Aus der Fakultät für Gesundheit – Department für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde – an der Universität Witten/Herdecke

Inaugural - Dissertation

Zahnbürstenentwicklungen im vergleichenden Robotertest mit quasi-klinischer Auswertung

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

vorgelegt der Fakultät für Gesundheit – Department für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde – an der Universität Witten/Herdecke

von

Stefan Egermann

aus Lüdinghausen

2016

Dekan: Prof. Dr. Stefan Wirth

Mentor: Prof. Dr. Dr. h.c. Peter Gängler

Gutachter: 1. Prof. Dr. Dr. h.c. Peter Gängler

2. Priv.-Doz. Dr. med. dent. habil. A. Rainer Jordan

Datum der Disputation: 27.04.2016

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG 4

2. ZIELSETZUNG 5

3. ZAHN-PLAQUE ALS BIOFILM 8

3.1 PLAQUE-ENTSTEHUNG UND KLINISCHE BEDEUTUNG 8
3.2 PLAQUE-REVELATOREN 12
3.3 PLAQUE-INDIZES 14
3.3.1 PLAQUE-INDEX NACH SILNESS UND LÖE (PI) 15
3.3.2 MODIFIZIERTER PLAQUE-INDEX NACH QUIGLEY UND HEIN (QHI) 16
3.3.3 NAVY-PLAQUE-INDEX 17
3.4 PUTZTECHNIKEN 20

4. MATERIAL UND METHODEN 22

4.1 MATERIALÜBERSICHT 22
4.2 MATERIALBESCHREIBUNG 23
4.3 METHODIK UND DURCHFÜHRUNG 28
4.3.1 VORBEREITUNG, PUTZVORGANG UND FOTODOKUMENTATION 28
4.3.2 ANALYSE DER GEPUTZTEN FLÄCHEN DURCH DIE AUTOMATISIERTE PLAQUE-PLANIMETRIE 34
4.3.3 KALIBRIERUNG DER QUASI-KLINISCHEN AUSWERTER 36
4.3.4 QUASI-KLINISCHE AUSWERTUNG DER FOTODOKUMENTIERTEN BILDER 38
4.4 STATISTISCHE AUSWERTUNG 40
4.4.1 VERSUCHSANORDNUNG 40
4.4.2 VERWENDETE VERFAHREN 41

5. ERGEBNISSE 43

5.1 TESTBÜRSTE 2 – INTERDENTALBÜRSTE (IBF/06/13/FÜNF DURCHLÄUFE) 46
5.1.1 GESAMTE ZAHNFELDER 46
5.1.2 DISTALE ZAHNFELDER 47
5.1.3 MESIALE ZAHNFELDER 49
5.1.4 STARK UNTERSCHIEDLICH BEWERTETE ZAHNFELDER 51
5.2 TESTBÜRSTE 7 – ELEKTRISCHE ZAHNBÜRSTE (EZB/05/13/SIEBEN DURCHLÄUFE) 52
5.2.1 GESAMTE ZAHNFELDER 52
5.2.2 BUKKALE ZAHNFELDER 53
5.2.3 LINGUALE ZAHNFELDER 55
5.2.4 STARK UNTERSCHIEDLICH BEWERTETE ZAHNFELDER 56
5.3 TESTBÜRSTE 10 – HANDZAHNBÜRSTE (MZB/04/13/VIER DURCHLÄUFE) 57
5.3.1 GESAMTE ZAHNFELDER 57
5.3.2 BUKKALE ZAHNFELDER 59
5.3.3 LINGUALE ZAHNFELDER 61
5.3.4 BUKKALE RISIKOZAHNFELDER A, B, C, D, F 62
5.3.5 LINGUALE RISIKOZAHNFELDER A, B, C, D, F 64
5.3.6 STARK UNTERSCHIEDLICH BEWERTETE ZAHNFELDER 65

6. DISKUSSION 66

6.1 MATERIAL 67
6.2 METHODIK 68
6.2.1 VORBEREITUNG, DURCHFÜHRUNG DES PUTZVORGANGS UND FOTODOKUMENTATION 68
6.2.2 AUTOMATISIERTE PLAQUE-PLANIMETRIE 68
6.2.3 QUASI-KLINISCHE AUSWERTUNG DER PRÜFPERSONEN 69
6.4 ERGEBNISSE DER STATISTISCHEN AUSWERTUNG 70
6.5 AUSBLICK 72

7. ZUSAMMENFASSUNG 73

8. SUMMARY 75

10. LITERATURVERZEICHNIS 77

ANHANG I

A1 – TESTBÜRSTE 1 – INTERDENTALBÜRSTE (IBF/06/13/FÜNF DURCHLÄUFE) I
A2 – TESTBÜRSTE 3 – INTERDENTALBÜRSTE (IBF/06/13/FÜNF DURCHLÄUFE) V
A3 – TESTBÜRSTE 4 – KINDERHANDZAHNBÜRSTE (KZB/04/13/VIER DURCHLÄUFE) VIII
A4 – TESTBÜRSTE 5 – KINDERHANDZAHNBÜRSTE (KZB/04/13/VIER DURCHLÄUFE) XIII
A5 – TESTBÜRSTE 6 – ELEKTRISCHE ZAHNBÜRSTEN (EZB/05/13/SIEBEN DURCHLÄUFE) XVIII
A6 – TESTBÜRSTE 8 – HANDZAHNBÜRSTE (MZB/04/13/VIER DURCHLÄUFE) XXI
A7 – TESTBÜRSTE 9 – HANDZAHNBÜRSTE (MZB/04/13/VIER DURCHLÄUFE) XXVIII
A8 – TESTBÜRSTE 10 – HANDZAHNBÜRSTE (MZB/04/13/VIER DURCHLÄUFE) XXXIV
A9 – LEBENSLAUF XXXVII
A10 – EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG: XXXVIII

1. Einleitung

Die Prävention kariöser Läsionen ist eine fundamentale Säule der Zahnmedizin. Dazu gehören nicht nur die regelmäßige Vorstellung des Patienten beim Zahnarzt und die dortige Kontrolle der Zähne, sondern auch die umfassende professionelle Aufklärung über Mundhygiene und mundhygieneverbessernde Maßnahmen, die der Patient eigenständig lernen, annehmen und aufrechterhalten kann (Zimmer 2000). Hierbei spricht man von der Compliance, dem „Befolgen“ bzw. der „Kooperation“ des Patienten. Zur Bestimmung der Mundhygiene werden verschiedene visuelle Plaque- und Blutungs-Indizes verwendet, die häufig modifiziert und ständig weiterentwickelt werden. Diese ermöglichen dem Therapeuten eine genaue Einschätzung des Gingivitisrisikos und so ein gezieltes Vorgehen bei dem Erhalt der Zahn- und Mundgesundheit. Als ein wichtiges Mittel zur Kariesprävention dient dem Patienten eine elektrische oder normale Handzahnbürste für die manuelle Entfernung der Plaque (Lang et al. 1973). Neben dem regelmäßigen Gebrauch der Zahnbürste kommt es besonders auf die individuell angewendete Putztechnik an, die dem Patienten gezeigt wurde. Das Design der Borsten und des Zahnbürstengriffs, das durch die Industrie immer wieder neu entwickelt wird, hat ohne die richtig durchgeführte Technik eher eine untergeordnete, aber nicht zu vernachlässigende Rolle (Rateitschak et al. 1989).

Durch Simulierung der menschlichen Plaque, von Zahnputztechniken und mithilfe der Anwendung klinischer Plaque-Indizes kann die Industrie die Putzeffektivität von Zahnbürsten erproben, bevor diese in den Handel gebracht werden. Komplexe Programmierungen von Bewegungsabläufen auf einen Roboterarm und hochauflösende Scanvorgänge der Oberflächen geputzter Zähne können dazu dienen, genaue Auswertungen über die Effektivität der getesteten Zahnbürsten zu erhalten. Diese Anforderungen sollen durch den Einsatz von Automatisierter Plaque-Planimetrie (APP) erfüllt werden, die unter ständiger Begutachtung – auch hinsichtlich klinischer Bewertungsmethoden – optimiert wird. Die APP ist eine computergesteuerte Einheit mit einer Analysesoftware, bestehend aus einem Bildverarbeitungssystem und einer Auswertungseinheit.

Da für die Hersteller von Zahnbürsten klinisch simulierte Voraussetzungen geschaffen werden, stellt sich die Frage, wie vergleichbar die automatisierte Bewertung mit der klinischen Auswertung ist.

2. Zielsetzung

Das Ziel dieser Studie ist der Vergleich zwischen zwei klinischen Prüfpersonen und der APP, die standardisiert und möglichst objektiv mithilfe des modifizierten Navy-Plaque-Index nach *Lang et al.* (2011) bzw. klinischer Plaque-Planimetrie und des modifizierten Quigley-Hein-Index (QHI) nach *Turesky et al.* (1972) die mechanische Reinigungsleistung von Zahnpflegeprodukten bewerten. Zu diesem Zweck werden Zahnflächen mit künstlicher Plaque bedeckt und anschließend durch einen Roboter geputzt. Die Ergebnisse der drei Auswertungen und ihre jeweiligen Übereinstimmungen sollen dahingehend interpretiert werden, dass ein Ausblick auf Verbesserungenvorschläge zu technisch generierten aber quasi-klinisch erfassten Auswertungsmethoden, in diesem Fall die Automatisierte Plaque-Planimetrie, gegeben werden kann. Von wesentlicher Bedeutung ist zudem die Beurteilung der angewandten Indizes in Bezug auf die APP. Bisher hat noch keine Anwendung des QHI in einer ähnlichen Studie stattgefunden.

Die bisherige Entwicklung und Begutachtung der Auswertungsmethodik der APP lässt sich anhand einer Validierungskette beschreiben.
Zunächst wurden eine Programmierung und Validierung des Putzroboters und der Plaque-Planimetrie über klinische Studien (Clinical Controlled Trials) von *Bretz* (2010), *Staufer* (2011) und später von *Fleuter* (2015) durchgeführt. Die Grundlage dazu schufen *Claydon und Addy* (1995) durch die Modifizierung des Navy-Plaque-Index mit dem planimetrischen Verfahren mithilfe der Fotodokumentation.
Die Studien von *Staufer* (2011), der u. a. eine genaue Beschreibung von Robotermodellen lieferte, und *Bretz* (2010), der die Vorteile einer weiteren Differenzierung des Navy-Plaque-Index aufzeigen konnte, sind die Basis für den quasi-klinischen Vergleich dieser Studie.
Die hier durchgeführte Kontrollstudie, die sich in einen quasi-klinischen Zweig mit den beiden Prüfpersonen und einen computergestützten Zweig mit der APP aufteilt, legt ihren Schwerpunkt im Gegensatz zu den zuvor durchgeführten Studien ausschließlich auf die Validierung der APP anhand klinisch relevanter Indizes und somit auf die letzten beiden Abschnitte der Validierungskette (s. Abbildung 1) ähnlich der Studie von *Arnoldi* (2015). *Arnoldi* befasste sich unter anderem mit der Entwicklung eines quasi-klinischen Navy-Plaque-Index für Kinder mithilfe einer Intraoralkamera.

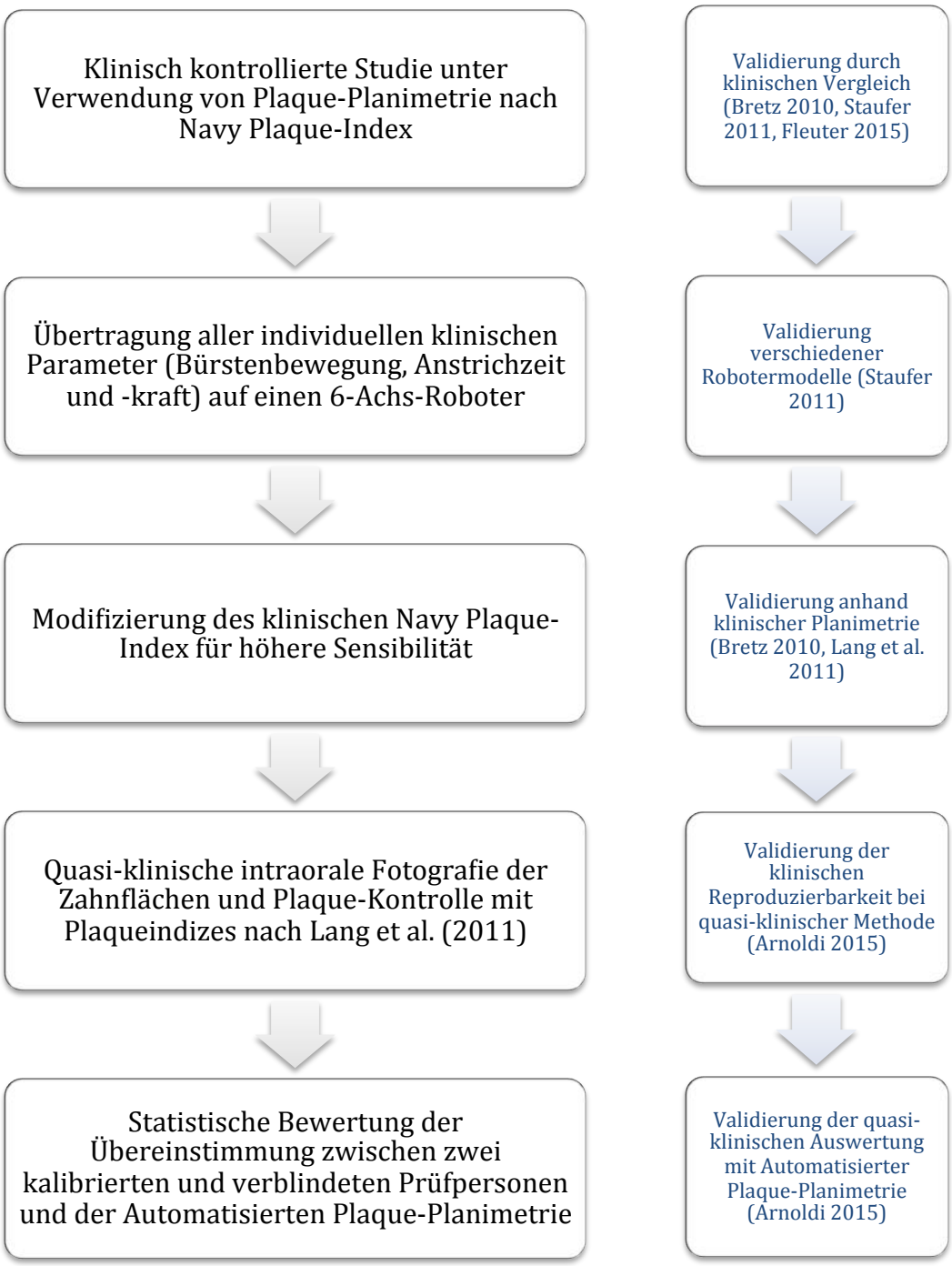

Abbildung 1: Validierungskette und Entwicklung der Auswertungsmethodik der Automatisierten Plaque-Planimetrie

Insgesamt sollen zehn verschiedene Testbürsten in drei Reihenvarianten, entweder als Pilottest mit drei Durchläufen, als explorativer Test mit fünf Durchläufen oder als statistisch vollständiger Test mit sieben Durchläufen, bewertet werden. Von Interesse sind hierbei auftretende Abweichungen, die sich auf bestimmte Zahnflächen bzw. -felder und die Anzahl der Durchläufe sowie der bewerteten Flächen beziehen.

Nach einheitlicher Kalibrierung der klinischen Prüfpersonen können diese mit den ausgewerteten Daten der APP auf eine Übereinstimmung getestet werden. Somit können die APP sowie die Prüfpersonen hinsichtlich ihrer Stärken und Schwächen miteinander verglichen, mögliche Unterschiede diskutiert und Ansatzpunkte für Verbesserungsvorschläge in Aussicht gestellt werden. Dazu zählen vor allem Grenzen bei der visuellen Auswertung mit klinischen Indizes oder der computerassistierten optischen Plaque-Planimetrie.

3. Zahn-Plaque als Biofilm

3.1 Plaque-Entstehung und klinische Bedeutung

Die besondere anatomische Beschaffenheit der Mundhöhle, in der die Zähne als mineralisierte Komponenten kontinuierlich dem Mundhöhlenmilieu ausgesetzt sind, bietet Mikroorganismen eine permanente Oberfläche zur Kolonisation. Der Vorteil für die Mikroorganismen besteht darin, dass sich die Zahnoberfläche im Gegensatz zum Weichgewebe nicht regelmäßig erneuern und abschilfern kann (Gängler 2010).

Eine genaue Definition der Zahn-Plaque nach *Riethe* aus dem Jahre 1980, auf die aktuell immer noch zurückgegriffen wird, besagt, dass die Plaque ein fest haftender, histologisch strukturierter Belag von lebenden und toten Mikroorganismen in einer polysaccharid-glycoproteinreichen Matrix ist, welche das Produkt mikrobieller Stoffwechselaktivität und Vermehrung darstellt (Hellwig 2003). Im Jahre 1971 beschrieb *König* vier notwendige Faktoren, die zur Entstehung einer Karies führen: Dazu zählen der *Wirt*, die *Mikroorganismen*, das *Substrat* (in der Regel Kohlenhydrate (Zucker) als Energielieferant) und die *Zeit*. Nur wenn alle diese Faktoren zusammentreffen, ist die Grundlage einer Kariesentstehung gegeben (König 1971).

Die Besiedelung einer glatten Oberfläche, wie sie auf Zähnen vorzufinden ist, benötigt allerdings bestimmte Parameter für ein späteres Anheften der Plaque. Die Oberfläche der Zahnhartsubstanz bildet eine elektrische Ladung im Speichel aus und lässt nur bestimmte Mikroorganismen zur initialen Kolonisierung zu. Aus diesem Grund gibt es unterschiedliche Phasen der Plaque-Entstehung (König 1987).
Abzugrenzen ist zunächst die nach mechanischer Reinigung der Zahnoberfläche entstehende Pellikel. Diese entsteht durch Speichelglykoproteine und Antikörper, die sich an der Zahnoberfläche zu einer monomolekularen Schicht anlagern. Die Eigenladung der Pellikel ermöglicht eine elektrostatische Bindung an die Calcium- und Phosphatgruppen des Apatits der Zahnhartsubstanz. Dadurch wird Bakterien, in erster Linie Streptokokken, ermöglicht, sich durch Adhäsion innerhalb von Stunden als Pionierkolonisationen anzulagern (Ellen 1997). Diese Erstbesiedelung ist der Grundstein für die weitere Anlagerung von Bakterien und den Aufbau einer extrazellulären Matrix aus Polysacchariden. Gramnegative Kokken und Stäbchen finden anschließend gute Anheftungsmöglichkeiten; dies führt zu einem raschen

Anwachsen der mikrobiellen Plaque. Eine erhöhte Schichtstärke erschwert die Diffusion und damit verbunden den Transport von Sauerstoff innerhalb der Plaque. Es kommt zu anaeroben Bedingungen, was ein noch komplexeres Ökosystem herbeiführt (Gängler 2010).

