

Aus dem Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin und der
3D-DENTAL-RADIOLOGIE MESANTIS Berlin

DISSERTATION

**Reliabilität der digitalen Okklusionsanalyse von OccluSense
und verschiedenen Intraoralscannern im Vergleich zu
klassischer instrumenteller Okklusionsanalyse**

**Reliability of the digital occlusal analysis by OccluSense and
different 3D intraoral scanners in comparison to the classic
instrumental occlusal analysis**

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von
Plamena Schütze
aus Pazardzhik, Bulgarien

Datum der Promotion: 03.03.2023

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	IV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VI
TABELLENVERZEICHNIS	IX
ABSTRAKT.....	X
ABSTRACT.....	XI
1 EINLEITUNG.....	1
1.1 Okklusion	2
1.1.1 Statische Okklusion.....	2
1.1.2 Dynamische Okklusion.....	2
1.1.3 Bedeutung der Okklusion.....	2
1.2 Konventionelle non-digitale Möglichkeiten zur Erfassung okklusaler Kontakte.....	3
1.2.1 Klassische instrumentelle Okklusionsanalyse	3
1.2.2 Okklusionsanalyse mittels Okklusionspapier	5
1.3 Digitale Darstellung okklusaler Kontakte	6
1.3.1 Intraoralscanner	6
1.3.2 Virtueller Artikulator	10
1.3.3 GEDAS.....	11
1.3.4 T-Scan.....	11
1.3.5 OccluSense	13
1.4 Begriffserklärung Reliabilität, Sensitivität, Spezifität.....	14
1.4.1 Reliabilität.....	14
1.4.2 Sensitivität	15
1.4.3 Spezifität.....	15
FRAGESTELLUNG.....	16
2 METHODIK	18

2.1	Modelle	18
2.1.1	Gruppe 1	18
2.1.2	Gruppe 2	19
2.1.3	Gruppe 3	20
2.1.4	Gruppe 4	21
2.1.5	Gruppe 5	22
2.2	Klassische instrumentelle Okklusionsanalyse mittels Shimstock-Folie	23
2.3	Klassische instrumentelle Okklusionsanalyse mittels Okklusionspapier	27
2.4	OccluSense	28
2.5	CS 3600	30
2.6	TRIOS 4	31
2.7	Emerald S	32
2.8	iTero Element 5D+	33
2.9	DiOS 4.0 i500	35
3	ERGEBNISSE	37
3.1	Instrumentelle Okklusionsanalyse mittels Okklusionspapier	38
3.1.1	Okklusionspapier 12 µm	38
3.1.2	Okklusionspapier 40 µm	40
3.1.3	Vergleich zwischen 12 µm Okklusionspapier und 40 µm Okklusionspapier	41
3.2	Intraoralscanner	42
3.2.1	CS 3600	42
3.2.2	TRIOS 4	44
3.2.3	Emerald S.....	46
3.2.4	iTero Element 5D+	48
3.2.5	DiOS 4.0.....	50
3.2.6	Vergleich der Intraoralscanner.....	52
3.2.7	Vergleich zwischen der konventionellen Okklusionsanalyse mittels Okklusionspapier und der Okklusionsanalyse durch Intraoralscanner	53
3.3	OccluSense	54
3.3.1	Vergleich von Okklusionspapier und OccluSense als Methoden zur Okklusionsanalyse	56
3.4	Einfluss verschiedener Malokklusionen auf die Reliabilität	57
4	DISKUSSION	58
4.1	Diskussion der Messmethoden	59
4.1.1	Shimstock-Folie als Referenzmethode	59
4.1.2	Okklusionsfolien	60
4.1.3	OccluSense	61
4.1.4	Intraoralscanner	63
4.1.5	Statistische Auswertung.....	64
4.2	Diskussion der Studienmodelle	65
4.3	Diskussion der Ergebnisse	66

4.4	Schlussfolgerungen	71
5	AUSBLICK	74
6	LITERATURVERZEICHNIS	76
7	EIDESSTATTLICHE VERSICHERUNG	84
8	LEBENS LAUF	85
9	DANKSAGUNG.....	86
10	BESCHEINIGUNG STATISTIK	87

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Aufl.	Auflage
bspw.	beispielweise
bzw.	beziehungsweise
CAD	computer-aided design
CAM	computer-aided manufacturing
FN	false negative / falsch negativ
FNR	false negative rate / Falsch-negativ-Rate
FP	false positive / falsch positiv
FPR	false positive rate /Falsch-positiv-Rate
g	Gramm
GEDAS	Greifswald Digital Analyzing System
ggf.	gegebenfalls
GKV	gesetzliche Krankenversicherung
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
IOA	instrumentelle Okklusionsanalyse
IOS	Intraoralscanner
κ	Cohen's Kappa Koeffizient
Kap.	Kapitel
KI	künstliche Intelligenz
μm	Mikrometer
mm	Millimeter
OcS	OccluSense
OK	Oberkiefer
PKV	private Krankenversicherung
Ref.-Nr.	Referenznummer
RN	richtig negativ
RNR	Richtig-Negativ-Rate
RP	richtig positiv
RPR	Richtig-positiv-Rate
SPSS	Statistical Package for Social Sciences

STL	Standard Triangle Language / Standard Tessellation Language
s.u.	siehe unten
Tab.	Tabelle
TN	true negative
TNR	true negative rate
TP	true positive
TPR	true positive rate
VA	virtueller Artikulator
UK	Unterkiefer
z.B.	zum Beispiel
Σ	Summe
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional

Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 1: Klassische instrumentale Okklusionsanalyse mittels Shimstock-Folie</i>	4
<i>Abb. 2: Farbige Markierungen nach der Anwendung unterschiedlicher Okklusionsfolien</i>	5
<i>Abb. 3: Intraorale Scanner verschiedener Firmen. Von links nach rechts - TRIOS von 3Shape, iTero Element 2D von iTero, CEREC Omicam von Dentsply Sirona, True Definition von 3M</i>	6
<i>Abb. 4: Virtueller Artikulator von SAM-Typ angeboten von Exocad</i>	10
<i>Abb. 5: T-Scan Novus von Tekscan</i>	12
<i>Abb. 6: Das OccluSense Handgerät mit einer eingeführten Sensorfolie</i>	13
<i>Abb. 7: OccluSense Okklusogramm in 2D- und 3D-Ansicht</i>	13
<i>Abb. 8: Bukkalansicht rechts (Gruppe 1)</i>	19
<i>Abb. 9: Frontalansicht (Gruppe 1)</i>	19
<i>Abb. 10: Bukkalansicht links (Gruppe 1)</i>	19
<i>Abb. 11: Okklusalansicht Oberkiefer (Gruppe 1)</i>	19
<i>Abb. 12: Okklusalansicht Unterkiefer (Gruppe 1)</i>	19
<i>Abb. 13: Bukkalansicht rechts (Gruppe 2)</i>	20
<i>Abb. 14: Frontalansicht (Gruppe 2)</i>	20
<i>Abb. 15: Bukkalansicht links (Gruppe 2)</i>	20
<i>Abb. 16: Okklusalansicht Oberkiefer (Gruppe 2)</i>	20
<i>Abb. 17: Okklusalansicht Unterkiefer (Gruppe 2)</i>	20
<i>Abb. 18: Bukkalansicht rechts (Gruppe 3)</i>	21
<i>Abb. 19: Frontalansicht (Gruppe 3)</i>	21
<i>Abb. 20: Bukkalansicht links (Gruppe 3)</i>	21
<i>Abb. 21: Okklusalansicht Oberkiefer (Gruppe 3)</i>	21
<i>Abb. 22: Okklusalansicht Unterkiefer (Gruppe 3)</i>	21
<i>Abb. 23: Bukkalansicht links (Gruppe 4)</i>	22
<i>Abb. 24: Frontalansicht (Gruppe 4)</i>	22
<i>Abb. 25: Bukkalansicht links (Gruppe 4)</i>	22
<i>Abb. 26: Okklusalansicht Oberkiefer (Gruppe 4)</i>	22
<i>Abb. 27: Okklusalansicht Unterkiefer (Gruppe 4)</i>	22
<i>Abb. 28: Bukkalansicht rechts (Gruppe 5)</i>	23
<i>Abb. 29: Frontalansicht (Gruppe 5)</i>	23

Abb. 30: Bukkalansicht links (Gruppe 5).....	23
Abb. 31: Okklusalansicht Oberkiefer (Gruppe 5)	23
Abb. 32: Okklusalansicht (Gruppe 5).....	23
Abb. 33: Artex Type CP Artikulator von Amann Girschbach mit dem montierten Gewicht von 3 kg	24
Abb. 34: Shimstock-Folie eingespannt in einer Klemmpinzette	24
Abb. 35: Versuchsaufbau der klassischen instrumentellen Okklusionsanalyse.....	25
Abb. 36: Vorhandener statischer Okklusionskontakt an Zahn 16	26
Abb. 37: Okklusionserfassung mit Arti-Check 40 μ m im linken Seitenzahsegment.....	28
Abb. 38: Beispiel für Okklusionsprotokoll: Messung 3 von Modell 5.3 (Gruppe 5).....	28
Abb. 39: Versuchsaufbau OccluSense	29
Abb. 40: Digitales Okklusogramm OccluSense	30
Abb. 41: Digitales Okklusogramm CS 3600.....	31
Abb. 42: Digitales Okklusogramm TRIOS 4.....	32
Abb. 43: Digitales Okklusogramm Emerald S.....	33
Abb. 44: Digitales Okklusogramm iTero	34
Abb. 45: Digitales Okklusogramm DiOS 4.0	36
Abb. 46: Grafische Darstellung der Reliabilität, Spezifität und Sensitivität von 12 μ m Okklusionspapier in den verschiedenen Dysgnathiegruppen	39
Abb. 47: Grafische Darstellung der Reliabilität, Spezifität und Sensitivität von 40 μ m Okklusionspapier in den verschiedenen Dysgnathiegruppen	41
Abb. 48: Vergleich von 12 μ m Okklusionspapier und 40 μ m Okklusionspapier.....	42
Abb. 49: Grafische Darstellung der Reliabilität, Spezifität und Sensitivität von CS 3600 in den verschiedenen Dysgnathiegruppen	44
Abb. 50: Grafische Darstellung der Reliabilität, Spezifität und Sensitivität von TRIOS 4 in den verschiedenen Dysgnathiegruppen	46
Abb. 51: Grafische Darstellung der Reliabilität, Spezifität und Sensitivität von Emerald S in den verschiedenen Dysgnathiegruppen	48
Abb. 52: Grafische Darstellung der Reliabilität, Spezifität und Sensitivität von iTero Element 5D Plus in den verschiedenen Dysgnathiegruppen.....	50
Abb. 53: Grafische Darstellung der Reliabilität, Spezifität und Sensitivität von DiOS 4.0 in den verschiedenen Dysgnathiegruppen	52
Abb. 54: Vergleich zwischen den Intraoralscannern.....	53

Abb. 55: Vergleich zwischen der konventionellen Okklusionsanalyse mittels Okklusionspapier und der Okklusionsanalyse durch Intraoralscanner54

Abb. 56: Grafische Darstellung der Reliabilität, Spezifität und Sensitivität von OccluSense in den verschiedenen Dysgnathiegruppen55

Abb. 57: Vergleich zwischen Okklusionspapier und OccluSense56

Tabellenverzeichnis

<i>Tab. 1: Wahrheitsmatrix zur Berechnung der Sensitivität und der Spezifität</i>	15
<i>Tab. 2: Kreuztabelle zu Darstellung der Sensitivität und Spezifität von Okklusionspapier (12 µm) im direkten Vergleich zum Goldstandard</i>	38
<i>Tab. 3: Kreuztabelle zu Darstellung der Sensitivität und Spezifität von 40 µm Okklusionspapier im direkten Vergleich zum Goldstandard.....</i>	40
<i>Tab. 4: Kreuztabelle zu Darstellung der Sensitivität und Spezifität von CS 3600 im direkten Vergleich zum Goldstandard.....</i>	43
<i>Tab. 5: Kreuztabelle zu Darstellung der Sensitivität und Spezifität von TRIOS 4 im direkten Vergleich zum Goldstandard.....</i>	45
<i>Tab. 6: Kreuztabelle zu Darstellung der Sensitivität und Spezifität von Emerald S im direkten Vergleich zum Goldstandard.....</i>	47
<i>Tab. 7: Kreuztabelle zu Darstellung der Sensitivität und Spezifität von iTero Element 5D+ im direkten Vergleich zum Goldstandard</i>	49
<i>Tab. 8: Kreuztabelle zu Darstellung der Sensitivität und Spezifität von DiOS 4.0 im direkten Vergleich zum Goldstandard.....</i>	51
<i>Tab. 9: Kreuztabelle zu Darstellung der Sensitivität und Spezifität von OccluSense im direkten Vergleich zum Goldstandard.....</i>	55
<i>Tab. 10: Darstellung der höchsten und niedrigsten Reliabilitätswerte aller untersuchten Methoden und die Studiengruppe, in der sie aufgetreten sind Der Cohens-Kappa-Koeffizient ist in Klammern angezeigt.....</i>	57

Abstrakt

Einleitung: Softwarebasierte Technologien sind heute ein unabdingbarer Teil moderner Medizin. Diverse computergestützte Geräte finden genauso Anwendung in der Zahnmedizin, hauptsächlich in Bereichen wie Diagnostik, Datenanalyse und Therapieplanung. Die Forschung über den digitalen Workflow in der Zahnheilkunde ist umfangreich und dynamisch. Dennoch sind wissenschaftliche Studien über digitale Okklusogramme mangelhaft. Ziel dieser Arbeit war es, digitale Messinstrumente für Okklusionsanalyse wie OccluSense (OcS) und Intraoralscanner (IOS) zu untersuchen und deren Reliabilität im Vergleich zu konventionellen Techniken zu bestimmen.

Methodik: Zwanzig Kiefermodellpaare mit unterschiedlichen Malokklusionen wurden in einem semi-justierbaren Artex CP Artikulator montiert. Die statische Okklusion wurde anhand 8 µm Shimstock-Folie als Goldstandard erfasst. Demgegenüber wurden acht weitere Methoden geprüft, darunter Okklusionspapier 12 µm and 40 µm, OccuSense, TRIOS 4, iTero Element 5D+, CS 3600, Emerald S und DiOS 4.0. Die Parameter Sensitivität, Spezifität und Reliabilität (berechnet durch den Cohen's Kappa Koeffizient „κ“) wurden jeweils erhoben. Insgesamt wurden 12800 Messungen durchgeführt.

Ergebnisse: 12 µm und 40 µm Okklusionspapier hatte die höchste Reliabilität (respektiv $\kappa = 0,93$ und $\kappa = 0,94$), was einer sehr guten Übereinstimmung mit dem Goldstandard entsprach. Die Okklusionskarten der Intraoralscanner zeigten eine gute Übereinstimmung mit der Referenzmethode mit iTero Element 5D+ als zuverlässigstem Scanner. κ betrug in der IOS-Gruppe wie folgt: iTero Element 5D+ (0,80), Emerald S (0,75), TRIOS 4 (0,69), DiOS 4.0 (0,61), CS 3600 (0,61). In Abhängigkeit von der vorhandenen Bissanomalie schwankten die Sensitivität-, Spezifität- und Reliabilitätswerte. OccluSense hatte eine durchschnittliche Reliabilität von $\kappa = 0,22$ und hatte die größte Ergebnisabweichung zwischen den verschiedenen Malokklusionsmodellen. Das Ergebnis in der Tiefbissgruppe hatte eine niedrige Übereinstimmungsrate mit $\kappa = 0,02$.

Schlussfolgerung: Innovative softwarebasierten Technologien sind zwar vielversprechend, jedoch derzeit keine gleichwertige Alternative zu den klassischen Okklusionsanalysemethoden. Intraoralscanner lieferten bei der Okklusionsanalyse klinisch akzeptable Ergebnisse, dennoch waren sie dem Okklusionspapier unterlegen. OccluSense wies eine geringe Übereinstimmung mit dem Goldstandard auf und kann besonders bei Patienten mit einem Tiefbiss nicht empfohlen werden.

Abstract

Introduction: Digitalised workflows have become an essential part of modern medicine. Dentistry profits from numerous digital appliances for diagnostic, analytic and treatment planning purposes. However the scientific data on digital occlusograms is still deficient. This study aims to provide clarification on different analytic tools for dental occlusion such as OccluSense (OcS) and intraoral scanners (IOS) and their reliability in comparison to conventional techniques.

Methods: Twenty resin dental casts representing different malocclusions were mounted in a semi-adjustable CP Artex articulator. The static occlusion was assessed using 8 μm shim stock foil as gold standard. Eight different methods of occlusion analysis were tested in comparison – articulating foil 12 μm and 40 μm , TRIOS 4, iTero element 5D+, CS 3600, Emerald S, DiOS 4.0 and OccluSense. The sensitivity, specificity and reliability (determined through Cohen's Kappa coefficient „ κ “) of each one was examined. A total of 12800 measurements was conducted.

Results: The highest reliability was yielded by 12 μm articulating paper ($\kappa = 0,93$) and 40 μm articulating paper ($\kappa = 0,94$), which classifies as an almost perfect agreement with the gold standard. All five IOS showed substantial agreement with the gold standard with iTero element 5D+ having the highest reliability amongst the IOS group. Cohen's Kappa measured as follows: iTero element 5D+ (0,80), Emerald S (0,75), TRIOS 4 (0,69), DiOS 4.0 (0,61), CS 3600 (0,61). Depending on the existing malocclusion results within dysgnathia modell groups varied. OcS had an average reliability of $\kappa = 0,22$ (fair agreement) and manifested the highest deviation throughout the different malocclusion groups. The OcS outcome in the deep bite group was especially notable with $\kappa = 0,02$ (poor agreement).

Conclusions: Within the limitations of this study it could be demonstrated that modern technology although promising does not yet provide an adequate alternative to the conventional occlusal analysis tools such as shim stock foil and articulating paper. IOS offer acceptable results but are not superior to articulating paper currently. OccluSense could not be recommended for assessing static occlusion in cases of deep bite.

1 Einleitung

„Πάντα χωρεῖ καὶ οὐδὲν μένει“
„Alles bewegt sich fort und nichts bleibt“

/Heraklit via Platon, „Kratylos“ 402a/

Der bekannte Aphorismus Heraklits „Alles bewegt sich fort und nichts bleibt“ trifft für viele Aspekte des Lebens zu. Nichts bleibt, wie es ist. Insbesondere bezieht sich dies auf den Entwicklungsstand der Wissenschaft. Seit der Erfindung des Computers befindet sich die Wissenschaft im ständigen Wandel. Die moderne Medizin profitiert äußerst von dieser rasanten Entwicklung. Dank des technischen Fortschritts des letzten Jahrhunderts wurden neue Erkenntnisse sowohl über die Prävention, als auch über die Diagnostik und die Therapie zahlreicher Krankheiten gewonnen. Durch Digitalisierung und Automatisierung von Prozessen kann hohe Präzision in kürzester Zeit erreicht werden.

Die Einsatzbereiche computerbasierter Technologien in der Zahnmedizin wachsen ebenfalls exponentiell. Von Planungssoftware für chirurgische Kieferrekonstruktionen über 3D-Druckern in der Zahnersatzkunde zu Biegerobotern in der Kieferorthopädie - die Möglichkeiten sind endlos. Die CAD/CAM-Technologie etabliert sich in der Zahnmedizin allmählich als Standard und entlastet Behandler und Zahntechniker bei ihrer täglichen Arbeit. Die signifikante Verbesserung der Software, der Herstellungstechniken sowie der Materialien in den letzten zwei Dekaden führte zu einem Anstieg im Gebrauch von CAD/CAM-basierten Technologien (1).

Der chairside-Vertreter des CAD-Prozesses in der Zahnarztpraxis ist der Intraoralscanner (IOS). IOS sind mittlerweile nicht nur ein Instrument zur optischen Erfassung von Patientenkiefen, sondern bieten ein Spektrum an Zusatzfunktionen wie Simulation des Behandlungsziels, Restaurationsplanung, Zahnfarbenbestimmung, Okklusionsanalyse etc. Seit einigen Jahren findet sogar künstliche Intelligenz (KI) Anwendung in IOS-Software. Der sogenannte „AI-Scan“ (artificial intelligence scan) von 3Shape TRIOS detektiert Weichgewebe maschinell und schneidet es automatisch aus, was den Scanvorgang erleichtert und die anschließende Bearbeitungszeit minimiert.

Nichtdestotrotz wird häufig von Schwierigkeiten beim Einsetzen von CAD/CAM-Restorationen auf Grund von Fehleinschätzung der okklusalen Verhältnissen durch den Intraoralscanner berichtet. Infolgedessen besteht meistens die Notwendigkeit eines okklusalen Nachjustierens durch den Behandler (2). Somit werden nach einem komplett oder

teilweise digitalen Workflow trotzdem analoge Hilfsmittel gebraucht, um den Zahnersatz endgültig einzusetzen. Daran knüpft die vorliegende Arbeit an und überprüft wie zuverlässig verschiedene Instrumente für digitale Okklusionsanalyse sind. Außerdem werden erweiterte Aussagen über die genaue Gegenüberstellung von den konventionellen Verfahren zur Okklusionserfassung und deren digitalen Alternativen getroffen.

1.1 Okklusion

Die Deutsche Gesellschaft für Funktionsdiagnostik und -therapie definiert die Okklusion als jeder Kontakt zwischen den Zähnen des Ober- und Unterkiefers (3). Respektiv bezeichnet man eine Non-Okklusion als fehlenden Kontakt bei Interkuspitation. Unter Interkuspitation versteht man den Zusammenschluss der Ober- und Unterkieferzähne (3). Man unterscheidet die statische Okklusion von der dynamischen Okklusion.

1.1.1 Statische Okklusion

Die statische Okklusion bezeichnet die Zahnkontakte in Schlussbisslage ohne Bewegung des Unterkiefers (3). Die gewohnheitsmäßig eingenommene statische Okklusion ergibt die sogenannte habituelle Okklusion oder habituelle Interkuspitation.

1.1.2 Dynamische Okklusion

Die dynamische Okklusion wird definiert als die Zahnkontakte, die infolge einer Bewegung des Unterkiefers entstehen (3). Dies ist beispielweise beim Kauen, Schlucken und Sprechen der Fall.

1.1.3 Bedeutung der Okklusion

Das Endziel jeder zahnmedizinischen Behandlung ist die Herstellung einer Regelokklusion, damit der Patient adäquat kauen, abbeißen und sich artikulieren kann. Eine harmonische Okklusion ist dabei viel mehr als ein intraorales Wohlgefühl.

Sie ist ein Produkt des Zusammenspiels aller Komponenten des Kauystems (4) bestehend aus den Kieferknochen, der Kaumuskulatur, den paarig angelegten Kiefergelenken, den Zähnen und dem Zahnhalteapparat, sowie deren Innervation. Es ist ein komplexes System, dessen gemeinsame Interaktion durch innere und äußere Faktoren beeinflussbar ist. Strukturelle oder funktionelle Veränderungen dieser Komponenten können indirekt zur Okklusionsstörungen führen.

Fehlerhafte Okklusion kann beispielsweise durch parodontale Läsionen, Zahnstellungsveränderungen, Abrasionen, restaurative Therapie oder Dyskinesien verursacht werden (5). Eine veränderte neuromuskuläre Programmierung kann als Folgen myofaziale Schmerzen, Läsionen der Kiefergelenke, Kapsulitiden und Muskelverkürzungen haben (5–7). Somit ist eine Malokklusion ein Risikofaktor für eine craniomandibuläre Dysfunktion (8–10). Die Okklusion hat zusätzlich eine Auswirkung auf den gesamten Bewegungsapparat bspw. eine Veränderung der Körperhaltung (11–14).

Stabile gleichmäßige okklusale Verhältnisse vermeiden Zahnwanderungen und Zahnfehlbelastungen langfristig (15). Weiterhin besteht ein Zusammenhang zwischen korrekter Okklusion und sportlicher Leistung. Zahlreiche Studien aus der Sportzahnmedizin konnten diese Korrelation in den letzten Jahrzehnten beweisen (16–18). Darüber hinaus könnten Okklusionsstörungen negative Auswirkungen auf die Psyche haben (19).

Aus den oben genannten Gründen ist die Okklusion von besonderer Bedeutung und wird in der Wissenschaft häufig thematisiert.

Die Okklusion, egal ob statisch oder dynamisch, ist für jeden Patienten ganz individuell. Um mögliche Okklusionsstörungen zu erkennen ist eine korrekte Okklusionsanalyse unumgänglich. Dazu bieten sich verschiedene Verfahren an, darunter klassische instrumentelle Methoden und innovative computergestützte Messinstrumente zur Okklusionserfassung.

1.2 Konventionelle non-digitale Möglichkeiten zur Erfassung okklusaler Kontakte

1.2.1 Klassische instrumentelle Okklusionsanalyse

Neben der klinischen Okklusionsanalyse, die direkt intraoral erfolgt, gibt es die sogenannte klassische instrumentelle Okklusionsanalyse. Sie ist definiert als das indirekte

Überprüfen der okklusalen Verhältnisse der Kiefer (20). Voraussetzung dafür sind präzise Abformungen der Patientenkiefer, ein Kieferrelationsregistrar, sowie die Ermittlung der genauen schädelbezügliche Oberkieferposition mittels eines Gesichtsbogens. Durch das kiefergelenkbezügliche Montage der dimensionsgetreuen Modelle in einem justierbaren Artikulator wird die intraorale Situation auf analogem Wege extraoral übertragen. Für die Erstellung des Okklusionsprotokolls wird die sogenannte Shimstock-Folie verwendet. Diese zeichnet sich durch hohe Reißfestigkeit, eine Stärke von 8 μm und eine Breite von 8 mm aus. Zur Überprüfung der Zahnkontakte wird die Folie zwischen den Zahnreihen interponiert (Abb. 1). Bei einem Interokklusalabstand in Interkuspitation $> 8 \mu\text{m}$ ist die Shimstock-Folie widerstandslos zwischen den Zähnen durchzuziehen. Wird die Folie durch das Antagonistenpaar geahnten, liegt ein statischer Okklusionskontakt ($\leq 8 \mu\text{m}$) vor (21).

Manche Autoren definieren zusätzlich den „Durchziehkontakt“, bei dem die Folie mit spürbarem Widerstand noch durchgezogen werden kann. Dies deutet auf einem schwachen Antagonistenkontakt bspw. beim Vorliegen einer Infra-Okklusion (21).



Abb. 1: Klassische instrumentale Okklusionsanalyse mittels Shimstock-Folie
Quelle: Eigene Aufnahme

Durch ihre minimale Schichtstärke zeichnet sich die Shimstock-Folie durch hohe Präzision aus. Mit ihr lassen sich interokklusale Abstände kleiner als 8 μm zuverlässig nachweisen (22). Außerdem liefert sie höhere Reliabilitätswerte als Okklusionspaier (23) und

ist in Genauigkeit überlegen (24). Aus diesem Grund wird sie seit Jahrzehnten als Goldstandard unter den konventionellen Methoden zur Okklusionsanalyse verwendet. Nichtsdestotrotz wird sie von manchen Wissenschaftlern als Methode zur Okklusionserfassung kritisiert. Auf Grund der Subjektivität des Behandlers bei der Beurteilung des Folienwiderstands wird die Aussagekraft dieser Methode hinterfragt (25). Deshalb sind nur wenige wissenschaftliche Studien auffindbar, die Shimstock-Folie als Referenzmethode verwenden. Dementsprechend wäre ein Studiendesign von wissenschaftlichem Interesse, bei dem die Auswertung des Shimstock-Okklusionsprotokolls objektiviert werden könnte.

1.2.2 Okklusionsanalyse mittels Okklusionspapier

Die am häufigsten verwendete Methode zur Okklusionsanalyse ist die Aufzeichnung der Zahnkontakte mit Okklusionspapier (auch Okklusionsfolie, Artikulationspapier, Artikulationsfolie, HANEL-Folie genannt). Das Okklusionspapier ist auf Grund der einfachen Handhabung und des niedrigen Preises beliebt (26). Es zeichnet sich durch eine spezielle Farbbeschichtung aus, die durch den Druck beim Zubeißen ihre Farbpigmente abgibt und somit die Okklusion farbig visualisiert (Abb. 2). Okklusionspapier bzw. Okklusionsfolien sind in verschiedenen Stärken (12 μm - 200 μm) und mehreren Farben verfügbar.



