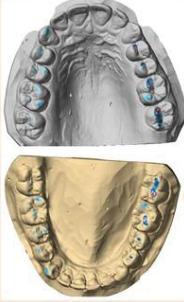
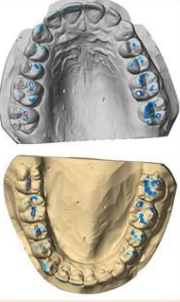
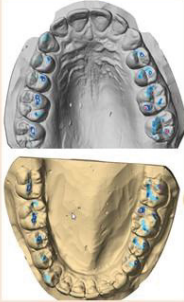
17 Proband	Kauen rechts	Kauen links	Kauen allgemein	Statik
Kauzyklen X-10 Trios				
Kauzyklen X-10 Zirkonzahn				

Abbildung 106: Ergebnisse Proband 17 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

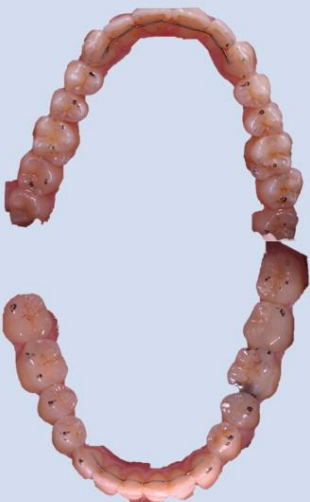
18 Proband	a. GEDAS	b. Foto	c. GEDAS+Foto
			

Abbildung 107: Ergebnisse Proband 18 aus Methode Klinik in der Statik.

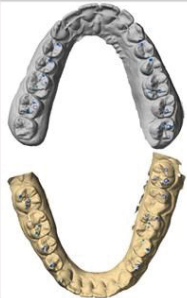
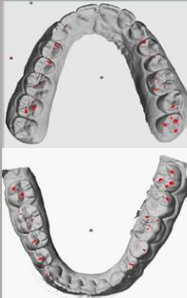
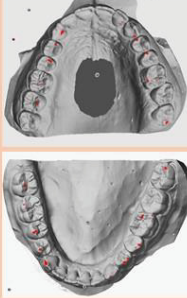
18 Proband	Kauen rechts	Kauen links	Kauen allgemein	Statik
Kauzyklen X-10 Trios				
Kauzyklen X-10 Zirkonzahn				

Abbildung 108: Ergebnisse Proband 18 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