Besonders durch den Stoffwechsel anaerober Bakterien im Biofilm erhöht sich die Milchsäureproduktion, die wiederum den pH-Wert senkt und das Gleichgewicht von De- und Remineralisation in Richtung der Demineralisation verlagert. Infolge einer erhöhten Demineralisation wird die initiale Entstehung einer Läsion der Zahnhartsubstanz begünstigt (Gehring 1984). Die Wechselwirkungen zwischen De- und Remineralisation wurden von *Gängler* 1985 mit dem Konzept der Progression und Stagnation in der Kariesentstehung beschrieben (Jordan und Markovic 2007). Die Demineralisation des Zahnschmelzes beginnt bereits bei einem pH-Wert zwischen 5,5 und 5,0. Schon ein pH-Wert von 6,3 reicht aus, um die Zahnwurzel zu demineralisieren und bei anhaltendem Ungleichgewicht dauerhaft zu schädigen (Gängler et al. 2010).
Durch eine Keimbesiedelung in den demineralisierten Schmelzdefekten wird schließlich eine initiale kariöse Läsion des Zahnes herbeigeführt. So entsteht ein chronisch destruktiver Prozess, der zunächst das Endodont und später das apikale Parodont erreicht und über jeweilige komplexe Entzündungsreaktionen des Körpers unbehandelt zum Zahnverlust führen kann (Axelsson et al. 1991, Axelsson et al. 2004).
Je nach Lokalisation und Form der Karies können verschiedene Beteiligungen von Mikroorganismen beobachtet werden. Im Jahre 2000 veröffentlichte *Zimmer* diesbezüglich eine Übersicht über die mit Karies assoziierten Bakterien (s. Tabelle 1). Auffällig erscheinen die hohe Relevanz der Streptokokken-Bakterien bei der initialen kariösen Läsion im Schmelzbereich, die stärker werdende Bedeutung der Laktobazillen bei der Dentinkaries und der hohe kariesätiologische Einfluss der Aktinomyzeten bei der Wurzelkaries. Demnach stellen die Plaque und ihre Mikroorganismen einen grundlegenden Faktor bei der Entstehung einer kariösen Läsion dar. Die Relevanz von Mikroorganismen für die Plaque-Entstehung ließ sich schon in den Sechzigerjahren in einem Experiment mit keimfrei aufgezogenen Ratten nachweisen. Dabei erhielten diese eine gezielte kariogene Diät, entwickelten aber keine Karies (Orland 1954). *Tanzer* zeigte 1989, dass nicht jede Plaque immer eine Karies verursachen kann oder muss. Kariesinitiation und -progression können maßgeblich durch individuelles Verhalten und individuelle Faktoren beeinflusst werden (Rupf et al. 2014).

Tabelle 1: Mit Kariesformen assoziierte Mikroorganismen nach Zimmer (2000)

Kariesform	Isolierte Mikroorganismen	Kariesätiologische Bedeutung
Fissuren- und Grübchenkaries	*Streptococcus mutans*	hoch
	Streptococcus sanguis	gering
	Streptococcus mitis	keine
	Lactobacillus sp.	hoch
	Actinomyces sp.	möglich
Glattflächenkaries	*Streptococcus mutans*	hoch
	Streptococcus salivarius	niedrig
Dentinkaries	*Lactobacillus sp.*	hoch
	Actinomyces viscosus	bedeutend
	Actinomyces naeslundi	hoch
	Streptococcus mutans	möglich
	Stäbchenbakterien	bedeutend
Wurzelkaries	*Actinomyces viscosus*	hoch
	Actinomyces naeslundi	hoch
	Streptococcus mutans	gewisse
	Streptococcus sanguis	unklar
	Streptococcus salivarius	unklar
	Stäbchenbakterien	hoch

Das aktuelle Wissen über die Mikroorganismen, die im oralen Biofilm des Menschen vorkommen, wird in der Human Oral Microbiome Database (HOMD) stets auf dem neusten Stand gehalten. Darin werden über 700 Organismen mit unterschiedlicher DNA-Sequenz beschrieben, von denen jedoch bisher maximal 100 in einem einzelnen Individuum vorgekommen sind (Dewhirst et al. 2008, Dewhirst et al. 2010).

Vor dem Hintergrund der unmöglichen Zuordnung einer generellen Pathogenität der Plaque veröffentlichte *McLean* im Juli 2014 einen Artikel, welcher sich mit der Bedeutung der strukturellen Zusammensetzung und Komplexität der dentalen Plaque beschäftigt und die Aussagekraft früherer Ansichten und Studien zur Plaque infrage stellt. Darin kritisiert er Methoden der Erforschung plaquebezogener oraler Mikroorganismen, besonders diejenigen, die in vitro in Reinkulturen oder labortechnisch erzeugten Kulturen durchgeführt wurden – also gar nicht dem Mundhöhlenmilieu ausgesetzt waren. Damit werden seiner Meinung nach die daraus resultierenden Ergebnisse der Realität des Mundhöhlenmilieus und den entsprechenden Parametern nicht gerecht und führen zu fehlerhaften Deutungen der komplex zusammengesetzten Plaque. Ein Beispiel, auf das *McLean* sich beruft, ist die mittlerweile veraltete Ansicht, nur Lactat (Milchsäure) führe zu einer Demineralisation des Zahnschmelzes, da inzwischen in vielen Studien die schädliche Wirkung anderer Stoffwechselendprodukte von Mikroorganismen, wie z. B. Acetat, Ethanol und Formiat, nachgewiesen werden konnte. In seinem Artikel wird u. a. die relativ neue Methodik des „stable-isotype probing“ (SIP) beschrieben. Im Vergleich zu früheren DNA- und RNA-Analysen, die den aktiven Stoffwechsel von Bakterien bestimmen konnten, werden mit dem SIP zusätzlich die Kohlenstoffflüsse in mikrobiellen Gemeinschaften analysiert. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Nahrungsketten innerhalb dieser mikrobiellen Zusammenschlüsse zu erörtern und so wichtige Informationen über das Zusammenspiel der einzelnen Gruppen zu erhalten. Vor diesem Hintergrund sollen sich nach *McLean* zukünftige Studien mit der Vielfältigkeit von Mikroorganismen und den damit zusammenhängenden metabolischen Eigenschaften befassen. Könnte man die Lebensgemeinschaft der dentalen Plaque genauer verstehen und zwischen gesunden und krank machenden Keimen unterscheiden, wären ein gezielteres Eingreifen in die Pathogenese und die Behandlung einer Karies deutlich einfacher (McLean 2014).

Die Ansicht einer holistischen Lebensgemeinschaft zwischen Mikroorganismen und körpereigenen Zellen der Mundhöhle wurde in einem Review von *Takahashi* (2015) herausgearbeitet und unterstützt die zuvor beschriebene Auffassung einer größeren Komplexität der mikrobiellen Zusammenhänge der Mundhöhle von *McLean*. *Takahashi* beschreibt vor allem die Möglichkeit eines Paradigmenwechsels von einer Wirt-Parasit-Beziehung zu einem Supraorganismus.

3.2 Plaque-Revelatoren

Da die dentale Plaque auf den ersten Blick nicht immer leicht zu erkennen ist, gibt es sog. Revelatoren (lat. revelare = enthüllen), die ein Anfärben der Plaque ermöglichen, so dass diese sowohl für die Patienten als auch für den Zahnarzt sichtbar wird. Zudem können viele Plaque-Indizes erst nach dem Anfärben der Plaque verwendet werden. Dabei kann anhand von verschiedenen Farbnuancen nicht nur das Ausmaß der Plaque, sondern auch ihr Alter bestimmt werden. Neben der Tablettenform, die sich für den häuslichen Gebrauch vor allem bei Kindern anbietet, gibt es Plaque-Revelatoren auch als Farblösungen, die mit einem Pinsel oder einem Pellet z. B. vom Zahnarzt oder der Prophylaxeassistentin aufgetragen werden. Der häusliche Gebrauch ist besonders bei zu verbessernder Mundhygiene sinnvoll und stellt ein gutes Kontrollverfahren für den Patienten selbst nach dem Zähneputzen dar.

Frühere Färbemittel wie Fuchsin und Kristallviolett, die der Gruppe der Triphenylmethanderivate angehören, werden heutzutage aufgrund ihrer toxischen Eigenschaften und einer denkbaren Kanzerogenität, bedingt durch die mögliche Bindung mit DNS (Desoxyribonukleinsäure), nicht mehr verwendet. In Tierversuchen wurde die letale Dosis von Fuchsin und Erythrosin verglichen. Dabei zeigte sich eine deutlich bessere Verträglichkeit von Erythrosin (Schäfer 2002), das den dentalen Biofilm rot angefärbt. Von der US-amerikanischen Food and Drug Administration (FDA) wurde Erythrosin für die USA zugelassen und findet nun tagtäglich Anwendung in Medikamenten, Kosmetika und Nahrungsmitteln. Dies spiegelt die Unbedenklichkeit des Färbemittels wieder; es könnte sogar ohne Nebenwirkungen geschluckt werden. Ein Nachteil besteht jedoch in seinem Inhaltsstoff Jod, der Unverträglichkeiten auslösen kann.

Eine vorteilhafte Alternative bieten Färbemittel, die die Plaque je nach ihrem Alter unterschiedlich hervorheben. Dazu zählen Lebensmittelfarbstoffe wie z. B. Phloxin B und E-133, besser bekannt als Mira2-Tone-Lösung, oder Oral B2-Farb-Plaque-Indikator-Tabletten. Reife Plaque stellt sich bläulich dar und junge Plaque, die kaum älter als 24 Stunden ist, erscheint rötlich (Hellwege 2003).

Die Anwendung von Plaque-Revelatoren zur Erhebung der Plaque-Indizes spielte in vielen klinischen Studien eine wichtige Rolle. So applizierten *van der Weijden et al.* (2004), *Dörfer et al.* (2001) und *Danser et al.* (1998a, 1998b) die Mira-2-Tone-Lösung. Erythrosin wurde von *Schafer et al.* (2003), *Chava* (2000) und *Sharma et al.* (1998) genutzt. Basisches Fuchsin fand in den Studien von *Niemi et al.* (1984) und *Sharma et al.* (2002) Anwendung.

Aus kosmetischen Gründen können auch fluoreszierende Farbstoffe wie Natrium-Fluorescein genutzt werden (Roulet 2003). Nachteile sind dabei allerdings die Notwendigkeit einer entsprechenden Lichtquelle und eine erschwerte Darstellung der Putzdefizite dem Patienten gegenüber. Nach *Eberhart* (2007) ist ein Trend zur Plaque-Erkennung mithilfe von optischen und computergestützten Auswertungsmethoden auszumachen. Zur Detektion der Plaque wird ein Fluoreszenzkamerasystem verwendet, das das Farbspektrum z. B. anhand des Porphyrinstoffwechsels in der Plaque darstellt.

Zu demonstrativen Zwecken, um z. B. besonders bei Kindern und jungen Erwachsenen die Plaque sichtbar zu machen, bieten sich Färbemittel, die die Plaque je nach Alter darstellen können, an. Die selbstständige Plaque-Kontrolle beim Zähneputzen fällt mit solchen Färbemitteln deutlich leichter, da die Kinder die mit Plaque belegten Bereiche direkt sehen und somit auch ihre Risikozonen aktiver wahrnehmen können. Bisher haben sich die für den häuslichen Gebrauch zulässigen unschädlichen Färbemittel weit verbreitet. In vielen Studien, die sich mit prophylaktischen Maßnahmen an Schulen und Kindergärten beschäftigen, finden sie effektiv Anwendung (Rupf et al. 2014).

3.3 Plaque-Indizes

Die Ausdehnung der Zahn-Plaque kann durch verschiedene Indizes beschrieben werden. Nach *Weber* (2010) ist ein Index „ein numerischer Wert, der das Vorkommen und das Verhältnis definierter diagnostischer Kriterien in einer Population oder an einem Individuum beschreibt“. Indizes sollen quantitative und qualitative Aussagen über bestimmte untersuchte Kriterien ermöglichen und dabei einfach, reproduzierbar, effizient und genau sein. Diese Eigenschaften helfen geschulten und ungeschulten Zahnärzten sowie zahnärztlichem Fachpersonal dabei, ein Indexsystem sowohl in der Forschung als auch in der zahnärztlichen Praxis anzuwenden (Fischman 1986, Hellwig et al. 2003). Indizes sollten generell an allen Zähnen eines Gebisses erhoben werden. Der Arbeitsaufwand kann dabei durch die sog. Ramfjord-Zähne (Zähne 16, 21, 24, 36, 41 und 44) erleichtert werden. Diese gelten als Zähne, die repräsentativ für das gesamte Gebiss genutzt werden können (Rams et al. 1993).

In der Zahnmedizin können Indizes zu demonstrativen Zwecken dem Patienten gegenüber oder als Indikator für Problemzonen für den Zahnarzt verwendet werden. Generell stehen unterschiedliche Verfahren der Plaque-Befundung zur Verfügung. Dazu zählen neben Verfahren der Planimetrie, welche plaquebedeckte Zahnflächen bewerten, auch gravimetrische Verfahren. Bei der gravimetrischen Methode wird das Nass- oder Trockengewicht der Plaque errechnet (Hellwig et al. 2003). Vorteilhaft bei den planimetrischen Verfahren ist die direkte visuelle Auswertung bzw. die Anfertigung von fotografischen Aufnahmen, die eine spätere visuelle und dabei beliebig oft wiederhol- und korrigierbare Auswertung ermöglichen. Die Wahl des passenden Index-Systems sollte dem Ziel der Untersuchung, dem zu erwartenden Zeitaufwand und dem Typ der Studie angepasst werden (Fischman 1986). Ein „einfach“ gehaltener Index, z. B. der Approximalraum-Index nach *Lange et al.* (1977), bietet sich zur Bewertung der Mundhygiene am Patienten an. Die Effizienz seiner Mundhygiene kann dem Patienten so schnell und direkt demonstriert werden.

Bei wissenschaftlichen Auswertungen müssen Zahnflächen besonders detailliert betrachtet werden. Hierzu bietet sich ein umfassenderer Index an, wie z. B. die Modifikation des Navy-Plaque-Index nach *Rustogi*. Dabei werden der Approximalraum, die Glattflächen lingual und bukkal und die Zahnhalsregionen genau betrachtet (Rustogi et al. 1992).

3.3.1 Plaque-Index nach Silness und Löe (PI)

Der von *Silness und Löe* 1964 entwickelte Plaque-Index bezieht sich vor allem auf die Bewertung der Plaque in der Nähe der Gingiva. Die Bewertung des Index wird an allen vier Zahnflächen – bukkal, lingual bzw. palatinal, distal und mesial – durchgeführt. Mit einer Sonde wird die Zahn-Plaque nur visuell und taktil erkannt (Roulet et al. 2003). Dazu wird zunächst mit einer Multifunktionsdüse der zu untersuchende Bereich ca. 20 Sekunden getrocknet. Auf eine Anfärbung oder anderweitige Hervorhebung der dentalen Plaque wird bewusst verzichtet. Der PI nach *Silness und Löe* erfährt eine Graduierung von 0 bis 3. Grad 0 beschreibt die Abwesenheit von Plaque. Grad 1 zeigt einen dünnen Plaque-Film entlang des Gingivasaums, der jedoch nur durch Abstreichen mit der Sonde zu erkennen ist. Grad 2 ist visuell sichtbar und zeigt eine mäßige Plaque entlang des Gingivarandes, wobei der interdentale Bereich noch nicht mit Plaque belegt ist. Beim dritten Grad handelt es sich um eine große Ansammlung von Plaque sowohl im Bereich des Gingivasaums als auch interdental bei den zu untersuchenden Zähnen (Silness und Löe 1964, Löe 1967). Bei dem PI nach Silness und Löe handelt es sich um einen schnell und einfach zu erhebenden Index, der besonders die Bedeutung der Plaque am Übergang zwischen Gingiva und Zahnrand hervorhebt. Gerade in klinischen Studien verdeutlicht er die Beziehung zwischen Plaque und marginaler Gingiva, besonders hinsichtlich der Schichtung und Dicke der Plaque (Roulet et al. 2003).

3.3.2 Modifizierter Plaque-Index nach Quigley und Hein (QHI)

Anfänglich wurden bei dem 1962 von *Quigley und Hein* veröffentlichten Bewertungssystem nur die Fazialfläche und das gingivale Drittel betrachtet und somit die approximale und sulkuläre Plaque wenig berücksichtigt (Quigley und Hein 1962). *Turesky et al.* verbesserten die Objektivität der Quigley-Hein-Kriterien, weshalb in aktuellen Studien meist diese modifizierte Form genutzt wird (Turesky et al. 1972). Dabei wird je eine Zahnfläche in drei Bereiche unterteilt. Der QHI weist in Bezug auf die Plaque-Bewertung, ihren Verlauf und die Plaque-Akkumulation eine gute und einfache Differenzierung auf (Quirynen et al. 1991). Die Plaque wird mit Plaque-Revelatoren – bestimmten Färbemitteln, welche die Plaque deutlich erkennbar machen – dargestellt. Anschließend wird eine Graduierung vorgenommen, je nach Ausdehnung und Lokalisation der Plaque in sechs unterschiedliche Grade. Grad 0 wird vergeben, wenn keine Plaque vorhanden ist. Grad 1 lässt vereinzelte Plaque-Inseln erkennen. Grad 2 beschreibt eine Plaque-Linie, welche bis zu 1 mm oberhalb des Gingivarandes verläuft. Grad 3 zeigt eine Plaque-Besiedelung bis zu einem Drittel des Zahnes. Dehnt sich die Plaque über ein Drittel, jedoch unter zwei Drittel der Zahnfläche aus, wird von Grad 4 gesprochen. Sollten über zwei Drittel der zu untersuchenden Zahnfläche von einer Plaque bedeckt sein, wird der Grad 5 verwendet (Quigley und Hein 1962).