Abb. 2: Farbige Markierungen nach der Anwendung unterschiedlicher Okklusionsfolien

Quelle: <https://www.aegisdentalnetwork.com/id/2009/01/using-computerized-occlusal-analysis>

(Letzter Zugriff: 09.06.2022, 15:26)

Dabei spielt die Stärke der Okklusionsfolie eine entscheidende Rolle bei der Darstellung der Kontakte (27). Es gibt Studien, die Korrelation zwischen Bisskraft und Größe des dargestellten Okklusionskontaktes gefunden haben (28, 29). Andere konnten keine Beziehung zwischen appliziertem Druck und hinterlassenem farbigen Abdruck auf der Zahnoberfläche nachweisen (30).

Häufiger Kritikpunkt bei der Verwendung von Okklusionspapier sind die falsch positiven Ergebnisse (31, 32, 24), die zur Ungenauigkeiten und falscher Interpretation der Okklusion führen könnten. Ein weiterer Nachteil ist die fehlende Möglichkeit zur Archivierung sowie die schlechte Reproduzierbarkeit der erfassten Zahnkontakte (23, 33). Der widersprüchliche wissenschaftliche Stand zu diesem Thema führt zu der Notwendigkeit weiterer Abklärung.

1.3 Digitale Darstellung okklusaler Kontakte

1.3.1 Intraoralscanner

Der klassische Vertreter des technischen Fortschritts in der Zahnarztpraxis ist der Intraoralscanner (IOS). Eine Mehrzahl an Firmen der Dentalindustrie bietet mit steigender Tendenz einen eigenen IOS an (Abb. 4) (1).



Abb. 3: Intraorale Scanner verschiedener Firmen. Von links nach rechts - TRIOS von 3Shape, iTero Element 2D von iTero, CEREC Omicam von Dentsply Sirona, True Definition von 3M, Denterprise Quick scan IOS

Quelle: <https://www.intraoral-scanners.com>
(Letzter Zugriff: 09.06.2022, 15:34)

Der digitale Workflow besteht im Kern aus drei Komponenten: Digitalisierungssystem, CAD-Software und CAM-Einheit. Der erste Schritt dieses Arbeitsablaufs besteht in der Digitalisierung der Patientendaten bzw. dem Erstellen von virtuellen 3D-Modellen der Patientenkiefer. Dazu bietet sich ein direktes und ein indirektes Vorgehen an. Beim direkten Vorgehen werden die Kiefer bzw. Kieferareale des Patienten unter Verwendung eines Intraoral-scanners am Behandlungsstuhl erfasst. Der IOS-Algorithmus fügt die Rohdaten zu einem kompletten Modellsatz zusammen und stellt die Patientenkiefer visuell dar. Anschließend erfolgt der Entwurf der gewünschten Restauration oder Apparatur durch eine integrierte CAD-Software. Der Datensatz wird in STL-Format archiviert und von der CAM-Einheit (3D-Drucker oder Fräseinheit) gelesen und ausgeführt.

Alternativ bietet sich ein Desktopscanner als indirektes Digitalisierungssystem an. Hier werden die konventionellen Abformungen in einem zweiten Schritt im Labor digitalisiert – entweder über einen Abdruckscan oder über einen Gipsmodellscan. Studien, die das direkte mit dem indirekten Verfahren verglichen haben, zeigen eine leichte Überlegenheit von Desktopscannern in Genauigkeit und Präzision (34–36). Wird dennoch ein komplett digitaler Workflow angestrebt, stellt ein IOS eine unabdingbare Voraussetzung dar. Dank des intraoralen Scans werden Arbeitsschritte im Herstellungsprozess gespart, Laboraufwand gesenkt und die Behandlung beträchtlich beschleunigt. Infolgedessen ist der Intraoralscanner ein beliebtes Hilfsmittel unter den digital orientierten Zahnärzten geworden. Zudem wächst seine Beliebtheit genauso unter den Patienten. In einem direkten Vergleich von einer elektronisch-optischen Abformung mit IOS und einer konventionellen Abformung mit plastischem Abdruckmaterial, bevorzugten Patienten die digitale Alternative (37, 38).

Von großem Interesse besonders für die restaurative Zahnheilkunde sind deshalb Meta-Analysen über den Vergleich von konventionellen Abformmaterialien und optisch-elektronischer Abformung mittels IOS. In einem umfassenden systematischen Review von Abduo und Elseyoufi wurde als klarer Schwachpunkt optischer Abformungen die zunehmende Ungenauigkeit und Fehlerfortpflanzung bei Ganzkieferscans im Gegensatz zu kleinflächigen Scans nachgewiesen (39). Schmidt et al. testeten in einer aktuellen Update-Studie die neusten Software-Versionen verschiedener Intraoral-scanner. Die Untersuchung zeigte zwar eine Reduktion der Deviation und eine Verbesserung der Fehlerfreiheit bei Ganzkieferabformungen, allerdings lieferten klassische Polyvinylsiloxan-Abfor-

mungen weiterhin bessere Ergebnisse bezogen auf Genauigkeit und Präzision (40). Weitere Studien konnten die Tendenz zur Leistungsverbesserung der IOS bestätigen und sahen sie als klinisch gleichwertig zu den konventionellen Abformmaterialien an (41–43). Eine Situation z. B., bei der die optische Abformung durch einen IOS vorzuziehen ist, ist das Vorliegen eines parodontal vorgeschädigte Gebisses mit ausgedehnten Interdentalräumen. Insbesondere bei der Aligner-Herstellung im Rahmen einer kieferorthopädischen Therapie ist die genaue Wiedergabe des Interdentalraumes aus großer Bedeutung. Dies stellt jedoch eine Herausforderung für konventionelle Abformverfahren dar, die bedingt durch Reißen des Abdruckmaterials interdental häufig mangelhaft sind (44). Weiterhin sind optisch-elektronischen Abformungen dem klassischen Abdruckverfahren überlegen, wenn kleinere Kieferabschnitte bspw. zur Aufnahme von Einzelkronen erfasst werden (39).

Es sind zahlreiche Untersuchungen auffindbar, die Genauigkeit und Präzision von IOS erforscht haben. Allerdings zeigte die Meta-Analyse von Goracci et al., dass wenige Studien die Reliabilität von Intraoralscannern untersuchten (45). Ziel dieser Studie war es deshalb die Reliabilität der Okklusionsanalyse von den neusten Versionen verschiedener IOS auf dem Markt zu bestimmen. Denn eine der wichtigsten Aufgaben der CAD-CAM-Technik heutzutage ist die Kaufunktion wiederherzustellen (46). Dazu sollte die Okklusion virtuell korrekt erfasst, adäquat dargestellt und analysiert werden können.

Die computergestützte Okklusionsanalyse erfolgt in Form einer Okklusionskarte. Sie ist die graphische Darstellung der interokklusalen Distanz und wird nach der Aufnahme der Kieferrelation durch die Software des Intraoralscanners kalkuliert. Je nach Abstand zwischen einander gegenüberliegenden Punkten auf der Zahnoberfläche von Antagonistenzähnen werden verschiedenen Farben abgebildet (47). Somit entsteht ein digitales farbiges Okklusogramm. Die Erhebung von Parametern wie Reliabilität, Sensitivität und Spezifität ermöglicht eine Gegenüberstellung von solcheinem digitalen Okklusogramm und einem klassischen Okklusionsprotokoll.

Der aktuelle Forschungsstand zum Thema digitale Okklusionsanalyse zeigt eine ähnliche Tendenz auf wie die oben aufgeführte – die Präzision der Okklusionsanalyse nimmt mit zunehmender Scangröße ab. Die Zunahme der Scandaten geht mit einer Abnahme der Sensitivität einher (48). In einigen Studien variierten die Ergebnisse stark je nach ver-

wendetem IOS (39, 49–51). Andere konnten keine signifikanten Unterschiede in der klinischen Anwendung nachweisen (52). Da die Studienergebnisse widersprüchlich sind, ist weitere Abklärung und Vergleich zwischen den Okklusionsanalyse-Werkzeugen der neusten Intraoralscanner notwendig.

Außerdem wurde in In-vitro-Untersuchungen beobachtet, dass die Ungenauigkeit der digital dargestellten Okklusionskontakte im Frontzahnbereich höher ist im Gegensatz zum Seitenzahnbereich, wobei die Stärke der Kontakte durch die Scanner überschätzt wurde (53). Aus diesem Grund wäre es wissenswert, ob weitere elektronische Geräte zur Erfassung okklusaler Kontakte (z.B. OccluSense) auch zur Überschätzung der Okklusion führen.

Die Mehrheit der Studien, die sich mit digitalen Okklusogrammen beschäftigen, verwenden als Referenzmethode entweder ein Industrial-Scanner (54–56) oder Bissregistrare. Im zweiten Fall wurden die Bissregistrare anschließend durch einen weiteren Laborscanner durchlichtet. Je nach Schichtdicke bzw. Transluzenz des Materials wurde die Stärke der Okklusionskontakte berechnet (57, 58). Allerdings ist diese indirekte Okklusionsanalyse nicht optimal, da die Lokalisation dieser berechneten Okklusionskontakte auf der entsprechenden Zahnoberfläche eine potenzielle Fehlerquelle darstellt. Aus dieser Sicht eignet sich die klassische instrumentelle Okklusionsanalyse mittels Shimstock-Folie besser als Goldstandardmethode, da sie präzise, anwenderfreundlich und weniger fehleranfällig ist. Dennoch sind sehr wenige Studien auffindbar, die diesen Studiendesign aufweisen (59, 60). Ziel dieser Studie war es hierfür die konventionelle analoge Okklusionsanalyse durch Shimstock-Folie zu objektivieren und als Goldstandard einzusetzen.

Weiterhin mangelhaft ist die Studienlage zur Auswirkung verschiedener Bissanomalien bzw. Malokklusionen auf die Präzision und Zuverlässigkeit der digitalen Okklusionserfassung. Daran knüpft die vorliegende Dissertation an und überprüft dies.

Es konnte bereits in Studien gezeigt werden, dass die dynamische technische Weiterentwicklung zur stetigen Verbesserung und zunehmender Präzision der Scanner-Software und deren Ergebnisse führt (61, 62).

Dies führt zu der Notwendigkeit, gut erprobte konventionelle Verfahren, die sich im letzten Jahrhundert bewährt haben, mit modernen digitalen Technologien in der aktuellsten Version gegenüberzustellen. Denn nur durch Hinterfragen vom alten Wissen lassen sich neue Erkenntnisse gewinnen.

1.3.2 Virtueller Artikulator

Der virtuelle Artikulator (VA) ist definiert als ein Werkzeug für die Analyse komplexer statischer und dynamischer Okklusionsverhältnisse (63). Zudem eignet er sich zur Planung und Simulation von Setups in der Disziplinen der Kieferorthopädie, Zahnersatzkunde, sowie Chirurgie (Abb. 4) (64, 65).



Abb. 4: Virtueller Artikulator von SAM-Typ angeboten von Exocad

Quelle: <https://exocad.com/de/unsere-produkte/exocad-dental-cad/virtueller-artikulator>
(Letzter Zugriff: 09.06.2022, 15:42)

Ziel des VA ist es, die mechanischen Begrenzungen des herkömmlichen Artikulators zu eliminieren und somit die Kieferrelation und die Artikulationsbewegungen des Patienten fehlerfrei virtuell zu übertragen (65). End konnte nachweisen, dass der virtuelle Artikulator eine bessere Übertragungsgenauigkeit bei der statischen und dynamischen Okklusion aufweist als der mechanische Artikulator und deshalb mindestens als gleichwertig angesehen werden sollte (66). Gärtner und Kordaß stufen die Reliabilität von dem VA der Firma DentCam als ausreichend hoch ein (67). Untrennbare Voraussetzung für die Nutzung von VA ist die Kombination mit einem virtuellen Gesichtsbogen zur Ermittlung der

schädelbezüglichen Kieferrelation, sowie mit einer korrekten Methode zur digitalen Bissregistrierung (68). Hier sind dennoch weitere Studien nötig, da wissenschaftliche Publikationen zu diesem Thema dürftig sind.

1.3.3 GEDAS

Eine weitere Methode zur digitalen Darstellung von Okklusionskontakten und quantitativer Okklusionsanalyse ist das GEDAS-System (Greifswald Digital Analyzing System), entwickelt 2000 in der Universität Greifswald. Hier wird ein Bissregistrat aus extrahartem A-Silikon am Patienten angefertigt, der in einem zweiten Schritt digitalisiert wird. Dazu wird es in einem Flachbettscanner durchgelichtet und die Transluzenz der Okklusionseinbisse analysiert. Ein Kalibrierkörper mit definierten Materialstärken wird dafür verwendet. Auf dieser Weise wird die Okklusion visuell dargestellt. Anschließend wird das gewonnene Bissregistrat im Auflicht zur Bestimmung der Zahnkonturen ein zweites Mal gescannt. Nach Überlagerung (matching) dieser zwei Aufnahmen, werden die okklusalen Kontakte genau lokalisiert und deren Stärke ermittelt (58). Einbissstellen im Silikon mit einer Stärke unter 20 µm werden dabei als Okklusionskontakt klassifiziert (69).

In der Studie von Hützen et al. (2006) wurden die intra- und interindividuellen Reproduzierbarkeitswerte vom GEDAS-System überprüft. Mit einem Kappa-Wert zwischen 0,92 und 0,99 für die intra- und 0,90 - 1,00 für die interindividuelle Reliabilität (58) lieferte dieses System eine sehr gute Übereinstimmung mit der Referenzmethode. Nichtsdestotrotz sind hier ebenfalls weitere Untersuchungen erforderlich.

1.3.4 T-Scan

Im Jahr 1987 brachte die Firma Tekscan (Boston, USA) das T-Scan auf dem Markt. Das T-Scan war das erste gittersensor-basiertes Messinstrument, das speziell für die Okklusionsanalyse entwickelt wurde. Ziel dieses Gerätes war eine genauere Messung dynamischer Okklusion. Dieses Diagnostiktool versprach objektiv, präzise, zuverlässig, anwendungsfreundlich und zeiteffektiv zu sein.

Ähnlich wie bei der konventionellen instrumentellen Okklusionsanalyse wird die Sensorfolie zwischen den Zahnreihen platziert. Nach Zubiss durch den Patienten stellt die T-

Scan-Software die Position, die Kraft und die Zeit der auftretenden Okklusionskontakten grafisch dar.

Erste Studien über Genauigkeit und Reproduzierbarkeit von T-Scan zeigten eine Übereinstimmung von 50% mit der Referenzmethode (herkömmlicher Okklusionsfolie) bei der Lokalisation der Okklusionskontakte auf. Die Reproduzierbarkeit der Okklusion zeigte eine Übereinstimmung von nur 70% und war als nicht überzeugend anzusehen (70).

Mittlerweile existiert schon die dritte Generation des Messgerätes (T-Scan-III-System) mit zusätzlichen Funktionen wie farbige Darstellung der Okklusionskraft und Visualisierung der Kontakte in 2D und 3D Ansicht (Abb. 5).



Abb. 5: T-Scan Novus von Tekscan

Quelle: <https://www.tekscan.com/products-solutions/systems/t-scan-novus>
(Letzter Zugriff: 09.06.2022, 15:46)

Die Dicke der Sensorfolie dieses Systems beträgt 100 μm . Im direkten Vergleich zur konventioneller Okklusionspapier lieferte das T-Scan-III in einer klinischen Studie von 2017 dennoch weiterhin unzuverlässigere Ergebnisse und sollte nicht als Mittel der ersten Wahl bei der Okklusionsanalyse gelten (71).

Aktuelle Studien zeigen deutliche Verbesserung der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit des T-Scans. Raul Ayuso-Montero et al. (2019) untersuchten die Reliabilität und Validität von T-Scan Okklusogrammen und IOS-Okklusionskarten (TRIOS 3) und verglichen diese zu Bissregistraten. T-Scan lieferte in dieser Studie zuverlässigere Ergebnisse bei der Okklusionsanalyse im Vergleich zu TRIOS 3 (57). Die Messungen waren dabei genauer, wenn höhere Kräfte bei der Interkuspitation verwendet wurden. Die höchste Validität zeigte immerhin die konventionelle Okklusionserfassung mithilfe von Bissregistraten. Als Vorteil des Systems wurde die Unempfindlichkeit gegenüber Speichel ermittelt (72). Bei

mehrfacher Anwendung der Sensorfolie ließ allerdings die Genauigkeit nach, deshalb wird ein Auswechseln der Messfolie nach jedem Gebrauch empfohlen.

1.3.5 OccluSense

Das von Dr. Jean Bausch GmbH & Co. KG (Köln, Deutschland). entwickelte OccluSense System besteht aus einem Handgerät mit einem elektronischen Drucksensor (Abb. 6), sowie aus der begleitenden OccluSense Software (Abb. 7).



Abb. 6: Das OccluSense Handgerät mit einer eingeführten Sensorfolie
 Quelle: <https://www.occlusense.com.au/>
 (Letzter Zugriff: 09.06.2022, 15:47)

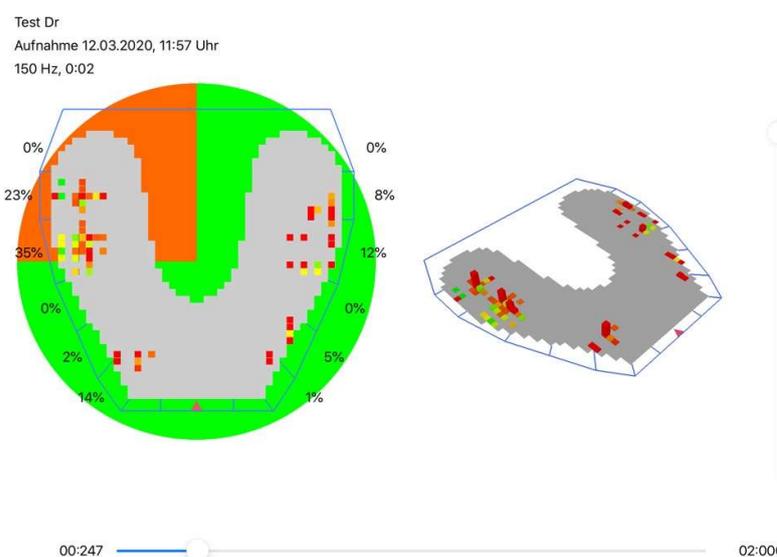


Abb. 7: OccluSense Okklusogramm in 2D- und 3D-Ansicht
 Quelle: Eigene Aufnahme

Die OccluSense-App erlaubt eine Aufzeichnung der Okklusionskontakte in 2D und 3D Ansicht, sowie eine Live-Übertragung der Artikulation und auftretenden Kaukräfte. Die flexible 60 µm starke Sensorfolie weist eine zusätzliche Farbbeschichtung auf, die ähnlich zur konventioneller Artikulationsfolie die Zahnkontakte intraoral visualisieren sollte. Das OccluSense repräsentiert somit eine innovative digitale Methode zur quantitativen Okklusionsanalyse, was nach Angaben der Hersteller herkömmliche und digitale Techniken vereinen sollte. Ziel des Tools ist es laut Bausch statische und dynamische Okklusionsverhältnisse aufzunehmen, graphisch darzustellen und zu analysieren. Dadurch sollten Früh- und Hyperbalancekontakte lokalisiert werden und Dysfunktionen früh erkannt werden.

Zurzeit sind jedoch keine wissenschaftlichen Studien zu diesem Gerät auffindbar, die diese Behauptungen bestätigen bzw. widerlegen. Es besteht deshalb die Notwendigkeit dieses Messgerät wissenschaftlich zu prüfen und dessen klinische Anwendbarkeit zu bewerten.

Da OccluSense in der Bau- und Funktionsweise dem T-Scan ähnelt, basieren die entsprechenden Hypothesen der vorliegenden Dissertation auf den vorliegenden Studienergebnissen von wissenschaftlichen Untersuchungen des T-Scans.

1.4 Begriffserklärung Reliabilität, Sensitivität, Spezifität

Für ein besseres Verständnis der folgenden Inhalte wird auf die zum Teil ähnliche Definitionen der oben erwähnten Begriffe kurz eingegangen.

1.4.1 Reliabilität

Reliabilität gehört zu den Hauptgütekriterien wissenschaftlicher Messinstrumente (73). Sie wird als die Zuverlässigkeit eines Messverfahrens definiert. Ein Test gilt als reliabel, wenn er bei einer Wiederholung unter denselben Bedingungen und an demselben Testobjekt zu unterschiedlichen Zeitpunkten die gleichen Ergebnisse konsistent liefert.

Der Messkoeffizient der ersten Wahl bei Intra-Rater-Reliabilität von Untersuchungen mit einem dichotomen Charakter (Messungen mit nur zwei möglichen Variablen als Outcome) ist der Cohen's-Kappa-Koeffizient (74). Die Kappa-Werte werden nach Landis und Koch folgendermaßen eingestuft (75):

$\kappa = 0,00 - 0,20$: schlechte Übereinstimmung,

$\kappa = 0,21 - 0,40$: geringe Übereinstimmung,

$\kappa = 0,41 - 0,60$: mäßige Übereinstimmung,

$\kappa = 0,61 - 0,80$: gute Übereinstimmung,

$\kappa = 0,81 - 1,00$: sehr gute Übereinstimmung.

1.4.2 Sensitivität

Sensitivität und Spezifität sind Qualitätsmerkmale der klinischen Diagnostik, die sich bei Untersuchungsverfahren mit einer binären Klassifikation der Ergebnisse (krank/gesund, positiv/negativ) ermitteln lassen. Die diagnostische Sensitivität eines Tests entspricht dem Anteil an positiv getesteten Patienten unter allen tatsächlich kranken bzw. positiven Patienten (Tab.1) (76).

	Krankheit nicht vorhanden	Krankheit vorhanden
Testergebnis negativ	a (TN)	b (FN)
Testergebnis positiv	c (FP)	d (TP)
	$\Sigma (a + c)$	$\Sigma (b + d)$

Tab. 1: Wahrheitsmatrix zur Berechnung der Sensitivität und der Spezifität

Quelle: Eigene Darstellung

$$\text{Sensitivität} = d / (b + d)$$

Die Sensitivität wird demnach definiert als der Quotient aus „d“ (true positive rates) und der Summe „b + d“ (false negatives + true positive rates).

1.4.3 Spezifität

Die diagnostische Spezifität entspricht dem Anteil an negativ getesteten bzw. gesunden Patienten unter allen tatsächlich gesunden Patienten. Entsprechend Tab. 1 lässt sich die Spezifität als der Quotient aus „a“ (true negative rates) und der Summe „a + c“ (true negative rates + false positive rates) ermitteln (76).

$$\text{Spezifität} = a / (a + c)$$

Die Sensitivität und die Spezifität sind als statistische Maße nur dann aussagekräftig, wenn sie zusammen betrachtet werden. Sie werden unter dem Begriff Validität einer Testmethode zusammengefasst (76). Mit zunehmender Sensitivität nimmt Spezifität in der Regel ab (77).

Fragestellung

Die korrekte Messung und Auswertung der Okklusion ist essentiell für den Erfolg jeder zahnmedizinischen Behandlung. Die digitale Okklusionsanalyse stellt ein innovatives und vielversprechendes Verfahren zur Erfassung okklusaler Verhältnisse dar. Darum ist es zwingend erforderlich, herkömmliche Methoden immer wieder kritisch zu hinterfragen und sie zu den modernen Alternativen gegenüberzustellen.

Eine systematische Literaturrecherche zu diesem Thema ergab zahlreiche Studien, die die Genauigkeit und Präzision von Intraoralscannern untersuchten und sie zu analogen Abformungen verglichen. Allerdings finden sich nur wenige Publikationen, die die Zuverlässigkeit der Okklusionskarten dieser Scanner überprüften. Die Mehrheit dieser wenigen Publikationen verwendete jedoch weitere computergestützte Verfahren als Referenz (z. B. Desktopscanner). Das Ziel dieser Arbeit ist deshalb der Vergleich zwischen der digitalen und der klassischen instrumentellen Okklusionsanalyse.

Darüber hinaus wurde bis dato nach bestem Wissen der Autorin keine wissenschaftliche Studie veröffentlicht, die das drucksensorbasierte Messinstrument OccluSense untersuchte und dessen Zuverlässigkeit evaluierte. Außerdem fehlen Berichte über die Auswirkung von Bissanomalien bzw. Malokklusionen auf die Genauigkeit der digitalen Okklusogramme.

Im Rahmen dieser Dissertation sollen die technischen Limitationen von OccluSense, sowie von fünf verschiedenen Intraoralscannern getestet werden und deren Reliabilität bei der Okklusionsanalyse beurteilt werden. Die Ergebnisse dieser modernen Geräten werden in Relation zu der konventionellen Okklusionsmessung mit Artikulationsfolien und Shimstock-Folie gesetzt.

Es sollten insbesondere folgende Hypothesen überprüft werden:

1. Im Rahmen der klassischen instrumentellen Okklusionsanalyse führt die Verwendung einer Okklusionsfolie mit einer Stärke von 12 μm bzw. 40 μm im Vergleich zu einer Shimstock-Folie (8 μm) zu falsch positiven Befunden.
2. Die zu untersuchenden fünf intraoralen Scanner (TRIOS4, iTero Element 5D+, Emerald S, CS 3600, DiOS 4.0) weisen beim intraindividuellen Vergleich zum analogen Goldstandard mit Shimstock-Folie weniger statische okklusale Kontakte nach.

3. Die zu untersuchenden fünf intraoralen Scanner (TRIOS4, iTero Element 5D+, Emerald S, CS 3600, DiOS 4.0) weisen bei der Bestimmung der statischen okklusalen Kontakte sehr gute Reliabilitätswerte auf (Cohen's Kappa = 0,81 - 1,00) verglichen mit der Goldstandardmethode.
4. Unterschiedliche Dysgnathien bzw. Malokklusionen (Tiefbiss, umgekehrte Frontzahnstufe, Kreuzbiss, ausgeprägter Engstand) beeinflussen die Reliabilität (= Übereinstimmung mit dem Goldstandard) der getesteten Methoden zur Okklusionsanalyse negativ.
5. OccluSense weist bei der digitalen Erfassung der statischen Okklusion die gleiche Sensitivität und Spezifität auf wie die klassische instrumentelle Okklusionsanalyse auf.
6. Die Erfassung der statischen Okklusion durch Occlusense weist im Vergleich zur Goldstandardmethode sehr gute Reliabilitätswerte (Cohen's Kappa = 0,81 - 1,00) auf.

2 Methodik

2.1 Modelle

Für die vorliegende Studie wurden insgesamt zwanzig Epoxidharz Typodont-Modellpaare (Nissin Dental Products Inc., Kyoto, Japan) verwendet. Es wurden dabei Modelle mit einem vollständigen bleibenden Gebiss (Weisheitszähne ausgeschlossen) gewählt. Die Typodonten wurden in fünf Gruppen bestehend aus jeweils vier Modellpaaren verteilt. Darunter befanden sich sowohl Beispiele eines eugnathen Gebisses mit regelrechter Zahnstellung als auch Modelle mit verschiedenen Bissanomalien. Dies hatte das Ziel, den Einfluss einer bestehenden Dysgnathie auf die Reliabilität der Okklusionsanalysemethoden zu testen.

Fünf verschiedene Typen an Typodonten (s.u.) in vierfacher Ausführung wurden für die Studie bereitgestellt. Um unterschiedliche Okklusionsprotokolle innerhalb jeder Gruppe zu erschaffen, wurden die Unterkiefermodelle entsprechend eingeschliffen (MEISINGER Diamanten gelb extra fein, Ref.-Nr.:8063140015) und anschließend poliert (DIATECH Acrylpolierer, Ref.-Nr.: 230259AA und TOPDENT Ziegenhaarbürste, Ref.-Nr.: 22682). Da die Messungen im Oberkiefer stattfanden, wurden die Oberkiefermodelle im Originalzustand behalten, um die Integrität der Oberfläche zu gewährleisten.