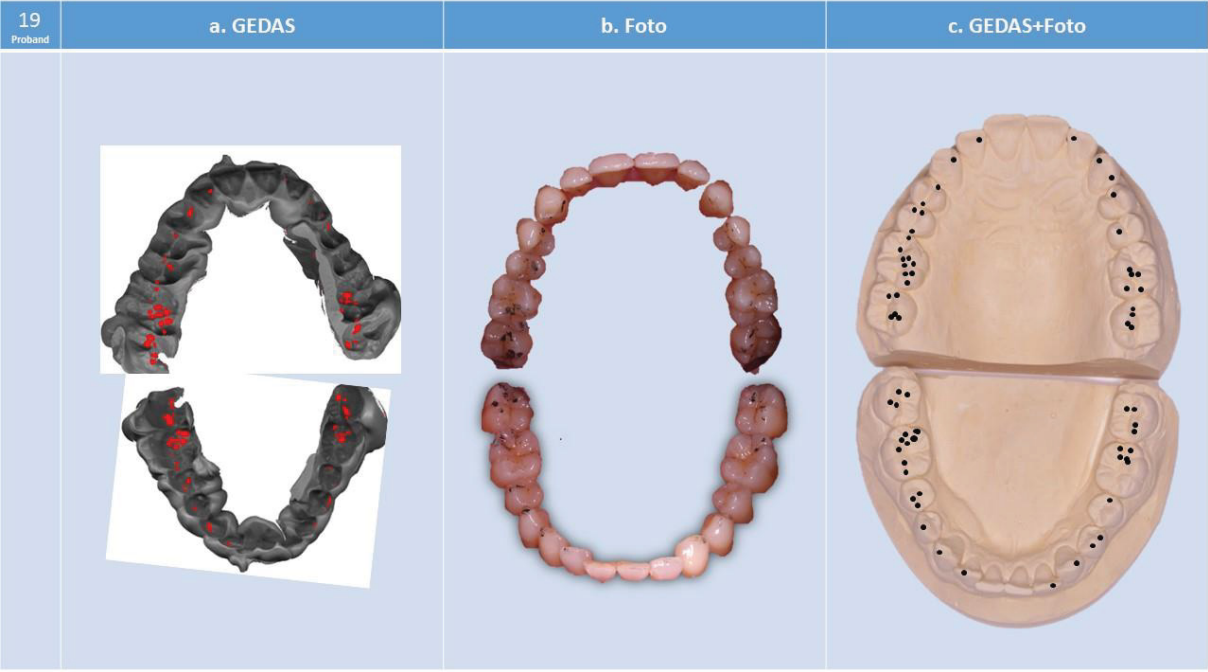


Abbildung 109: Ergebnisse Proband 19 aus Methode Klinik in der Statik.

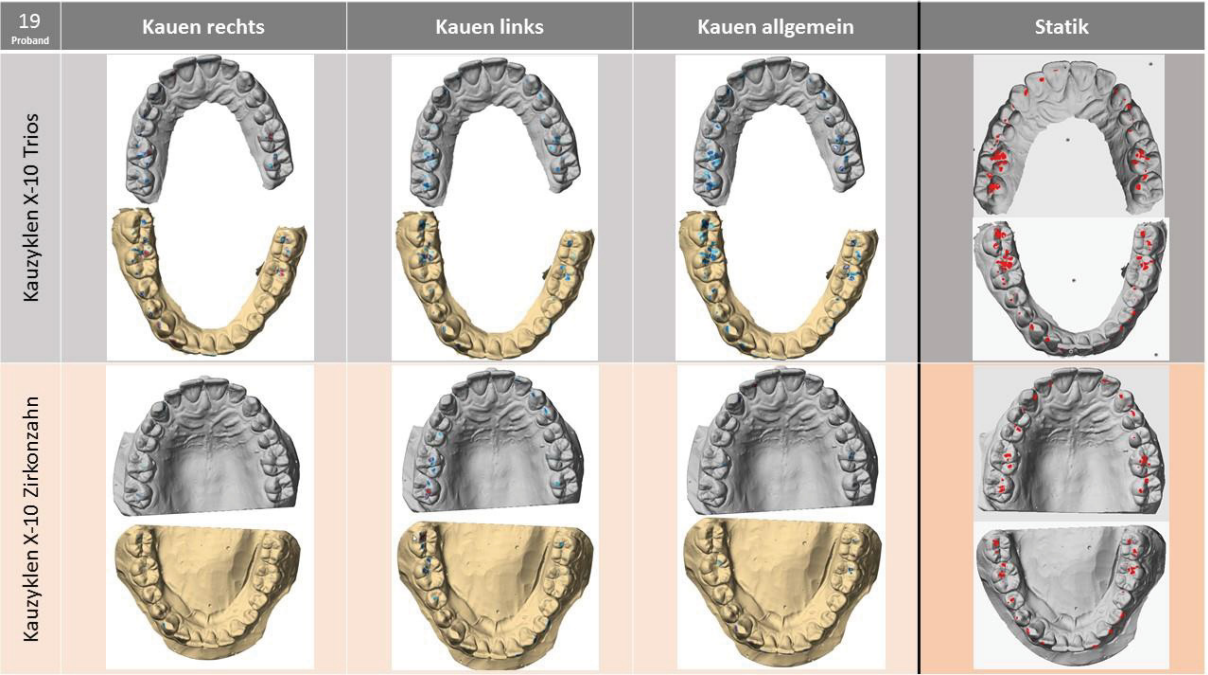


Abbildung 110: Ergebnisse Proband 19 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