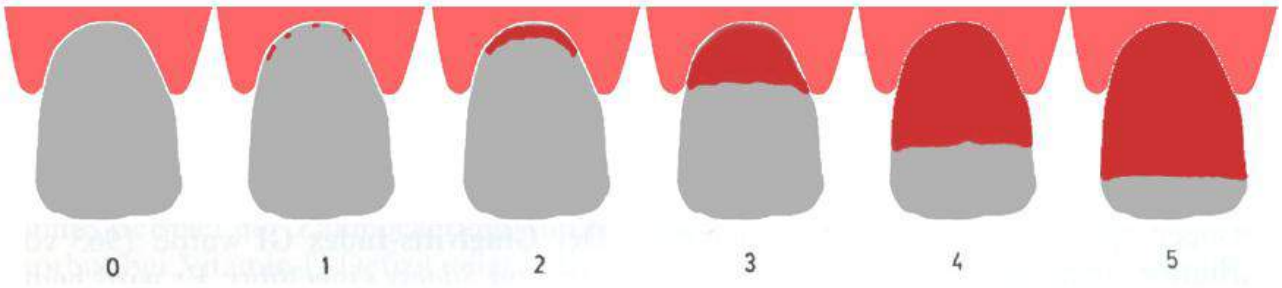

Abbildung 2: Schematische Darstellung des Quigley-Hein-Index, modifiziert nach Turesky et al. (1972)

Durch die klare objektive Definition und Einteilung des QHI ergibt sich eine besonders gute Anwendungsmöglichkeit für Langzeitstudien und klinische Studien in Bezug auf Plaque-Prävention und Therapieverfahren, die einer Plaque-Akkumulation entgegenwirken (Reddy 2008).

3.3.3 Navy-Plaque-Index

Der Navy-Plaque-Index nach *Elliot et al.* (1972) beschreibt das Vorliegen von Plaque in gedachten Zonen auf dem Zahn, die mit 0 oder 1 bewertet werden. Die grobe Einteilung der Zahnoberfläche erfolgt zunächst in drei Hauptzonen. Man spricht von einer okklusalen, einer mittleren und einer gingivalen Zone. Die gingivale Zone liegt apikal einer gedachten Linie, welche die Interdentalpapillen verbindet und parallel ca. 1 mm über dem marginalen Gingivasaum verläuft. Eine anschließende Drittelung der gingivalen Zone führt zu einem mesialen, einem mittleren und einem distalen Bereich. Die mittlere Zone wird in einen mesialen und einen distalen Bereich unterteilt und beschreibt damit die größte Fläche zwischen der gingivalen und okklusalen Zone. Letztere bezieht sich nur auf die inzisalen Glattflächen bei Frontzähnen oder auf die okklusalen bei Seitenzähnen. Mithilfe dieser Zoneneinteilung lässt sich eine Unterscheidung zwischen gingivanahen und interdentalen Bereichen im Verhältnis zu Inzisal- und Glattflächen beschreiben.

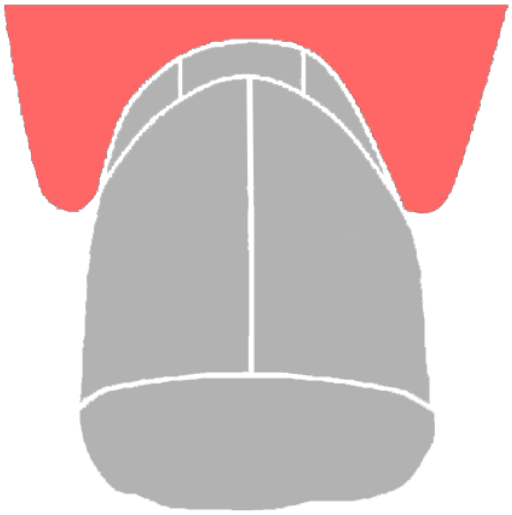

Abbildung 3: Schematische Darstellung des Navy-Plaque-Index nach Elliot et al. (1972)

Der Navy-Plaque-Index wurde bisher mehrere Male abgewandelt und verbessert. Der modifizierte Navy-Plaque-Index nach *Rustogi et al.* (1992) erweitert den ursprünglichen Index auf neun Zonen mit einer zusätzlichen Kennzeichnung „A“ bis „I“. Besonders die mittlere Zone erfährt so eine detaillierte Einteilung durch die Bestimmung der Areale „F“ (distal) und „D“ (mesial). Die Bewertung der Felder mit 0 oder 1 hinsichtlich der Plaque bleibt identisch. Die feinere Einteilung der Zonen ermöglicht eine stärkere Differenzierung des interproximalen und marginalen Bereichs.

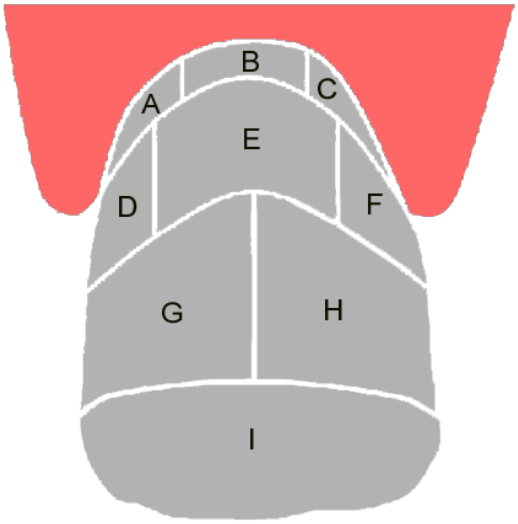

Abbildung 4: Schematische Darstellung des modifizierten Navy-Plaque-Index nach Rustogi et al. (1992)

Durch die Einführung eines planimetrischen Verfahrens erfuhr der Navy-Plaque-Index im Jahre 1995 eine weitere Modifizierung durch *Claydon und Addy*. Aufgrund der Feldeinteilung in neun Zonen pro Glattfläche ergeben sich 18 Werte je Zahn, da sowohl bukkal als auch lingual bzw. palatinal die Werte erhoben werden müssen. Somit addiert sich der Wert im vollbezahnten Gebiss auf insgesamt 576 einzelne Felder. Um den Zeitaufwand am Patienten zu reduzieren, fotografierten und archivierten *Claydon und Addy* die zu validierenden Zahnflächen und führten die spätere Auswertung mithilfe von speziell angefertigten Schablonen durch (Claydon und Addy 1995, Claydon und Addy 1996).

Zusammenfassend ist der Navy-Plaque-Index als hervorragender Index für In-vitro- und In-vivo-Studien zu bewerten. Er ist sowohl von ungeübtem also auch von speziell ausgebildetem Fachpersonal anwendbar. Die indirekte Auswertung anhand einer Fotodokumentation lässt ein ausführliches und reproduzierbares Vorgehen zu, sowohl inter- als auch intraindividuell (Shaloub und Addy 2000). Nach *Claydon und Addy* (1995) ist die objektivere Auswertung im Vergleich mit anderen Indizes von Vorteil.

Grender et al. (2013) verglichen in einem Review sechs klinische Studien hinsichtlich der Effektivität der Plaque-Entfernung bei oszillierend-rotierend elektrischen Zahnbürsten sowie Schall- und Handzahnbürsten. Dabei wurde bei den Studien von *Biesbrock et al.* (2008), *Goyal et al.* (2009), *Sharma et al.* (2010) und *Klukowska et al.* (2010) der Navi-Plaque-Index modifiziert nach *Rustogi et al.* (1992) verwendet.

Durch die hohe Anzahl von Werten, die erhoben werden müssen, entsteht beim Navy-Plaque-Index ein höherer Zeitaufwand, der im Vergleich zu einfacheren Indizes von Nachteil sein kann. Claydon und Addy haben jedoch durch die Einführung der Fotodokumentation eine deutliche Vereinfachung in Bezug auf die sonst schwer einzusehenden distalen Werte im Molarenbereich geschaffen. Die präzisen Bewertungsmöglichkeiten anhand der einzelnen Feldeinteilungen und deren hohe Differenzierung der Problemzonen eignen sich sehr gut für Studien, in denen Mundhygieneprodukte getestet und evaluiert werden sollen. Der benötigte Zeitaufwand spricht eher für in vitro durchgeführte Studien, die eine quasi-klinische Situation simulieren.
Eine weitere Modifizierung des Navy-Plaque-Index nach *Lang et al.* (2011) unterteilt die Bewertung der einzelnen Zahnfelder nicht mehr in einen Ja/Nein-Entscheid, der mit 0 oder 1 bezeichnet wird. Die Bewertung bezieht sich hier auf den prozentualen Anteil der Plaque auf den entsprechenden Feldern. Eine 0 wird weiterhin bei Plaque-Freiheit vergeben. Eine 1 ergibt sich bei einem Plaque-Anteil von bis zu 50 % des Feldes. Der neue Parameter 2 wird dann zugeteilt, wenn der Plaque-Anteil über 50 % liegt. Durch diese Modifizierung ist eine sensiblere Unterteilung der einzelnen Felder erreicht worden. *Bretz* (2010) zeigte in einer indirekten klinischen Studie, innerhalb der die Auswertung anhand von Fotos vorgenommen wurde, die Vorteile einer Abstufung des Navy-Plaque-Index in drei Grade.

3.4 Putztechniken

Die Etablierung einer reifen dentalen Plaque dauert ungefähr 24 bis 36 Stunden (Lang et al. 1973). Dabei hängt eine effektive Plaque-Beseitigung weniger von der Zahnbürstenform, der verwendeten Zahncreme oder der Borstengestaltung ab, als vielmehr von einem konsequenten systematischen Vorgehen beim Putzen, bei dem bewusst alle Zahnflächen erfasst werden (Rateitschak et al. 1989). Patienten wenden am häufigsten die Putztechnik des „horizontalen Schrubbens“ an, da dieses schnell und einfach schon im Kindesalter zu erlernen ist und gerade für den Patienten selbst einen zufriedenstellenden Putzerfolg darstellt (Mierau 1992). Nachteilig an dieser Methode sind die oft mit ihr einhergehenden gingivalen und parodontalen Schädigungen, die sich zu parodontalen Rezessionen ohne oder mit keilförmigen Defekten oder zu den typischen Stillman-Spalten (Stillman`s clefts) entwickeln können (Mierau et al. 1989, Frandsen et al. 1972).

Rateitschak et al. (1989) beschreiben eine bestimmte Systematik des Zähneputzens, die zum Ziel hat, alle Zahnflächen zu reinigen. Zunächst sollen die schwer zugänglichen Bereiche, insbesondere die lingualen bzw. palatinalen Zahnflächen, und anschließend die bukkalen Flächen geputzt werden. Dieser Putzvorgang erinnert an ein kreisförmiges Vorgehen, das z. B. lingual im Unterkiefer begonnen und auf der gleichen bukkalen Seite beendet wird. Erst danach werden die Kauflächen gereinigt. Je nach Alter, gesundheitlichem Zustand und manuellem Geschick des Patienten werden unterschiedliche Putztechniken empfohlen. Insgesamt sollen zehn bis 15 Wiederholungen je Zahn durchgeführt werden. In einer In-vitro-Studie aus dem Jahre 2000 wurden Handzahnbürsten in Hinblick auf ihr Zahnflächenkontaktvermögen bei verschiedenen Putzbewegungen getestet. Im Ergebnis stellte sich heraus, dass gewisse Putzbewegungen anderen überlegen sind, wobei jedoch auch die Gestaltung der Bürste eine signifikante Rolle spielt. Die größten Erfolge lieferten die vertikalen Putzbewegungen mit bestimmten Bürsten, danach kamen die kreisenden und anschließend die horizontalen Putzabläufe (Imfeld et al. 2000). Nach *Kramer* (2004) stellen distale Flächen gekippter Zähne, gekippte Zähne, Schachtelstellungen der Frontzähne, Kauflächen im Durchbruch befindlicher Zähne, in ihrer vertikalen Achse gedrehte Zähne und freiliegende Furkationen mehrwurzliger Zähne besondere Problemzonen bei der Reinigung der Zähne dar.

Die Individualität jedes Patienten bezüglich der anatomischen Beschaffenheit der Mundhöhle, des Kariesrisikos und der eigenen motorischen und kognitiven Eigenschaften lässt keine optimale Standardtechnik, die in jedem Maße einen gleichen Putzerfolg verspricht, zu. Natürlich kann in In-vitro-Studien die Effektivität von Zahnpflegeprodukten zur Plaque-Beseitigung geprüft und optimiert werden, jedoch hängen eine gute Zahnpflege und der Grad ihrer Notwendigkeit generell vom Patienten ab. Im 20. Jahrhundert wurden von vielen Autoren Putztechniken entwickelt, die durch eine genaue Beschreibung des Putzvorgangs und ein bestimmtes Indikationsfeld gekennzeichnet sind. Dazu zählen u. a. die modifizierte Bass-Technik, die modifizierte Stillman-Technik, die Fones-Technik (Rotationsmethode), die Rot-Weiß-Methode und die Rollmethode. Sie alle beschreiben eine detaillierte Vorgehensweise, um einen bestimmten Putzerfolg zu erzielen. Darunter fallen auch Methoden, die bei einem parodontal geschädigten Gebiss angewendet werden sollen oder bei sehr jungen bzw. alten Patienten, deren manuelle Fähigkeiten eher eingeschränkt sind. Zudem gibt es darüber hinaus sehr anspruchsvolle Methoden, die ein hohes manuelles Geschick erfordern und erst dann zu den erwünschten Ergebnissen führen.

Viele dieser Methoden sind kritisch zu hinterfragen, da sie vor allem in vitro getestet wurden oder von speziell geschulten Probanden. Deswegen ist es wichtig, einem Patienten, dessen Mundhygiene durch manuelle Plaque-Entfernung verbessert werden soll, nicht nur eine bestimmte Methode, die eigens dafür vorgesehen wurde, beizubringen, sondern eine für ihn individuell entwickelte, die er sich gut aneignen und beibehalten kann. Dies kann durchaus eine Kombination aus oben genannten Techniken oder auch eine ganz individuelle Putztechnik sein.

4. Material und Methoden

4.1 Materialübersicht

– KaVo-Kunststoffzähne und -Zahnträger

– Mittel zur Simulation der Plaque

– Trocknungsapparatur für die Plaque-Simulation

– Zahnputzroboter und Druckaufnehmer der Firma Kawasaki

– Zahnentnahmezange

– Entriegelungsapparatur

– Testbürsten (sowohl Hand- als auch elektrische Zahnbürsten und Interdentalbürsten)

– Isopropylalkohol (Reinigungsflüssigkeit)

– Spiegelreflexkamera (Nikon D70)

– Automatisierte Plaque-Planimetrie (APP)

– Mundspiegel

– Computer

4.2 Materialbeschreibung

KaVo-Kunststoffzähne und -Zahnträger:

Mithilfe des Zahnträgers und der zugehörigen Kunststoffzähne soll die physiologische Situation eines Gebisses simuliert werden (Eugnathie). Der Zahnträger besteht aus einem weißen Kunststoffmaterial. Er besitzt speziell angefertigte Einsparungen, in die die Kunststoffzähne eingebracht und dort per Schnapphalterung festgehalten werden können. Aufgrund der guten Simulation des menschlichen Gebisses werden KaVo-Modelle an vielen Universitäten zur präklinischen Ausbildung im Zahnmedizinstudium verwendet.

Mittel zur Simulation der Plaque:

Die Plaque-Simulation mit einer Rotfärbung als Revelation ist klinisch validiert und entspricht damit statistisch gesichert der klinischen Plaque-Kontrolle durch das Zähnebürsten (Lang et al. 2014).

Trocknungsapparatur für die Plaque-Simulation:

Diese Apparatur gewährleistet automatisch eine gleichmäßige Beschichtung der Prüfzähne. Sie ist zusammengesetzt aus einem Steuerungspanel, einem Heißluftgebläse, einer Halterung, in die der Zahnträger eingespannt und so auf- und abgefahren werden kann, einem Farbbecken und einer Schutzabdeckung aus Plexiglas.

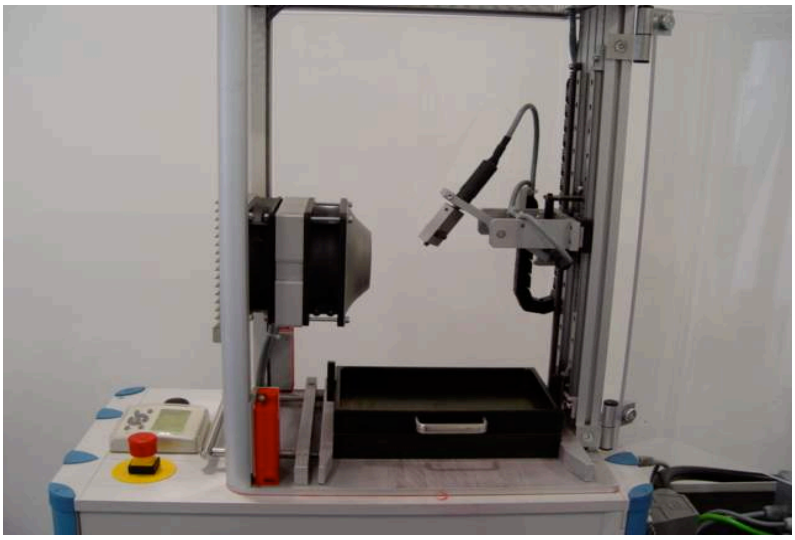

Abbildung 5: Frontale Darstellung der Trocknungsapparatur für die Plaque-Simulation

Zahnputzroboter und Druckaufnehmer der Firma Kawasaki:

Bei diesem Gerät handelt es sich um einen Sechs-Achsen-Roboter des Typs FS02N der Firma Kawasaki. Dieser kann Bewegungen mit 3,80 mm/s durchführen und besitzt eine Wiederholungsgenauigkeit von +/- 0,03 mm. Der Roboter dient zur Simulation der Zahnputzbewegungen des Menschen. An dem Roboterarm können verschiedene Halterungen befestigt werden, je nachdem, ob es sich um eine universelle oder spezielle Handzahnbürste oder eine elektrische Zahnbürste handelt. An der Vorderseite der Apparatur befinden sich die Hauptschalter für die Stromversorgung des Roboters, der Zählerständer und des Druckaufnehmers. Zur Steuerung des Roboterarms gibt es ein Touchpanel. Der Druckaufnehmer wird über eine elektrische Vorrichtung navigiert. Die Anpresskraft (in Newton), die hinsichtlich Hersteller und Typ der Zahnbürste variieren kann, wird über den Winkel, in dem die Zahnbürste aufliegt, und anhand von zwei Messplatten justiert.