Die folgenden Modelle wurden in der Studie inkludiert:

2.1.1 Gruppe 1

Die Studienmodelle aus Gruppe 1 (Nissin Dental Products Inc., Kyoto, Japan, Artikelnummer ORT1006-UL-HD-28) repräsentierten ein eugnathes Gebiss mit regelrechter Zahnstellung (Abb. 8-12). Der Biss entsprach nach der Angle-Klassifikation Angle Klasse I (78) mit 3 mm Overbite und 2 mm Overjet. Jedes Modellpaar wies dabei ein unterschiedliches Okklusionsprotokoll auf.



Abb. 8: Bukkalansicht rechts (Gruppe 1)

Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 9: Frontalansicht (Gruppe 1)

Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 10: Bukkalansicht links (Gruppe 1)

Quelle: Eigene Aufnahme

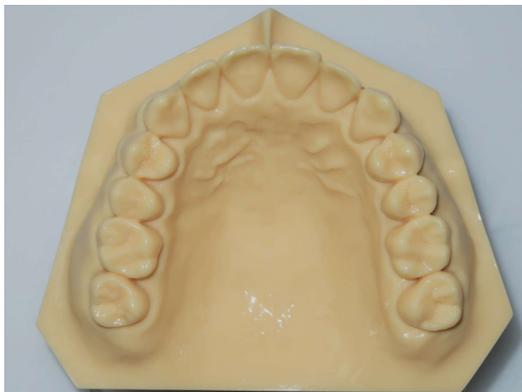


Abb. 11: Okklusalsicht Oberkiefer (Gruppe 1)

Quelle: Eigene Aufnahme

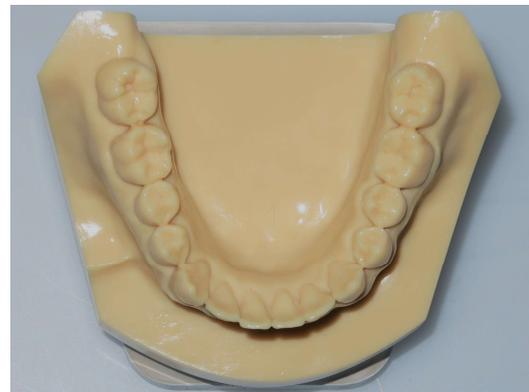


Abb. 12: Okklusalsicht Unterkiefer (Gruppe 1)

Quelle: Eigene Aufnahme

2.1.2 Gruppe 2

Gruppe 2 bestand aus vier Modellpaaren (Nissin Dental Products Inc., Kyoto, Japan, Artikelnummer ORT1013-UL-HD-28) mit stark ausgeprägtem Engstand mit diversen Rotationen in der Ober- und Unterkieferfront (Abb. 13-17). Der Overbite betrug 6 mm (gemessen an 12/42) und der Overjet betrug 11 mm (gemessen an 21/31). Es lag eine Angle-Klasse II.2-Okklusion vor (78). Nach Modifizieren der Unterkiefermodelle entstanden vier unterschiedliche Okklusionsprotokolle.



Abb. 13: Bukkalansicht rechts
(Gruppe 2)

Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 14: Frontalansicht
(Gruppe 2)

Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 15: Bukkalansicht links
(Gruppe 2)

Quelle: Eigene Aufnahme

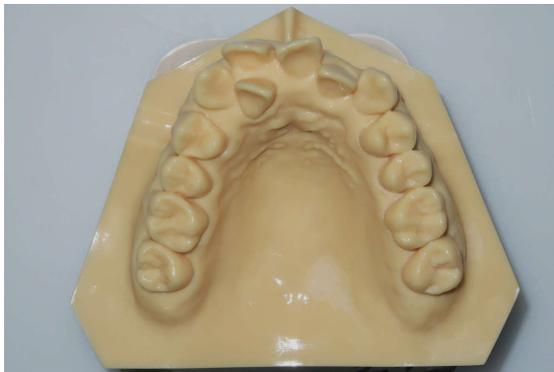


Abb. 16: Okklusalsicht Oberkiefer (Gruppe 2)

Quelle: Eigene Aufnahme

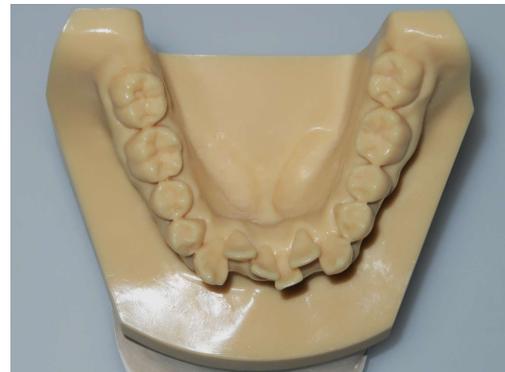


Abb. 17: Okklusalsicht Unterkiefer (Gruppe 2)

Quelle: Eigene Aufnahme

2.1.3 Gruppe 3

Das Hauptmerkmal von Gruppe 3 war der tiefe Biss, der dental nicht gestützt war. Der Overbite betrug 11mm (Abb.18-22). Außerdem repräsentierte diese Gruppe einen retrognathen Patienten mit einer Angle-Klasse-II.1-Verzahnung (78). Des Weiteren bestand ein Scherenbiss am Antagonistenpaar 24/34. Dazu wurde der Typodont mit Artikelnummer ORT1010-UL-HD-28 von Nissin Dental Products Inc. vierfach bestellt und wie oben beschrieben bearbeitet.



Abb. 18: Bukkalansicht rechts (Gruppe 3)

Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 19: Frontalansicht (Gruppe 3)

Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 20: Bukkalansicht links (Gruppe 3)

Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 21: Okklusalansicht Oberkiefer (Gruppe 3)

Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 22: Okklusalansicht Unterkiefer (Gruppe 3)

Quelle: Eigene Aufnahme

2.1.4 Gruppe 4

Die Modelle der Gruppe 4 (Artikelnummer ORT1014-UL-HD-28) stellen einen Patienten mit mandibulärer Prognathie und einer umgekehrten Frontzahnstufe dar (Abb. 23 -27). Bei diesem Modelltyp betrug der Overbite 6 mm und der Overjet 3 mm. Im Molarenbereich entsprach die Okklusion einer Angle Klasse I (78).



Abb. 23: Bukkalansicht links
(Gruppe 4)

Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 24: Frontalansicht
(Gruppe 4)

Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 25: Bukkalansicht links
(Gruppe 4)

Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 26: Okklusalsicht Oberkiefer (Gruppe 4)

Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 27: Okklusalsicht Unterkiefer (Gruppe 4)

Quelle: Eigene Aufnahme

2.1.5 Gruppe 5

Die Typodonten aus Gruppe 5 (Nissin Dental Products Inc., Kyoto, Japan, Artikelnummer ORT1009-UL-HD-28) wiesen Kreuzbiss als Bissanomalie auf (Abb. 28-32). Betroffen davon waren die Antagonistenpaare 12/42, 24/34, sowie 25/35. Hier wurden Overbite von 3 mm und Overjet von 2 mm an 21/31 gemessen. Links lag im Bereich der Eckzähne ein offener Biss vor. Nach der Angle Klassifikation entsprach die Situation einer Angle Klasse II.2 (78).



Abb. 28: Bukkalansicht rechts
(Gruppe 5)

Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 29: Frontalansicht (Gruppe 5)

Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 30: Bukkalansicht links
(Gruppe 5)

Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 31: Okklusalanzeige Oberkiefer (Gruppe 5)

Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 32: Okklusalanzeige (Gruppe 5)

Quelle: Eigene Aufnahme

2.2 Klassische instrumentelle Okklusionsanalyse mittels Shimstock-Folie

Als Referenzmethode für die Studie wurde die klassische instrumentelle Okklusionsanalyse ausgewählt. Zur Erstellung der Okklusionsprotokolle wurden folgende Materialien bzw. Instrumentarium verwendet: Artex Type CP Artikulator (Amann Girrbach, Koblach, Österreich) mit einem Bennett-Winkel von 15° und einem sagittalen Kondylenbahnneigungswinkel von 35° (Abb. 33), die mittelwertig einartikulierten Studienmodelle (Nissin Dental Products Inc., Kyoto, Japan), Shimstock-Folie mit einer Stärke von $8\ \mu\text{m}$ und einer Breite von $8\ \text{mm}$ (Hanel Dental, Langenau, Deutschland, Ref.-Nr.480180) (Abb. 34), Klemmpinzette (Hanel Dental, Langenau, Deutschland), einen selbstgebauten höhenverstellbaren Pinzettenhalter (Abb. 35) und eine Correx Federwaage (Haag & Streit, Koeniz, Schweiz) mit einem Messbereich von 0 bis 30 Gramm (Abb. 37).



Abb. 33: Artex Type CP Artikulator von Amann Girrbach mit dem montierten

Gewicht von 3 kg

Quelle: Eigene Aufnahme



Abb. 34: Shimstock-Folie eingespannt in einer Klemmpinzette

Quelle: Eigene Aufnahme

Ziel dieser Studie war es einen standardisierten Versuchsaufbau zu erzeugen und die Auswertung des Shimstock-Okklusionsprotokolls zu objektivieren. Aus diesem Grund wurden die Messbedingungen möglichst reproduzierbar gestaltet. Die simulierte Bisskraft wurde durch Montage von 3 kg Tauch-Bleigewicht auf dem Artikulatoroberteil konstant gehalten. Durch ein höhenverstellbares Pinzettengestell konnte die Position beliebig eingestellt werden, sodass die Shimstock-Folie parallel zur Okklusionsebene des zu untersuchenden Kieferpaares ausgerichtet werden konnte (Abb. 35). Dazu wurde ein Bolzen vertikal in einer Hartgipsbasis eingebettet. Mit der Hilfe von zwei Schraubenmuttern wurde eine M12 U-Scheibe aus Edelstahl mit 40 mm Außendurchmesser eingespannt. An der U-Scheibe wurde die HANEL Klemmpinzette mit Epoxidharzkleber waagrecht fixiert. Die U-Scheibe wurde einerseits ausreichend fest zwischen den Schraubenmuttern eingespannt, sodass Stabilität gewährleistet wurde, andererseits locker genug, sodass eine widerstandslose geradlinige Bewegung der Pinzette in der Horizontalen möglich war. Beim Messen wurde eine konstante Zugkraft von 30 g auf der Folie angewandt, die durch eine Correx Federwaage stets überprüft wurde.



Abb. 35: Versuchsaufbau der klassischen instrumentellen Okklusionsanalyse

Quelle: Eigene Aufnahme

Für jede Messung wurde ein neues ca. 10 mm langes Stück Shimstock-Folie verwendet. Durch den höhenverstellbaren Halter wurde die Folie horizontal zwischen den Zahnreihen am bestimmten Antagonistenpaar eingesetzt. Anschließend wurden die Kiefermodelle in Endposition gebracht, sodass die Shimstock-Folie sich zwischen den Zahnreihen befand. Die Klemmpinzette wurde dann mit dem Anzeiger der Federwaage so weit von den Zähnen wegbewegt, bis die Anzeige 30 g erreicht hat. An diesem Zeitpunkt fand die Beurteilung des zu überprüfenden Okklusionskontakts statt: wenn die Pinzette durch den Druck der Federwaage geschwenkt wurde und somit die Shimstock-Folie durchgezogen wurde, galt dies als ein fehlender Okklusionskontakt. Wenn die Shimstock-Folie bei einer Zugkraft von 30 g noch durch die Zähne festgehalten wurde, bestand ein vorhandener Kontakt (Abb. 36). Auf die beschriebene Art und Weise ergab sich ein binäres bzw. dichotomes Auswertungssystem der statischen Okklusion jedes Modellpaares.



Abb. 36: Vorhandener statischer Okklusionskontakt an Zahn 16

Quelle: Eigene Aufnahme

Jedes Okklusionsprotokoll bestand aus 14 Messungen, die sich an die Oberkieferzähnen richteten (17-11, 21-27). Um die statische Okklusion an Zahn 17 zu beurteilen, wurde zuerst die entsprechende Höhe am Pinzettenhalter eingestellt, dann wurde die Shimstock-Folie so positioniert und ggf. adaptiert, dass sie von der distalen bis zur mesialen Randleiste des zweiten Molaren reichte. Vorhandener Kontakt in dieser Spanne wurde als „+“ markiert, fehlender Kontakt als „-“. Dasselbe Vorgehen wurde bei dem Zahn 16 mit einem frischen Stück Shimstock-Folie wiederholt, dann bei dem Zahn 15 usw. Alle vierzehn Ergebnisse wurden in tabellarischer Form aufgezeichnet. Diese Vorgehensweise wurde 5-mal pro Modellpaar wiederholt und systematisch dokumentiert.

Die auf dieser Weise erhobenen Okklusionsprotokolle galten als Goldstandard für die restlichen untersuchten Methoden in dieser Studie.

2.3 Klassische instrumentelle Okklusionsanalyse mittels Okklusionspapier

Okklusionspapier war das erste Messinstrument, das dem Goldstandard gegenübergestellt wurde. In der vorliegenden Studie wurden das 40 µm starke Okklusionspapier Arti-Check in Blau (Bausch, Köln, Deutschland, REF BK 1015) sowie die 12 µm starke Okklusionsfolie HANEL in Blau (Hanel Dental, Langenau, Deutschland, REF 480047) untersucht

Zum Durchführen der Messungen wurde der in Kap. 8.2. beschriebene Versuchsaufbau verwendet. Durch das montierte Gewicht von 3 kg wurde wieder eine konstante Bisskraft simuliert. Die Okklusionserfassung erfolgte in Segmenten:

- Seitenzahnsegment rechts (Zähne 17, 16, 15, 14),
- Frontzahnsegment (Zähne 13, 12, 11, 21, 22, 23)
- Seitenzahnsegment links (Zähne 24, 25, 26, 27)

Bei jeder Messung wurde auf Vollständigkeit der Segmente geachtet. Um die Okklusion im linken Seitenzahnsegment beispielsweise darzustellen, wurde der Bereich von der mesialen Randleiste des ersten linken Prämolaren bis zur distalen Randleiste des zweiten linken Molaren erfasst (Abb. 37). Diese Vorgehensweise erzielte die einmalige Markierung der Kontaktpunkte und schloss Verfälschung durch Überlagerung aus. Für jedes Segment wurde ein neues Stück Okklusionspapier benutzt.

Als vorhandener statischer Kontakt wurden nur Markierungen interpretiert, die eine dunkle Umrandung und einen hellen Kern aufwiesen. Wolkige undefinierte Markierungen wurden nicht als Okklusionskontakte gezählt (Abb. 38). Nach jeder Messung wurden die Kiefermodelle gründlich gereinigt und getrocknet. Für jedes Modellpaar wurde die Vermessung fünfmal durchgeführt und das Ergebnis neu dokumentiert. Nach jeder Okklusionserfassung wurden die Farbrückstände gründlich entfernt und die Modelle getrocknet.



Abb. 37: Okklusionserfassung mit
Arti-Check 40 µm im linken Seitenzahsegment
Quelle: Eigene Aufnahme

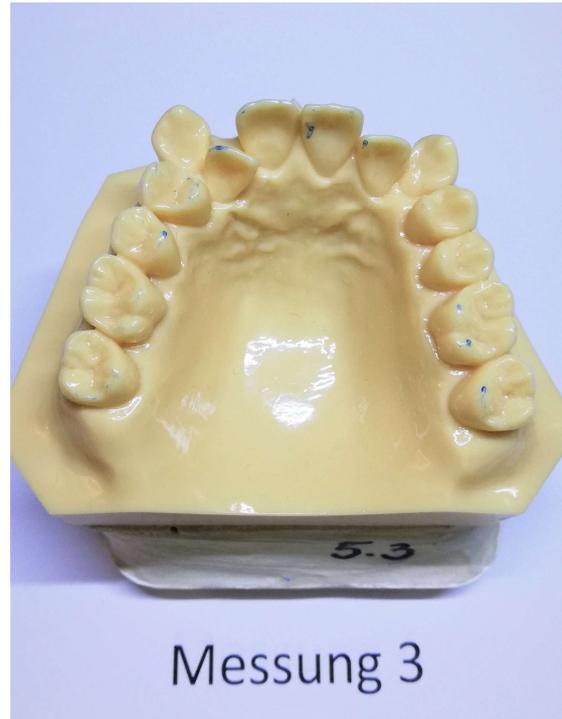


Abb. 38: Beispiel für Okklusionsprotokoll: Mes-
sung 3 von Modell 5.3 (Gruppe 5).
Statischer Kontakt an 15, 12, 21, 22, 26, 27. Bei
den restlichen Zähnen ist kein Kontakt vorhanden
(Interokklusalabstand bei maximaler Interkuspida-
tion > 8 µm)

Quelle: Eigene Aufnahme

2.4 OccluSense

Als nächstes wurde das OccluSense-System (Bausch, Köln, Deutschland) als Methode zur Okklusionsanalyse getestet. Begleitend wurde die OccluSense-iPad-App (Version 1.7.4.) verwendet. Täglich vor Anfang der Messungen wurde ein Funktionstest nach Herstellerangaben durchgeführt. Für die Aufnahmen wurde die Frequenz 100 Hz / 04 s eingestellt. Der Artikulator mit dem montiertem Kaugewicht und dem zu untersuchenden Modellpaar wurde auf eine horizontale Fläche gestellt. Nach dem Einlegen der Sensorfolie in das Handgerät wurde sie symmetrisch auf den Unterkieferzahnbogen ausgerichtet, sodass die Mittellinienmarkierung der eigentlichen Modellmittellinie entsprach. Das Handgerät wurde dann so positioniert, dass die Sensorfolie sich parallel zur Okklusionsebene befand. Die Ober- und Unterkiefermodelle wurden in Interkuspitation gebracht

und die Okklusion aufgenommen (Abb. 39). Während der Aufnahme wurden die Modelle bzw. Sensorfolie nicht bewegt. Um die Kontakte richtig zuordnen zu können, erfolgte die Auswertung der Daten während die Sensorfolie sich noch zwischen den Zahnreihen befand, da die schematische Einteilung des Zahnbogens nicht immer der eigentlichen Position der Zähne am Modell entsprach.



Abb. 39: Versuchsaufbau OccluSense

Quelle: Eigene Aufnahme

In der OccluSense-App wurde der Sensitivitätsschieberegler so eingestellt, dass nur Okklusionskontakte mit punktuelltem Druck (in Rot) angezeigt wurden (Abb. 40). Wenn das im Einzelfall nicht möglich war, wurden die in anderen Farben dargestellten Kontakte nicht in die Auswertung mit reingenommen. Jeder dieser angezeigten Okklusionskontakte wurde dann zugeordnet und dokumentiert. Für jeden Zahn im Oberkiefer wurde anschließend das Ergebnis „Kontakt“ oder „kein Kontakt“ markiert. Für jedes Modellpaar wurde die Messung fünfmal wiederholt. Nach jeder Messung wurden die Farbrückstände gründlich entfernt, die Modelle getrocknet und eine neue Sensorfolie in das OccluSense-Handstück eingesetzt. Die Dokumentation der Okklusionsprotokolle erfolgte in tabellarischer Form.

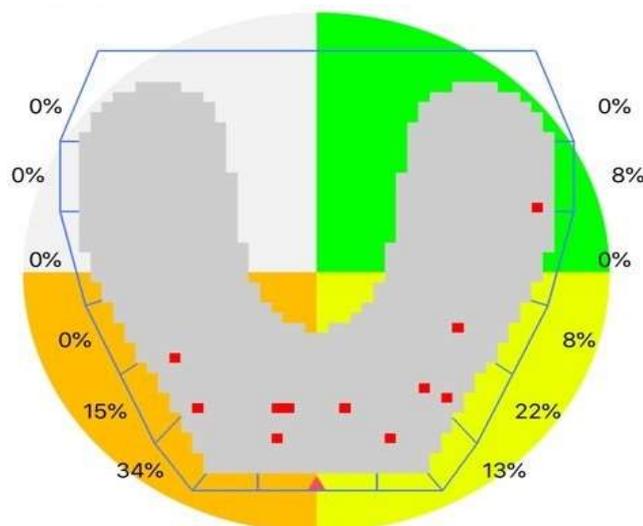


Abb. 40: Digitales Okklusogramm OccluSense

Quelle: Eigene Aufnahme

2.5 CS 3600

Für die optisch-elektronische Erfassung der einartikulierten Modelle wurde als erstes der CS 3600 Intraoralscanner (Carestream Dental, Atlanta, USA) mit der Software CS ScanFlow Version 1.0.2.8. verwendet. Für die Auswertung der Scans wurde die neue Analyse- und Planungssoftware CS Model+ benutzt.

Zuerst wurden der Ober- und Unterkiefer nach Herstelleranweisungen separat gescannt. Es wurde dabei auf Vollständigkeit des Okklusalreliefs geachtet. Die Kieferrelation von jedem Modellpaar wurde durch fünf vestibuläre Aufnahmen erhoben: Molarenbereich rechts, Prämolaren- und Eckzahnbereich rechts, Frontzahnbereich, Prämolaren- und Eckzahnbereich links und Molarenbereich links. Die gescannten 3D-Modelle wurden von der ScanFlow Software überprüft und optimiert. Anschließend erfolgte die Übertragung der STL-Rohdaten in das CS Model+ Analyseprogramm. Im Review-Menü konnte dann das farbige Okklusogramm aufgerufen werden. Die Farbe Lila wurde in der Software als „Kollision“ bezeichnet, Rot als „Kontakt“, Orange als „Hoch“, Gelb als „Mittel“, Grün als „Niedrig“ und Türkis als „Sehr sehr niedrig“. Um Referenzwert für die Farben zu haben, wurde der interokklusale Abstand an drei Punkten im roten und orangen Bereich gemessen. Die Werte ergaben 0.0592 mm, 0.0355 mm und 0,0728 mm für Rot und 0.117 mm, 0.165 mm und 0,143 mm für Orange. Da die Shimstock-Folie (Goldstandard) eine Dicke von 8 µm aufwies, waren nur die in Rot angezeigten Kontaktpunkte relevant und wurden

für die Okklusionsprotokolle verwendet. Mit Hilfe des Okklusionstools ließen sich die anderen Farben wegfiltern, sodass nur die roten Okklusionsflächen dargestellt wurden. Die Okklusionskarte des Oberkiefers wurde unter Vergrößerung begutachtet. Das Okklusionsprotokoll wurde nach dem binären Beurteilungssystem (wie in Kap. 8.2. beschrieben) erstellt und dokumentiert. Jedes Modell wurde fünfmal gescannt und die Okklusion neu beurteilt. Daraus ergaben sich insgesamt 100 CS 3600 Okklusogramme (Abb. 41).

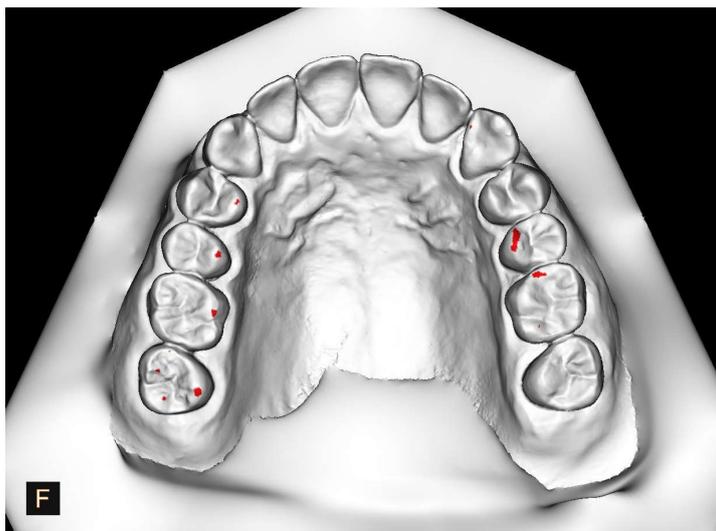


Abb. 41: Digitales Okklusogramm CS 3600

Quelle: Eigene Aufnahme

2.6 TRIOS 4

Das nächste Messinstrument, das in dieser Studie untersucht wurde, ist der TRIOS 4 Intraoralscanner in Version 20.3.0 (3Shape, Kopenhagen, Dänemark). Zu Beginn wurde die Intraoralkamera des Scanners farbig kalibriert. Danach wurde jedes Modellpaar nach Herstelleranweisung gescannt. Die durch die Software berechneten 3D-Modelle wurden auf Fehler überprüft. Ggf. nicht gescannte okklusale bzw. inzisale Areale wurden nachgescannt und das Okklusionsrelief vervollständigt. Zur Bissregistrierung wurden zwei vestibuläre Aufnahmen von Ober- und Unterkiefer gemacht (jeweils vom ersten Prämolaren bis zum zweiten Molaren reichend). Anschließend wurde die obligatorische Post-Bearbeitung der Scandaten durch den IOS durchgeführt. Das Okklusionstool auf der Analyse-Seite erstellte dann das farbige Okklusogramm. Die Kiefermodellfarbe wurde auf Grau geändert, damit die Okklusionsareale kontrastreicher und dadurch einfacher zu beurteilen sind. Die interokklusale Distanz wurde so auf der Farbskala eingestellt, dass die Bereiche von unter 0,005 mm in Rot, von 0,005 mm bis 0,008 mm in Orange, von 0,008

mm bis 0,011 mm in Gelb und ab 0,011 mm aufwärts in Grün angezeigt wurden. Das Oberkiefermodell wurde zum Schluss unter Vergrößerung ausgewertet. Bei der Beurteilung der Okklusion wurden nur rote und orange Flächen als Kontakt erfasst. Die restlichen Farben wurden als „fehlenden Kontakt“ interpretiert (Abb. 42).

Um die Reliabilität zu prüfen, wurde das oben genannte Vorgehensweise für jedes Modellpaar fünfmal wiederholt. Somit wurden insgesamt 100 Vermessungen mit dem TRIOS 4 IOS durchgeführt und dokumentiert.

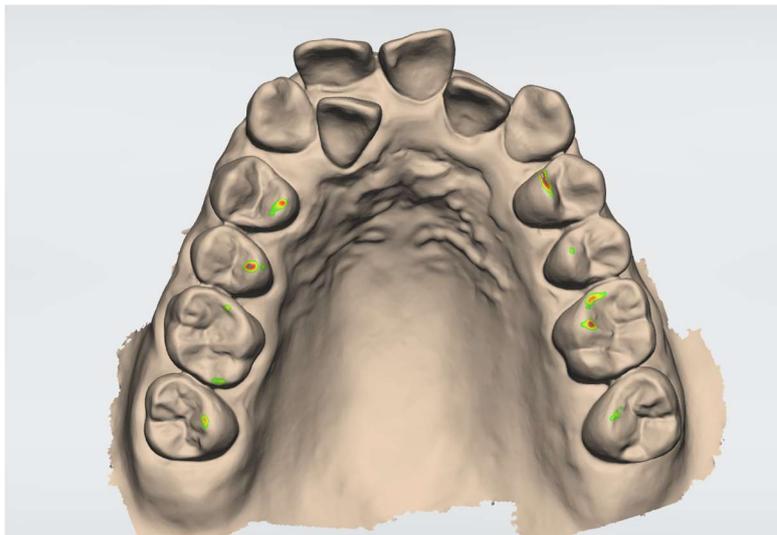


Abb. 42: Digitales Okklusogramm TRIOS 4
Quelle: Eigene Aufnahme

2.7 Emerald S

Die nächste Methode, die in dieser Studie geprüft wurde, ist die digitale Erfassung der Okklusion durch den Emerald S IOS (Planmeca, Helsinki, Finnland) in Kombination mit der Software Romexis 6.0.1.812.