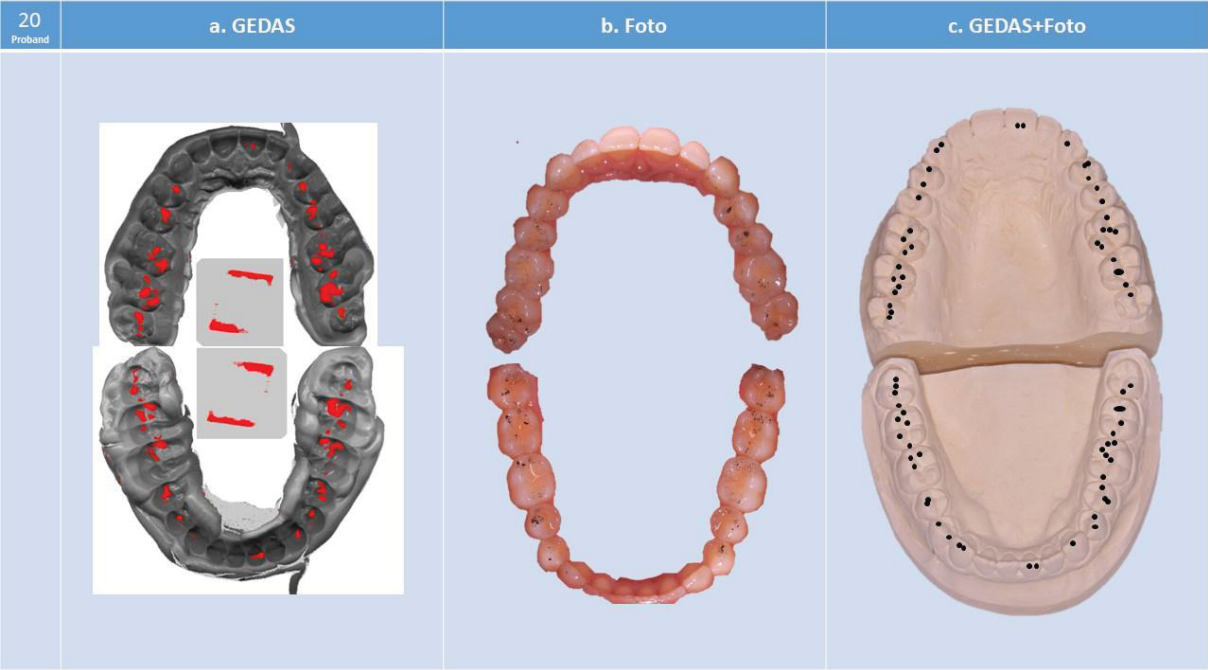


Abbildung 111: Ergebnisse Proband 20 aus Methode Klinik in der Statik.



Abbildung 112: Ergebnisse Proband 20 aus Methode IOS und EOS in Dynamik und Statik.

DANKSAGUNG

Mein Dank gilt all denjenigen, die mich auf irgendeine Art und Weise bei meiner Promotionsarbeit unterstützt und zum Gelingen beigetragen haben!

Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Professor Dr. Alfons Hugger für die Bereitstellung der Arbeit, für die durchgehende Unterstützung, Motivation, Zeit und wissenschaftliche Betreuung bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich bei Frau Professor Dr. Gierthmühlen bedanken, dass ich die Promotionsarbeit in ihrer Abteilung durchführen durfte.

Außerdem möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Dr. rer. med., Dipl.-Math. Sebastian Ruge und Herrn Professor Dr. Bernd Kordaß für die Unterstützung aus der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald sowie das Bereitstellen und Einweisen in das GEDAS System bedanken.

Mein weiterer Dank gilt auch Herrn Dipl.- Ing. Wolfgang Brunner und Herrn Dipl.- Ing. Dennis Sommer für die Hilfe aus der zebris Medical GmbH, Isny, Deutschland, für die spezielle Abwandlung der Software zu meinen Zwecken sowie für zahlreiche Ideen, die in die Arbeit mit eingeflossen sind.

Hervorheben möchte ich dabei auch Dennis für die durchgehende Unterstützung, Motivation und Geduld.

Ein außerordentlicher Dank gilt meinen Eltern und meiner Oma, die mich durchgehend motiviert und mir das Studium und den Weg zur Promotionsarbeit überhaupt ermöglicht haben.

Nicht zu vergessen sind all die Probanden, die sich freiwillig für die ganzen Messungen, Abformungen, Bissregistrare und das Essen der vielen Gummibärchen zur Verfügung gestellt haben. Ohne euch wäre die Arbeit gar nicht möglich gewesen.