Abbildung 6: Zahnputzroboter der Firma Kawasaki

Entriegelungsapparatur:

Diese Apparatur besteht aus einer Metallbasis, die mit einer zweiten kleineren Metallplatte verbunden ist. Die kleinere Platte besitzt analog zu dem KaVo-Zahnmodell Löcher an den Stellen, an denen die Kunststoffzähne in das Modell eingeschnappt sind (s. o.). Durch diese können mithilfe eines Hebelarms kleine Metallzylinder gedrückt werden, was zum Austritt der Kunststoffzähne aus dem Zahnmodell führt.

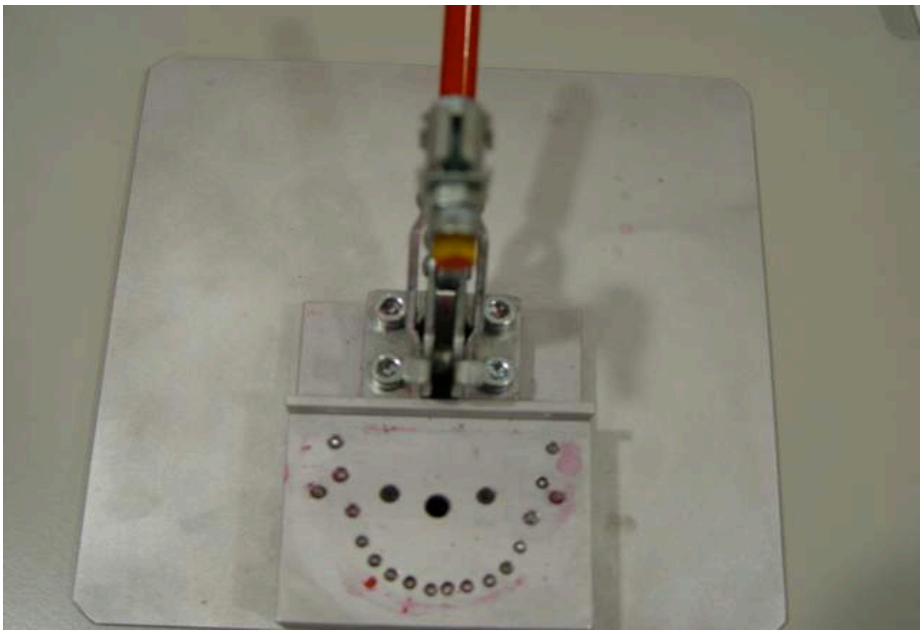

Abbildung 7: Entriegelungsapparatur mit Halterung für die KaVo-Zähne

Automatisierte Plaque-Planimetrie (APP):

Hierbei handelt es sich um eine computergesteuerte Einheit mit einer Analysesoftware, bestehend aus einem Bildverarbeitungssystem und einer Auswertungseinheit. Zusätzlich ist eine Dunkelkammer vorhanden, in die die KaVo-Zähne in Verbindung mit einer Spezialhalterung eingebracht und dort fixiert werden können (s. Abbildung 8). Die ganze Einheit wird über ein Touchpanel und einen Monitor gesteuert (s. Abbildung 9). Zusätzlich ist ein Computer angeschlossen, auf den die ausgewerteten Daten überspielt werden können. Sie können so weiter bearbeitet und z. B. in eine Tabelle übertragen werden. Der Monitor zeigt die aktuellen Aufnahmen und Scanvorgänge an, die die APP zu dem jeweiligen Zeitpunkt durchführt. Ein kleines Feld unten rechts am Monitor gibt an, bei welchem Zahn sich die APP gerade befindet. Dies ist visuell überprüfbar. Falls Fehler auftreten, kann der aktuelle Vorgang unterbrochen und erneut gestartet werden.

Innenleben

Im Innern befinden sich folgende Komponenten:

Bildverarbeitung: Kamera und Beleuchtung

Probenträger: Halterung für Prüfzähne

Lineareinheit: Verfährt die Probenträger vor der Kamera

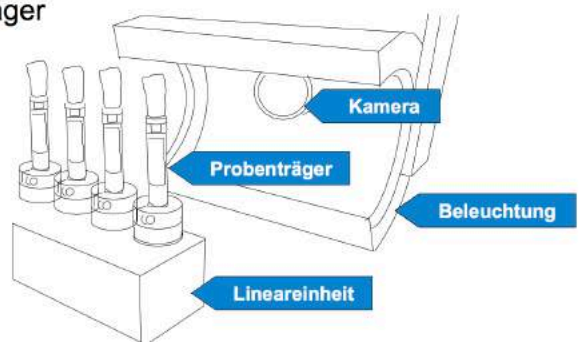

Abbildung 8: Schematische Darstellung der Innenansicht der APP (Benutzerhandbuch ORMED/ M+C Schiffer)

Außenansicht

Das Gerät weist in der Außenansicht 3 relevante Bauteile auf.

Bedienteil: dient zur Bedienung und Einstellung der relevanten Parameter

Monitor: zeigt die Aufnahme des zuletzt vermessenen Zahns

Schutztür: verdeckt das Bildverarbeitungs- und das Transfersystem.

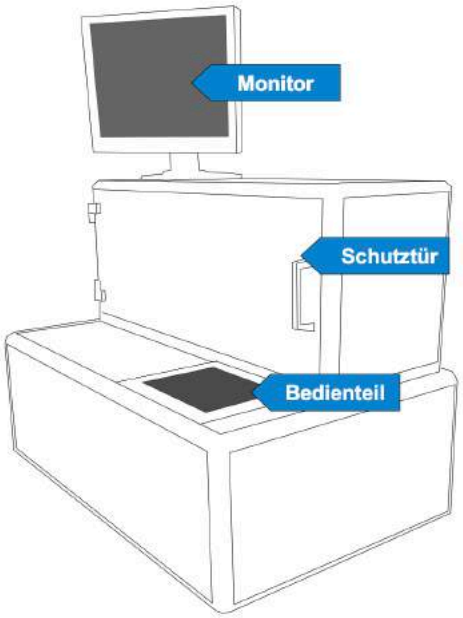

Abbildung 9: Schematische Darstellung der Außenansicht der APP (Bedienungshandbuch ORMED/ M+C Schiffer)

Testbürsten:

Insgesamt wurden zehn verschiedene Zahnpflegebürsten geprüft. Darunter befanden sich fünf Handzahnbürsten, zwei elektrische Zahnbürsten und drei Interdentalbürsten. Dabei handelte es sich um Prüfreihen von Prototypen mit ihrer jeweiligen Codierung.

- Interdentalbürsten:
  - Testbürste 1 (IBF/06/13/fünf Durchläufe)
  - Testbürste 2 (IBF/06/13/fünf Durchläufe)
  - Testbürste 3 (IBF/06/13/fünf Durchläufe)

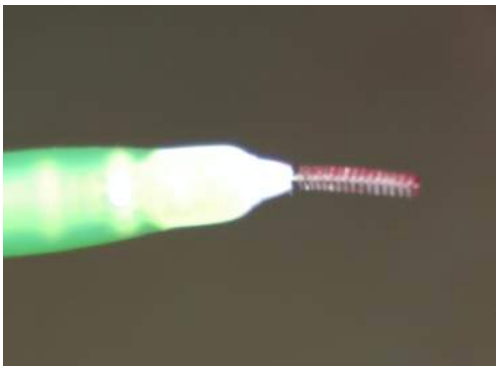

Abbildung 10: Testbürste 2

- Kinderhandzahnbürsten:
  - Testbürste 4 (KZB/04/13/vier Durchläufe)
  - Testbürste 5 (KZB/04/13/vier Durchläufe)

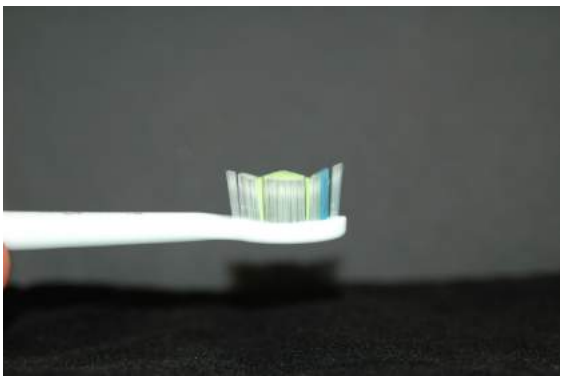

Abbildung 11: Testbürste 7

- Elektrische Zahnbürsten:
  - Testbürste 6 (EZB/05/13/sieben Durchläufe)
  - Testbürste 7 (EZB/05/13/sieben Durchläufe)

- Handzahnbürsten:
  - Testbürste 8 (MZB/04/13/vier Durchläufe)
  - Testbürste 9 (MZB/04/13/vier Durchläufe)
  - Testbürste 10 (MZB/04/13/vier Durchläufe)

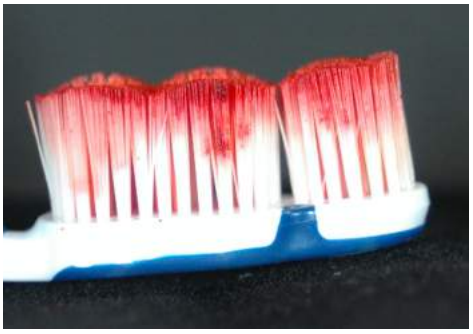

Abbildung 12: Testbürste 10

4.3 Methodik und Durchführung

Die Methodik gliedert sich in vier wesentliche Schritte.

1. Vorbereitung der Modellträger, Versuchsdurchführung mit dem Zahnputzroboter und Fotodokumentation
2. Automatisierte Plaque-Planimetrie
3. Kalibrierung der quasi-klinischen Auswerter
4. Quasi-klinische Auswertung der fotodokumentierten Bilder durch zwei unabhängige Beobachter

4.3.1 Vorbereitung, Putzvorgang und Fotodokumentation

Das Labor, in dem die simulierten Zahnputzabläufe mithilfe des Zahnputzroboters durchgeführt wurden, befindet sich im dritten Stock des ZBZ (Zahnmedizinisch-Biowissenschaftliches Forschungs- und Entwicklungszentrum) der Universität Witten/Herdecke. Es gehört dem ORMED Institute for Oral Medicine at the University of Witten/Herdecke.

Abbildung 13: Einsetzen der Zähne in den Zahnträger

Abbildung 14: Konditionierung mit Isopropylalkoholträger

Der Zahnträger der Firma KaVo wurde mit den vorgesehenen Zähnen von Zahn 33 bis Zahn 48 bestückt, anschließend mit Isopropylalkohol konditioniert und mindestens zehn Minuten getrocknet. Wichtig waren darüber hinaus das Überprüfen des Kunststoffträgers auf mögliche

Mängel und die korrekte Passung der einzelnen Zähne. Hierbei war besonders auf das Einschnappen beim Einbringen der Zähne zu achten, damit sich alle Testzähne bei jedem Durchlauf in der richtigen Position befanden. Jeder Zahnträger durfte für zwei weitere Versuchsdurchläufe wiederverwendet werden. Die Kunststoffzähne wurden nach einmaliger Benutzung entsorgt.

Im Folgenden wird das Einrichten der Testzahnbürsten im Zahnputzroboter beschrieben. Am Zahnputzroboterarm wurden entweder eine Universalhalterung oder eine Spezialhalterung befestigt. Der Ablauf für die Befestigung am Roboterarm war bei beiden Halterungen gleich. Zunächst wurde der Roboterarm mithilfe des Touchpanels in seine Ausgangsposition gefahren, in der die Halterung aufgeschraubt werden konnte. Mithilfe der Halterung und der zugehörigen Feststellschrauben wurde später eine Veränderung der Zahnbürste in horizontaler und vertikaler Ebene ermöglicht. Die genaue Einstellung des Zahnbürstenkopfes wurde mithilfe eines Fadenkreuzes auf einer planen Fläche vorgenommen. Dabei wurde darauf geachtet, den Kopf möglichst zentral und gleichmäßig auf die Fläche zu setzen, damit ein konstanter Druck gewährleistet war (s. Abbildung 15).

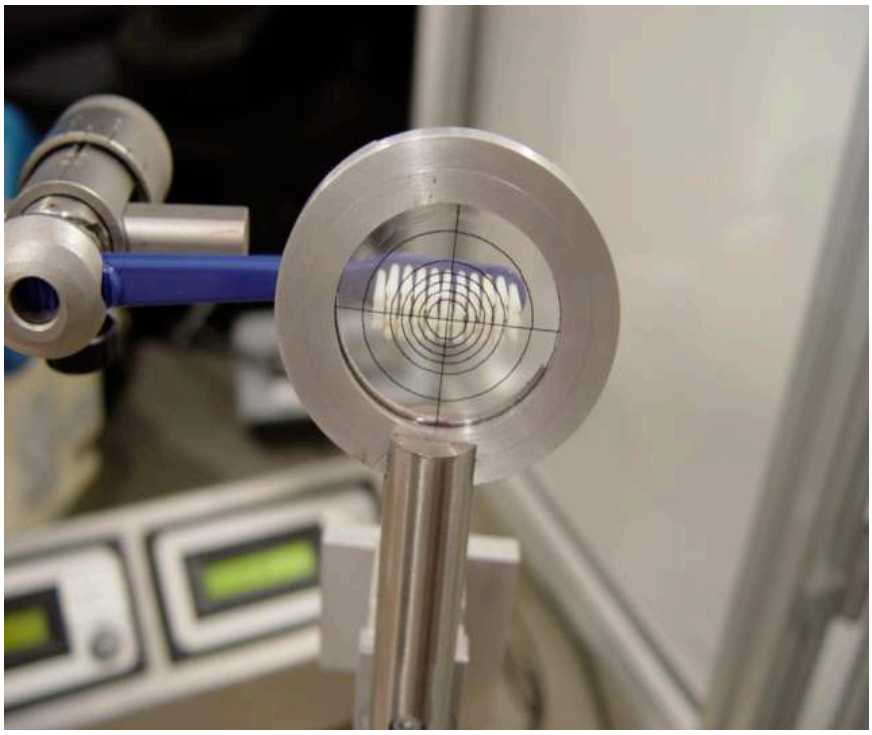

Abbildung 15: Ausrichten der Zahnbürste am Fadenkreuz

Anschließend folgte die Kalibrierung der Anpresskraft mithilfe eines zweiflächigen Druckmessers und einer zugehörigen Messapparatur. Die Steuerung erfolgte wiederum mit dem Touchpanel. Zunächst wurde die Druckanzeige auf „Null“ gestellt, um eine Ausgangssituation zu schaffen. Durch die Veränderung der Anpresskraft und die Justierung des Winkels, in dem der Zahnbürstenkopf auf der Druckanzeige auflag, konnte eine gleichmäßige Kraftverteilung erreicht werden. Diese lag bei ungefähr 1,5 Newton pro Anzeige, wobei eine Toleranz von 0,025 Newton akzeptabel war, solange die Gesamtanpresskraft weiterhin bei 3 Newton lag. Dieser Vorgang durfte insgesamt nicht länger als vier Minuten in Anspruch nehmen, damit sich der Anpressdruck bezogen auf die Flexibilität der Zahnbürste nicht verändert.

Das Anfärben der Zahnträger wurde mit einer speziell entwickelten roten Testfarbe durchgeführt, die aufgrund ihrer Konsistenz als Plaque-Simulation diente. Da dieser Schritt für jeden Durchlauf identisch sein musste, entwickelte ORMED eine Trocknungsapparatur, durch die der Ablauf automatisiert werden konnte. Nach der Entnahme trockneten die Zähne weitere zwei Minuten bei Raumtemperatur. Zur Überprüfung reichte eine handelsübliche Zeitmessung.

Abbildung 16: Modellträger mit fixiertem Zahnmodell

Nach der Öffnung der Roboterabdeckung konnte der mit der künstlichen Plaque vorbereitete Zahnträger auf dem für ihn vorgesehenen Modellträger des Zahnputzroboters befestigt werden. Dieser Modellträger mit dem Zahnträger diente dem Roboter als fixe Position im Raum. Bei der Montage des Zahnträgers wurde besonders darauf geachtet, die beiden Führungsdorne an der Oberfläche des Modellträgers in die Einkerbungen des Zahnträgers einzusetzen und zu fixieren. Die spaltfreie Passung zwischen Modellträger und Zahnmodell konnte visuell überprüft werden. Eine falsche Passung hätte den späteren Putzablauf beeinflusst und zu einer Verwerfung des Durchgangs geführt.

Mithilfe des Touchpanels wurde der Putzablauf vorbereitet und anschließend gestartet. Zuerst wurde „Auswahl bestätigen“ angewählt, danach legte man z. B. durch den Befehl „Schrubben“ die Putztechnik fest. Unterschieden wurden die Modi „Schrubben“, „Rotierend“ und „Rot-Weiß“. Zusätzlich konnte die sog. „Schiffer“-Methode angewendet werden, bei der die Zähne in drei Durchläufen („Schrubben“, „Rotierend“ und „Wischend“) geputzt wurden. Insgesamt benötigte ein Durchlauf zwei Minuten. Wurde jedoch ein Kombinationsdurchlauf ausgewählt, dauerte er zweieinhalb Minuten. Der Roboter begann bukkal des Zahnes 48 und fuhr bis zu den Frontzähnen. Am Zahn 33 angekommen wechselte er nach lingual und führte den gleichen Putzablauf rückseitig durch, bis alle Zähne mit der gleichen Intensität geputzt worden waren. Nach Abschluss des Durchlaufs konnte die Abdeckung geöffnet und durch das Lösen der Drehschraube an der Unterseite des Modells das geputzte Modell vorsichtig entnommen werden. Hier war es von großer Bedeutung, das Modell nicht zu berühren, um einen Misserfolg des Versuchs zu vermeiden.

Die Fotodokumentation für die spätere quasi-klinische Auswertung wurde mithilfe einer Spiegelreflexkamera und Mundspiegeln durchgeführt, was den klinischen Vergleich herstellen sollte. Dabei wurden die Mundspiegel von bukkal oder lingual in einem Abstand von 2 bis 3 cm an die Zahnreihen gehalten und das Foto schließlich über die Spiegel ausgelöst, sodass ein möglichst klinisches Verhältnis geschaffen wurde. Die geputzten Zahnflächen waren nun gespiegelt erkennbar, ähnlich einem Fotostatus, welcher am Patienten zur Fotodokumentation und späteren Begutachtung durchgeführt wird. Die Frontzähne konnten direkt mit der Spiegelreflexkamera aufgenommen werden, da diese am Patienten ebenfalls ohne die Hilfe von Mundspiegeln fotografiert werden können. Abbildung 17 verdeutlicht, wie wichtig eine gute Positionierung des Mundspiegels ist, um alle relevanten Bereiche genau dokumentieren zu können. Unterschiedliche Rottöne und Schattierungen erschwerten das Erkennen der eigentlich plaquebedeckten Felder. Bei der späteren Bearbeitung war es von Vorteil, die relevanten Zahnflächen am Computer zu vergrößern, um sie genauer betrachten zu können.