Dazu wurden die Studienmodelle nach Protokoll optisch erfasst. Im Menü Modellanalysator wurde der Oberkiefer (OK) zuerst gescannt, danach den Unterkiefer (UK) - beginnend auf derselben Seite und mit der Scanner-Spitze zeigend nach distal. Die generierten 3D-Modelle wurden dann auf Vollständigkeit überprüft und anschließend durch automatische Verfeinerung der Rohdaten mit Hilfe der Software ausgebessert. Als nächstes wurde der Biss von bukkal aufgenommen. Es wurde zuerst der rechte Seitenzahnbereich (vom Eckzahn bis zum zweiten Molaren) gescannt, folgend von der linken Seite mit demselben Vorgehen. Durch die Romexis Analysesoftware wurde anschließend ein "global

alignment“ ausgeführt und die Modelle wurden mit der entsprechenden Kieferrelation gespeichert. Die Okklusionsebene wurde durch eine 3-Punkt-Ausrichtung im OK festgelegt. Nach Ausblenden des Unterkiefers im Modellanalysator konnte unter den Ansichtswerkzeugen die Okklusionskarte berechnet und angezeigt werden. Die Okklusion wurde von der Software farbig dargestellt. Der interokklusale Abstand wurde so ausgewählt, dass die Farbskala als niedrigster Wert 0,000 mm und als höchster Wert 0,008 mm aufwies. Alle größeren interokklusalen Distanzen wurden somit weggefiltert. Das resultierende Okklusogramm (Abb. 43) wurde ausgewertet, indem jeder angezeigter Kontakt im Oberkiefer als “Kontakt“ interpretiert wurde. Die Farbe war in diesem Fall nicht von Bedeutung, da der Interokkusalabstand entsprechend des Goldstandards bereits eingestellt wurde. Es wurden fünf Scans bzw. fünf Messungen pro Modellpaar durchgeführt und dokumentiert.



Abb. 43: Digitales Okklusogramm Emerald S
Quelle: Eigene Aufnahme

2.8 iTero Element 5D+

Der nächste untersuchte IOS war iTero Element 5D+ mit der Software-Version 2.6.3.369. Beim Anlegen des Patienten wurde der Fallart iRecord beauftragt. Es wurde eine neue Abdeckkappe am Handstück aufgesetzt und der Vorgang bestätigt. Es wurde zuerst das Unterkiefermodell, folgend vom Oberkiefermodell gescannt. Dabei wurde die gesamte okklusale Fläche beginnend mit dem endständigen Molar auf einer Seite aufgenommen,

anschließend wurden die lingualen und bukkalen Flächen optisch erfasst. Die Scans wurden auf Vollständigkeit des Okklusalreliefs bzw. Inzisalflächen geprüft und ggf. korrigiert. Als nächster Schritt wurden die Studienmodelle mit Hilfe des Artikulators zusammengeführt. Nach Zentrieren des Handstücks zwischen dem oberen und unteren Zahnbogen wurden langsame wellenförmige Bewegungen in einem zuvor erfassten bukkalen Bereich ausgeführt. Um die Kieferrelation sicher zu erfassen, wurden zwei Bissaufnahmen pro Modellpaar aufgenommen, jeweils reichend von dem zweiten Molaren bis zum Eckzahn. Im Einzelfall mussten die Incisivi teilweise mitgescannt werden, damit das System die Scans erfolgreich überlagert. Danach wurde eine Nachbearbeitung durch die iTero-Software durchgeführt. Die digital berechnete Okklusionskarte wurde nach dem obengenannten binären Auswertungssystem beurteilt. Dazu wurde der Unterkiefer ausgeblendet und der Oberkiefer in einer transversalen Ansicht gedreht (Abb. 44).

Da die vorliegende Software keine freie Einstellung des interokklusalen Abstands durch den Benutzer erlaubte, wurde die vorgegebene Farbtabelle mit der kleinstmöglichen Skalierung 0.00-1.20 verwendet. Die dann angezeigte okklusale Karte wurde folgendermaßen ausgewertet: alle in Rot angezeigten Bereiche, sowie flächige in Orange angezeigte Bereiche wurden als "vorhandener Kontakt" beurteilt. Punktuelle orange Areale, sowie Flächen in den Farben Gelb, Grün und Blau wurden als "kein Kontakt" verzeichnet.

Für jedes Modellpaar wurde der Scanvorgang fünfmal wiederholt und die okklusale Karte neu ausgewertet. Die Ergebnisse wurden in tabellarischer Form gespeichert.

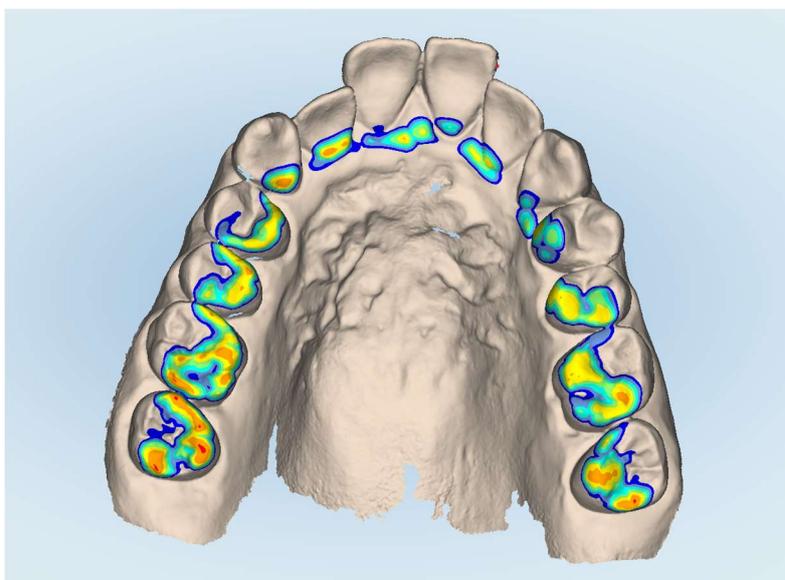


Abb. 44: Digitales Okklusogramm iTero

Quelle: Eigene Aufnahme

2.9 DiOS 4.0 i500

Der letzte untersuchte IOS dieser Studie war DiOS 4.0 i500 (Medit, Seoul, Südkorea) mit der Software Medit Link in Version 2.3.6 Build 964. Dazu wurden folgende Schritte vorgenommen: Im ersten Schritt wurde das Handstück nach Herstellerangaben mit Hilfe des Kalibrierungswerkzeug kalibriert. Nach der Eröffnung einer neuen Sitzung wurde im Menü Case Box die Scanoption „Zahnbogen“ ausgewählt. Als Scantyp wurde „Orthodontisch“ festgelegt. Danach wurde der OK nach der Herstelleranleitung gescannt. Die Scantiefe wurde auf 21 festgelegt und als Modelldarstellungsmodus wurde die Zuverlässigkeitskarte ausgewählt. Es wurde darauf geachtet, dass die okklusalen, inzisalen und bukkalen Flächen komplett in Blau dargestellt werden, sodass die Datenzuverlässigkeit von der Software gewährleistet werden konnte. Das dadurch gewonnene 3D Kiefermodell wurde zunächst optimiert. Im Anschluss wurde der UK nach derselben Vorgehensweise gescannt und optimiert. Die Bissregistrierung wurde vorgenommen, indem zuerst rechts und anschließend links die bukkalen Zahnoberflächen vom zweiten Molaren bis zum Eckzahn, sowie den zahnnahen Kieferabschnitt gescannt wurden. Nach Zusammenfügen der Kiefermodelle durch die Software wurde die Okklusionskarte kalkuliert und angezeigt. Der Ansichtsstil wurde auf „Kiefer geöffnet“ geändert. Der interokklusale Abstand wurde so gewählt, dass alle Bereiche mit einer Interferenz von 0,001 mm bis 0,008mm rot angezeigt wurden (Abb. 45). Bei der Farbkarte wurde eine niedrige Auflösung eingestellt, damit die Kontakte in dem gefragten Bereich einfarbig angezeigt werden, was die Auswertung erleichterte. Der Toleranzbereich (angezeigt in Grün) wurde möglichst klein gewählt - 0,000mm bis 0,001 mm. Das berechnete Okklusogramm wurde unter Vergrößerung folgendermaßen ausgewertet: Zähne, die flächigen rote Okklusionsflächen aufwiesen, wurden als „Kontakt“ beurteilt; Zähne, bei denen einen einzelnen roten Punkt auffindbar war, wurden als „kein Kontakt“ interpretiert. Zähne ohne angezeigte rote Bereiche wurden als „kein Kontakt“ markiert. Jedes Modellpaar wurde fünfmal optisch erfasst, erneut beurteilt und dokumentiert

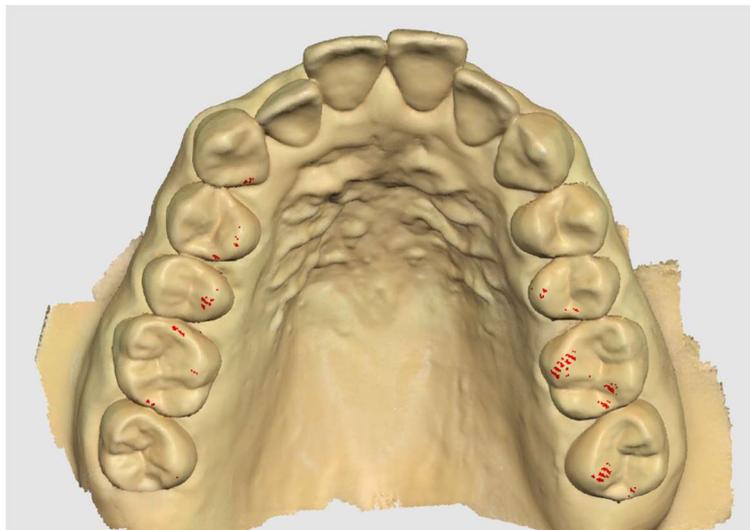


Abb. 45: Digitales Okklusogramm DiOS 4.0

Quelle: Eigene Aufnahme

3 Ergebnisse

Für die vorliegende Studie wurden insgesamt 12600 Messungen durchgeführt. Diese Gesamtzahl entspricht dem Produkt von 20 Modellpaaren, 14 Messwerten pro Modellpaar, 5 Wiederholungen jeder Messung und insgesamt 9 untersuchten Methoden. Die Messergebnisse wurden als eine nominale Zielgröße mit zwei Ausprägungen dargestellt: „Kontakt vorhanden“ oder „kein Kontakt vorhanden“. Somit spricht man von einem dichotomen bzw. binärem Charakter der Beurteilung. Die Daten wurden dann numerisch kodiert (z.B. 0 für „kein Kontakt“ und 1 für „Kontakt vorhanden“) und anschließend mit der statistischen Software SPSS Version 25 (IMB, Chicago, USA) analysiert.

Die Referenzmethode (Goldstandard) für alle Messungen war hier die klassische instrumentelle Okklusionsanalyse anhand von Shimstock-Folie. Die Sensitivität und Spezifität der getesteten Methoden wurden mit Hilfe von Kreuztabellen ermittelt. Für jede Methode ergab sich eine Fallzahl von 1400 Messwerten.

Mit der Goldstandardmethode wurde bei insgesamt 499 Antagonistenpaaren einen Okklusionskontakt (Interokkluslabstand bei maximaler Interkuspitation $\leq 8 \mu\text{m}$) festgestellt. Das entsprach einer Richtig-positiv-Rate von 35,6%. An den restlichen 901 Messstellen bestand kein Kontakt (Interokkluslabstand bei maximaler Interkuspitation $> 8 \mu\text{m}$). Daraus ergab sich eine Richtig-negativ-Rate von 64,4%.

Die Reliabilität wurde durch die Übereinstimmung der Ergebnisse der geprüften Messverfahren mit den Ergebnissen der Shimstock-Messungen errechnet. Dargestellt wurde sie durch den Cohen's Kappa-Wert (κ), der folgendermaßen eingestuft wird:

$\kappa = 0,00 - 0,20$: schlechte Übereinstimmung,

$\kappa = 0,21 - 0,40$: geringe Übereinstimmung,

$\kappa = 0,41 - 0,60$: mäßige Übereinstimmung,

$\kappa = 0,61 - 0,80$: gute Übereinstimmung,

$\kappa = 0,81 - 1,00$: sehr gute Übereinstimmung.

3.1 Instrumentelle Okklusionsanalyse mittels Okklusionspapier

Zuerst wurde die Zuverlässigkeit von Okklusionspapier als konventionelle non-digitale Messmethode untersucht. Die Es wurden dabei zwei unterschiedliche Stärken an Artikulationspapier getestet – 12 µm und 40 µm.

3.1.1 Okklusionspapier 12 µm

Mit der 12 µm starken Okklusionspapier wurden insgesamt 518 positive („Kontakt vorhanden“) und 882 negative Ergebnisse („kein Kontakt vorhanden“) ermittelt. Das entsprach 37,0% positive und 63,0% negative Messwerte. Das bedeutete, dass durch diese Methode 31 Kontakte falsch positiv und 12 Kontakte falsch negativ ermittelt wurden. Daraus lässt sich eine Falsch-positiv-Rate von 2,2% und eine Falsch-negativ-Rate von 0,9% ausrechnen (Tab. 2).

			Shimstock-Folie		Gesamt
			Kein Kontakt	Kontakt vorhanden	
Okklusionspapier 12 µm	Kein Kontakt	Anzahl	870	12	882
		% der Gesamtzahl	62,1%	0,9%	63,0%
	Kontakt vorhanden	Anzahl	31	487	518
		% der Gesamtzahl	2,2%	34,80%	37,0%
Gesamt		Anzahl	901	499	1400
		% der Gesamtzahl	64,4%	35,6%	100%

Tab. 2: Kreuztabelle zu Darstellung der Sensitivität und Spezifität von Okklusionspapier (12 µm) im direkten Vergleich zum Goldstandard

Quelle: Eigene Darstellung

Aus den Formeln für Sensitivität ($TPR / (TPR + FNR)$) und Spezifität ($TNR / (TNR + FPR)$), die sich aus Tab.1 ergaben, und den Messwerten in Tab. 2 ließen sich bei Okklusionspapier mit Stärke 12 μ m eine Gesamtsensitivität von 98% und eine Gesamtspezifität von 97% ausrechnen.

Bei Betrachtung aller Dysgnathien zusammen ergab sich ein Cohen's Kappa-Wert von 0,93, was nach Landis und Koch eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Referenzmethode und der Okklusionspapier (12 μ m) entsprach.

Innerhalb der einzelnen Dysgnathie-Gruppen ließen sich unterschiedliche Werte für Reliabilität, Sensitivität und Spezifität errechnen (Abb. 46). Bei Kreuzbiss und Tiefbiss wies das Okklusionspapier mit einer Stärke von 12 μ m sogar eine Spezifität von 1,00 auf. Der höchste Sensitivitätswert (0,99) hatte diese Methode bei den Modellpaaren mit einer Regelokklusion. Die beste Übereinstimmung (Reliabilität) ließ sich in der Kreuzbissgruppe feststellen ($\kappa = 0,96$).

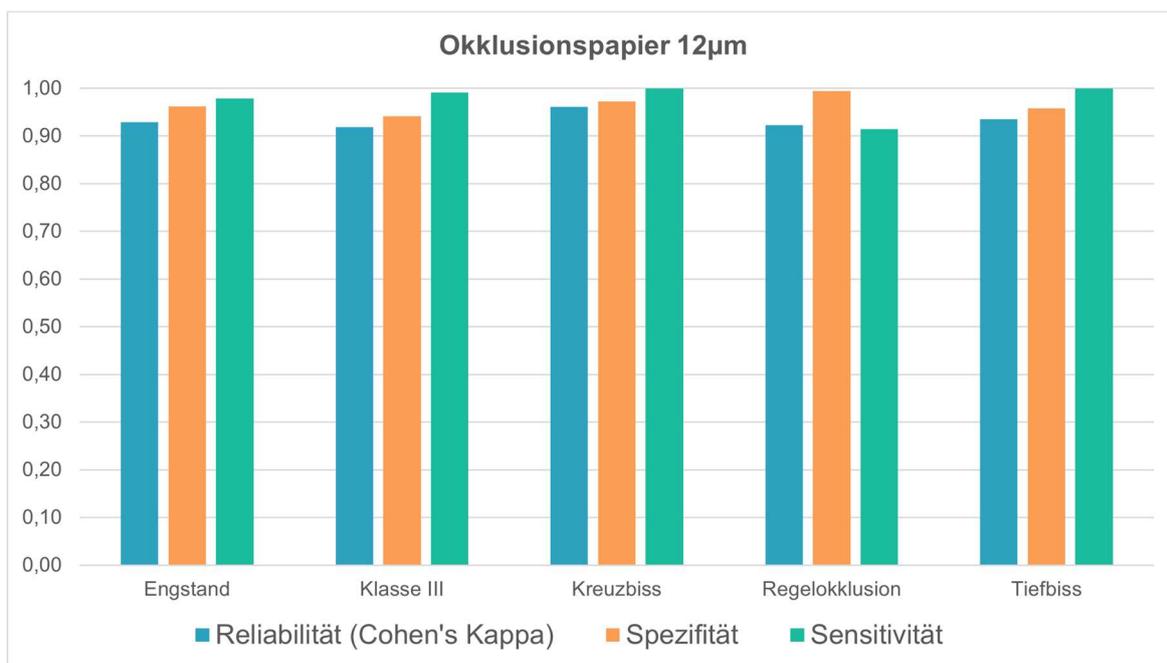


Abb. 46: Grafische Darstellung der Reliabilität, Spezifität und Sensitivität von 12 μ m Okklusionspapier in den verschiedenen Dysgnathiegruppen

Quelle: Eigene Darstellung

3.1.2 Okklusionspapier 40 µm

Anhand der 40 µm starken Okklusionspapier wurde bei insgesamt 526 Antagonistenpaaren (36,7%) ein Kontakt festgestellt. Daraus ließ sich eine Falsch-positiv-Rate von 2,4% ausrechnen. Bei 874 Antagonistenpaaren (62,4%) wurde mit dieser Methode kein Kontakt ermittelt (Interokklusalabstand bei maximaler Interkuspitation > 8 µm). Bei einer Fallzahl von 1400 entsprachen diese Werte eine Falsch-positiv-Rate von 2,4% und eine Falsch-negativ-Rate von 0,4%, sowie eine Richtig-positiv-Rate von 35,2% und eine Richtig-negativ-Rate von 62,0% (Tab. 3).

			Shimstock-Folie		Gesamt
			Kein Kontakt	Kontakt vorhanden	
Okklusions-Papier 40 µm	Kein Kontakt	Anzahl	868	6	874
		% der Gesamtzahl	62,0%	0,4%	62,4,0%
	Kontakt vorhanden	Anzahl	33	493	526
		% der Gesamtzahl	2,4%	35,20%	37,6%
Gesamt		Anzahl	901	499	1400
		% der Gesamtzahl	64,4%	35,6%	100%

Tab. 3: Kreuztabelle zu Darstellung der Sensitivität und Spezifität von 40 µm Okklusionspapier im direkten Vergleich zum Goldstandard

Quelle: Eigene Darstellung

Die Gesamtübereinstimmung der Untersuchungsergebnisse von Okklusionspapier 40 µm mit denen der Goldstandardmethode war sehr gut ($\kappa = 0,94$). Die durchschnittliche Sensitivität lag bei 99%, die durchschnittliche Spezifität bei 96%.

Innerhalb der verschiedenen Dysgnathien variierten die Werte für Reliabilität, Sensitivität und Spezifität leicht, wobei der höchste Sensitivitätswert bei Regelokklusion (100%) und der höchste Spezifitätswert bei Tiefbiss (98%) ermittelt wurde. Cohen's Kappa

schwankte zwischen 0,93 und 0,97, wobei die beste Übereinstimmung bei den Tiefmissmodellen festzustellen war (Abb. 47).

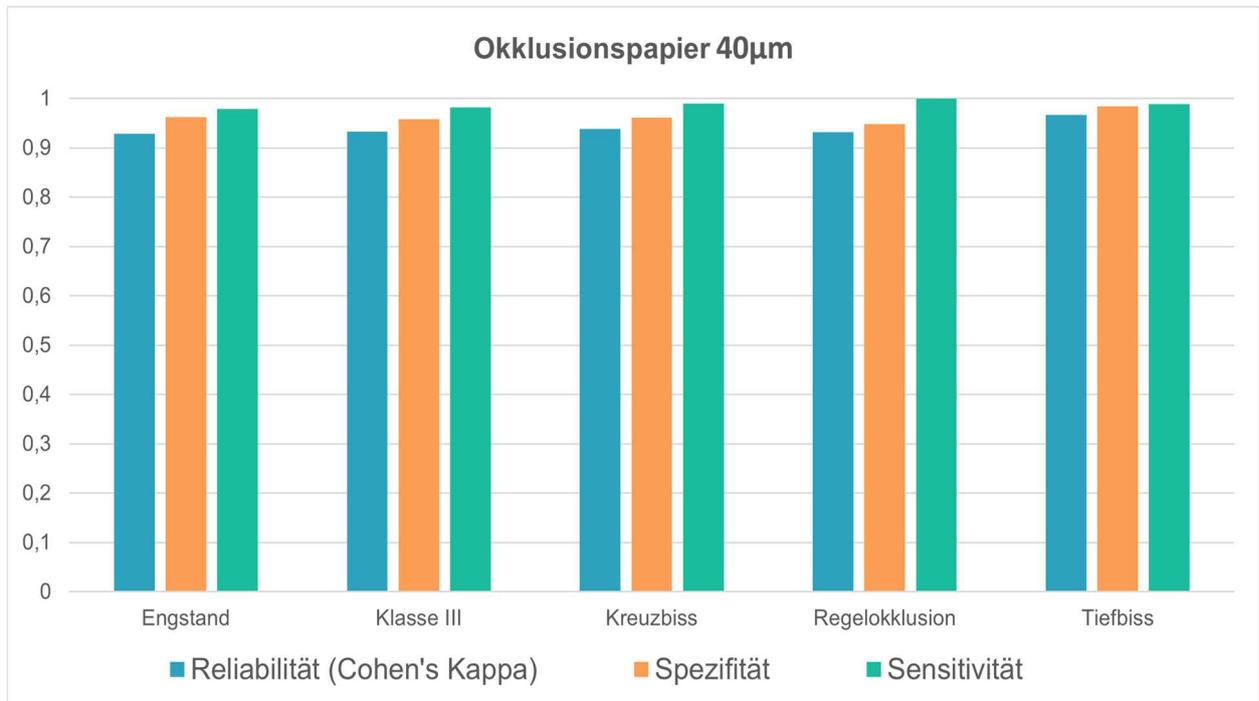


Abb. 47: Grafische Darstellung der Reliabilität, Spezifität und Sensitivität von 40 µm Okklusionspapier in den verschiedenen Dysgnathiegruppen

Quelle: Eigene Darstellung

3.1.3 Vergleich zwischen 12 µm Okklusionspapier und 40 µm Okklusionspapier

Beide Stärken an Okklusionspapier wiesen eine sehr gute Übereinstimmung ($\kappa > 0,80$) mit der Goldstandardmethode (Shimstock-Folie) aus. Bei dem direkten Vergleich der Reliabilität war das dickere Artikulationspapier ($\kappa = 0,94$) der dünneren Artikulationspapier ($\kappa = 0,93$) leicht überlegen (Abb. 48).

Das 40 µm starke Okklusionspapier hatte eine höhere Richtig-Positiv-Rate und somit eine höhere Sensitivität (99%). Das 12 µm starke Artikulationspapier hatte im Gegensatz dazu eine minimal höhere Richtig-Negativ-Rate und dadurch eine höhere Spezifität (97%). Insgesamt lieferten beide Arten an Okklusionspapier vergleichbar gute Ergebnisse und haben sich als eine zuverlässige Methode zur Okklusionsanalyse bewiesen.

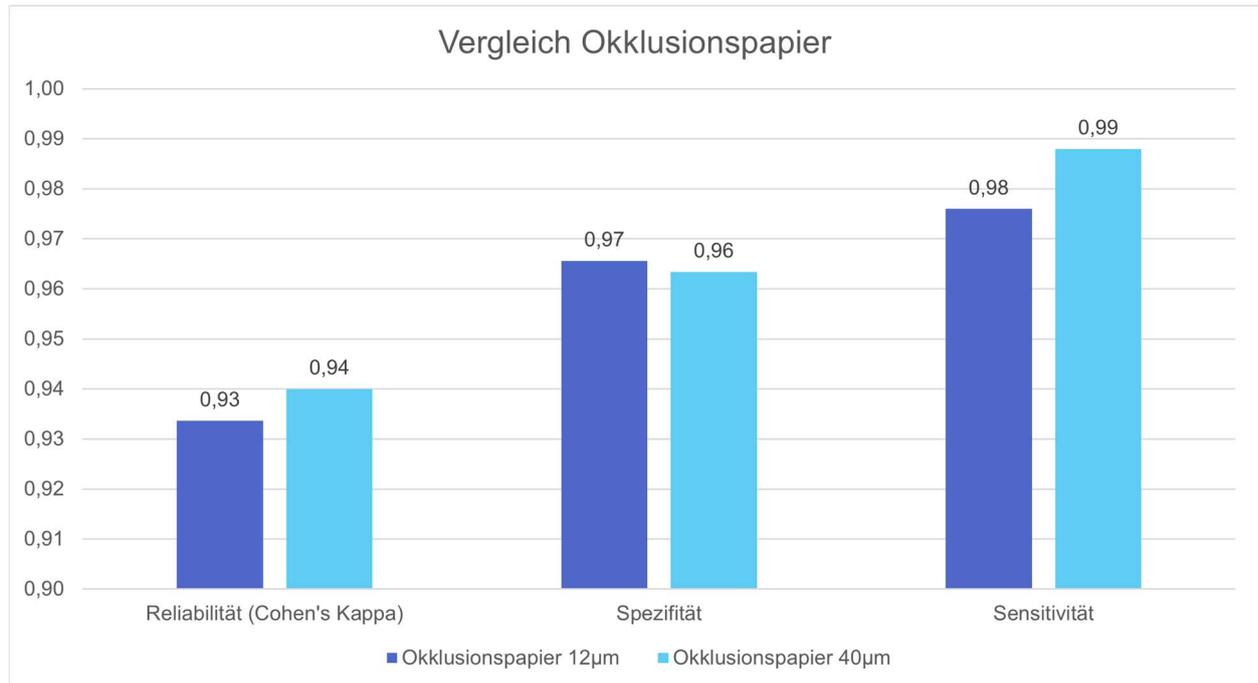


Abb. 48: Vergleich von 12 µm Okklusionspapier und 40 µm Okklusionspapier

Quelle: Eigene Darstellung

Anschließend wurden die Daten der digitalen Okklusionsmessinstrumente ausgewertet und zur klassischen instrumentellen Okklusionsanalyse durch Shimstock-Folie verglichen.

3.2 Intraoralscanner

3.2.1 CS 3600

Die Goldstandardmethode stellte von insgesamt 1400 Messstellen bei 901 Antagonistenpaaren einen Okklusionskontakt (Interokklusalabstand bei maximaler Interkuspitation $\leq 8 \mu\text{m}$) und bei 499 Paaren keinen Kontakt fest (Interokklusalabstand bei maximaler Interkuspitation $> 8 \mu\text{m}$).

Im Vergleich dazu wurden durch CS 3600 482 positive Befunde („Kontakt vorhanden“) und 918 negative Befunde („kein Kontakt vorhanden“) ermittelt. Allerdings interpretierte dieser Intraoralscanner 117 der positiven und 134 der negativen Befunde falsch. Daraus errechnete sich eine Falsch-positiv-Rate von 8,4% und eine Falsch-negativ-Rate von

9,6%. Als richtig positiv wurden 26,1% aller Ergebnisse erkannt, sowie 56,0% als richtig negativ (Tab. 4).

			Shimstock-Folie		Gesamt
			Kein Kontakt	Kontakt vor- handen	
CS 3600	Kein Kontakt	Anzahl	784	134	918
		% der Gesamtzahl	56,0%	9,6%	65,6%
	Kontakt vor- handen	Anzahl	117	365	482
		% der Gesamtzahl	8,4%	26,1%	34,4%
Gesamt	Anzahl		901	499	1400
	% der Gesamtzahl		64,4%	35,6%	100%

Tab. 4: Kreuztabelle zur Darstellung der Sensitivität und Spezifität von CS 3600 im direkten Vergleich zum Goldstandard

Quelle: Eigene Darstellung

Bei Betrachtung aller Malokklusionen zusammen betrug die durchschnittliche Sensitivität von CS 3600 73%, die durchschnittliche Spezifität 87%.

Beim intraindividualen Vergleich lag der Cohen's Kappa-Wert von CS 3600 bei 0,61, was einer guten Übereinstimmung ($\kappa = 0,61 - 0,80$) mit der Referenzmethode entsprach.