Abbildung 17: Fotoansicht einer bukkalen Seite nach einem Putzvorgang

Das weitere Vorgehen bestand aus der Entnahme der Kunststoffzähne aus dem Zahnträger. Hierfür stand die Entriegelungsapparatur bereit, mit der die in den Zahnträger eingeschnappten Zähne gleichmäßig unter manuellem Kraftaufwand nach oben aus dem Träger herausgedrückt werden konnten. Besondere Vorsicht galt wiederum dem Umgang mit den Zähnen, die unter keinen Umständen an der Zahnkrone berührt werden durften. Um die gelockerten Zähne aus dem Träger zu nehmen, wurden sie vorsichtig mit einer Zange unterhalb der klinischen Krone gefasst und in eine Spezialhalterung gesetzt, die dann zur Analyse in die APP eingesetzt wurde.

4.3.2 Analyse der geputzten Flächen durch die Automatisierte Plaque-Planimetrie

Sobald die geputzten Kunststoffzähne in die jeweiligen Klemmhalterungen eingespannt worden waren, erfolgte nach Betätigung des Startvorgangs der automatisierte Scanvorgang der Zahnoberflächen. Die APP legt virtuell die hierfür eingelesene Schablone des Navy-Plaque-Index auf die Zahnflächen und kann so den Zahn in einzelne Felder, z. B. A bis I und W an den Glattflächen (s. Abbildung 18 (b)) oder w1, w2 und X bis Z im Approximalraum (s. Abbildung 18 (a)), einteilen.

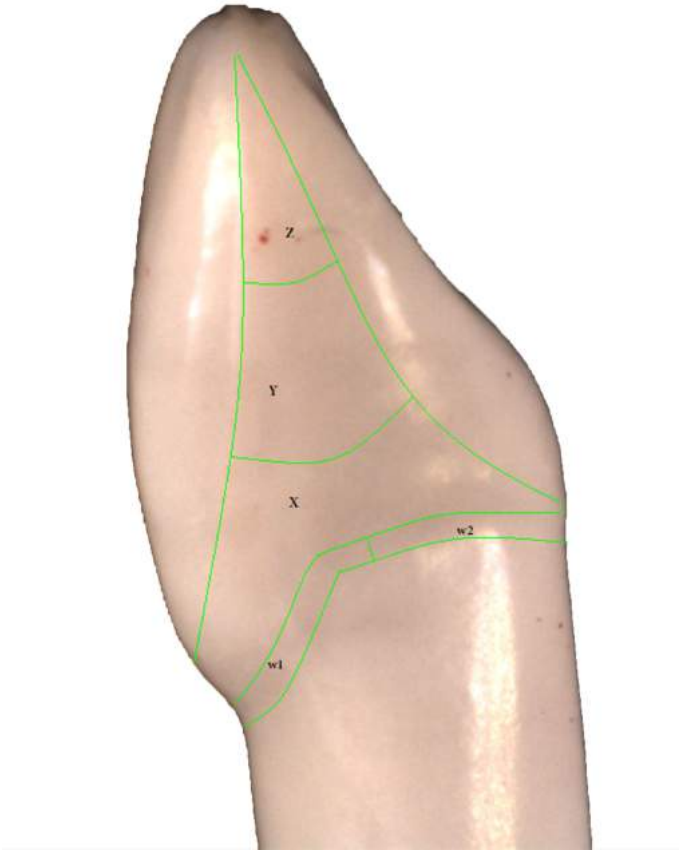

Abbildung 18 (a): Approximalansicht Zahn 43 von mesial mit Feldeinteilung der APP (Z, Y, X, w1, w2) des Navi-Plaque-Index (Lang et al. 2011)

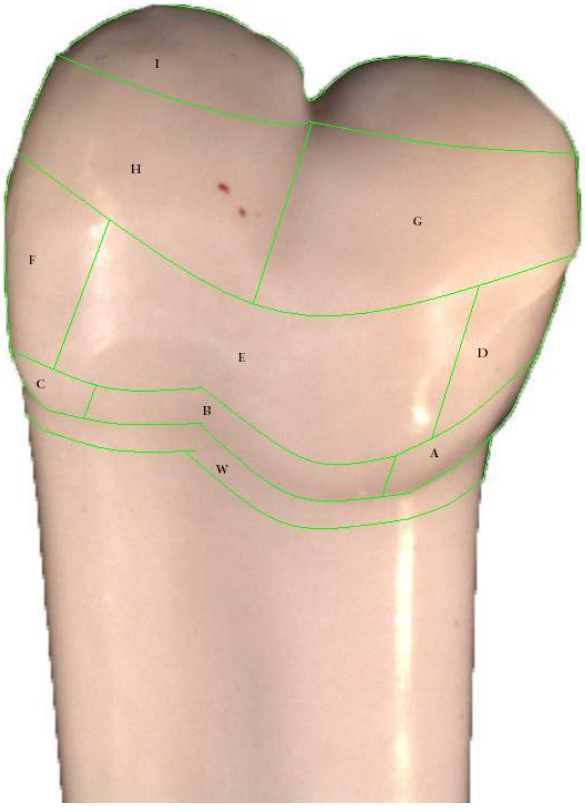

Abbildung 18 (b): Bukkalansicht Zahn 47 mit Feldeinteilung der APP (A, B, C, D, E, F, G, H, I, W) des Navy-Plaque-Index (Lang et. al 2011)

Über eine spezielle Kamera, die den Kontrast auf der Zahnoberfläche berechnet und dabei mögliche Artefakte über einen Rotfilter entfernt, kann die APP den genauen prozentualen Anteil der Plaque pro Feld wiedergeben. Dies wird direkt auf dem Bildschirm der APP sichtbar. Eine Überwachung des Analysevorgangs durch geschultes Personal ist wichtig, damit bei möglichen technischen Fehlern oder einem „Aufhängen“ der APP rechtzeitig eingegriffen werden kann. Im Anschluss findet nach Übertragung der Daten auf einen Computer und Speicherung die Auswertung statt. So ist eine weitere Begutachtung und detaillierte Analyse der Daten möglich.

In der vorliegenden Arbeit sollte die APP hinsichtlich des Navy-Plaque- und des Quigley-Hein-Index verglichen werden. Die prozentualen Ergebnisse der APP wurden zu diesem Zweck in den jeweiligen Index überführt. Um die Genauigkeit der APP zu validieren, wurde eine Auswertung von zu 100 % plaquefreien Zähnen durchgeführt. Diese brachten nach dem Scanvorgang durch die APP einzelne Abweichungen von bis zu 6 % pro Feld vor. Anschließend wurde nach mehrmaliger Diskussion und Rücksprache mit dem Prüfleiter eine leichte Änderung der prozentualen Angaben des Navy-Plaque-Index vorgenommen. Bei der Auswertung durch die APP wurde eine 0 für eine Reinigungsleistung größer als 94 %, eine 1 für 50 % bis 94 % und eine 2 für 0 % bis 50 % vergeben. Im Computer sind alle Planimetrieflächen nacheinander aufgelistet und mit der jeweiligen prozentualen Reinigungsleistung gekennzeichnet. Für die Testbürsten, die mit dem Quigley-Hein-Index ausgewertet werden sollten, wurde ebenfalls eine Übertragung des klinischen Index auf die Auswertungsmethodik der APP angewandt. Hierfür wurden die Felder des Navy-Plaque-Index, die die APP auswerten kann, in den Quigley-Hein-Index umgerechnet. Der daraus entstandene Index der APP berechnet sich aus den prozentualen Reinigungswerten für die Zahnfelder A bis I des entsprechenden Situs:

- QHI = 0: max(ABC) < 2 % und D bis I = 0 %
- QHI = 1: max(ABC) < 50 % und D bis I = 0 %
- QHI = 2: max(ABC) > 50 % und D bis I = 0 %
- QHI = 3: max(ABC) > 50 % und D bis I ≠ 0 % (maximal 33 % der Gesamtfläche Plaque)
- QHI = 4: 33 bis 66 % der Gesamtfläche Plaque
- QHI = 5: mehr als 66 % der Gesamtfläche Plaque

4.3.3 Kalibrierung der quasi-klinischen Auswerter

Für die Qualität der erhobenen Daten ist nicht nur das Studiendesign und dessen exakte Umsetzung von ausschlaggebender Bedeutung, sondern nicht zuletzt auch die Kalibrierung der Auswerter bzw. Prüfpersonen P1 und P2. Die Kalibrierung wurde durch einen fachverantwortlichen Mitarbeiter des ORMED Institutes supervidiert. Die Unterweisung erfolgte in der Art verblindet, dass P1 und P2 die jeweiligen Beurteilungen und Messprozesse unabhängig voneinander durchführten und in die Ergebnisse des jeweils anderen keinen Einblick hatten.

In dem „theoretischen“ Teil der Kalibrierung mussten die Untersucher zunächst die korrekte Anwendung der klinischen Plaque-Planimetrie vorweisen. Sie mussten sich eingehend mit den Grundlagen und der Ermittlung des Navy-Plaque-Index sowie des QHI vertraut machen, dieses Wissen vorweisen und die Feldeinteilungen der Zähne anhand von Zahnmodellen genau beschreiben können.
Jeder Untersucher beurteilte unter der Supervision des Leiters der Kalibrierung anhand von Zahnflächenfotografien aus früheren Putzdurchläufen mit Testzahnbürsten, die auf einem Computerbildschirm dargeboten wurden, die vorhandene Plaque-Bedeckung eines jeden einzelnen Zahnfeldes bzw. eines Zahnes gemäß der Bewertungsskala des Navy-Plaque-Index bzw. des QHI. Anschließend führten P1 und P2 eigenständig, d.h. unabhängig voneinander, die komplette Auswertung eines Zahnmodells durch, wobei für die Notierung der Messwerte rechts neben der fotografischen Darstellung auf dem Bildschirm eine vorgefertigte tabellarische Schablone verwendet wurde, in der für jedes Zahnfeld und für den Totalwert ein Eintragungsfeld vorgesehen war. Die Ergebnisse dieser Komplettauswertung wurden mit dem Leiter durchgesprochen.

Innerhalb des Teils der „Kodierungskalibrierung“ wurden von den Prüfpersonen insgesamt 100 Feldbewertungen anhand der fotografischen Dokumentationen ausgeführt. Die dabei verwendeten Beurteilungsobjekte hatten sich bereits bei früheren Kalibrierungsprozeduren bewährt und waren ursprünglich gemäß dem Kriterium einer typischen, breiten Variation von Beurteilungsgegebenheiten und –situationen ausgewählt worden, z.B. unterschiedlichen Plaque-Bedeckungen der Felder bzw. unterschiedlichen Putzergebnissen und verschiedenen

Zahnarten und morphologischen Gegebenheiten. Eine Zeitbegrenzung für die Urteilsprozesse der beiden Untersucher war nicht gesetzt worden.

Von den 100 Zahnfeldern wurden 65 von den unabhängigen Untersuchern übereinstimmend, d.h. mit dem gleichen ordinalen Skalenwert z.B. „0“, „1“ oder „2“ des modifizierten Navy-Plaque-Index, beurteilt. Nach einer eingehenden Erörterung der Messwertermittlung bei den nichtkonkordanten Feldern hinsichtlich möglicher Urteilsfehlerquellen bzw. individueller Tendenzen (etwa Wahrnehmungs-, Verzerrungs-, Bezugssystem- oder Kontrastfehler) wurde bei einer erneuten Auswertung der gleichen Felder eine Interrater-Reliabilität von 90% erreicht.

Bei der „nachsorgenden“ auswertungsbegleitenden Kalibrierung konnten die Prüfpersonen während der späteren eigentlichen Auswertung der Testzähne besondere, spezifische Fragen mit dem Kalibrierungsleiter klären, deren Beantwortung für eine korrekte Feldbewertung erforderlich war. Dazu wurden die fraglichen Feldbewertungen mit dem Prüfungsleiter an einem Bildschirm aufgerufen und besprochen. Hierzu zählten hauptsächlich:

- die Unterscheidung von vorhandener nicht-geputzter Plaque und sog. Plaque-Artefakten, also zurückgebliebenen Putzresten, die in einem quasi-klinischen Vergleich nicht als noch bestehende Plaque-Inseln bewertet werden dürfen;
- der Umgang Feldern, die aufgrund der Zahnmorphologie Probleme bereiten (z.B. Hypoplasien und Grübchen, die zu Verfärbungsanomalien führen können) (morphologische Kalibrierung);
- die Bewertung des Approximalraums insofern, als nicht immer dessen vollständige Einsehbarkeit gegeben war und daher hier die Wahrscheinlichkeit individueller Urteilsprozesse gefördert wurde.

Eine weitere „nachsorgende“ Kalibrierung in diesem Sinne war nach der Auswertung der drei ersten Zahnbürsten nicht mehr erforderlich.

4.3.4 Quasi-klinische Auswertung der fotodokumentierten Bilder

Die mit einer Spiegelreflexkamera teilweise über einen Mundspiegel fotografierten Zahnflächen wurden von den Prüfpersonen P1 und P2 unabhängig voneinander an einem Computer bewertet. Hierfür wurden die Ergebnisse in vorgefertigte Schablonen eingetragen, was eine spätere Überführung in die Statistik ermöglichte. Die jeweils erhobenen Werte des modifizierten Navy-Plaque-Index nach *Lang et al.* (2011) wurden in der Schablone in die vorgesehenen Felder mit 0, 1 oder 2 je nach Einschätzung der Prüfpersonen eingetragen (s. Abbildung 19 rechts). Dabei steht eine 0 für eine komplette Plaque-Freiheit, bei einer 1 ist weniger als die Hälfte und bei einer 2 mehr als die Hälfte des zu bewertenden Feldes mit Plaque belegt. Besonders wichtig war es, darauf zu achten, den richtigen Blickwinkel auf die Zähne zu wählen, um den jeweiligen Plaque-Index korrekt anwenden zu können.

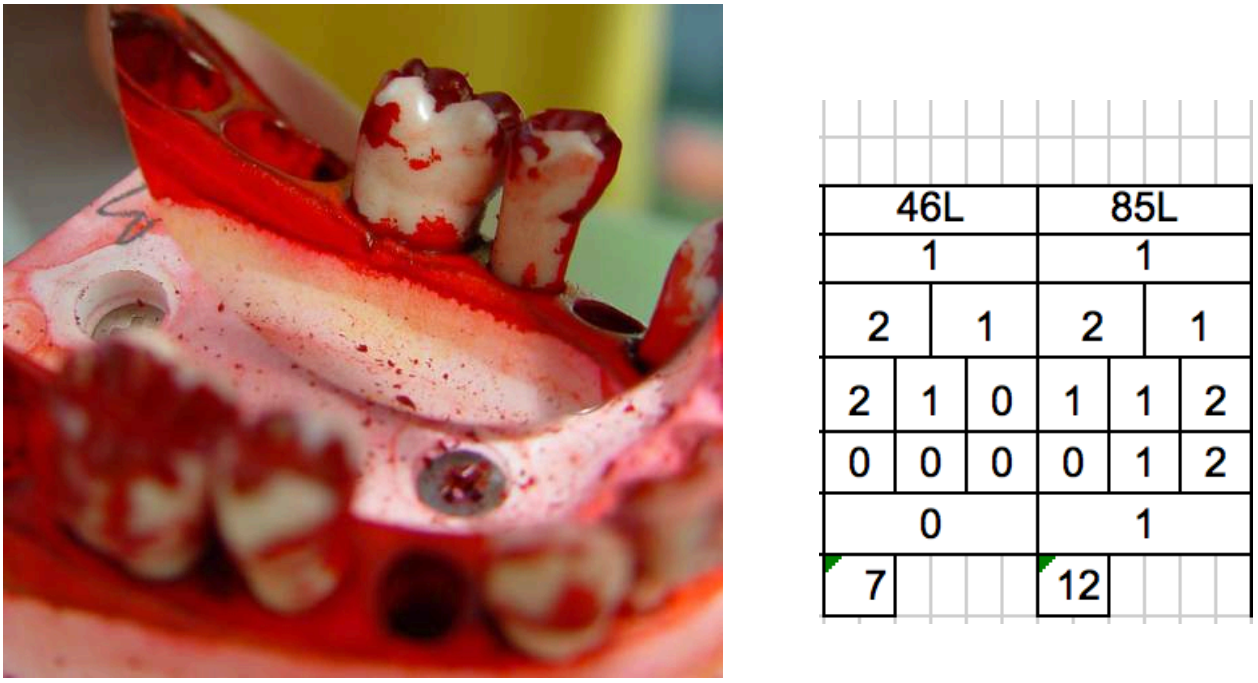

Abbildung 19: Lingualansicht über Mundspiegel nach Putzvorgang der Testbürste 5 (links) und zugehörige Feldbewertung durch die Prüfperson P1 in vorgefertigter Schablone (rechts)

Bei dem Quigley-Hein-Index modifiziert nach *Turesky et al.* (1972) bewertete die Prüfperson jeden Zahn mit Werten von 0 bis 5 (s. 3.3.2). Beide Prüfpersonen konnten anhand der Fotos eine für sie eindeutige Entscheidung treffen und diese in vorgefertigte Exceltabellen übertragen. In Abbildung 20 (a) wird deutlich, dass die bukkalen Flächen bis zum Zahn 44 sehr gut erkennbar sind und so eine gute Beurteilung stattfinden konnte. Für die Frontzahnbewertung wurde eine frontale Perspektive hinzugezogen, damit eine zufriedenstellende Beurteilung abgegeben werden konnte (s. Abbildung 20 (b)).

Abbildung 20 (a): Bukkalansicht über Mundspiegel nach Putzvorgang der Testbürste 6

Abbildung 20 (b): Bukkalansicht nach Putzvorgang der Testbürste 6 (schrägfrontale Aufnahme)

4.4 Statistische Auswertung

4.4.1 Versuchsanordnung

In die vorliegende Untersuchung sind die Daten von zehn Testbürsten eingeflossen. Da die Daten aus verschiedenen Analysen stammen, liegen dementsprechend unterschiedliche Stichprobenumfänge vor. Für die Testbürsten 1 bis 5 und 8 bis 10 erfolgten die Bewertungen anhand des klinischen Planimetrie-Index und bei den Testbürsten 6 und 7 wurde der Quigley-Hein-Index angewandt.

Bei den Testbürsten 1 bis 3 handelt es sich um Interdentalbürsten. Die Daten wurden für fünf bzw. zwei Durchläufe, jeweils neun Zähne distal und zehn Zähne mesial für die drei Zahnfelder X, Y und Z pro Zahn – jeweils bukkal und lingual – ermittelt. Insgesamt hat sich ein maximaler Stichprobenumfang von 285 (bei den fünf Durchläufen) bzw. 114 Auswertungen (bei den zwei Durchläufen) ergeben. Im Einzelnen wurden bei der Auswertung die Gesamtheit der bewerteten Zahnfelder, die gesamten mesialen und die gesamten distalen Zahnfelder unterschieden.

Die Testbürsten 4 und 5 sind Kinderzahnbürsten. Es wurde ein modifiziertes Wechselgebiss, bei dem fehlende Zähne und Zähne im Durchbruch simuliert wurden, mit den Zähnen 46, 85, 43, 42, 41, 31 und 32 bewertet. Die Daten liegen insgesamt für vier Durchläufe, jeweils sieben Zähne und die neun Zahnfelder A bis I pro Zahn – jeweils bukkal und lingual – vor. Der maximale Stichprobenumfang beträgt 580 Bewertungen. Die Auswertung teilt sich in die Bewertung der Gesamtheit der Zahnfelder, der gesamten bukkalen bzw. gesamten lingualen Zahnfelder und der bukkalen bzw. lingualen Risikofelder A, B, C, D und F.

Die Testbürsten 6 und 7 sind elektrische Zahnbürsten. Die Daten liegen für die bukkalen und lingualen Flächen vor. Insgesamt beträgt der Stichprobenumfang bei den zehn getesteten Zähnen mit jeweils sieben Durchläufen pro Zahnbürste maximal 140. Die Auswertung differenzierte sich in die Gesamtheit der bewerteten Zahnfelder, die gesamten bukkalen und die gesamten lingualen Zahnfelder.

Die Testbürsten 8 bis 10 sind Handzahnbürsten. Die Daten liegen für vier Durchläufe, jeweils zehn Zähne und die neun Zahnfelder A bis I pro Zahn – jeweils bukkal und lingual – vor. Daraus ergibt sich ein Stichprobenumfang von maximal 720 Bewertungen. Die Auswertung wurde, wie zuvor bei den Kinderzahnbürsten, in die Bewertung der Gesamtheit der Zahnfelder, der gesamten bukkalen bzw. gesamten lingualen Zahnfelder und der bukkalen bzw. lingualen Risikofelder A, B, C, D und F unterteilt.

Für jedes in die Untersuchung eingegangene Zahnfeld existieren Ergebnisse von drei Auswertern: zwei Prüfpersonen (P1 und P2) und die APP. In die Untersuchung sind nur die Zahnfelder eingegangen, für die alle drei Auswerter eine Bewertung vorgenommen haben. Konnte von einem oder mehreren Auswertern ein Feld nicht bewertet werden, wurde das entsprechende Indexfeld statistisch nicht berücksichtigt.

4.4.2 Verwendete Verfahren

Die Qualität der gemessenen Eigenschaften nimmt mit der Erhöhung des Index ab, wenn man die einzelnen Zahnfelder als eigenständige Untersuchungen betrachtet. Vor diesem Hintergrund handelt es sich bei der aus der Bewertung resultierenden Datenreihe um eine mindestens ordinalskalierte Variable. Die Literatur beinhaltet verschiedene Auffassungen über eine solche Index-Variable und die Frage, ob sie ihre notwendigen Bedingungen für eine Intervallskalierung (und damit verbunden die Anwendung von Mittelwertvergleichen) erfüllt (Rinne 2003, Bortz et al. 2006). Bei der statistischen Bearbeitung der vorliegenden Datenreihen wurde zunächst ein Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben durchgeführt (Bortz 2005, Weiß 2010). Der Wilcoxon-Test ist ein verteilungsfreier Test, der allerdings eine Ordinalskalierung der ausgewerteten Daten benötigt. Mit diesem Test soll das Vorhandensein einer signifikanten Abweichung der untersuchten Untergruppen in Bezug auf ihre zentrale Tendenz überprüft werden. Die Abweichung in der zentralen Tendenz der untersuchten Variablen wird nach Anwendung des Wilcoxon-Tests als „signifikant“ oder „nicht signifikant“ beschrieben. Ein „signifikanter“ Unterschied liegt dann vor, wenn die Nullhypothese der Gleichheit beider Datenreihen abgelehnt werden kann. Dies geschieht bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als 5 %.

Ein weiteres Verfahren, das Hypothesen bezüglich der Unterschiede zweier Mittelwerte überprüft, ist der t-Test (Gujarati 2003). Voraussetzung ist hier die Annahme, dass die

verfügbaren Messwerte intervallskalierte Datenreihen sind, die Signifikanztests unter Verwendung des arithmetischen Mittels zur Abbildung der zentralen Tendenz und der Varianz zulassen. Bei der Durchführung werden zweiseitige Tests verwendet. Die Stichprobenumfänge der untersuchten Untergruppen haben die gleiche Anzahl und unterstützen damit die Anwendung des Standard-t-Tests als ein geeignetes Instrument für den Mittelwertvergleich.

Kommt es sowohl beim t- als auch beim Wilcoxon-Test zu einer Ablehnung der Nullhypothese durch eine Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als 5 % der Gleichheit der Mittelwerte bzw. der Mediane, kann der Unterschied in den zentralen Tendenzen der untersuchten Variablen als „signifikant“ beschrieben werden.

Ein χ^2-Test, der sich mit der Häufigkeitsverteilung eines zu untersuchenden Merkmals befasst, wurde in der statistischen Auswertung nicht verwendet. Sowohl der t- als auch der Wilcoxon-Test weisen einen deutlich höheren Informationsgehalt auf als der χ^2-Test.

Als ein zusätzliches statistisches Werkzeug zur Messung des Grades der Übereinstimmung zwischen zwei unterschiedlichen Auswertern kann der κ-Koeffizient nach Cohen verwendet werden (Weiß 2010). Durch den κ-Koeffizienten kann der Anteil deckungsgleicher Auswertungen zwischen zwei Bewertern, der über das hinausgeht, was zufällig übereinstimmen könnte, quantifiziert werden. Der κ-Koeffizient beschreibt im Unterschied zum Wilcoxon- und zum t-Test, die ausschließlich Bezug auf die Güte der Übereinstimmung hinsichtlich der zentralen Varianz der Datenreihen nehmen, jede einzelne Bewertung und untersucht diese individuell auf ihre Kongruenz. Das Ergebnis des κ-Koeffizienten sind Werte zwischen 0 und 1. Dabei zeigen κ-Werte größer als 0,6 eine gute und Werte größer als 0,8 eine sehr gute Kongruenz bzw. Übereinstimmung an, die sich signifikant von einem zufällig erzielten Ergebnis unterscheidet.

5. Ergebnisse

Im Folgenden soll eine übersichtliche Zusammenfassung über die statistischen Ergebnisse aller zehn untersuchten Testbürsten gegeben werden. Anschließend werden beispielhaft drei unterschiedliche Testbürsten aus der statistischen Auswertung – darunter eine Interdentalbürste, eine elektrische Zahnbürste und eine Handzahnbürste – hinsichtlich ihrer Ergebnisse näher beschrieben. Die statistischen Einzelergebnisse, die nicht in 5.1, 5.2 und 5.3 näher beschrieben werden, sind im Anhang A1 bis A7 durch alle Werte der prozentualen Übereinstimmung und ihrer bivariaten Signifikanztests zusammengefasst.

Bei den Testbürsten 1 bis 3 handelt es sich um Interdentalbürsten, die sich individuell in Form und Konsistenz unterscheiden. Testbürste 1 besitzt einen Stichprobenumfang von n=270, Testbürste 2 einen von n=282 und Testbürste 3, durch die geringere Anzahl von Durchläufen, einen von n=144.

Testbürste 1 weist mit 66 % die größte Übereinstimmung der gesamten Werte im bivariaten Vergleich zwischen der Prüfperson P2 und der APP auf. Die Übereinstimmung zwischen allen Auswertern liegt bei knapp 40 %. P1 bewertete viel häufiger mit einer 2, woraus sich ein Mittelwert von 1,59 ergibt, der ca. 0,4 Punkte höher liegt als der von P2 und der APP. Daraus resultieren die mit dem t- und dem Wilcoxon-Test ermittelten signifikanten Abweichungen jeweils zwischen P1 vs. P2 und P1 vs. APP. Die Prüfperson P1 bewertete häufig höher bei den Feldern, die von P2 und APP als sehr sauber deklariert wurden. Damit führt die individuelle klinische Beurteilung von P1 zu erkennbaren Unterschieden bei der vorgenommenen Bewertung (Anhang A1).

Testbürste 2 zeigt mit 71 % eine deutlich höhere Kongruenz zwischen den Prüfpersonen P1 und P2, als es mit 53 % bei Testbürste 1 der Fall ist. Auch die Übereinstimmung zwischen den Prüfpersonen und der APP ist mit 66 % als hoch anzusehen. Insgesamt kamen alle Auswerter in 53 % der Beurteilungen zu einem gleichen Ergebnis. P1 wertete im Schnitt höher als P2 und die APP, jedoch ist die Differenz hier weniger drastisch als bei Testbürste 1. Daraus ergeben sich trotzdem signifikante Abweichungen zwischen P1 und den anderen Auswertern. P2 und die APP unterscheiden sich in insignifikantem Maße und haben wie auch schon bei Testbürste 1 miteinander verglichen ähnlichere Bewertungsmuster als P1 (s. 5.1).

Testbürste 3 weist eine eher geringe Übereinstimmung zwischen den Auswertern auf. In gerade einmal 23 % der Fälle kamen alle Auswerter zum selben Ergebnis. P1 zeigt wieder

eine deutliche Tendenz zu einer höheren Bewertung (Mittelwert P1: 1,31) im Vergleich zu den anderen Auswertern (Mittelwert P2: 0,73 und APP: 0,83). Die größte Kongruenz zeigen P2 und die APP mit 55 %; darüber hinaus sind keine signifikanten Abweichungen anhand des t- und des Wilcoxon-Tests erkennbar (Anhang A2).

Bei den Testbürsten 4 und 5 handelt es sich um Kinderzahnbürsten. Testbürste 4 besitzt einen Stichprobenumfang von n=414 und Testbürste 5 einen von n=425.

Testbürste 4 hat eine Übereinstimmung zwischen P1, P2 und der APP von 46 % aller Zahnfelder. Die Prüfpersonen P1 und P2 zeigen mit 71 % die größte Kongruenz. Auch die APP weist zufriedenstellende Übereinstimmungen mit 54 % zu P1 und 61 % zu P2 auf. Es gibt keine signifikanten Abweichungen zwischen den einzelnen Auswertern. Auffällig ist, dass es sich bei den stark unterschiedlich bewerteten Feldern (Felder, bei denen es zu Differenzen von +2 bzw. –2 zwischen einem oder zwei Auswertern gekommen ist) in 31 von 35 Fällen um die Risikozahnfelder A, B, C, D und F handelt. Dies sind die Felder des Navy-Plaque-Index, die sich an den gingivalen und approximalen Randbereichen der Zähne befinden. Zudem zeigen vor allem Frontzähne die größten Abweichungen (Anhang A3).

Testbürste 5 kommt zu ähnlichen Ergebnissen wie Testbürste 4. Die gesamte Übereinstimmung unter den Auswertern liegt bei 43 %. P1 und P2 besitzen erneut mit 71 % die höchste Kongruenz. Alle Auswerter unterscheiden sich in insignifikantem Maße voneinander. Die Mittelwerte und der Median liegen nah beieinander. Wie bei Testbürste 4 handelt es sich in 32 von 38 Fällen mit stark unterschiedlich bewerteten Feldern um die Risikozahnfelder besonders im Frontzahnbereich (Anhang A4).

Die Testbürsten 6 und 7 sind elektrische Zahnbürsten und mit dem QHI bewertet. Testbürste 6 hat einen Stichprobenumfang von n=137, Testbürste 7 einen von n=136.

Testbürste 6 weist mit 68 % die höchste Kongruenz zwischen den beiden Prüfpersonen auf. Insgesamt liegt die Übereinstimmung zwischen allen Auswertern bei 39 %. Ähnlich hoch ist diese auch bei dem Vergleich von P1 und APP (40 %) sowie von P2 und APP (35 %). Die APP bewertete im Mittel höher als die klinischen Auswerter, woraus auch ein signifikanter Unterschied zu den Prüfpersonen P1 und P2 hervorgeht. Die eher geringe Übereinstimmung zwischen der APP und den Auswertern zeigt, dass die Umsetzung und Modifizierung des QHI in Verbindung mit der APP noch nicht ausgereift ist (Anhang A5).

Testbürste 7 zeigt bessere Ergebnisse bei der Übereinstimmung als Testbürste 6. Bei P1 und P2 liegt diese bei 67 %. Bei APP und P1 (63 %) sowie bei APP und P2 (60 %) kann

insgesamt von einer positiven Bilanz gesprochen werden. Alle drei Auswerter haben in fast 50 % der Fälle das gleiche Ergebnis erzielt. Sowohl bei Testbürste 6 als auch bei Testbürste 7 beträgt die Übereinstimmung zwischen den Auswertern fast immer über 90 %, solange der Index nur um einen Wert abweicht, obwohl insgesamt sechs verschiedene Werte vergeben werden konnten (s. 5.2).

Die Testbürsten 8 bis 10 sind Handzahnbürsten und besitzen im Vergleich zu den anderen Zahnbürsten den größten Stichprobenumfang. Bei Testbürste 8 beträgt er n=648, bei Testbürste 9 n=647 und bei Testbürste 10 n=648.

Testbürste 8 weist die höchste Übereinstimmung zwischen P1 und P2 auf. Diese ist mit 71 % mehr als 25 % höher verglichen mit APP und P1 sowie APP und P2. Insgesamt kommen alle drei Auswerter nur auf 33 % Übereinstimmung, was besonders auf die durchschnittlich höhere Bewertung der APP zurückzuführen ist. Sowohl der t- als auch der Wilcoxon-Test zeigen signifikante Unterschiede, besonders deutlich im Vergleich zur APP. In 16,36 % der Fälle kommt es zu stark unterschiedlich bewerteten Zahnfeldern, wobei es sich bei 99 von 106 Feldern wieder um die Risikofelder (A, B, C, D, F) besonders im Frontzahnbereich handelt (Anhang A6).

Testbürste 9 ist bei den Ergebnissen vergleichbar mit Testbürste 8, jedoch sind hier etwas bessere Resultate aufgetreten. Die Kongruenz von P1 und P2 liegt bei 70 %, die von APP und P1 bei 49 % und die von APP und P2 bei 55 %. Zwischen P2 und der APP ist im Mittel kein signifikanter Unterschied aufgetreten, da sich die abweichenden Bewertungen in sowohl positive als auch negative Richtung gleich verteilen. In 11,44 % der Fälle kommt es zu einer stark unterschiedlichen Bewertung. Hierbei stellte sich von den 74 Feldern nur ein Feld als Nicht-Risikozahnfeld heraus. Die größte Verteilung findet wieder im Frontzahnbereich statt (Anhang A7).

Testbürste 10 zeigt von allen getesteten Zahnbürsten die größte Übereinstimmung zwischen P1 und P2. Bei 85 % der Bewertungen kamen die beiden Auswerter zum gleichen Ergebnis, dagegen nur bei 44 % bei P1 und APP und bei 45 % bei P2 und APP. Die APP zeigt hier wieder eine deutlich höhere Bewertung der Zahnfelder als die beiden Prüfpersonen. Generell ist mithilfe des t- und des Wilcoxon-Tests ein signifikanter Unterschied feststellbar. 12,65 % der Zahnfelder wurden stark unterschiedlich bewertet, wobei wieder nur ein Feld nicht aus der Gruppe der Risikozahnfelder stammt (s. 5.3).

5.1 Testbürste 2 – Interdentalbürste (IBF/06/13/fünf Durchläufe)

5.1.1 Gesamte Zahnfelder

Die Abbildung 21 (a) zeigt, dass die Übereinstimmung bei der Bewertung der gesamten interdentalen Felder (x,y,z) mit dem Navy-Plaque-Index nach *Lang et al.* (2011) zwischen den drei Auswertern bei 53 % liegt. Der Stichprobenumfang umfasst n=282. Damit sind die beiden Prüfpersonen und die APP mindestens bei jedem zweiten Zahnfeld zum selben Ergebnis gekommen. Das Bewertungsverhältnis zwischen APP vs. P1 und APP vs. P2 ist gleich (13 %). Eine komplette Unstimmigkeit zwischen allen Auswertern liegt bei nur 3 % der gesamten Zahnfelder vor. In Abbildung 21 (b) zeigt sich die deutliche Tendenz einer positiven Abweichung zwischen der Prüfperson P1 und sowohl APP als auch P2.

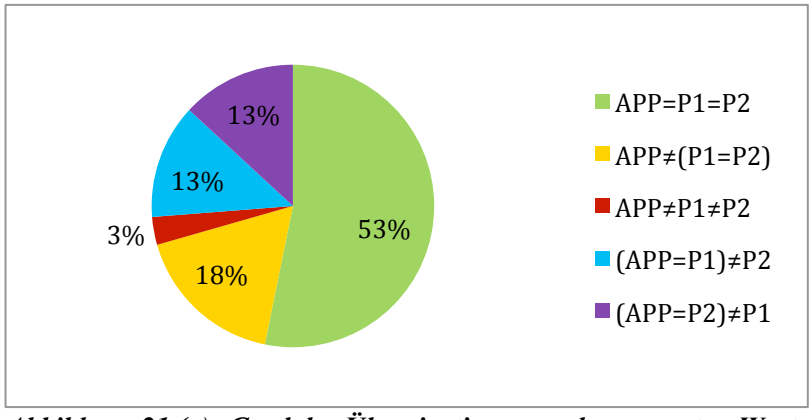

Abbildung 21 (a): Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen

Erläuterungen: Stichprobenumfang n=282. APP: aus dem Prozentsatz der APP abgeleiteter Indexwert. P1, P2: von Prüfperson P1 bzw. P2 festgelegter Indexwert.