Bei genauerer Untersuchung der Ergebnisse innerhalb der 5 Modellgruppen, konnten bei der Reliabilität deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Dysgnathien festgestellt werden. Die beste Übereinstimmung mit Shimstock war in der Gruppe der Tiefbiss-Modelle ($\kappa = 0,75$) und die schlechteste – in der Klasse-III-Gruppe ($\kappa = 0,43$).

Ähnliche Tendenz konnte bei der Sensitivität und Spezifität beobachtet werden. Die niedrigsten Sensitivitäts- (64%) und Spezifitätswerte (79%) befanden sich auch in der Modellgruppe mit einer Angle-Klasse-III-Dysgnathie. Der höchste Spezifitätswert (90%) lag im Gegensatz dazu in der Engstand-Gruppe und der höchste Sensitivitätswert (79%) in der Kreuzbiss-Gruppe (Abb. 49).

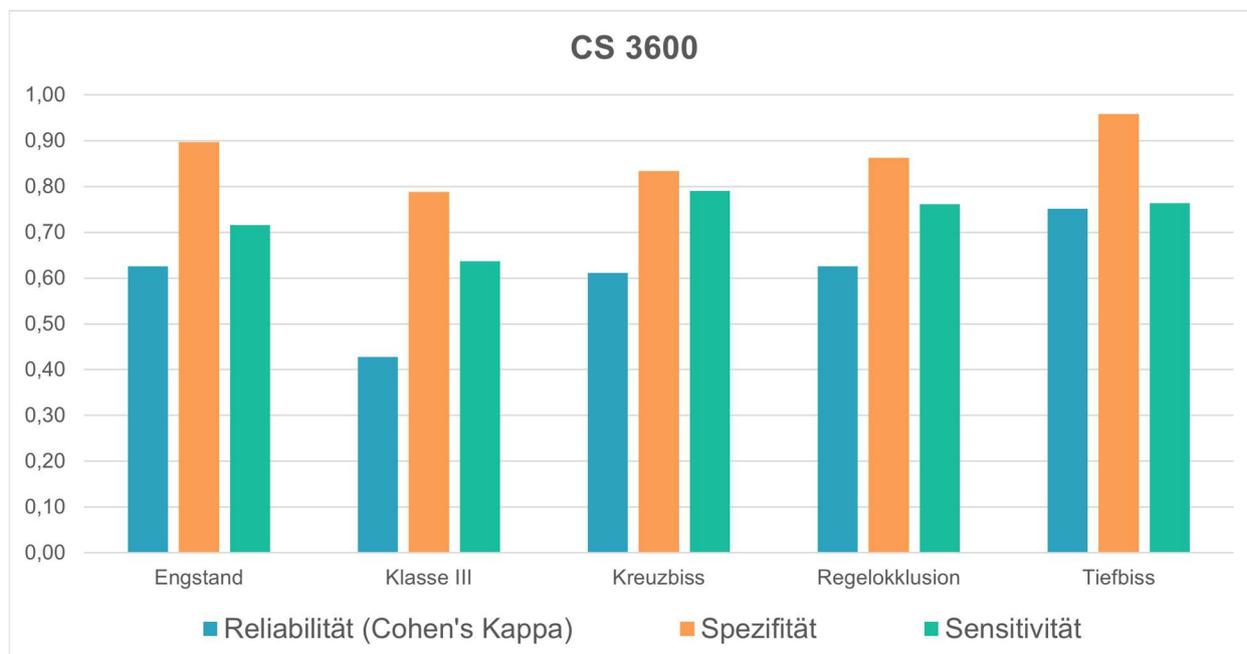


Abb. 49: Grafische Darstellung der Reliabilität, Spezifität und Sensitivität von CS 3600 in den verschiedenen Dysgnathiegruppen

Quelle: Eigene Darstellung

3.2.2 TRIOS 4

Bei der Okklusionsanalyse aller Studienmodelle mit TRIOS 4 wurden insgesamt 514 vorhandene Okklusionskontakte gemessen, was bei einer Fallzahl von 1400 36,7% aller Messwerte entsprach. Bei 886 Antagonistenpaaren (36,7%) wurde einen fehlenden Kontakt (Interokkluslabstand bei maximaler Interkuspitation $> 8 \mu\text{m}$) durch den Softwarealgorithmus kalkuliert. 407 Befunde wurden durch den Intraoralscanner korrekt als positiv erkannt (TPR = 29,1%), und 794 Befunde korrekt als negativ (TNR = 56,7%). 107 Messwerte wurden allerdings fehlerhaft als positiv ermittelt (FÜR = 7,6%) und 92 Messwerte fehlerhaft als negativ (FNR = 6,6%) (Tab. 5).

			Shimstock-Folie		Gesamt
			Kein Kontakt	Kontakt vorhanden	
TRIOS 4	Kein Kontakt	Anzahl	794	92	886
		% der Gesamtzahl	56,7%	6,6%	63,3%

	Kontakt vor- handen	Anzahl	107	407	514
		% der Ge- samtzahl	7,6%	29,1%	36,7%
Gesamt		Anzahl	901	499	1400
		% der Ge- samtzahl	64,4%	35,6%	100%

Tab. 5: Kreuztabelle zu Darstellung der Sensitivität und Spezifität von TRIOS 4 im direkten Vergleich zum Goldstandard

Quelle: Eigene Darstellung

Aus den Formeln für Sensitivität ($TPR / (TPR + FNR)$) und Spezifität ($TNR / (TNR + FPR)$) ließ sich bei TRIOS 4 eine Gesamtsensitivität von 82% und eine Gesamtspezifität von 89%.

Die Reliabilität von TRIOS 4 als Methode zur Okklusionsanalyse wurde anhand des Cohen's Kappa-Koeffizienten beurteilt. Bei Betrachtung aller Dysgnathien zusammen war die Übereinstimmung der digitalen Okklusogramme von TRIOS 4 mit den konventionellen Okklusionsprotokollen von Shimstock gut ($\kappa = 0,69$).

Innerhalb der verschiedenen Dysgnathie-Gruppen schwankte Cohen's Kappa zwischen 0,61 (Kreuzbiss) und 0,78 (Tiefbiss) (Abb. 50).

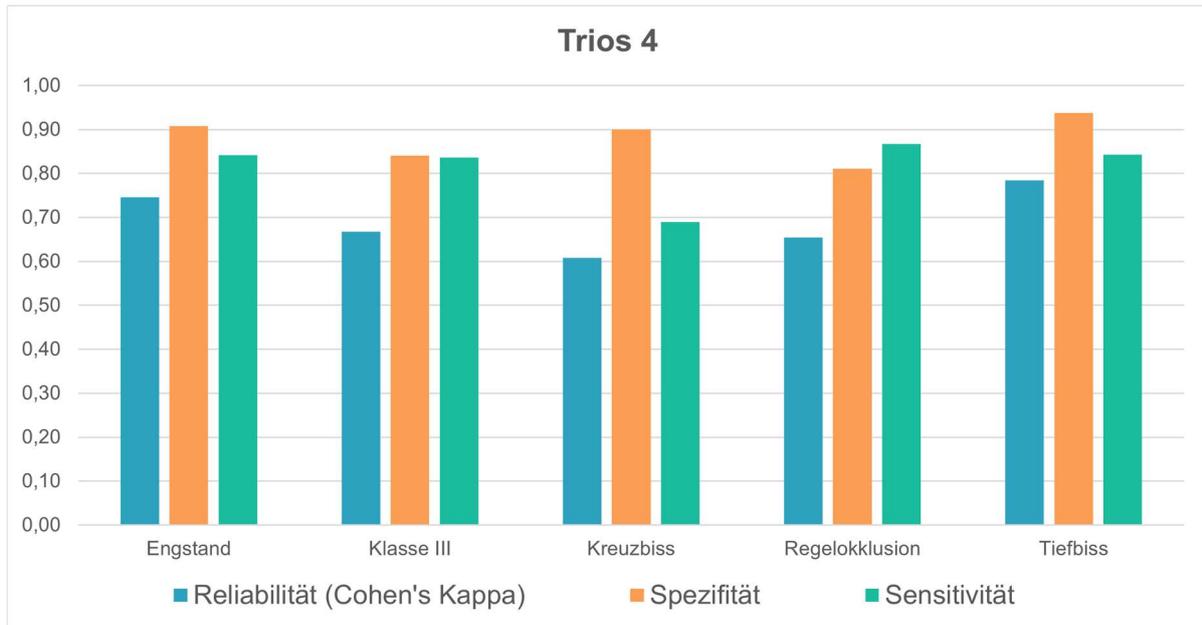


Abb. 50: Grafische Darstellung der Reliabilität, Spezifität und Sensitivität von TRIOS 4 in den verschiedenen Dysgnathiegruppen

Quelle: Eigene Darstellung

Bei den Regelokklusion-Modellen wies TRIOS 4 die höchsten Werte für Sensitivität (87%) auf, bei den Tiefbiss-Modellen – die höchsten Werte für Spezifität (94%). Die niedrigste Sensitivität (69%) wurde in der Kreuzbiss-Gruppe festgestellt. Der niedrigste Spezifitätswert (81%) lag in der Regelokklusion-Gruppe.

3.2.3 Emerald S

Die Okklusionsanalyse mit Emerald S stellte insgesamt 618 okklusale Kontakte fest (Interokklusalabstand bei maximaler Interkuspitation $\leq 8 \mu\text{m}$), wobei 476 davon tatsächlich vorhanden waren (TPR = 34,0%) und 143 fälschlicherweise als bestehend erkannt wurden (FPR = 10,2%).

Bei 781 der Antagonistenpaaren wurde mit diesem Scanner kein Okklusionskontakt detektiert. Die Referenzmethode (Shimstock-Folie) ermittelte insgesamt 901 Messungen mit fehlendem Kontakt (Interokklusalabstand bei maximaler Interkuspitation $> 8 \mu\text{m}$). Das bedeutet, dass dieser IOS 54,1% aller Befunde als richtig negativ erkannt hat und 1,6% als falsch negativ (Tab. 6).

			Shimstock-Folie		Gesamt
			Kein Kontakt	Kontakt vor- handen	
Emerald S	Kein Kontakt	Anzahl	758	23	781
		% der Gesamtzahl	54,1%	1,6%	55,8%
	Kontakt vor- handen	Anzahl	143	476	619
		% der Gesamtzahl	10,2%	34,0%	44,2%
Gesamt		Anzahl	901	499	1400
		% der Gesamtzahl	64,4%	35,6%	100%

Tab. 6: Kreuztabelle zur Darstellung der Sensitivität und Spezifität von Emerald S im direkten Vergleich zum Goldstandard

Quelle: Eigene Darstellung

Die durchschnittliche Sensitivität von Emerald S lag bei 95%, die durchschnittliche Spezifität bei 84%.

Nach Berechnung von Cohen's-Kappa (κ) konnte eine gute Übereinstimmung mit der Goldstandardmethode festgestellt werden ($\kappa = 0,75$). Je nach Malokklusion variierte Kappa allerdings erheblich (Abb. 51). Beim Vorliegen einer Klasse III-Verzahnung wurde eine gute Übereinstimmung vom Emerald S Okklusogramm mit dem Shimstock-Okklusionsprotokoll ermessend ($\kappa = 0,68$). Bei Kreuzbiss lag κ bei 0,83, was einer sehr guten Übereinstimmung mit der Referenzmethode entsprach. Die gleiche Tendenz konnte bei der Ermittlung der Spezifität beobachtet werden: Der niedrigste Wert lag wieder bei der Klasse-III-Gruppe (77%), der höchste Wert bei der Engstand-Gruppe (87%).

Die Sensitivität von Emerald S schwankte innerhalb der Dysgnathiegruppen nur gering und lag zwischen 99% (Engstand) und 95% (Regelokklusion).

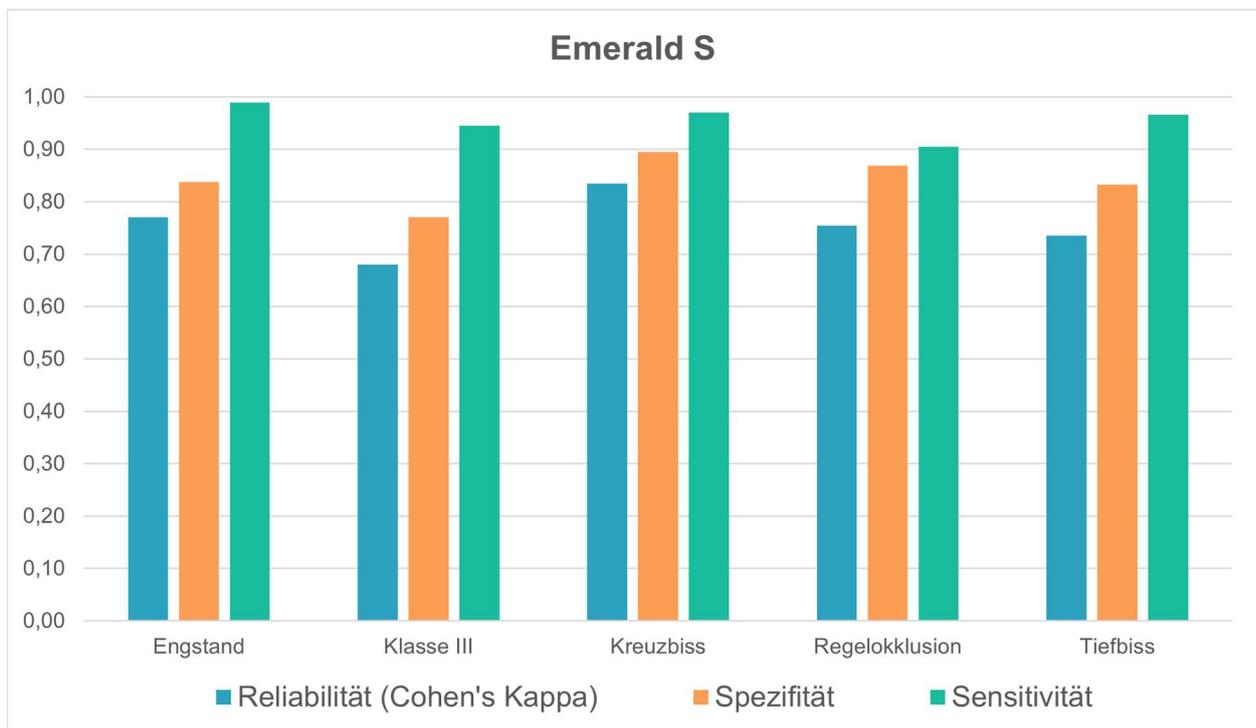


Abb. 51: Grafische Darstellung der Reliabilität, Spezifität und Sensitivität von Emerald S in den verschiedenen Dysgnathiegruppen

Quelle: Eigene Darstellung

3.2.4 iTero Element 5D+

Nach Okklusionserfassung aller 20 Modellpaaren mit iTero Element 5D+ (1400 Messwerte) wurden insgesamt 797 negative („kein Kontakt“) und 603 positive Befunde („Kontakt vorhanden“) ermittelt. Unter den negativen Resultaten wurden vom Scanner 16 falsch eingeschätzt und unter den positiven 120 falsch eingeschätzt. Dies ergab eine Falsch-Negativ-Rate von 1,1% und eine Falsch-Positiv-Rate von 8,6%. Die Richtig-Positiv-Rate betrug 34,5%, die Richtig-Falsch-Rate – 55,8% (Tab. 7).

			Shimstock-Folie		Gesamt
			Kein Kontakt	Kontakt vorhanden	
iTero Element 5D+	Kein Kontakt	Anzahl	781	16	797
		% der Gesamtzahl	55,8%	1,1%	56,9%

	Kontakt vor- handen	Anzahl	120	483	603
		% der Ge- samtzahl	8,6%	34,5%	43,1%
Gesamt		Anzahl	901	499	1400
		% der Ge- samtzahl	64,4%	35,6%	100%

Tab. 7: Kreuztabelle zu Darstellung der Sensitivität und Spezifität von iTero Element 5D+ im direkten Vergleich zum Goldstandard

Quelle: Eigene Darstellung

Bei Betrachtung aller Dysgnathie-Gruppen zusammen lag die durchschnittliche Sensitivität von iTero Element 5D+ bei 97% und die durchschnittliche Spezifität bei 87%.

Je nach Dysgnathie ließen sich die Werte unterscheiden. Beim Vorliegen einer Regelokklusion bzw. eines Tiefbisses lag die Sensitivität bei 100%. In der Klasse-III-Gruppe im Gegensatz dazu lag sie bei 91%. Die individuelle Spezifität schwankte signifikant zwischen 81% (Kreuzbiss) und 97% (Tiefbiss).

Bei der Untersuchung der Reliabilität wurde ein Cohen's Kappa-Wert von 0,80 kalkuliert, was einer guten Übereinstimmung mit den Messungen der Goldstandardmethode ergab. Zwischen den verschiedenen Malokklusionen unterschieden sich allerdings die Reliabilitätswerte von iTero Element 5D+. Der höchste Kappa-Wert lag wieder bei der Tiefbiss-Gruppe ($\kappa = 0,95$) vor und der niedrigste Wert bei der Klasse-III Gruppe ($\kappa = 0,72$) (Abb. 52).

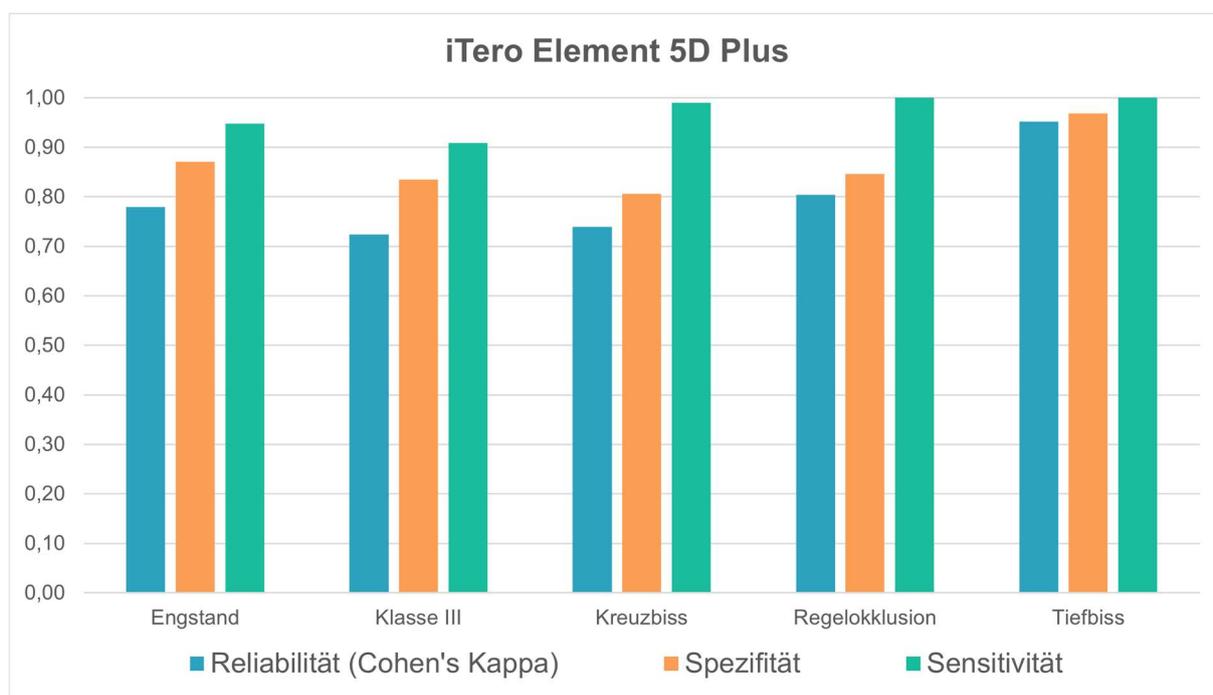


Abb. 52: Grafische Darstellung der Reliabilität, Spezifität und Sensitivität von iTero Element 5D Plus in den verschiedenen Dysgnathiegruppen

Quelle: Eigene Darstellung

3.2.5 DiOS 4.0

Die Okklusionsanalyse mit dem Intraoralscanner DiOS 4.0 der Firma Medit ermittelte insgesamt 740 Okklusionskontakte. 259 Kontakte davon wurden falsch von der Scanner-Software berechnet und waren in Wirklichkeit nicht vorhanden. Dadurch ergab sich eine Falsch-Positiv-Rate bei diesem IOS von 18,5% und eine Richtig-Positiv-Rate von 34,4%. Der Scanner konnte bei insgesamt 660 Zahnpaaren keinen Kontakt nachweisen. 642 davon wurden richtig gemessen, an den restlichen 18 Stellen bestand in Wirklichkeit ein Okklusionskontakt. Die Richtig-Negativ-Rate lag dadurch bei 45,9% und die Falsch-Negativ-Rate bei 1,3% (Tab. 8).

			Shimstock-Folie		Gesamt
			Kein Kontakt	Kontakt vorhanden	
DiOS 4.0	Kein Kontakt	Anzahl	642	18	660
		% der Gesamtzahl	45,9%	1,3%	47,1%

	Kontakt vorhanden	Anzahl	259	481	740
		% der Gesamtzahl	18,5%	34,4%	52,9%
Gesamt		Anzahl	901	499	1400
		% der Gesamtzahl	64,4%	35,6%	100%

Tab. 8: Kreuztabelle zu Darstellung der Sensitivität und Spezifität von DiOS 4.0 im direkten Vergleich zum Goldstandard

Quelle: Eigene Darstellung

Berechnet auf alle Studienmodelle betrug die durchschnittliche Sensitivität 96% und die durchschnittliche Spezifität 71%.

Die Reliabilität von DiOS 4.0 anhand des Cohen's Kappa Koeffizienten berechnet. Es wurde ein Kappa-Wert von 0,61 kalkuliert, was einer guten Übereinstimmung des DiOS 4.0 Okklusogramms mit dem Shimstock-Okklusionsprotokoll entsprach ($\kappa = 0,61 - 0,80$). Zwischen den verschiedenen Malokklusionsgruppen weichten die Werte für Sensitivität, Spezifität und Reliabilität unterschiedlich stark ab. Die geringste Abweichung wurde bei der Sensitivität festgestellt (94%-99%). Der niedrigste Spezifitätswert wurde bei den Modellen mit einer Klasse-III-Okklusion gemessen (65%), der höchste Wert bei den Kreuzbissmodellen (81%). Ähnlich verhielt sich auch κ . Beim Vorliegen einer Angle-Klasse-III lag κ bei 0,59. In der Kreuzbiss-Gruppe lag κ bei 0,71. Der tiefste Cohen's Kappa-Wert wurde dennoch in der Gruppe mit einer regelrechten Okklusion gemessen (0,54), was nur eine mäßige Übereinstimmung mit dem Referenzokklusionsprotokoll bedeutete (Abb. 53).

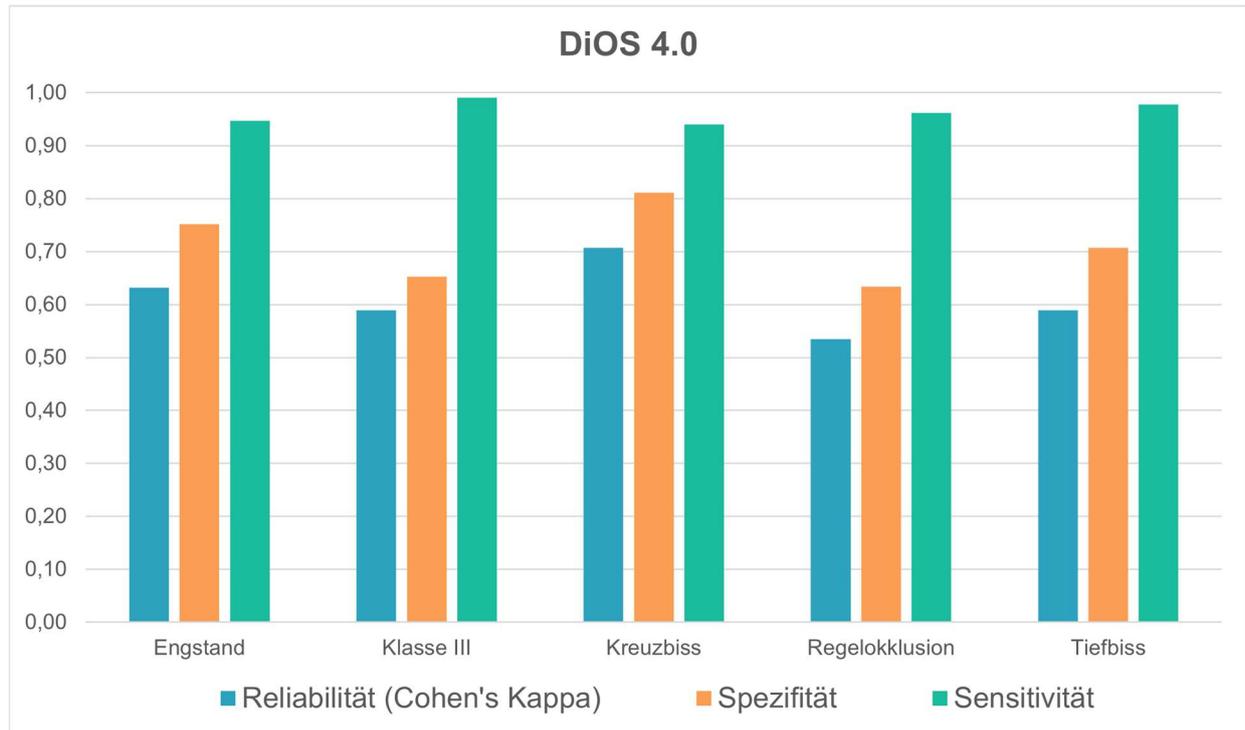


Abb. 53: Grafische Darstellung der Reliabilität, Spezifität und Sensitivität von DiOS 4.0 in den verschiedenen Dysgnathiegruppen

Quelle: Eigene Darstellung

3.2.6 Vergleich der Intraoralscanner

Unter den untersuchten Intraoralscanner (IOS) wies iTero Element 5D Plus die höchste Reliabilität auf ($\kappa = 0,80$). An zweiter Stelle mit einem Cohen's Kappa-Wert von 0,75 kommt Emerald S, gefolgt von TRIOS 4 ($\kappa = 0,69$). DiOS 4.0 und CS 3600 hatten beide einen Cohen's Kappa-Wert von 0,61, was knapp einer guten Übereinstimmung ($\kappa = 0,61 - 0,80$) mit dem Goldstandard entsprach (Abb. 54). Die niedrige Reliabilität von den zuletzt erwähnten zwei Intraoralscannern ergab sich durch die hohe Falsch-Positiv-Rate von DiOS 4.0 (18,5%) und die verhältnismäßig hohe Falsch-Negativ-Rate von CS 3600 (9,6%), was zu einer niedrigen Spezifität bzw. einer niedrigen Sensitivität führte. Demzufolge konnte die Reliabilität (Zuverlässigkeit) der IOS folgendermaßen von links nach rechts abnehmend eingeordnet werden:

Reliabilität

iTero Element 5D Plus > Emerald S > TRIOS 4 > CS 3600 = DiOS 4.0

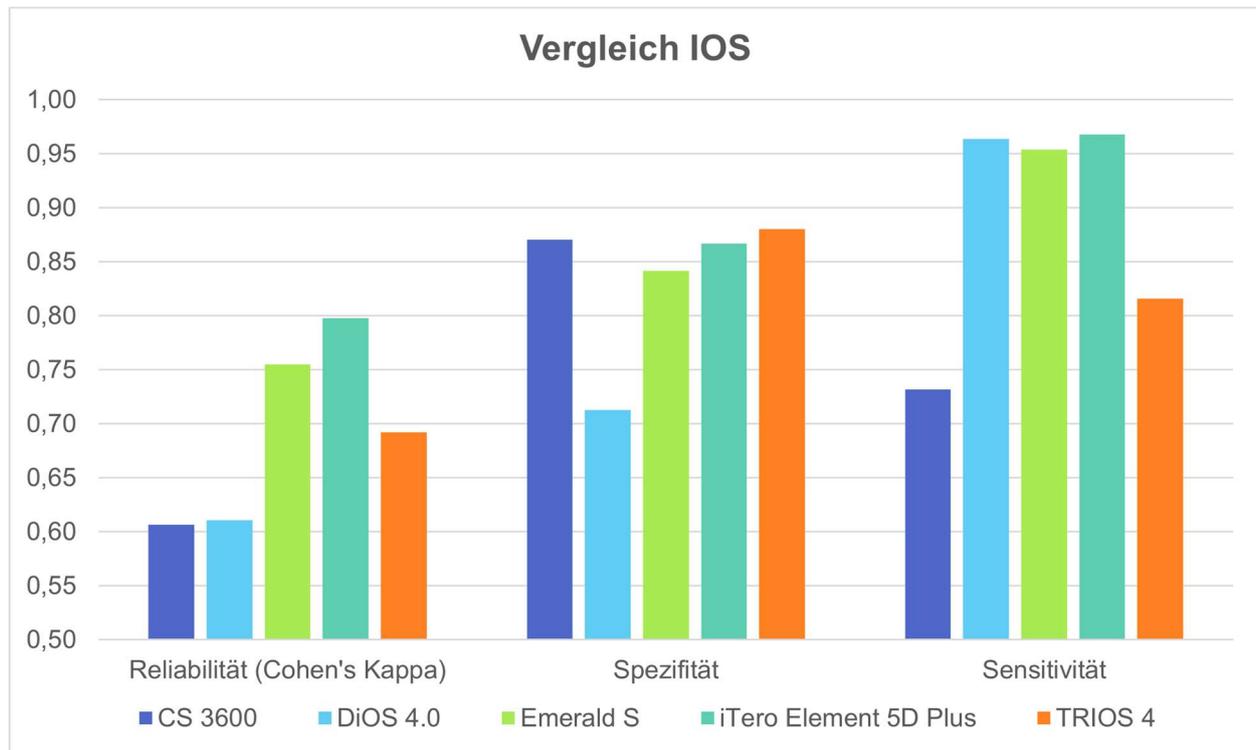


Abb. 54: Vergleich zwischen den Intraoralscannern

Quelle: Eigene Darstellung

3.2.7 Vergleich zwischen der konventionellen Okklusionsanalyse mittels Okklusionspapier und der Okklusionsanalyse durch Intraoralscanner

Mit einem Cohen's-Kappa-Wert von über 0,9 waren die Artikulationspapiere eindeutig die zuverlässigere Methode zur Okklusionserfassung, wenn verglichen mit den digitalen Okklusogrammen der Intraoralscannern (IOS) (Abb. 55). Die Scanner DiOS 4.0, Emerald S und iTero Element 5D Plus wiesen eine mit dem Okklusionspapier vergleichbar gute Sensitivität auf. Allerdings ließ sich aufgrund der niedrigeren Spezifität dieser Scanner wiederum eine niedrigere Reliabilität der IOS als die der herkömmlichen Okklusionspapier ausrechnen.