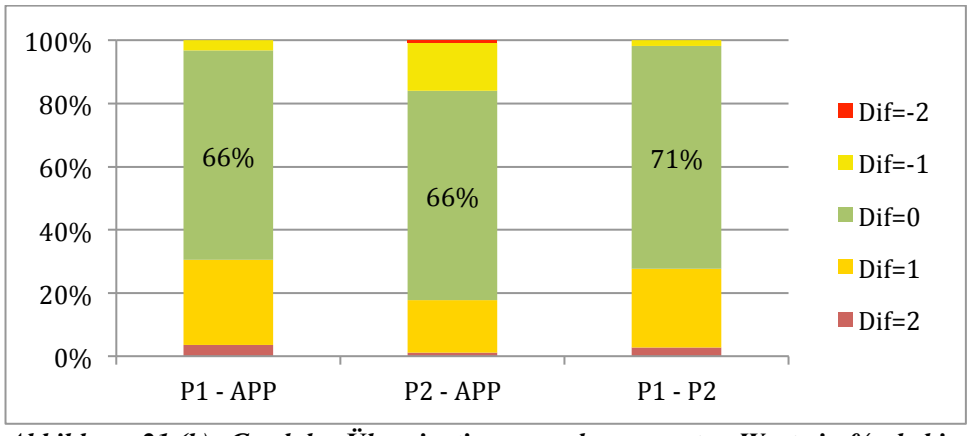

Abbildung 21 (b): Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander

Erläuterungen: Stichprobenumfang n=282. Weitere Erläuterung siehe Abbildung 21 (a). Dif: Differenz zwischen Indexwert des erst- und des zweitgenannten Auswerters. Eine negative Differenz (-) stellt eine niedrigere Bewertung, eine positive Differenz eine höhere Bewertung des erstgenannten Auswerters dar. Bei dem Navi-Plaque-Index ist eine Differenz von -2 bis 2 möglich, bei dem QHI eine von -5 bis 5.

Tabelle 2: Grad der Übereinstimmung der gesamten Zahnfelder von Automatisierter Plaque-Planimetrie, Prüfpersonen 1 und 2 mithilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	**P1**	**P2**
Mittelwert	1,38	1,69	1,40
Median	1	2	2

Bivariate Tests	**t**	**prob(t)**	**sign. (p=0,05)**	**W**	**prob(W)**	**sign. (p=0,05)**	**κ**
P1 vs. P2	**4,99**	<0,01	**ja**	**3,02**	<0,01	**ja**	0,426
P1 vs. APP	**6,10**	<0,01	**ja**	**4,90**	<0,01	**ja**	0,378
P2 vs. APP	0,33	0,738	nein	1,19	0,234	nein	0,444

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=282. t: zweiseitiger Standard-t-Test des Mittelwertes. W: zweiseitiger Wilcoxon-Test des Medians. prob(Test): p-Wert des ermittelten Testwertes. sign. (p=0,05)=ja: Die Nullhypothese eines gleichen Mittelwertes/Medians der untersuchten Datenreihen kann zugunsten der Alternativhypothese eines voneinander verschiedenen Wertes bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von höchstens 5 % abgelehnt werden.

Die Prüfperson P1 erzielte bei der Testbürste 2 mit 66 % den gleichen Grad an Übereinstimmung mit der APP wie die Prüfperson P2 (s. Abbildung 21 (b)). Während sich bei P2 vs. APP die ungleichen Bewertungen symmetrisch verteilen, ist es bei der Kombination P1 vs. APP fast ausschließlich so, dass P1, erkennbar anhand des Mittelwertes, einen höheren Indexwert wählt als die APP (vgl. Tabelle 2). P2 weicht, wie auch schon in Abbildung 21 (b) zu sehen ist, nicht signifikant von der APP ab. Demzufolge erreicht P1 einen höheren durchschnittlichen Planimetrie-Index als P2 und die APP, was durch den erhöhten Mittelwert von 1,69 deutlich wird.

5.1.2 Distale Zahnfelder

Die Abbildung 22 (links) zeigt die Übereinstimmung von 55 % zwischen den drei Auswertern bei der Bewertung der distalen Zahnfelder. Der Stichprobenumfang beträgt n=132. Damit kamen die beiden Prüfpersonen und die APP mindestens bei jedem zweiten Zahnfeld zum selben Ergebnis. Das Bewertungsverhältnis zwischen APP vs. P1 und P1 vs. P2 ist fast gleich. Eine komplette Unstimmigkeit zwischen allen Auswertern liegt bei nur 1 % der distalen Zahnfelder vor. In Abbildung 22 (rechts) wird deutlich, dass das Ergebnis der Prüfperson P1 sowohl gegenüber der APP als auch gegenüber P2 eine erkennbare Tendenz einer positiven Abweichung aufweist. Die Übereinstimmung bei P1 vs. APP liegt bei den distalen Werten 4 % *Prozentpunkte* höher als bei den gesamten ausgewerteten Zahnfeldern (s. Abbildung 21 (b)).

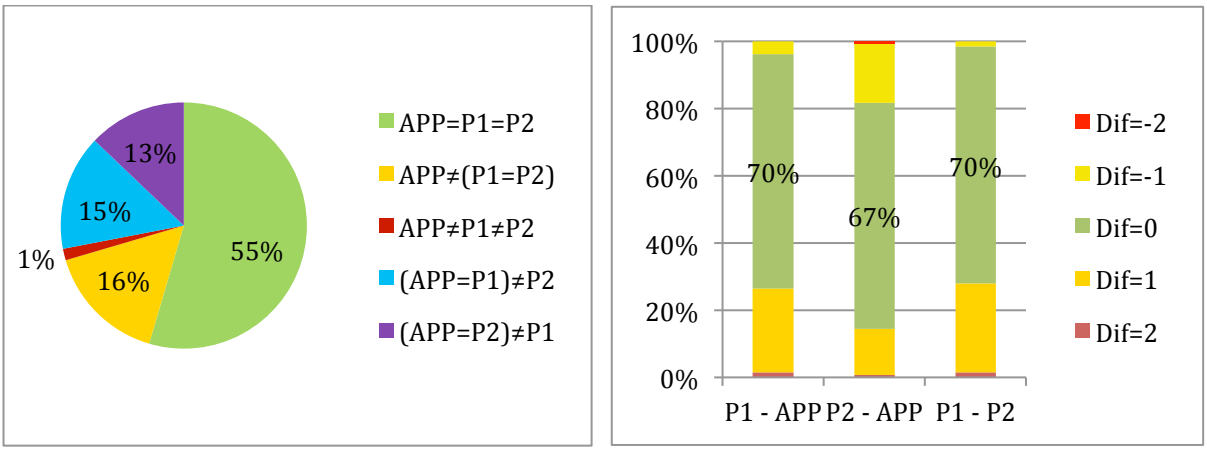

Abbildung 22: Grad der Übereinstimmung der distalen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=132. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle 3: Grad der Übereinstimmung der distalen Zahnfelder von Automatisierter Plaque-Planimetrie, Prüfpersonen 1 und 2 mithilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	**P1**	**P2**
Mittelwert	1,44	1,68	1,40
Median	2	2	2

Bivariate Tests	**t**	**prob(t)**	**sign. (p=0,05)**	**W**	**prob(W)**	**sign. (p=0,05)**	**κ**
P1 vs. P2	**3,31**	<0,01	**ja**	**2,08**	0,038	**ja**	0,423
P1 vs. APP	**3,38**	<0,01	**ja**	**2,87**	<0,01	**ja**	0,423
P2 vs. APP	-0,42	0,674	nein	0,35	0,727	nein	0,454

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=132. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

Die Prüfperson P2 und die APP unterscheiden sich bei den distalen Zahnfeldern nur in einem nicht signifikanten Maße. Der durchschnittlich gewählte Indexwert im distalen Bereich liegt für P1 bei 1,68, für P2 bei 1,40 und für die APP bei 1,44. P1 erzielt hier leicht höhere Übereinstimmungswerte mit der APP als in der Gesamtbetrachtung. Die Signifikanztests zeigen Ergebnisse, die bei der Gesamtbetrachtung zu erwarten gewesen sind.

5.1.3 Mesiale Zahnfelder

Die Abbildung 23 (links) zeigt bei den mesialen Zahnfeldern eine Übereinstimmung zwischen den drei Auswertern von 52 %. Der Stichprobenumfang ist n=150. Damit kamen die beiden Prüfpersonen und die APP mindestens bei jedem zweiten Zahnfeld zum selben Ergebnis. Das Bewertungsverhältnis zwischen APP vs. P1, APP vs. P2 und P1 vs. P2 ist verschieden, bewegt sich jedoch im Bereich zwischen 63 % und 71 %. Eine komplette Unstimmigkeit zwischen allen Auswertern liegt bei nur 5 % der mesialen Zahnfelder vor. In Abbildung 23 (rechts) wird deutlich, dass das Ergebnis von Prüfperson P1 sowohl zur APP als auch zu P2 eine erkennbare Tendenz einer positiven Abweichung aufweist. Die Übereinstimmung bei P1 vs. APP liegt im Vergleich zu den gesamt und distal ausgewerteten Zahnfeldern bei den mesialen Werten mit 63 % am niedrigsten (s. Abbildung 21 (b) und Abbildung 22 (rechts)).

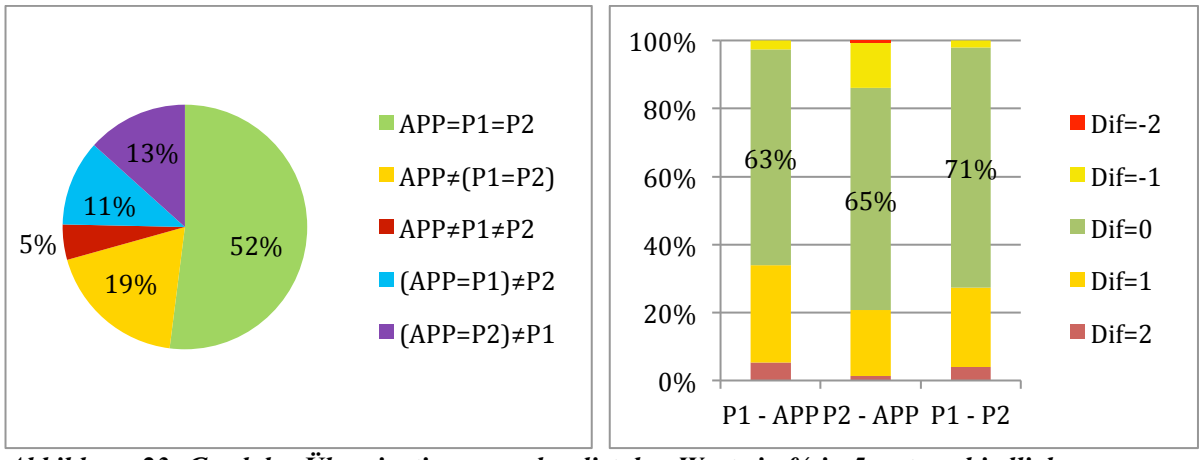

Abbildung 23: Grad der Übereinstimmung der distalen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=150. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle 4: Grad der Übereinstimmung der mesialen Zahnfelder von Automatisierter Plaque-Planimetrie, Prüfpersonen 1 und 2 mithilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	**P1**	**P2**
Mittelwert	1,33	1,69	1,40
Median	1	2	2

Bivariate Tests	**t**	**prob(t)**	**sign. (p=0,05)**	**W**	**prob(W)**	**sign. (p=0,05)**	**κ**
P1 vs. P2	**3,73**	<0,01	**ja**	**2,19**	0,029	**ja**	0,429
P1 vs. APP	**5,16**	<0,01	**ja**	**4,03**	<0,01	**ja**	0,342
P2 vs. APP	0,82	0,413	nein	1,30	0,195	nein	0,435

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=150. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

In Tabelle 4 fällt die deutliche Tendenz beim Vergleich der Prüfperson P1 mit der APP wieder ins Auge. P1 bewertet über 30 % der Zahnfelder mit höheren Indexwerten als die APP. In über 5 % der Fälle wählt der Auswerter P1 sogar den Index von 2, während die APP den Wert PI=0 vergibt (vgl. hierzu auch Tabelle 5). Es liegt keine Veränderung bei den Ergebnissen der Signifikanztests im Vergleich zur Gesamtbetrachtung vor.

5.1.4 Stark unterschiedlich bewertete Zahnfelder

Bei der Testbürste 2 kommt es in 16 von 282 Zahnfeldbewertungen zu Abweichungen von 2 Indexwerten zwischen zwei Auswertern (dies entspricht 5,67 % aller Bewertungen).

Tabelle 5: Zahnfelder mit stark unterschiedlicher Bewertung zwischen Automatisierter Plaque-Planimetrie, Prüfpersonen 1 und 2 anhand der mesialen (M) und distalen (D) Zahnflächen und der approximalen Zahnfelder X, Y und Z des Navy-Plaque-Index

APP	P1	P2	Zahnfläche	Zahnfeld	Durchlauf
0	2	1	48M	Y	1
0	2	0	41D	Z	2
1	2	0	31D	Y	2
0	2	1	48M	Y	2
2	2	0	31M	Y	2
0	2	0	32M	Y	2
0	2	2	32D	Y	3
0	1	2	31M	Z	3
2	1	0	42D	Z	4
0	2	1	41M	Z	4
0	2	1	32M	Z	5
0	2	2	48M	Y	5
0	2	0	43M	Z	5
1	2	0	42M	Z	5
0	2	0	41M	Z	5
1	2	0	31M	Z	5

5.2 Testbürste 7 – elektrische Zahnbürste (EZB/05/13/sieben Durchläufe)

5.2.1 Gesamte Zahnfelder

Die Abbildung 24 (a) zeigt die Übereinstimmung der gesamten Indexwerte zwischen den drei Auswertern von 49 %. Es wurde der modifizierte Quigley-Hein-Index nach *Turesky et al.* (1972) von den Prüfpersonen und der für die APP speziell modifizierte QHI (vgl. 4.3.2) verwendet. Der Stichprobenumfang umfasst n=136. Die beiden Prüfpersonen und die APP kamen fast bei jedem zweiten Zahnfeld zum selben Ergebnis. Das Bewertungsverhältnis zwischen APP vs. P1, APP vs. P2 und P1 vs. P2 liegt jeweils über 60 %. Eine komplette Unstimmigkeit zwischen den Auswertern liegt bei 7 % aller erhobenen Indexwerte vor. Abbildung 24 (b) zeigt mit -4 die größte Differenz zwischen P2 und APP. Über 90 % der vergebenen Indexwerte haben eine maximale Differenz von +1 bzw. -1.

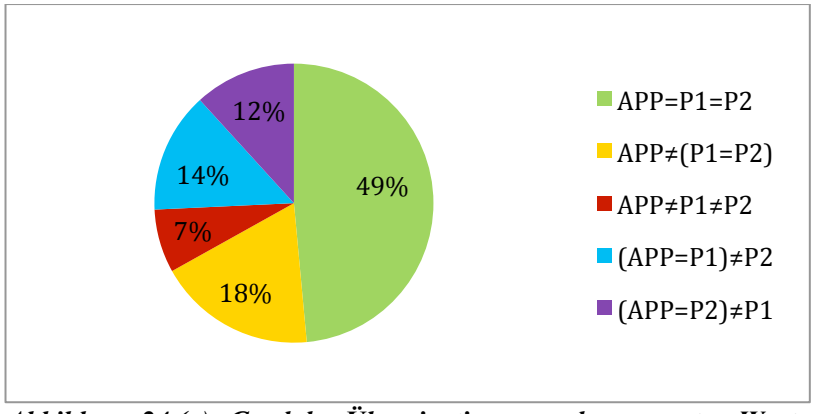

Abbildung 24 (a): Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=136. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a).

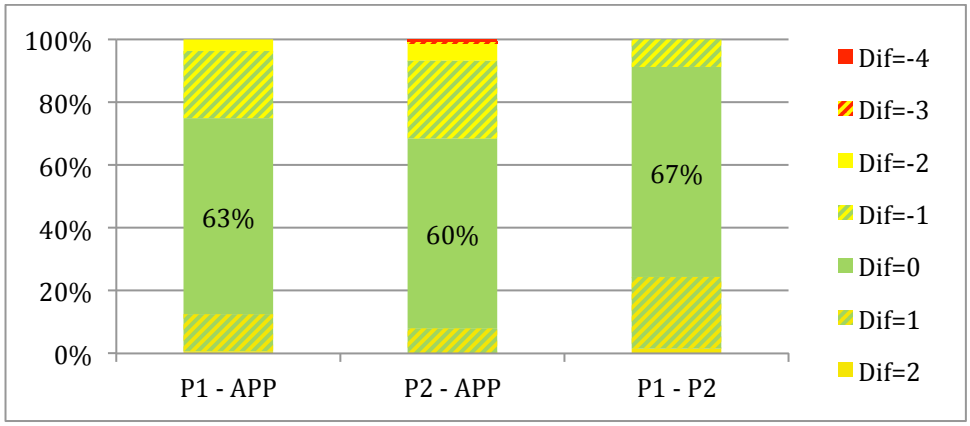

Abbildung 24 (b): Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=136. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (b).

Tabelle 6: Grad der Übereinstimmung der gesamten Zahnfelder von Automatisierter Plaque-Planimetrie, Prüfpersonen 1 und 2 mithilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	**P1**	**P2**
Mittelwert	3,93	3,78	3,61
Median	4	4	4

Bivariate Tests	**t**	**prob(t)**	**sign. (p=0,05)**	**W**	**prob(W)**	**sign. (p=0,05)**	**κ**
P1 vs. P2	1,30	0,195	nein	1,08	0,281	nein	0,553
P1 vs. APP	-1,30	0,195	nein	0,99	0,318	nein	0,482
P2 vs. APP	**-2,69**	<0,01	**ja**	**2,25**	0,025	**ja**	0,444

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=136. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

Während es keinen signifikanten Unterschied zwischen P1 und der APP gibt, sind die Mittelwerte von P2 und APP (3,61 und 3,93) zu unterschiedlich, um aus einer gleichen Grundgesamtheit stammen zu können, und weisen damit eine signifikante Abweichung auf. In Tabelle 6 wird dieses fettgedruckt hervorgehoben. P1 vs. P2 weisen ebenfalls keinen signifikanten Unterschied auf.