Reliabilität

Okklusionspapier 40 μ m > Okklusionspapier 12 μ m > iTero Element 5D Plus > Emerald S > TRIOS 4 > CS 3600 = DiOS 4.0

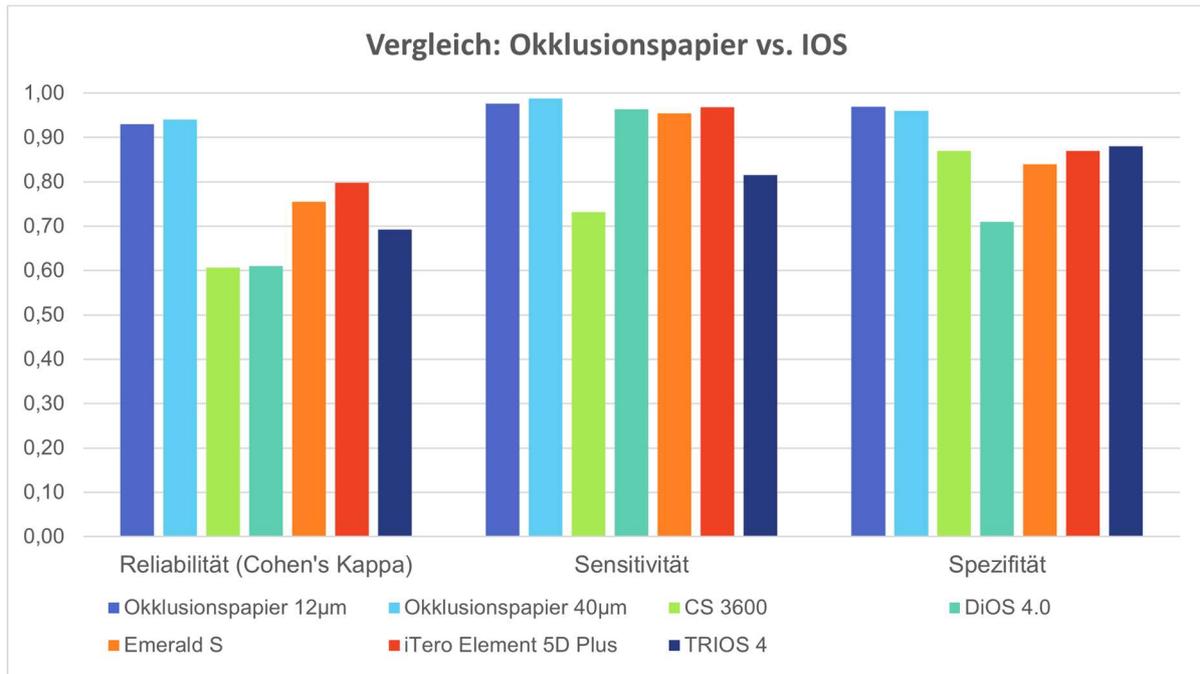


Abb. 55: Vergleich zwischen der konventionellen Okklusionsanalyse mittels Okklusionspapier und der Okklusionsanalyse durch Intraoralscanner

Quelle: Eigene Darstellung

3.3 OccluSense

Anschließend wurden die Ergebnisse von OccluSense in SPSS Version 25 statistisch analysiert. Anhand von Shimstock-Folie (Goldstandard) wurden 499 (35,6%) vorhandene Kontakte (Interokklusalabstand bei maximaler Interkuspitation $\leq 8 \mu\text{m}$) von insgesamt 1400 möglichen Messungen nachgewiesen. Bei den restlichen 901 (64,4%) Antagonistenpaaren wurde ein fehlender Okklusionskontakt ermittelt (Interokklusalabstand bei maximaler Interkuspitation $> 8 \mu\text{m}$). OccluSense ermittelte bei denselben Studienmodellen 746 statische Okklusionskontakte, was bei einer Fallzahl von 1400 53,3% positive Befunde bedeutete. 403 von denen wurden allerdings überschätzt und existierten in Wirklichkeit nicht. Dadurch ergab sich eine Falsch-Positiv-Rate von 28,8% und eine Richtig-Positiv-Rate von 24,5%. Die Richtig-Negativ-Rate betrug 35,6%, die Falsch-Negativ-Rate – 11,1% (Tab. 9).

			Shimstock-Folie		Gesamt
			Kein Kontakt	Kontakt vorhanden	
OccluSense	Kein Kontakt	Anzahl	498	156	654

		% der Gesamtzahl	35,6%	11,1%	46,7%
	Kontakt vorhanden	Anzahl	403	343	746
		% der Gesamtzahl	28,8%	24,5%	53,3%
Gesamt		Anzahl	901	499	1400
		% der Gesamtzahl	64,4%	35,6%	100%

Tab. 9: Kreuztabelle zu Darstellung der Sensitivität und Spezifität von OccluSense im direkten Vergleich zum Goldstandard

Quelle: Eigene Darstellung

Die durchschnittlichen Werte für Sensitivität und Spezifität von OccluSense lagen bei jeweils 69% und 55%. Je nach vorhandener Malokklusion variierten die Ergebnisse. Die tiefsten Werte lagen in der Gruppe der Tiefbiss-Modelle – 64% Sensitivität und 38% Spezifität. Die höchste Spezifität (63%) wies OccluSense bei Kiefermodellen mit einem ausgeprägtem Engstand auf. Die höchste Sensitivität (79%) dagegen bei den Modellen mit einer Regelokklusion.

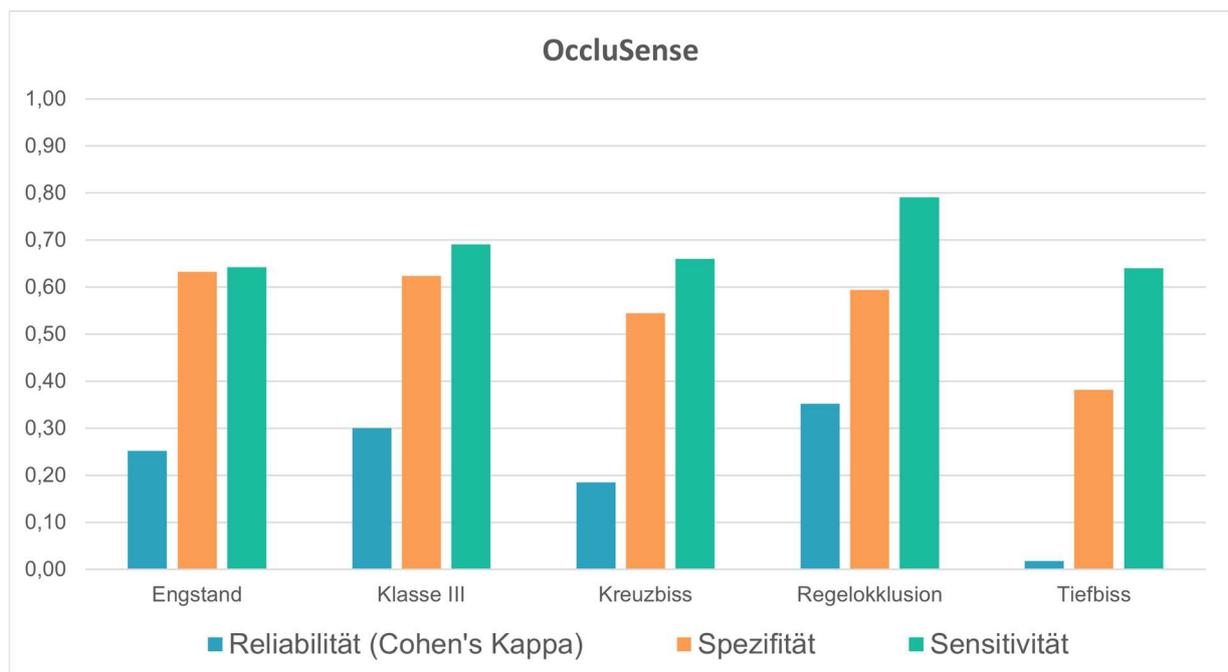


Abb. 56: Grafische Darstellung der Reliabilität, Spezifität und Sensitivität von OccluSense in den verschiedenen Dysgnathiegruppen

Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Berechnung der Reliabilität wurden signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Dysgnathien festgestellt (Abb. 56). Beim Vorliegen einer Regelokklusion lag Cohen's Kappa bei 0,35 (geringe Übereinstimmung), in der Tiefbiss Gruppe betrug $\kappa = 0,02$ (schlechte Übereinstimmung). Durchschnittlich wies OccluSense eine geringe Übereinstimmung ($\kappa = 0,22$) mit dem Goldstandard auf.

3.3.1 Vergleich von Okklusionspapier und OccluSense als Methoden zur Okklusionsanalyse

Die untersuchten Stärken an Okklusionspapier (12 μm und 40 μm) wiesen beide eine Sensitivität und Spezifität von über 95%. Im Gegensatz dazu lag die Sensitivität von OccluSense bei 69% und die Spezifität bei 55%.

Bei der Reliabilität wurden signifikante Unterschiede zwischen den konventionellen Materialien und der digitalen Okklusionserfassung durch OccluSense beobachtet, wobei Okklusionspapier deutlich überlegen war. Das Artikulationspapier wies eine sehr gute Übereinstimmung ($\kappa = 0,94$ und $\kappa = 0,93$) mit der Goldstandardmethode (Shimstock-Folie) auf, während OccluSense nur eine geringe Übereinstimmung ($\kappa = 0,22$) gewährleisten konnte (Abb. 57).

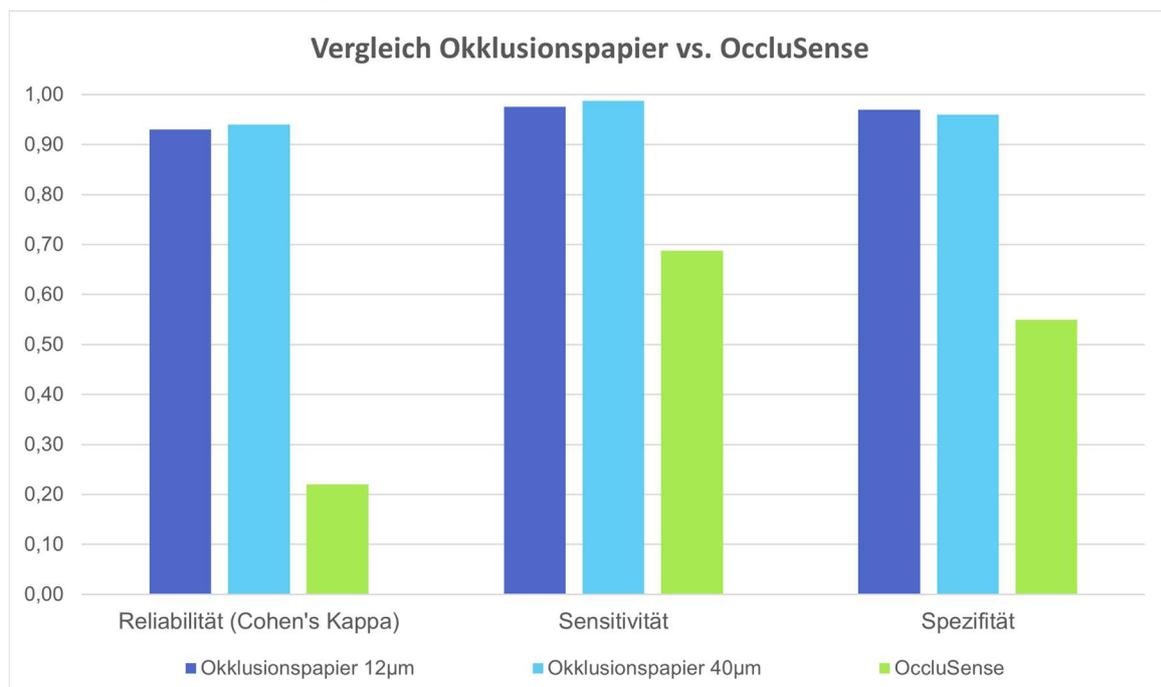


Abb. 57: Vergleich zwischen Okklusionspapier und OccluSense
Quelle: Eigene Darstellung

3.4 Einfluss verschiedener Malokklusionen auf die Reliabilität

	Höchste Reliabilität	Niedrigste Reliabilität
Okklusionspapier 12µm	Kreuzbiss (0,96)	Klasse III, Regelokklusion (0,92)
Okklusionspapier 40µm	Tiefbiss (0,97)	Klasse III, Regelokklusion (0,93)
CS 3600	Tiefbiss (0,75)	Klasse III (0,43)
TRIOS 4	Tiefbiss (0,78)	Kreuzbiss (0,61)
Emerald S	Kreuzbiss (0,83)	Klasse III (0,68)
iTero Element 5D Plus	Tiefbiss (0,95)	Klasse III (0,72)
DiOS 4.0	Kreuzbiss (0,71)	Regelokklusion (0,54)
OccluSense	Regelokklusion (0,35)	Tiefbiss (0,02)

Tab. 10: Darstellung der höchsten und niedrigsten Reliabilitätswerte aller untersuchten Methoden und die Studiengruppe, in der sie aufgetreten sind. Der Cohens-Kappa-Koeffizient ist in Klammern angezeigt.

Quelle: Eigene Darstellung .

In Tab.10 sind die niedrigsten und die höchsten Reliabilitätswerte der jeweiligen Messinstrumente zur Okklusionsanalyse zusammengefasst, sowie die Dysgnathie, bei der sie aufgetreten ist. Es gab keine Malokklusion, die eindeutig und konsequent alle Geräte negativ beeinflusste. Allerdings konnten Tendenzen beobachtet werden. Die höchste Reliabilität wurde im Durchschnitt in der Tiefbiss- und der Kreuzbissgruppe erreicht. Eine Klasse III-Okklusion bzw. eine umgekehrte sagittale Stufe schien bei der Mehrheit der getesteten Methoden Schwierigkeiten zu bereiten. Bei den Studienmodellen mit einer Regelokklusion hatten drei der Messverfahren (Okklusionspapier 12 µm, Okklusionspapier 40 µm und IOS DiOS 4.0) sogar die niedrigste Übereinstimmung mit dem Goldstandard. In diesen Fällen war eine bestehende Malokklusion sogar von Vorteil.

Besonders auffällig waren die Ergebnisse von OccluSense, die die größte Abweichung der Reliabilität aufwiesen. In der Tiefbissgruppe betrug der Cohen's Kappa-Koeffizient von OccluSense $\kappa = 0,02$, was einer minimalen Übereinstimmung mit der Referenzmethode entsprach. Eine mögliche Erklärung dafür ist die Stärke von 60 µm und die schlechte Biegsamkeit der Drucksensorfolie, die bei einem Tiefbiss (hier Overbite von 6 mm) sich unregelmäßig verformte und dadurch viele Fehlmesswerte anzeigte.

4 Diskussion

Das Ziel dieser Dissertation war drei verschiedene Kategorien an Messinstrumenten zur Okklusionsanalyse und deren Zuverlässigkeit zu vergleichen. Die Artikulationsfolien repräsentierten die herkömmliche analoge Vorgehensweise. Die Intraoralscanner (IOS) berechneten durch digitale Okklusogramme (auch Okklusionskarten genannt) den interokklusalen Abstand. OccluSense als drucksensorbasiertes Gerät analysierte die auftretenden okklusalen Kräfte und deren Lokation auf dem Zahnbogen.

Des Weiteren sollte diese Studie die Vorteile sowie Limitationen dieser Methoden untersuchen und die konventionellen den digitalen Messverfahren gegenüberstellen.

Außerdem sollte mit der vorliegenden Arbeit überprüft werden, ob verschiedene Bissanomalien und daraus resultierende Malokklusionen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der untersuchten Geräte haben.

Im nachfolgenden Abschnitt werden Versuchsaufbau und Messmethodik kritisch betrachtet. Die Ergebnisse dieser Dissertation werden anschließend diskutiert, sowie mit Ergebnissen ähnlicher Studien verglichen. Es wird auf die Fragestellung zurück eingegangen, indem jede der einzelnen Hypothesen bestätigt oder abgelehnt wird.

Abschließend werden die klinischen Konsequenzen und den Ausblick besprochen, sowie eine Schlussfolgerung gezogen.

4.1 Diskussion der Messmethoden

Die größte Schwierigkeit der Messmethodik bestand in der Erschaffung eines einheitlichen Auswertungssystems der analog bzw. digital dargestellten Okklusionsprotokolle. Zwei der untersuchten Messmethoden lieferten quantitative Aussagen über die okklusalen Verhältnisse (IOS, OccluSense) und eine Methode lieferte qualitative Aussagen (klassische instrumentelle Analyse). Das ist bis dato die erste Studie, die die Reliabilität, Sensitivität und Spezifität dieser drei Verfahren zusammen untersucht. Aus diesem Grund liefert sie wertvolle Informationen für Zahnmediziner mit einem digitalorientierten Behandlungskonzept. Allerdings führte die Essenz des Vergleichs dieser Messverfahren zur Okklusionsanalyse zu gewissen Limitationen im Studiendesign, konkreter in der Messmethodik.

4.1.1 Shimstock-Folie als Referenzmethode

Als Goldstandard dieser Studie wurde die klassische instrumentelle Okklusionsanalyse durch Shimstock-Folie ermittelt. Sie wurde als Referenzmethode ausgewählt, weil sich durch Shimstock-Folie interokklusale Distanzen kleiner als 8 μm zuverlässig nachweisen ließen (22). Sie wurde der Okklusionspapier bzw. der sog. HANEL-Folie vorgezogen, da Shimstock demgegenüber höhere Genauigkeits- sowie Reliabilitätswerte aufwies (23, 24, 79). Der häufige Kritikpunkt bezogen auf die Subjektivität der Auswertung bei Shimstock-Ergebnissen wurde in dieser Studie aufgehoben, indem der Versuchsaufbau durch genau definierte und reproduzierbare Kräfte beim Durchziehen der Folie bei konstanter Kaukraft standardisiert wurde (s. Kap. 3.2). Somit eignete sich die Shimstock-Folie unter den konventionellen Methoden am besten als Goldstandard. Durch den spezifischen Versuchsaufbau stellte dies ein einzigartiges Studiendesign dar.

Die Referenzmethode lieferte ausschließlich qualitative Aussagen über die Okklusion in Form von dichotomen Variablen (+/-). Damit Vergleichbarkeit ermöglicht werden konnte, sollten die Ergebnisse der anderen Verfahren simplifiziert werden. Deshalb wurde bei den restlichen untersuchten Methoden eine einheitliche Interpretationsstrategie entwi-

ckelt. Dies wurde einerseits erschwert durch die Software-Unterschiede in den Auswertungswerkzeugen der jeweiligen Scanner. Manche Werkzeuge erlaubten manuelle Einstellungen des interokklusalen Abstandes (TRIOS 4, DiOS 4.0, Emerald S), andere hatten eigene Skalierungen der interokklusalen Distanz zur Auswahl (iTero Element 5+), andere Systeme wiederum hatten eine vordefinierte Klassifikation der Kontaktstärke (CS 3600). Die digitalen Okklusogramme wurden dann vereinfacht, indem sie durch ein binäres Auswertungssystem beurteilt wurden. Mögliches Ergebnis bei jeder Messung war entweder „vorhandener Kontakt“ oder „fehlender Kontakt“. Dabei wurden interokklusale Distanzen $\leq 8 \mu\text{m}$ bei maximaler Interkuspitation der Modelle als „vorhandener Kontakt“ definiert, größere Distanzen galten als „fehlender Kontakt“ in dieser Studie. Auf diese Art wurde eine relative Vergleichbarkeit mit dem Shimstock-Okklusionsprotokoll geschaffen. Nuancen wie „Störkontakt“, „Infraokklusion“, und „Durchziehkontakt“ wurden nicht inkludiert, um undeutliche Interpretation zu vermeiden. In Anlehnung an anderen Studien wurden neue Shimstock-, Okklusionsfolie bzw. OccluSense-Sensorfolie bei jeder neuen Messung verwendet. Saraçoğlu und Ozpinar (2002) konnten nachweisen, dass die Sensitivität verschiedener Farbfolien bei mehrfacher Anwendung nachließ (72). Ähnlich verhielt sich die Sensorfolie von T-Scan-III (71). Deshalb wurden die Materialien streng als Einwegmaterialien angewendet. Für die Shimstock-Folie hieß das ein neues Stück Folie für jedes Antagonistenpaar, das Okklusionspapier wurde sextantenweise ausgewechselt, die OccluSense-Sensorfolie wurde einmal pro Kieferpaar benutzt. Auf die vollständige Entfernung der Farbrückstände wurde nach jeder Messung geachtet.

Insgesamt stellt die Shimstock-Folie ein benutzerfreundliches und preiswertes Instrument zur Erhebung dentaler Okklusion. Allerdings geht die klassische instrumentelle Okklusionsanalyse (IOA) mit einem hohen Laboraufwand einher (Abdruck, Modellherstellung, Einartikulieren der Modelle, Messung, Archivierung etc.). Somit ist es in Relation zu den computergestützten Alternativen zeitaufwendig und möglicherweise fehleranfällig wegen der menschlichen Komponente.

4.1.2 Okklusionsfolien

Okklusionsfolien sind im klinischen Alltag weit verbreitet. Sie sind auf Grund der einfachen Handhabung und des niedrigen Preises beliebt (26). Sie bieten Variabilität durch

verschiedene Folienstärken und Farben an. Somit lassen sich statische und dynamische Okklusionskontakte zeitgleich beurteilen. Im Gegensatz zu einem Scanner oder elektronischem Gerät benötigen sie wenig Stauraum und setzen kein technisch geschultes Personal voraus.

Sie haben aber sowohl bei einer klinischen Untersuchung der Okklusion, als auch beim indirekten Verfahren Nachteile. Je nach Oberflächenbeschaffenheit (Metall, Keramik) kann die Pigmentabgabe erschwert werden. Dies könnte zu einer Fehleinschätzung der Zahnkontakte führen und stellt häufig ein Problem bei der Eingliederung von festsitzenden Restaurationen dar. Außerdem kann die Benetzung der Zahnoberfläche durch Speichel weiterhin die Farbabgabe der Folien verschlechtern.

Des Weiteren verbleiben bei wiederholtem Gebrauch (z.B. bei Anproben) nicht selten Pigmentrückstände zurück. Sie führen gegebenenfalls zu einer Verfälschung des Ergebnisses, wenn sie nicht sorgfältig entfernt werden. Andererseits fehlt die Möglichkeit der Archivierung des Okklusionsprotokolls, wenn man zeitlich versetzt die Okklusion kontrollieren möchte (z.B. vor und nach einer Schienentherapie). In diesem Fall ist der Behandler auf digitale Unterstützung angewiesen.

Wenn ein digitales Workflow erzielt wird, bedeutet eine IOA mit Okklusionspapier genauso wie die klassische IOA mit Shimstock-Folie ein Hindernis. Durch diesen Zwischenschritt wird der CAD/CAM-Prozess unterbrochen und potentielle menschliche Fehlerquellen hinzugefügt.

Dies sind alle Faktoren, die für die Überlegenheit einer digitalen Methode sprechen.

4.1.3 OccluSense

OccluSense als innovative Technologie hat den Anspruch die traditionelle und digitale Okklusionsprüfung zu vereinen. Die farbbeschichteten OccluSense-Drucksensorfolien fungieren gleichzeitig als klassisches Okklusionspapier und Bisskraftindikator. Im Unterschied zu den Artikulationsfolien bietet OccluSense zusätzlich Dokumentation- und Archivierungsmöglichkeit, sowie Live-Übertragung und Aufzeichnung der Okklusion in 2D- und 3D Ansicht an. Das Gerät ermittelt sowohl statische als auch dynamische Okklusion. Dies könnte zur Veranschaulichung der Zahnkontakte für Patienten genutzt werden und somit als hilfreiches Kommunikationstool dienen. Dieses Okklusionsprüfmittel

von Bausch erzielt Früh- und Hyperbalancekontakte effektiv zu erkennen, was bei Gebissanierungen oder CMD-Diagnostik von Vorteil ist. Außerdem sind Änderungen des okklusalen Status im Laufe einer Behandlung durch direkten Vergleich verschiedener Aufnahmen leicht zu verfolgen. Durch das kabellose Handgerät und die OccluSense-iPad-App ist das System anwenderfreundlich und gut konzipiert.

Allerdings weist OccluSense technische Limitationen auf. Eine davon ist die Stärke (60 µm) und die Rigidität der Sensorfolie. In der vorliegenden Studie erzeugte dies zum Beispiel Fehlmessungen bei den Gebissen mit einem vergrößerten Overbite und Overjet. Durch unerwünschtes Verbiegen der Drucksensorfolie ergaben sich häufig Fehlkontakte in Arealen mit eindeutiger Non-Okklusion (z.B. Frontzahnkontakt trotz Overjet von 11mm bei einem dental nicht gestützten Tiefbiss).

Die Stärke der OccluSense-Folie war weiterhin problematisch für eine einheitliche Auswertung aller Prüfmethode. Mit 60 µm weichte die Drucksensorfolie wesentlich von der 8 µm dicken Shimstock-Folie ab. Aus diesem Grund konnte nur eine relative Vergleichbarkeit der verschiedenen Messinstrumenten gewährleistet werden.

Es besteht Bedarf an weiteren Untersuchungen in diesem Bereich, sobald absolute Vergleichbarkeit durch Eliminierung der technischen Einschränkung ermöglicht wird.

Weiterhin wäre sinnvoll zu prüfen, welcher Übereinstimmungsgrad zwischen den farblichen Markierungen der OccluSense-Folie und denen von Okklusionspapier besteht.

Beachtenswert ist noch die Tatsache, dass die Sensorfolien Einwegartikel sind. Für Nachhaltigkeitsbewusste Praxisinhaber könnte das ein Nachteil bedeuten.

Des Weiteren hat sich die Lokalisation der Kontakte auf der Zahnreihe bei einigen Messungen als schwierig erwiesen. Die vorgedruckte schematische Darstellung des Zahnbogens auf der Sensorfolie entsprach nicht in jedem Fall der eigentlichen Position der Zähne. Beispielweise war die Zuordnung der Zahnkontakte bei starkem Engstand und dadurch resultierender Verschachtelung der einzelnen Zähne teilweise erschwert. Infolgedessen kann OccluSense für Praxen mit häufiger Prävalenz von Gebissanomalien und Malokklusionen (z.-B. kieferorthopädische Praxen) nicht als Mittel der Wahl bei Okklusionsprüfung empfohlen werden.

4.1.4 Intraoralscanner

Dentale Okklusion lässt sich auch mit Hilfe von Intraoralscannern (IOS) analysieren. Die Aufzeichnung einer Okklusionskarte gehört zu den Zusatzfunktionen der IOS und ist selten der primäre Grund warum Scanner angeschafft werden. Das Indikationsfeld begrenzt sich mittlerweile nicht mehr auf optische Abformungen allein. Die meisten Intraoralscanner auf dem Markt können heutzutage dank fortgeschrittener Software außerdem als Diagnoseinstrumente verwendet werden. Scannerbesitzer genießen deshalb Vorteile wie präzises Darstellen, Abmessen und Farbbestimmung von Zähnen, sowie Planung von prothetischen Restaurationen und Simulation von kieferorthopädischen Behandlungen. Die CAD/CAM-Technologie etabliert sich allmählig in der Zahnmedizin als Standard und liefert hochqualitative Ergebnisse in kürzester Zeit. Je nach Modell und Version des Scanners sorgen Schnittstellen von weiterer Software (Labor, Praxissoftware) für eine schnelle Datenübertragung und einfache Nutzung. Die elektronische Übermittlung der Scandaten ist weiterhin umweltfreundlich und verbirgt keine Gefahr der Beschädigung beim Transport. Somit wird ein rein digitaler Workflow ermöglicht und viele Prozesse effektiver gestaltet.

Die digitale Okklusionsanalyse bringt weitere klinische Vorteile mit sich. Die von den IOS erstellten Okklusionskarten liefern gleichzeitig quantitative und qualitative Aussagen über die okklusalen Verhältnisse des Patienten. Das heißt, dass Lokalisation und Ausmaß der Kontakte sofort einsehbar sind. Die interokklusale Distanz (occlusal clearance) wird durch den Algorithmus errechnet und entsprechend farbig dargestellt. Dies ermöglicht zum Beispiel schnelles und gezieltes Einschleifen vorhandener Vorkontakte. Die farbige Aufzeichnung der Okklusion erleichtert auch Zahntechniker bei der Gestaltung vom Zahnersatz. Die vorherige Optimierung des Okklusalreliefs der Restaurationen reduziert den Anpassungsaufwand bei der Eingliederung drastisch. Die neueren Versionen Intraoralscanner bieten dazu die Aufnahme von dynamischer Okklusion an. Die Datenarchivierung ist hier genauso wie bei OccluSense gewährleistet und könnte sogar durch das Ersetzen von Gipsmodellen Platz in der Praxis sparen. Nicht an letzter Stelle erleichtern Aufnahmen von Intraoralscannern die Kommunikation zwischen Behandlern und Patienten und führen letztendlich zu einer verbesserten Aufklärung. Die digitale Okklusionsauswertung ist in dieser Hinsicht als Bonus und nicht als Hauptindikation der IOS anzusehen.

An dieser Stelle ist besonders wichtig zu differenzieren, dass diese Studie nicht den Anspruch hatte, die Genauigkeit oder Präzision der optisch-elektronischen Abformungen zu beurteilen. Sie erfasste ausschließlich die Zuverlässigkeit der Okklusionskarten.

Dennoch bedeutet ein Intraoralscanner eine erhebliche Investition für die Praxis. Der fünfstellige Preis bedeutet für viele Praxisinhaber eine zu hohe finanzielle Belastung und ist der Hauptgrund warum IOS in weniger als zehn Prozent der europäischen Zahnarztpraxen verwendet werden. Dazu kommen Lizenz- und Wartungskosten, sowie Personalschulung.

Optisch-elektronische Abformungen werden außerdem nicht von der GKV vergütet. Für den Großteil der Patienten bedeutet das deshalb eine private Leistung und wird nicht einheitlich akzeptiert. Weder in der GKV noch in der PKV existiert weiterhin eine Abrechnungsposition für die digitale instrumentelle Okklusionsanalyse (IOA). Digitale IOA geht also mit einem hohen technischen und finanziellen Aufwand einher, wird aber nicht entsprechend abgegolten.

Folgender Aspekt bleibt zum heutigen Zeitpunkt außerdem für rein digital aufgestellte kieferorthopädische Praxen problematisch. Die optisch-elektronische Abformungen wird nicht als diagnostisches Mittel von Krankenkassen anerkannt. Die Modellanalyse (BEMA-Position 117) als untrennbarer Teil der kieferorthopädischen Diagnostik wird laut Leistungsdefinition auf einem Gipsmodell durchgeführt. Infolgedessen laufen kieferorthopädisch tätige Behandler, die allein digital abformen, in ein juristisches Problem, wenn ein Gipsmodell nicht vorhanden ist. Solche Formalitäten benachteiligen die Digitalisierung und begrenzen den Nutzeffekt und klinische Anwendung von Intraoralscannern.

Abschließend lässt sich sagen, dass Intraoralscanner inklusive der digitalen IOA schnell und effektiv sind. Sie sollten dennoch je nach Indikation individuell abgewogen werden. Faktoren wie das Kosten-Nutzen-Verhältnis, die Verwendungshäufigkeit, die technischen Kenntnisse des Personals, sowie die Patientenakzeptanz sollten dabei in Rücksicht genommen werden.

4.1.5 Statistische Auswertung

Es wurden insgesamt 12600 Messwerte erhoben. Bei 9 untersuchten Methoden entsprach dies einer Fallzahl von 1400. Die hohe Fallzahl ermöglichte statistisch signifikante Aussagen.

Die statistische Analyse erfolgte durch die Software SPSS Version 25. Es wurden die Parameter Sensitivität und Spezifität, sowie Reliabilität erhoben und im Sinne einer deskriptiven Statistik analysiert. Das Gütekriterium Validität wurde für die Studie als unpassend bewertet. Die Validität ist ein Bewertungskriterium aus dem Gebiet der Psychologie und beurteilt, ob eine Methode, Messinstrument oder Test das misst, was sie messen sollte. Validität war in der vorliegenden Studie nicht das zutreffende Maß, da jedes der untersuchten Messverfahren per se ein Verfahren zur Okklusionsanalyse darstellte. Folglich ist jede dieser Methoden per definitionem valide bei der Erfassung okklusaler Verhältnisse. Vielmehr sind Sensitivität und Spezifität hier relevant, da sie genaue Informationen zu dem positiven und dem negativen prädikativen Wert liefern.

Als Indiz für die Reliabilität wurde hier der Cohen's-Kappa-Koeffizient berechnet, da er der Messkoeffizient der ersten Wahl bei Untersuchung der Reliabilität in Studien mit dichotomen Charakter ist (74). Der in anderen Studien häufig verwendete Intraklassenkorrelationskoeffizient (57) war in der vorliegenden Studie nicht geeignet, da hier keine metrischen Variablen, sondern nominale Variablen ausgewertet wurden.

Zur möglichst akkuraten Auswertung der Reliabilität wurde jede Messung fünfmal wiederholt. In weiteren Studien, die diesen Parameter erfassten (80–82, 71), wurden die Messungen zweifach durchgeführt. Dadurch ist hier eine hohe statistische Relevanz gewährleistet.

4.2 Diskussion der Studienmodelle

Für die vorliegende Studie wurden vollbezahnte Kiefermodelle (bleibendes Gebiss ohne Weisheitszähne) aus Epoxidharz ausgewählt. Um Materialabnutzung zu minimieren wurde hier Epoxidharz vor Hartgips auf Grund der höheren Härte, Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul bevorzugt. Bei jedem Wechsel des Messinstruments wurde das Okklusio-protokoll jedes Modellpaares mit Hilfe von Shimstock-Folie erneut erfasst und validiert. Dennoch kann Materialabnutzung im Mikrometerbereich nicht ausgeschlossen werden.

Weitere Anforderung bei der Wahl der Studienmodelle war die am häufigsten vorkommenden Gebissanomalien zu inkludieren. Aus diesem Grund wurden kieferorthopädische Typodonten vorgezogen, die verschiedene Dysgnathien, Zahnfehlstellungen und Malokklusionen repräsentierten. Die zwanzig Modellpaare wurden in fünf Gruppen mit

jeweils vier Vertretern verteilt. Dies erzielte aussagekräftige Beurteilung des Einflusses von Gebissanomalien auf die Zuverlässigkeit von Okklusionsprüfmitteln.

4.3 Diskussion der Ergebnisse

In dieser Studie wurden die Sensitivität, Spezifität und Reliabilität (Übereinstimmung mit der Referenzmethode) von verschiedenen konventionellen und digitalen Okklusionsprüfmethoden untersucht.

In Hinsicht auf die Reliabilitätswerte lassen sich die Ergebnisse dieser Studie folgendermaßen zusammenfassen:

Reliabilität

Okklusionspapier 40 µm > Okklusionspapier 12 µm > iTero Element 5D Plus > Emerald S > TRIOS 4 > CS 3600 = DiOS 4.0 > OccluSense

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass Okklusionspapier in Relation zu der digitalen instrumentellen Okklusionsanalyse (IOA) mittels Intraoralscanner und OccluSense am zuverlässigsten statische Okklusion erfasst. Okklusionspapier wies eine sehr gute Übereinstimmung ($\kappa > 0,90$) mit dem Goldstandard (Shimstock-Folie) aus.

Unter den untersuchten computergestützten Geräten kamen iTero Element 5D+ IOS ($\kappa = 0,80$), Emerald S IOS ($\kappa = 0,75$) und TRIOS4 IOS ($\kappa = 0,69$) am nächsten zum Artikulationspapier. Diese Werte entsprechen einer guten Übereinstimmung mit der Referenzmethode. OccluSense kann in Betracht auf die niedrige Zuverlässigkeit ($\kappa = 0,22$) bei Erhebung statischer Okklusion nicht empfohlen werden.

Die Unterschiede in der Reliabilität dieser Methoden sind statistisch signifikant. Jedoch ist statistische Signifikanz nicht mit klinischer Relevanz gleichzusetzen.

Um die klinisch relevante Frage „Wie viele Vorkontakte werden bei der digitalen IOA übersehen?“ zu beantworten, ist die Sensitivität des jeweiligen Geräts von Bedeutung. Nicht erkannte Okklusionskontakte werden durch die Falsch-negativ-Rate (FNR) dargestellt. Die höchsten Sensitivitätswerte bzw. die niedrigste FNR wurde bei iTero Element 5D+ DiOS 4.0 und, Emerald S ermittelt. Mit einer Falsch-negativ-Rate von knapp 1% ist die Wahrscheinlichkeit Störkontakte mit diesen Scannern zu übersehen sehr gering.

Insgesamt ließ sich eine Tendenz zur leichten Überschätzung der Okklusion durch Intraoralscanner nachweisen. Diese Tendenz wird auch in der Studie von Cheng et al. bestätigt (35).

Es ist sinnvoll allerdings Sensitivität und Spezifität immer zusammen zu betrachten. DiOS 4.0 ermittelte zwar hohe Sensitivitätswerte, jedoch niedrige Spezifitätswerte. Anders gesagt überschätzte DiOS 4.0 die Okklusionskontakte verhältnismäßig stark und ermittelte häufig Kontakte, die in Wirklichkeit nicht vorhanden waren (Falsch-Positiv-Rate von 18,5%).

Im Gegensatz dazu wies CS 3600 eine hohe Spezifität und eine niedrige Sensitivität auf. Dieser IOS unterschätzte im Durchschnitt die okklusalen Interferenzen (Falsch-negativ-Rate von 9,6%). Die Wahrscheinlichkeit Vorkontakte mit diesem Scanner zu übersehen, war entsprechend höher.

Daraus ergab sich für DiOS 4.0 und CS 3600 insgesamt eine schlechtere Zuverlässigkeit im Vergleich zu den restlichen drei IOS.

OccluSense zeigte weder überzeugende Sensitivität (Falsch-Positiv-Rate von 28,8%), noch ausreichende Spezifität (Falsch-Negativ-Rate von 11,1%). Somit ist OccluSense den untersuchten Intraoralscannern deutlich unterlegen. Alle Ergebnisse bezogen sich auf der Detektion statischer Okklusion.

Eine umfassende Literaturrecherche ergab wenige Studien mit ähnlichem Versuchsaufbau. Aufgrund des meist abweichenden Goldstandards der Studien ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse nur bedingt möglich.

In einer aktuellen Studie von 2022, in der Artikulationsfolien und Intraoralscanner (CS 3600, TRIOS 3, Cerec Omnicam) gegenübergestellt wurden, lieferten die konventionellen Okklusionsfolien genauso wesentlich bessere Ergebnisse bei der Visualisierung statischer Okklusion (83). Unter den IOS kam TRIOS 3 am nächsten zu den Artikulationsfolien.

Heuser et al. verglichen Okklusionsfolien mit Intraoralscannern und dem T-Scan als drucksensorbasiertes Gerät. Die drei Methoden erkannten in dieser Studie zwar eine ähnliche Zahl an Okklusionskontakte, variierten allerdings in Lokalisation und Stärke (84). Zu dem gleichen Ergebnis kamen auch Botsford et al. in einer Untersuchung der Präzision der digitalen Okklusionsanalyse vom CS 3600 IOS (85).

Fraile et al. untersuchten die Reliabilität von Intraoral- (TRIOS Standard) und Extraoralscannern (Zfx Evolution) im Vergleich zu Shimstock-Folie. Der IOS wies dabei eine geringe Übereinstimmung mit dem Goldstandard ($\kappa = 0,26$).

Die Schlussfolgerung aller dieser Studien ist, dass Intraoralscanner zuverlässige quantitative Aussagen über die okklusalen Verhältnisse liefern (Lokalisation und Fläche), allerdings keine zuverlässige qualitative Okklusionsanalyse gewährleisten (Berechnung des interokklusalen Abstands). Dies bedeutet, dass die von IOS berechnete Okklusionskarte ggf. irreführender Indikator von Störkontakten sein könnte.

In Relation zu optisch erfassten Polyvinylsiloxan-Registraten zum Beispiel kam es ebenfalls zu Überschätzung der interokklusalen Interferenzen (86). Cheng et al. stellten auch fest, dass IOS die interokklusale Distanz tendenziell verkürzten und somit mehr Falschpositive-Befunde erfassten (35). Ähnliche Resultate ermittelten Delong et al., die digitale und konventionelle Okklusionsprüfmitteln verglichen. Es bestand kein signifikanter Unterschied der Sensitivität der getesteten Methoden (IOS und Artikulationsfolie) (87). Jedoch hatten die digitalen Okklusogramme niedrigere Spezifität - ein Ergebnis, welches auch in der vorliegenden Arbeit bestätigt wurde. In anderen Worten tendieren IOS teilweise Okklusionskontakte anzuzeigen, die in Wirklichkeit nicht vorhanden sind (oder schwächer ausgeprägt sind).

Weitere Studien, die konventionelle und digitale Verfahren zur Okklusionsanalyse geprüft hatten, ermittelten eine bessere Übereinstimmung zwischen analogen Methoden (z.B. klinische Untersuchung und klassische IOA). Größere Abweichung wurde zwischen den digitalen und den analogen Verfahren beobachtet (65, 88), ähnlich wie in dieser Studie.

Insgesamt kam ein Großteil der Publikationen zu diesem Thema zu der Schlussfolgerung, dass digitale Methoden zur Okklusionserfassung den konventionellen noch nicht überlegen sind. Nichtsdestotrotz waren genügend Studien auffindbar, die anderweitiges behaupteten (43, 89, 90). Die widersprüchlichen Studienergebnisse können einerseits durch die alternierende Wahl der Goldstandardmethode und somit andere Messmethodik erklärt werden. Andererseits untersuchten sie verschiedene Modelle bzw. Software-Versionen innerhalb des breiten IOS-Spektrums, wodurch diese Studien untereinander schwer vergleichbar sind.

Was alle Studien inkl. dieser gemeinsam hatten, ist die Deviation unter den geprüften Geräten (55, 56, 91, 49, 50).

Deutlich ist außerdem eine Tendenz zur Verbesserung der Scannersoftware und somit zur Steigerung der Zuverlässigkeit der computergestützte Okklusionsanalyse. In der letzten Studie von Fraile et al. aus 2022 wurden IOS als reliabel in Relation zu Shimstock-Folie ermittelt (92). Sie zeigten außerdem bessere Übereinstimmung mit dem Goldstandard als das drucksensorbasierte Gerät T-Scan.

Berücksichtigt man noch Studien, die drucksensorbasierte Geräte inkludierten, wird der Vergleich schlecht überschaubar. Zum aktuellen Zeitpunkt sind nur Publikationen über Prescale (FujiFilm) und T-Scan (Tekscan) auffindbar.

Lee et al. überprüften die Genauigkeit von IOS (TRIOS 3) und dem Prescale System und stellte keinen signifikanten Unterschied im Seitenzahnggebiet fest. Allerdings lieferte der IOS vermehrte falsch positive Ergebnisse im Frontzahnbereich in Relation zu Prescale (53).

Die Studie von Fr. Frommann-Stoltenburg von 2017, die die Reliabilität von dem T-Scan-III bei der Okklusionsanalyse in vivo untersuchte, zeigte eine starke Abweichung zw. des Drucksensorsystems und dem Goldstandard (Okklusionsfolie), wobei T-Scan signifikant weniger Okklusionskontakte ermittelte. Somit galten unter diesen Bedingungen die herkömmlichen Okklusionsindikatoren im klinischen Gebrauch als besser geeignet (71).

Im Gegensatz dazu beurteilten Ayuso-Montero et al. in einer weiteren in vivo Studie von 2019 das T-Scan als zuverlässiger im Vergleich zu IOS (TRIOS 3) (57). Hier korrelierte das T-Scan-System besser mit der Referenzmethode mittels Silikonbissregistrator.

Da Studien zu OccluSense zum Zeitpunkt des Entstehens dieser Dissertation nicht vorhanden waren, ergab sich die Notwendigkeit OccluSense wissenschaftlich und objektiv zu prüfen.

Schlussfolgernd lässt sich für die Praxis ermitteln, dass Okklusionsfolien am zuverlässigsten bei der Erfassung statischer Okklusion sind. Sie haben dennoch den Nachteil, dass die Okklusionsprotokolle nicht archiviert werden können und einen analogen Prozess voraussetzen. Bei digital orientierten Praxen bieten Intraoralscanner weitaus mehr Vorteile an wie z. B. Therapieplanung und -simulation, sowie Schnittstellen mit weiterer praxisrelevanter Software (Labor). Somit ermöglichen IOS die Vollendung einer komplett digitalen CAD/CAM-Kette. Unter den Intraoralscanner stehen iTero und TRIOS als die zuverlässigsten Scanner heraus. Deren Leistung (Zuverlässigkeit der Okklusionskarte)

kommt den klassischen Okklusionsfolien am nächsten. Drucksensorbasierte Geräte zur Okklusionsemernmittlung sind als digitale Methode den Intraoralscannern zurzeit unterlegen. Vor allem für kieferorthopädische Praxen, wo verschiedene Dysgnathien täglich vorkommen, ist OccluSense nicht geeignet. Malokklusionen, die beispielsweise bei Patienten mit Tiefbiss oder umgekehrter Schneidezahnrelation vorkommen, verschlechtern die Performance von OccluSense. Aus diesem Grund kann OccluSense bei der Bestimmung von statischer Okklusion nicht uneingeschränkt empfohlen werden. Die Stärke von druckbasierten Geräten lag laut der retrospektiven Studie von Afrashtehfar und Qadeer bei Untersuchung von dynamischer Okklusion (93).

Der Aspekt des Einflusses von Bissanomalien auf die Zuverlässigkeit der Okklusionsanalyse in der Literatur nicht auffindbar.

Im Rahmen der Auswertung der Ergebnisse und der neu gewonnenen Erkenntnisse gilt es als diskussionswürdig, die neuartigen computergestützten Messinstrumente zur Okklusionserfassung der konventionellen Verfahren als gleichwertig anzusehen. Eine Tendenz zu rasanter Verbesserung der rein digitalen Methoden zieht sich jedoch als ein roter Faden durch die wissenschaftliche Literatur zu diesem Thema.

In Anlehnung an die Ergebnisse dieser Dissertation kann folgendes Fazit gezogen werden: Als Mittel der ersten Wahl bei der Erfassung statischer Okklusion wird die Kombination von quantitativer Analyse durch Okklusionspapier und qualitativer Validierung durch Shimstock-Folie empfohlen.

Dennoch ist es nennenswert, dass Intraoralscanner mittlerweile klinisch akzeptable Resultate liefern. Die Entscheidung, ob computerbasierte Verfahren die herkömmliche analoge Arbeitsweise in der Praxis ersetzen sollte, ist stark benutzerabhängig und ist von jedem Praxisinhaber individuell zu erwägen und zu treffen.

4.4 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Arbeit hatte das Ziel, eine Übersicht über die neusten computergestützten Geräte zur Okklusionsanalyse in der jeweils aktuellsten Software-Version zu verschaffen. Dazu sollte deren Zuverlässigkeit in Relation zu den gut erprobten klassischen Okklusionsprüfmethoden evaluiert werden.

Anschließend soll anhand der Ergebnisse eine eindeutige Beantwortung der Fragestellungen erfolgen und eine zusammenfassende Bewertung abgegeben werden.

1. *Im Rahmen der klassischen instrumentellen Okklusionsanalyse führt die Verwendung einer Okklusionsfolie mit einer Stärke von 12 μm bzw. 40 μm im Vergleich zu einer Shimstock-Folie (8 μm) zu falsch positiven Befunden.*

Bei 12 μm Okklusionspapier ließ sich eine Falsch-positiv-Rate von 2,2% ausrechnen. 40 μm Okklusionspapier wies eine Falsch-positiv-Rate von 2,4% auf. Der Unterschied zwischen beiden Stärken an Okklusionsfolie war nicht signifikant. Beide Schichtstärken führten zu falsch positiven Befunden, auch wenn nur in geringem Ausmaß.

Somit konnte die erste Hypothese bestätigt werden.

2. *Die zu untersuchenden fünf intraoralen Scanner (TRIOS4, iTero Element 5D+, Emerald S, CS 3600, DiOS 4.0) weisen beim intraindividuellen Vergleich zum analogen Goldstandard mit Shimstock-Folie weniger statische okklusale Kontakte nach.*

Dies war nur bei dem CS 3600 Scanner zutreffend. Dieser Scanner rechnete durchschnittlich mehr falsch negative Resultate bei der Okklusionserfassung aus. Die restlichen intraoralen Scanner berechneten im Durchschnitt mehr falsch positive Befunde als der Goldstandard. Auf Grund dessen konnte die zweite Hypothese nur teilweise bestätigt werden.

3. *Die zu untersuchenden fünf intraoralen Scanner (TRIOS4, iTero Element 5D Plus, Emerald S, CS 3600, DiOS 4.0) weisen bei der Bestimmung der statischen okklusalen Kontakte sehr gute Reliabilitätswerte ($\kappa = 0,81-1,00$) auf verglichen mit der Goldstandardmethode.*

Folgende Cohen's-Kappa-Koeffizienten (κ) wurden im Rahmen dieser Studie berechnet: 0,61 (CS 3600), 0,61 (DiOS 4.0), 0,69 (TRIOS 4), 0,75 (Emerald S), 0,80 (iTero Element 5D Plus). Nach Landis und Koch wird $\kappa = 0,61 - 0,80$ als eine gute Übereinstimmung zwischen zwei Messverfahren eingestuft (75). Demnach zeigten alle fünf untersuchten Scanner eine gute Reliabilität. Dabei lagen iTero Element 5D Plus an der oberen Grenze und CS 3600 und DiOS 4.0 an der unteren Grenze der obenerwähnten Definition. Keiner dieser Intraoralscanner wies eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Goldstandard auf ($\kappa = 0,81 - 1,00$). Somit konnte die dritte Hypothese abgelehnt werden.

4. *Unterschiedliche Malokklusionen (Tiefbiss, Angle Klasse III, Kreuzbiss, ausgeprägter Engstand) beeinflussen die Reliabilität (= Übereinstimmung mit dem Goldstandard) der getesteten Methoden zur Okklusionsanalyse negativ.*

Bei Okklusionspapier (12 μm und 40 μm) sowie bei allen fünf Intraoralscannern gab es kein klares Indiz für Verschlechterung der Reliabilität der Okklusionsanalyse durch bestehende Malokklusionen bzw. Dysgnathien. Bei OccluSense wurde allerdings eine deutliche Abnahme der Reliabilität in der Tiefbiss-Gruppe ermittelt. Bei Regelokklusion betrug der Cohen's-Kappa-Wert 0,35 (geringe Übereinstimmung), während der Cohen's-Kappa-Wert bei Tiefbiss bei 0,02 (schlechte Übereinstimmung) lag.

Die vierte Hypothese ließ sich damit bei OccluSense bestätigen, bei den restlichen Methoden wurde sie abgelehnt.

5. *OccluSense weist bei der digitalen Erfassung der statischen Okklusion die gleiche Sensitivität und Spezifität auf wie die klassische instrumentelle Okklusionsanalyse.*

Im Durchschnitt wies OccluSense eine Sensitivität von 69% und eine Spezifität von 55% auf. Im Gegensatz dazu lagen die Sensitivitäts- und Spezifitätswerte von Okklusionspapier (12 μm und 40 μm) bei über 95%. Im Hinblick auf diese Ergebnisse wurde die fünfte Hypothese abgelehnt.

6. *Die Erfassung der statischen Okklusion durch Occlusense weist im Vergleich zur Goldstandardmethode sehr gute Reliabilitätswerte (Cohen's Kappa = 0,81-1,00) auf.*

OccluSense zeigte durchschnittlich eine geringe Übereinstimmung ($\kappa=0,22$) mit der Goldstandardmethode zur Okklusionsanalyse auf. κ schwankte je nach vorhandener Dysgnathie stark. Somit konnte die letzte Hypothese abgelehnt werden.

Schlussfolgernd lässt sich wie in vergangenen Studien nachweisen, dass herkömmliche Artikulationsfolien statische Okklusion zuverlässiger erfassen als computergestützte Geräte wie OccluSense und Intraoralscanner. Obwohl die Ergebnisse von einzelnen Intraoralscannern in Bezug auf die Okklusionsanalyse den Ergebnissen der analogen Artikulationsfolien nahe kommen, sind sie gegenwärtig noch nicht überlegen.

5 Ausblick

Die Digitalisierung ist ein Thema derzeit nicht nur in der Politik und Forschung, sondern auch in der Medizin. Die elektronische Patientenakte, die digitale Infektionsverfolgung und die automatisierte Online-Terminvergabe sind aktuelle Beispiele, wie softwarebasierte Technologien verschiedene Aspekte des Gesundheitswesens effektiv verbessern können.

Heutzutage liegen dem Behandler viele diagnostische Daten aus Anamnese, klinischen Untersuchungen und Bildgebung vor. Die korrekte Auswertung dieser Daten, sowie die eigene Expertise bilden die Grundlage zur Diagnosestellung und der anschließenden Behandlung *lege artis*. In dieser Zeit der „Datenmedizin“ stellt künstliche Intelligenz (KI) ein Hilfsmittel dar, ein Teil dieser Daten schneller und zum gewissen Grad präziser auszuwerten.

Gegenwärtig begrenzt sich die KI-Anwendung in der Zahnmedizin hauptsächlich auf die Bildanalytik (Röntgenbilder, Fotos, 3D-Scans) (94). Dentale Applikationen wie die automatisierte Kariesdetektion auf Bissflügel-Aufnahmen und die KI-unterstützte kephalometrische Analyse von Fernröntgenseitenbildern weisen zwar zurzeit Limitationen auf, sind aber vielversprechende Innovationen. Ein Problem besteht bspw. darin, dass selten standardisierte „saubere Datensätze“ für das maschinelle Lernen vorliegen. Außerdem erschweren unterschiedliche Prävalenzen verschiedener Phänomene die Vorhersagbarkeit und Genauigkeit des KI-Modells (95). Nichtsdestotrotz besitzen Applikationen dieser Art unbegrenztes Potential. Die hochdynamische Forschung in diesem Bereich wird unweigerlich zu der Einführung weiterer KI-Produkte auf dem Markt führen.

Eine Aufgabe, die sich für viele Zahnmediziner als herausfordernd bewiesen hat, ist die Diagnose, Therapie und ggf. Vorbeugung von CMD. Es wäre interessant zu wissen, ob in der Zukunft dentale Software die Behandler dabei besser unterstützen könnte. Es wäre denkbar, dass es zukünftig durch KI-basierte Auswertung der Gesamtdaten aus Funktionsanalyse, Bildgebung, Intraoralscann, sowie aus der digitalen instrumentellen Okklusionsanalyse bestimmte Muster erkannt und Wahrscheinlichkeiten verschiedener Pathologien bestimmt werden könnten.

Momentan haben nur die Menschen die Fähigkeit, eine klinische Untersuchung durchzuführen und deren Ergebnisse zu beurteilen. Es stellt sich dennoch die Frage was die digitale Zukunft für den Praxisalltag bringt.

Schlussendlich stellen softwarebasierten Technologien eine sinnvolle, präzise und effiziente Alternative zu diversen konventionellen zahnärztlichen und zahntechnischen Abläufen. Deren Entwicklung sollte nach wie vor Objekt wissenschaftlicher Untersuchungen bleiben. Denn eins ist sicher: „Alles bewegt sich fort und nichts bleibt“ (Heraklit via Platon, „Kratylos“ 402a).

6 Literaturverzeichnis

1. Oen KT, Veitz-Keenan A, Spivakovsky S, Wong YJ, Bakarman E, Yip J. CAD/CAM versus traditional indirect methods in the fabrication of inlays, onlays, and crowns: Cochrane Database of Systematic Reviews. 2014 Apr 9;2014(4). CD011063.
2. Bidra AS, Taylor TD, Agar JR. Computer-aided technology for fabricating complete dentures: systematic review of historical background, current status, and future perspectives. *J Prosthet Dent* 2013; 109(6):361–6.
3. Ahlers MO, Biffar R, Bumann A, Freesmeyer WB, Fuchs B, Hugger L, Kordaß B, Klett R, Koeck B, Meyer G, Ottl P, Seeher WD, Schindler HJ, Türp JC. Ahlers MO, Biffar R, Bumann A, Freesmeyer WB, Fuchs B, Hugger L, Kordaß B, Klett R, Koeck B, Meyer G, Ottl P, Seeher WD, Schindler HJ, Türp JC. Wissenschaftliche Mitteilung "Terminologie der Deutschen Gesellschaft für Funktionsdiagnostik und Therapie (DGFD) und der Deutschen Gesellschaft für zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde (ehem. DGzPW)"; 2005. Available from: URL: <https://www.dgfd.de/terminologie-nomenklatur>. (Letzter Zugriff: 09.06.2022, 16:02).
4. Sessle BJ. Biological adaptation and normative values. *Int J Prosthodont* 2005; 18(4):280–2.
5. Bumann A, Lotzmann U. Farbatlanten der Zahnmedizin, Band 12: Funktionsdiagnostik und Therapieprinzipien. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag; 2000.
6. Tardieu C, Dumitrescu M, Giraudeau A, Blanc J-L, Cheynet F, Borel L. Dental occlusion and postural control in adults. *Neurosci Lett* 2009; 450(2):221–4.
7. Liu X, Zhang C, Liu Q, Zhou K, Yin N, Zhang H et al. Dental malocclusion stimulates neuromuscular circuits associated with temporomandibular disorders. *Eur J Oral Sci* 2018; 126(6):466–75.
8. Sonnesen L, Bakke M, Solow B. Malocclusion traits and symptoms and signs of temporomandibular disorders in children with severe malocclusion. *Eur J Orthod* 1998; 20(5):543–59.
9. Ciancaglini R, Gherlone EF, Redaelli S, Radaelli G. The distribution of occlusal contacts in the intercuspatal position and temporomandibular disorder. *J Oral Rehabil* 2002; 29(11):1082–90.
10. Karkazi F, Özdemir F. Temporomandibular Disorders: Fundamental Questions and Answers. *Turk J Orthod* 2020; 33(4):246–52.
11. Cuccia AM. Interrelationships between dental occlusion and plantar arch. *J Bodyw Mov Ther* 2011; 15(2):242–50.

12. Solow B, Sonnesen L. Head posture and malocclusions. *Eur J Orthod* 1998; 20(6):685–93.
13. Blood SD. The craniosacral mechanism and the temporomandibular joint. *J Am Osteopath Assoc* 1986; 86(8):512–9.
14. Freesmeyer WB. Zahnärztliche Funktionstherapie. München, Wien: Carl Hanser Verlag; 1993.
15. Ihlow D, Rudzki I. Kieferorthopädische Retention: Kriterien, Regeln und Maßnahmen der Rezidivprophylaxe. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag; 2017.
16. Militi A, Cicciù M, Sambataro S, Bocchieri S, Cervino G, Stefano R de et al. Dental occlusion and sport performance. *Minerva Stomatol* 2020; 69(2):112–8.
17. Leroux E, Leroux S, Maton F, Ravalec X, Sorel O. Influence of dental occlusion on the athletic performance of young elite rowers: a pilot study. *Clinics (Sao Paulo)* 2018; 73:e453.
18. Maurer C, Stief F, Jonas A, Kovac A, Groneberg DA, Meurer A et al. Influence of the Lower Jaw Position on the Running Pattern. *PLoS One* 2015; 10(8):e0135712.
19. Liu X, Zhou KX, Yin NN, Zhang CK, Shi MH, Zhang HY et al. Malocclusion Generates Anxiety-Like Behavior Through a Putative Lateral Habenula–Mesencephalic Trigeminal Nucleus Pathway. *Front. Mol. Neurosci.* 2019;12:174.
20. Ott R, Vollmer HP, Krug W. Funktionsstörungen des stomatognathen Systems: 13.7 Therapie von Funktionsstörungen. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2003.
21. Behr M, Fanghänel J. Kраниomandibuläre Dysfunktionen: II Diagnose. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2020.
22. Harper KA, Setchell DJ. The use of shimstock to assess occlusal contacts: a laboratory study. *Int J Prosthodont* 2002; 15(4):347–52.
23. Anderson GC, Schulte JK, Aeppli DM. Reliability of the evaluation of occlusal contacts in the intercuspatal position. *J Prosthet Dent* 1993; 70(4):320–3.
24. Sapkota B, Gupta A. Pattern of occlusal contacts in lateral excursions (canine protection or group function). *Kathmandu Univ Med J* 2014; 12(45):43–7.
25. Kerstein R. Handbook of Research on Clinical Applications of Computerized Occlusal Analysis in Dental Medicine. Hershey: IGI Global; 2020.

26. Babu R, Nayar S. Occlusion indicators: A review. *J Indian Prostodont Soc.* 2007;7(4):170-4.
27. Brizuela-Velasco A, Álvarez-Arenal Á, Ellakuria-Echevarria J, Del Río-Highsmith J, Santamaría-Arrieta G, Martín-Blanco N. Influence of Articulating Paper Thickness on Occlusal Contacts Registration: A Preliminary Report. *Int J Prosthodont* 2015; 28(4):360–2.
28. Carossa S, Lojaco A, Schierano G, Pera P. Evaluation of occlusal contacts in the dental laboratory: influence of strip thickness and operator experience. *Int J Prosthodont* 2000; 13(3):201–4.
29. Millstein P, Maya A. An evaluation of occlusal contact marking indicators. A descriptive quantitative method. *J Am Dent Assoc* 2001; 132(9):1280-6;
30. Carey JP, Craig M, Kerstein RB, Radke J. Determining a relationship between applied occlusal load and articulating paper mark area. *Open Dent J* 2007; 1:1–7.
31. Saad MN, Weiner G, Ehrenberg D, Weiner S. Effects of load and indicator type upon occlusal contact markings. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 2008; 85(1):18–22.
32. Bozhkova TP. Comparative Study of Occlusal Contact Marking Indicators. *Folia Med (Plovdiv)* 2020; 62(1):180–4.
33. Davies SJ, Gray RJM, Al-Ani MZ, Sloan P, Worthington H. Inter- and intra-operator reliability of the recording of occlusal contacts using 'occlusal sketch' acetate technique. *Br Dent J* 2002; 193(7):397–400.
34. Flügge TV, Schlager S, Nelson K, Nahles S, Metzger MC. Precision of intraoral digital dental impressions with iTero and extraoral digitization with the iTero and a model scanner. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2013; 144(3):471–8.
35. Cheng MX, Jiang T, Sun YC, Zhang HY. Influence of intraoral scan and dental cast scan on occlusal quantitative analysis of virtual dental model. *Beijing Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban* 2018; 50(1):136–40.
36. Yee SHX, Esguerra RJ, Chew AAQ, Wong KM, Tan KBC. Three-Dimensional Static Articulation Accuracy of Virtual Models - Part I: System Trueness and Precision. *J Prosthodont* 2018; 27(2):129–36.
37. Burhardt L, Livas C, Kerdijk W, van der Meer, Wicher Joerd, Ren Y. Treatment comfort, time perception, and preference for conventional and digital impression techniques: A comparative study in young patients. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2016; 150(2):261–7.

38. Yuzbasioglu E, Kurt H, Turunc R, Bilir H. Comparison of digital and conventional impression techniques: evaluation of patients' perception, treatment comfort, effectiveness and clinical outcomes. *BMC Oral Health* 2014; 14:10.
39. Abduo J, Elseyoufi M. Accuracy of Intraoral Scanners: A Systematic Review of Influencing Factors. *Eur J Prosthodont Restor Dent* 2018; 26(3):101–21.
40. Schmidt A, Klussmann L, Wöstmann B, Schlenz MA. Accuracy of Digital and Conventional Full-Arch Impressions in Patients: An Update. *J Clin Med* 2020; 9(3).
41. Nedelcu R, Olsson P, Nyström I, Rydén J, Thor A. Accuracy and precision of 3 intraoral scanners and accuracy of conventional impressions: A novel in vivo analysis method. *J Dent* 2018; 69:110–8.
42. Aragón MLC, Pontes LF, Bichara LM, Flores-Mir C, Normando D. Validity and reliability of intraoral scanners compared to conventional gypsum models measurements: a systematic review. *Eur J Orthod* 2016; 38(4):429–34.
43. Keul C, Güth J-F. Accuracy of full-arch digital impressions: an in vitro and in vivo comparison. *Clin Oral Investig* 2020; 24(2):735–45.
44. Schlenz MA, Schmidt A, Wöstmann B, Ruf S, Klaus K. In vitro comparison of analog versus digital impressions of the periodontally compromised dentition focused on interdental areas. *Int J Comput Dent* 2019; 22(2):131–8.
45. Goracci C, Franchi L, Vichi A, Ferrari M. Accuracy, reliability, and efficiency of intraoral scanners for full-arch impressions: a systematic review of the clinical evidence. *Eur J Orthod* 2016; 38(4):422–8.
46. Kordaß B, Ruge S. Lösungsansätze für einen virtuellen Artikulator. *Wissen kompakt* 2018; 13(1):21–33.
47. Kopelman A, Nissenbaum B. Verfahren zur Gewinnung einer zahnärztlichen Okklusionsbildung: Übersetzung der europäischen Patentschrift von 2004.02.19. Deutsches Aktenzeichen DE 698 17 342 T2. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/1a/66/a9/66b2e1942c20d9/DE69817342T2.pdf>. (Letzter Zugriff: 09.06.2022, 16:07)
48. Edher F, Hannam AG, Tobias DL, Wyatt CCL. The accuracy of virtual interocclusal registration during intraoral scanning. *J Prosthet Dent* 2018; 120(6):904–12.
49. Michelinakis G, Apostolakis D, Tsagarakis A, Kourakis G, Pavlakis E. A comparison of accuracy of 3 intraoral scanners: A single-blinded in vitro study. *J Prosthet Dent* 2020; 124(5):581–8.

50. Burzynski JA, Firestone AR, Beck FM, Fields HW, JR, Deguchi T. Comparison of digital intraoral scanners and alginate impressions: Time and patient satisfaction. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2018; 153(4):534–41.
51. García-Gil I, Perez de la Calle, Celia, Lopez-Suarez C, Pontevedra P, Suarez MJ. Comparative analysis of trueness between conventional and digital impression in dental-supported fixed dental prosthesis with vertical preparation. *J Clin Exp Dent* 2020; 12(9):896-901.
52. Lavorgna L, Cervino G, Fiorillo L, Di Leo G, Troiano G, Ortensi M et al. Reliability of a Virtual Prosthodontic Project Realized through a 2D and 3D Photographic Acquisition: An Experimental Study on the Accuracy of Different Digital Systems. *Int J Environ Res Public Health* 2019; 16(24):5139.
53. Lee H, Cha J, Chun YS, Kim M. Comparison of the occlusal contact area of virtual models and actual models: a comparative in vitro study on Class I and Class II malocclusion models. *BMC Oral Health* 2018; 18(1):109.
54. Patzelt SBM, Emmanouilidi A, Stampf S, Strub JR, Att W. Accuracy of full-arch scans using intraoral scanners. *Clin Oral Investig* 2014; 18(6):1687–94.
55. Muallah J, Wesemann C, Nowak R, Robben J, Mah J, Pospiech P et al. Accuracy of full-arch scans using intraoral and extraoral scanners: an in vitro study using a new method of evaluation. *Int J Comput Dent* 2017; 20(2):151–64.
56. Park JM, Jeon J, Heo SJ. Accuracy comparison of buccal bite scans by five intraoral scanners: *J Dent Rehabil Appl Sci* 2018;34(1):17-31.
57. Ayuso-Montero R, Mariano-Hernandez Y, Khoury-Ribas L, Rovira-Lastra B, Willaert E, Martinez-Gomis J. Reliability and Validity of T-scan and 3D Intraoral Scanning for Measuring the Occlusal Contact Area. *J Prosthodont* 2020; 29(1):19–25.
58. Hützen D, Rebau M, Kordass B. Clinical reproducibility of GEDAS--"Greifswald Digital Analyzing System" for displaying occlusal contact patterns. *Int J Comput Dent* 2006; 9(2):137–42.
59. Straga RW. Straga, Comparison of Occlusal Contacts on Mounted Dental Models to Contacts Identified on 3D Digital Models Comparison of Occlusal Contacts on Mounted Dental Models to Contacts Identified on 3D Digital Models Using a New Virtual Alignment Method: University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2009.
60. Solaberrieta E, Garmendia A, Brizuela A, Otegi JR, Pradies G, Szentpétery A. Intraoral Digital Impressions for Virtual Occlusal Records: Section Quantity and Dimensions. *Biomed Res Int* 2016; (1):1–7.

61. Haddadi Y, Bahrami G, Isidor F. Effect of Software Version on the Accuracy of an Intraoral Scanning Device. *Int J Prosthodont* 2018; 31(4):375–6.
62. Ender A, Zimmermann M, Mehl A. Accuracy of complete- and partial-arch impressions of actual intraoral scanning systems in vitro. *Int J Comput Dent* 2019; 22(1):11–9.
63. Bisler A, Bockholt U, Kordass B, Suchan M, Voss G. The virtual articulator. *Int J Comput Dent* 2002; 5(2-3):101–6.
64. Gesch D, Gärtner CH, Kordaß B, Hensel S. Auswirkungen der Therapie von posterioren Zwangsbissen auf das kranio-mandibuläre System - visualisiert mit Hilfe eines virtuellen Artikulators.: Jahrestagung der DGKFO, Düsseldorf (2001).
65. Maestre-Ferrín L, Romero-Millán J, Peñarrocha-Oltra D, Peñarrocha-Diago M. Virtual articulator for the analysis of dental occlusion: an update. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal* 2012; 17(1):e160-3.
66. End A. Statische und dynamische Okklusionstheorien. Untersuchung zu bestehenden Theorien, Vorkommen im natürlichen Gebiss und deren Anwendung im Artikulator.: Ludwig-Maximilians-Universität München, 2010.
67. Gärtner CH, Kordaß B. Der Virtuelle Artikulator „DentCAM“: Evaluation und Konzepte zur praktischen Realisierung. Medizinischen Fakultät der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, 2003.
68. Lepidi L, Galli M, Mastrangelo F, Venezia P, Joda T, Wang H-L et al. Virtual Articulators and Virtual Mounting Procedures: Where Do We Stand? *J Prosthodont* 2021; 30(1):24–35.
69. Quooss A, Ruge S, Kordass B. GEDAS II--new possibilities in digital contact point analysis. *Int J Comput Dent* 2011; 14(2):105–9.
70. Freesmeyer WB. Elektronische Okklusionsdiagnostik mit dem T-Scanner, Möglichkeiten und Grenzen. *Die Quintessenz*. 1991;(9)1443-54.
71. Frommann-Stoltenburg M. Experimentelle Untersuchung zur Anwendung des T-Scan-III-Systems für die Okklusionsanalyse in vivo. Charité - Universitätsmedizin Berlin, 2017.
72. Saraçoğlu A, Ozpınar B. In vivo and in vitro evaluation of occlusal indicator sensitivity. *J Prosthet Dent* 2002; 88(5):522–6.
73. Lienert GA, Raatz U. Testaufbau und Testanalyse. 6. Aufl. Weinheim: Beltz Verlag; 1998.

74. Cohen J. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*. 1960;20(1):37-46.
75. Landis JR, Koch GG. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*. 1977;33(1):159-74.
76. Klee W, Sauter-Louis C. Einführung in die klinische Epidemiologie; 2020.
77. Lechner K, Krauth M. Grundlagen der Diagnostik. Medizinische Universität Wien [cited 2022 Jan 14]. Available from: URL: http://www.meduniwien.ac.at/msi/biosim/met-med/1_Diagnostik_Grundlagen%20bearbeitet.pdf. (Letzter Zugriff: 09.06.2022, 16:11)
78. Angle EH. Classification of malocclusion. *Dental Cosmos*.; 1899;41:248-64.
79. Hansen PA, Atwood A, Shanahan M, Beatty M. The accuracy of clinician evaluation of interproximal contacts using different methods. *J Prosthet Dent* 2020; 123(2):284–9.
80. Hayashi K, Sachdeva AUC, Saitoh S, Lee S-P, Kubota T, Mizoguchi I. Assessment of the accuracy and reliability of new 3-dimensional scanning devices. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2013; 144(4):619–25.
81. Fraile C, Ferreiroa A, Solaberrieta E, Pradés G. Intraoral versus extraoral digital occlusal records: a pilot study. *Int J Comput Dent* 2018; 21(4):329–33.
82. Travassos da Rosa Moreira Bastos, Renata, Da Teixeira Silva P, Normando D. Reliability of qualitative occlusal tooth wear evaluation using an intraoral scanner: A pilot study. *PLoS One* 2021; 16(3):e0249119.
83. Tappert MV, Grabowski H, Dammaschke T. Accuracy and reproducibility of the visualisation of occlusal contact points using analogue articulating foil or digital intraoral scanners in vitro. *Int J Comput Dent* 2022; 0(0):0.
84. Heuser F, Bourauel C, Stark H, Dörsam I. Clinical investigations of the comparability of different methods used to display occlusal contact points. *Int J Comput Dent* 2020; 23(3):245–55.
85. Botsford KP, Frazier MC, Ghoneima AAM, Utreja A, Bhamidipalli SS, Stewart KT. Precision of the virtual occlusal record. *Angle Orthod* 2019; 89(5):751–7.
86. Krahenbuhl JT, Cho S-H, Ireland J, Bansal NK. Accuracy and precision of occlusal contacts of stereolithographic casts mounted by digital interocclusal registrations. *J Prosthet Dent* 2016; 116(2):231–6.
87. DeLong R, Ko C-C, Anderson GC, Hodges JS, Douglas WH. Comparing maximum intercuspatal contacts of virtual dental patients and mounted dental casts. *J Prosthet Dent* 2002; 88(6):622–30.

88. Buduru S, Finta E, Almasan O, Fluerasu M, Manziuc M, Iacob S et al. Clinical occlusion analysis versus semi-adjustable articulator and virtual articulator occlusion analysis. *Med Pharm Rep* 2020; 93(3):292–6.
89. Solaberrieta E, Otegi JR, Goicoechea N, Brizuela A, Pradies G. Comparison of a conventional and virtual occlusal record. *J Prosthet Dent* 2015; 114(1):92–7.
90. Floriani F, Sabatini GP, Oliveira Dos Santos, Tarla Thaynara, Philippi AG, Gonzaga LH, Mezzomo LA. Digital and Analog Analysis of Occlusion in Conventional and Implant-Retained Complete Dentures: Preliminary Results of a Prospective Clinical Trial. *Int J Prosthodont* 2022; 35(1):27–36.
91. Wong KY, Esguerra RJ, Chia VAP, Tan YH, Tan KBC. Three-Dimensional Accuracy of Digital Static Interocclusal Registration by Three Intraoral Scanner Systems. *J Prosthodont* 2018; 27(2):120–8.
92. Fraile C, Ferreiroa A, Romeo M, Alonso R, Pradies G. Clinical study comparing the accuracy of interocclusal records, digitally obtained by three different devices. *Clin Oral Investig* 2022; 26(2):1957–62.
93. Afrashtehfar KI, Qadeer S. Computerized occlusal analysis as an alternative occlusal indicator. *Cranio* 2016; 34(1):52–7.
94. Schwendicke F, Krois J. So bringt KI eine Zweitmeinung in die Praxis. *Zahnärztliche Mitteilungen* 2022, (7):78-9.
95. Schwendicke F, Krois J. So unterstützt KI die zahnärztliche Diagnostik. *Zahnärztliche Mitteilungen* 2022, (8):50-1.

7 Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Plamena Schütze, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: **„Reliabilität der digitalen Okklusionsanalyse von OccluSense und verschiedenen Intraoralscannern im Vergleich zu klassischer instrumenteller Okklusionsanalyse“** beziehungsweise **„Reliability of the digital occlusal analysis by OccluSense and different 3D intraoral scanners in comparison to the classic instrumental occlusal analysis“** selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren/innen beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) werden von mir verantwortet.

Ich versichere ferner, dass ich die in Zusammenarbeit mit anderen Personen generierten Daten, Datenauswertungen und Schlussfolgerungen korrekt gekennzeichnet und meinen eigenen Beitrag sowie die Beiträge anderer Personen korrekt kenntlich gemacht habe (siehe Anteilserklärung). Texte oder Textteile, die gemeinsam mit anderen erstellt oder verwendet wurden, habe ich korrekt kenntlich gemacht.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Erstbetreuer/in, angegeben sind. Für sämtliche im Rahmen der Dissertation entstandenen Publikationen wurden die Richtlinien des ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors; www.icmje.org) zur Autorenschaft eingehalten. Ich erkläre ferner, dass ich mich zur Einhaltung der Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis verpflichte.

Weiterhin versichere ich, dass ich diese Dissertation weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits an einer anderen Fakultät eingereicht habe.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§§156, 161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

8 Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

9 Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt Prof. Dr. Axel Bumann, Leiter des Instituts für 3D Dental-Radiologie – MESANTIS Berlin, und seinem Team für die Ermöglichung der Promotion.

Ich danke Vincent Faure, Tobias Bauer, Sebastian Sohst, Carolina Schlotte und Meltem Inanmisik für die Bereitstellung der einzelnen Geräte.

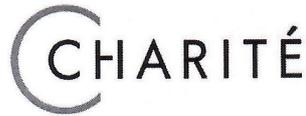
Christoph Burmeister danke ich für seine kontinuierliche Unterstützung bei technischen Problemen jeder Art bei der Durchführung der Untersuchungen.

Ich bedanke mich bei meinen Freunden, die mir hilfreiche Denkanstöße und Ratschläge bei der Umsetzung dieser Studie gegeben haben.

Danke lieber Ehemann, dass du jederzeit mit Rat und Tat zu meiner Seite standest und mich stetig ermutigt hast. Ohne dein tagelanges Korrekturlesen würde dieser Text bestimmt an einigen Stellen skurril klingen. Meinem Sohn danke ich ebenfalls, dass er meine wahre Motivation war, diese Dissertation zu Ende zu bringen, auch wenn er leider viel Zeit in meiner Abwesenheit verbringen musste.

Mein besonderer Dank geht an meiner Mutter für die wochenlange aufopfernde Betreuung meines Sohnes. Ohne ihre Hilfe und liebevolle Unterstützung wäre diese Doktorarbeit nicht zustande gekommen.

10 Bescheinigung Statistik



CharitéCentrum für Human- und Gesundheitswissenschaften

Charité | Campus Charité Mitte | 10117 Berlin

Institut für Biometrie und Klinische Epidemiologie (iBike)

Direktor: Prof. Dr. Geraldine Rauch

Name, Vorname: Schütze, Plamena
Emailadresse: plamena.schütze@charite.de
Matrikelnummer: 218050
PromotionsbetreuerIn: Prof. Dr. Axel Bumann
Promotionsinstitution/ Klinik: Mesantis Berlin

Postanschrift:
 Charitéplatz 1 | 10117 Berlin
Besucheranschrift:
 Reinhardtstr. 58 | 10117 Berlin

Tel. +49 (0)30 450 562171
 geraldine.rauch@charite.de
 https://biometrie.charite.de/

**Bescheinigung**

Hiermit bescheinige ich, dass Frau Plamena Schütze innerhalb der Service Unit Biometrie des Instituts für Biometrie und Klinische Epidemiologie (iBike) bei mir eine statistische Beratung zu einem Promotionsvorhaben wahrgenommen hat. Folgende Beratungstermine wurden wahrgenommen:

- Termin 1: 10.04.2020
- Termin 2: 08.06.2020
- Termin 4: 31.01.2022

Folgende wesentliche Ratschläge hinsichtlich einer sinnvollen Auswertung und Interpretation der Daten wurden während der Beratung erteilt:

- Nach erfolgter Fallzahlplanung anhand des Parameters Cohen's Kappa wurden 20 Modelle von Gebissen verwendet, die jeweils 28 Zähne und dadurch für die Fragestellung relevante 14 Zahnpaare haben. Hierbei können Messungen von unterschiedlichen Zahnpaaren der Modelle als unabhängig angenommen werden, allerdings nicht wiederholte Messungen am gleichen Zahnpaar.
- Die Schätzung der Reliabilität anhand von Cohen's Kappa, aber auch der Sensitivität und Spezifität erfolgt im Vergleich zum Referenzstandard der Shimstock-Methode. Ursprünglich sollten 4 Messmethoden mit der Referenz verglichen werden, final wurden insgesamt 8 evaluiert.
- Zentral ist die Deskription der Daten, separat für die 8 evaluierten Methoden – hinsichtlich Reliabilität, Sensitivität und Spezifität. Diese Schätzungen können darüber hinaus noch stratifiziert für die Art der verwendeten Gebiss-Modelle erfolgen.

Diese Bescheinigung garantiert weder die richtige Umsetzung der in der Beratung gemachten Vorschläge, die korrekte Durchführung der empfohlenen statistischen Verfahren noch die richtige Darstellung und Interpretation der Ergebnisse. Die Verantwortung hierfür obliegt allein dem Promovierenden. Das Institut für Biometrie und Klinische Epidemiologie übernimmt hierfür keine Haftung.

Datum: 1.2.2022

Name des Beraters/ der Beraterin: Annette Aigner, PhD

Annette Aigner

Digital unterschrieben von Annette
 Aigner
 Datum: 2022.02.01 10:53:23 +01'00'

Unterschrift BeraterIn, Institutsstempel