5.2.2 Bukkale Zahnfelder

Die Abbildung 25 (links) zeigt die Übereinstimmung der bukkalen Indexwerte zwischen den drei Auswertern von 45 %. Der Stichprobenumfang beträgt n=67. Damit kamen die beiden Prüfpersonen und die APP fast bei jedem zweiten Zahnfeld zum selben Ergebnis. Das Bewertungsverhältnis zwischen APP vs. P1, APP vs. P2 und P1 vs. P2 liegt zwischen 55 % und 67 %. Eine komplette Unstimmigkeit zwischen den Auswertern liegt bei 8 % aller erhobenen Indexwerte vor. Abbildung 25 (rechts) zeigt die größte Differenz von +2 bzw. -2. Fast 100 % der Indexwerte haben eine maximale Differenz von +1 bzw. -1. Die größte Übereinstimmung gibt es mit 67 % zwischen den Prüfpersonen P1 und P2.

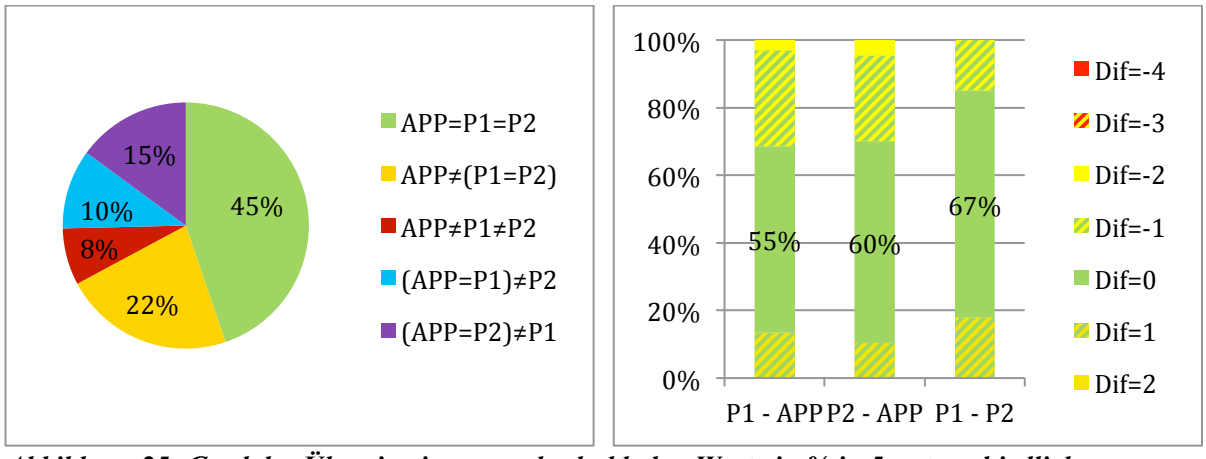

Abbildung 25: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=67. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle 7: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Zahnfelder von Automatisierter Plaque-Planimetrie, Prüfpersonen 1 und 2 mithilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	**P1**	**P2**
Mittelwert	3,46	3,25	3,22
Median	3	3	3

Bivariate Tests	**t**	**prob(t)**	**sign. (p=0,05)**	**W**	**prob(W)**	**sign. (p=0,05)**	**κ**
P1 vs. P2	0,18	0,858	nein	0,10	0,917	nein	0,527
P1 vs. APP	-1,35	0,178	nein	1,37	0,171	nein	0,357
P2 vs. APP	-1,54	0,126	nein	1,27	0,204	nein	0,412

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=67. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

Alle drei Auswerter verwenden durchschnittliche QHI-Werte, die sich nicht signifikant voneinander unterscheiden. Der Median ist mit 3 identisch. Der höchste Mittelwert wird von der APP mit 3,46 angegeben und liegt ungefähr 0,2 Punkte höher als der der beiden Prüfpersonen.

5.2.3 Linguale Zahnfelder

Die Abbildung 26 (links) illustriert die Übereinstimmung der lingualen Indexwerte zwischen den drei Auswertern von 52 %. Der Stichprobenumfang beträgt n=69. Damit kamen die beiden Prüfpersonen und die APP bei mehr als der Hälfte der Zähne zum selben Ergebnis. Das Bewertungsverhältnis bei APP vs. P1, APP vs. P2 und P1 vs. P2 liegt zwischen 61 % und 70 % und ist damit insgesamt höher als bei den bukkal erhobenen Werten. Eine komplette Unstimmigkeit zwischen den Auswertern liegt bei 7 % der Bewertungen vor. Abbildung 26 (rechts) zeigt die größte Differenz bei P2 vs. APP mit einer Abweichung von -4. Über 90 % der Indexwerte haben eine maximale Differenz von +1 bzw. -1. Die größte Übereinstimmung findet sich mit 70 % zwischen der Prüfperson P1 und der APP. Bei P1 vs. P2 gibt es vor allem eine positive Differenz, da von P2 im Schnitt niedrigere Indexwerte vergeben wurden (s. Tabelle 8).

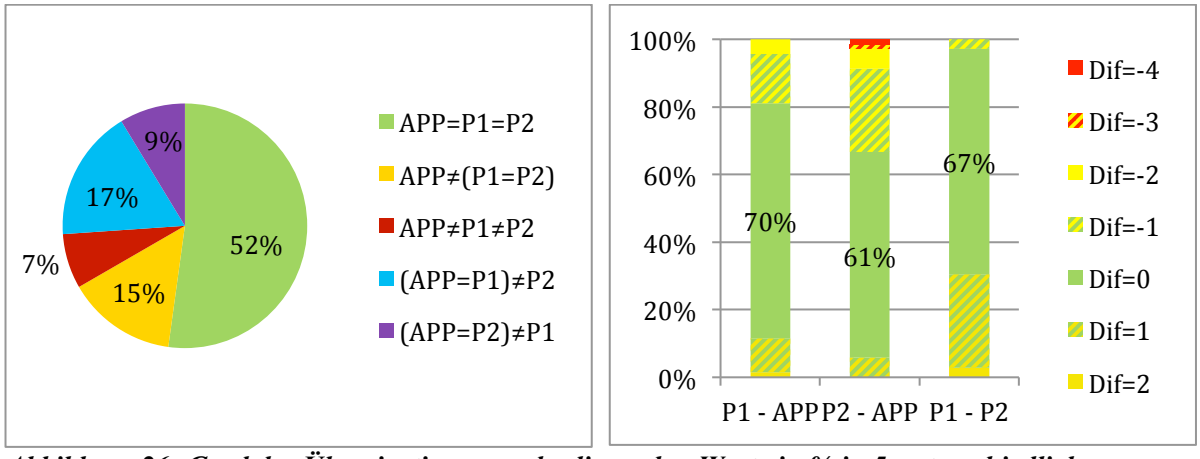

Abbildung 26: Grad der Übereinstimmung der lingualen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=69. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle 8: Grad der Übereinstimmung der lingualen Zahnfelder von Automatisierter Plaque-Planimetrie, Prüfpersonen 1 und 2 mithilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests s. o.

	APP	**P1**	**P2**
Mittelwert	4,39	4,29	3,99
Median	4	5	4

Bivariate Tests	**t**	**prob(t)**	**sign. (p=0,05)**	**W**	**prob(W)**	**sign. (p=0,05)**	**κ**
P1 vs. P2	1,81	0,073	nein	1,78	0,075	nein	0,506
P1 vs. APP	-0,74	0,462	nein	0,14	0,888	nein	0,501
P2 vs. APP	**-2,66**	<0,01	**ja**	**2,12**	0,034	**ja**	0,389

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=69. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

Die Prüfperson P2 bewertete die lingualen Zahnflächen signifikant niedriger als die APP, was in Tabelle 8 fettgedruckt dargestellt ist. Der Unterschied zwischen P1 und APP sowie zwischen P1 und P2 ist insignifikant. Der Median von P1 liegt bei 5, der von APP und P2 bei 4. Den höchsten Mittelwert erreicht die APP mit 4,39.

5.2.4 Stark unterschiedlich bewertete Zahnfelder

Bei der Testbürste 7 kommt es in 2 von 136 bewerteten Zahnfeldern zu Abweichungen des QHI von mehr als 2 Indexwerten zwischen zwei Bewertern (dies entspricht 1,47 % der Bewertungen).

Tabelle 9: Zahnfelder mit stark unterschiedlicher Bewertung zwischen Automatisierter Plaque-Planimetrie, Prüfpersonen 1 und 2 anhand der lingualen (l) Zahnflächen des QHI

APP	**P1**	**P2**	**Zahnfläche**	**Durchlauf**
4	2	0	42l	7
4	2	1	41l	7

5.3 Testbürste 10 – Handzahnbürste (MZB/04/13/vier Durchläufe)

5.3.1 Gesamte Zahnfelder

Die Abbildung 27 (a) veranschaulicht die Übereinstimmung von 38 % bei der Bewertung der gesamten Zahnfelder, lingual und bukkal, mit dem Navy-Plaque-Index nach *Lang et al.* (2011) zwischen den drei Auswertern. Damit liegt die Deckungsgleichheit zwischen allen Auswertern deutlich niedriger als bei den zuvor beschriebenen Testbürsten 2 und 7. Der Stichprobenumfang ist n=648. Eine komplette Unstimmigkeit zwischen den Auswertern liegt bei nur 2 % aller erhobenen Indexwerte vor. Abbildung 27 (a) und (b) verdeutlichen die mit 85 % besonders hohe Übereinstimmung zwischen den beiden Prüfpersonen P1 und P2 bei einer sehr großen Anzahl von bewerteten Feldern.

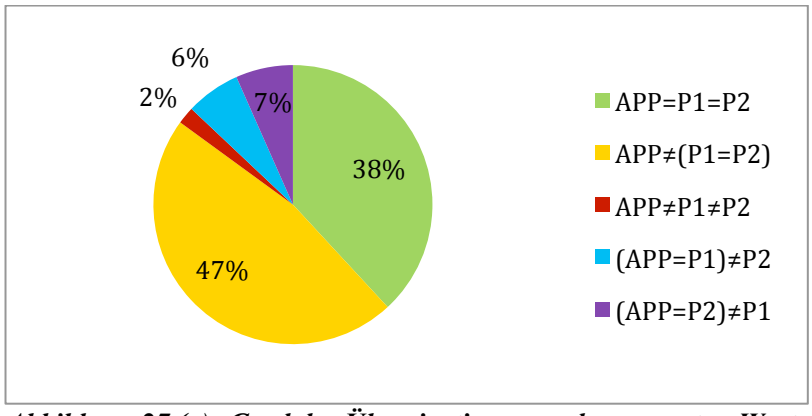

Abbildung 27 (a): Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=648. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a).

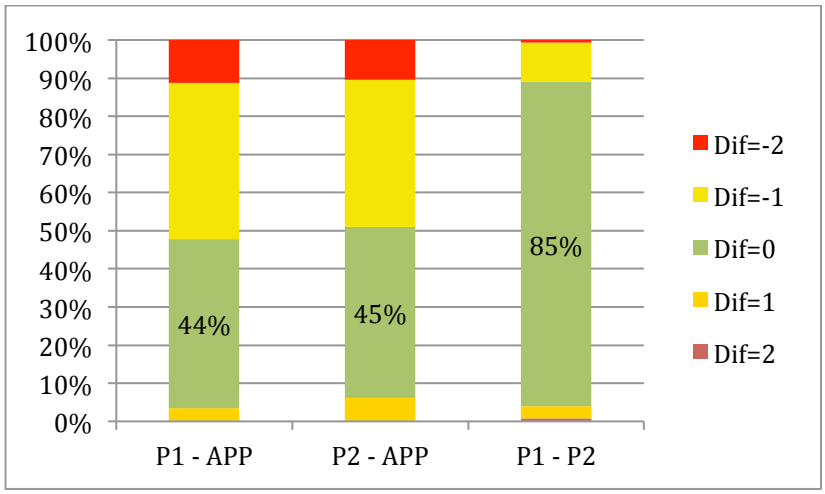

Abbildung 27 (b): Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=648. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (b).

Abbildung 27 (b) zeigt die größte Differenz von +2 bzw. -2. Die Übereinstimmungen zwischen P1 vs. APP und P2 vs. APP liegen leicht unter 50 %. Eine klare Abweichung aufgrund einer im Schnitt höheren Bewertung der APP wird anhand der beiden ersten Säulendiagramme von Abbildung 27 (b) deutlich. Über 50 % der Werte haben die Prüfpersonen niedriger angegeben als die APP. 10 % dieser Bewertungen weisen eine Differenz von -2 auf. Damit hat die APP in 10 % der Fälle eine 2 vergeben, in denen P1 und P2 mit einer 0 bewerteten.

Tabelle 10: Grad der Übereinstimmung der gesamten Zahnfelder von Automatisierter Plaque-Planimetrie, Prüfpersonen 1 und 2 mithilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	**P1**	**P2**
Mittelwert	0,73	0,14	0,20
Median	1	0	0

Bivariate Tests	**t**	**prob(t)**	**sign. (p=0,05)**	**W**	**prob(W)**	**sign. (p=0,05)**	**κ**
P1 vs. P2	**-2,92**	<0,01	**ja**	**2,04**	0,042	**ja**	0,435
P1 vs. APP	**-19,28**	<0,01	**ja**	**15,06**	<0,01	**ja**	0,066
P2 vs. APP	**-16,47**	<0,01	**ja**	**13,25**	<0,01	**ja**	0,067

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=647. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

Die Prüfpersonen P1 und P2 erreichen, wie aus Abbildung 27 (b) ersichtlich, bei 85 % der Bewertungen ein übereinstimmendes Ergebnis. In mehr als 90 % dieser Fälle besteht die gleiche Bewertung aus der Vergabe eines Planimetrie-Index mit dem Wert 0 (503 von 551 übereinstimmenden Ergebnissen). In diesem Zusammenhang ist von besonderem Interesse, dass die APP von diesen 503 Zahnfeldern lediglich 220 ebenfalls mit dem Index 0 bewertet hat. Der hohe Wert von 47 % Übereinstimmung von P1 und P2, bei dem die APP anders bewertet hat, erklärt sich aus dieser Diskrepanz. Der Median der APP liegt bei 1, der von P1 und P2 bei 0. Die im Schnitt höhere Bewertung der APP zeigt der Mittelwert von 0,73, der bei den Prüfpersonen nicht mehr als 0,2 erreicht. Eine statistisch signifikante Diskrepanz liegt bei allen Auswertern vor, jedoch mit deutlicher Abweichung zwischen der APP und den Prüfpersonen.

5.3.2 Bukkale Zahnfelder

Die Abbildung 28 (links) veranschaulicht die Übereinstimmung von 42 % der bukkalen Indexwerte zwischen den drei Auswertern. Der Stichprobenumfang beträgt n=324. Eine komplette Unstimmigkeit zwischen den Auswertern liegt bei 3 % aller erhobenen Indexwerte vor. Abbildung 28 (rechts) zeigt die größte Differenz von +2 bzw. -2. Beide Abbildungen zeigen mit 80 % die größte Übereinstimmung zwischen den Prüfpersonen P1 vs. P2 und eine ähnliche Kongruenz bei P1 vs. APP und P2 vs. APP mit knapp über 50 %.

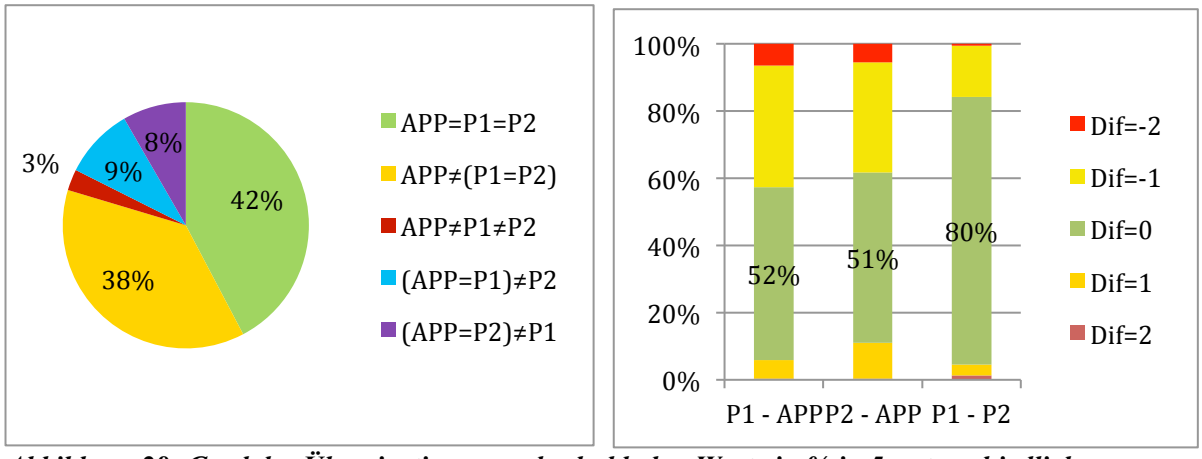

Abbildung 28: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=324. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle 11: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Zahnfelder von Automatisierter Plaque-Planimetrie, Prüfpersonen 1 und 2 mithilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	**P1**	**P2**
Mittelwert	0,61	0,18	0,29
Median	1	0	0

Bivariate Tests	**t**	**prob(t)**	**sign. (p=0,05)**	**W**	**prob(W)**	**sign. (p=0,05)**	**κ**
P1 vs. P2	**-2,86**	<0,01	**ja**	**2,32**	0,021	**ja**	0,419
P1 vs. APP	**-9,88**	<0,01	**ja**	**8,02**	<0,01	**ja**	0,097
P2 vs. APP	**-7,18**	<0,01	**ja**	**5,89**	<0,01	**ja**	0,086

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=324. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

Tabelle 11 verdeutlicht anhand des Medians von 1 und des Mittelwertes von 0,61 die im Schnitt höhere Bewertung der APP verglichen mit den beiden Prüfpersonen. Ein signifikanter Unterschied liegt, wie bei den gesamten Werten (s. Tabelle 10), bei allen Auswertern vor, jedoch stechen auch hier die größeren Abweichungen zwischen der APP und den klinischen Auswertern ins Auge.

5.3.3 Linguale Zahnfelder

Die Abbildung 29 (links) zeigt, dass die Übereinstimmung der lingualen Indexwerte zwischen den drei Auswertern bei 34 % liegt. Diese ist fast 10 % niedriger als die der bukkal vergebenen Werte. Der Stichprobenumfang beträgt n=324. Eine komplette Unstimmigkeit zwischen den Auswertern liegt bei gerade mal 1 % aller erhobenen Indexwerte vor. Abbildung 29 (rechts) zeigt die deutliche Differenz von -1 und -2 bei P1 vs. APP sowie bei P2 vs. APP. Beide Abbildungen zeigen die größte Übereinstimmung mit 90 % links 91 % zwischen den Prüfpersonen P1 vs. P2.

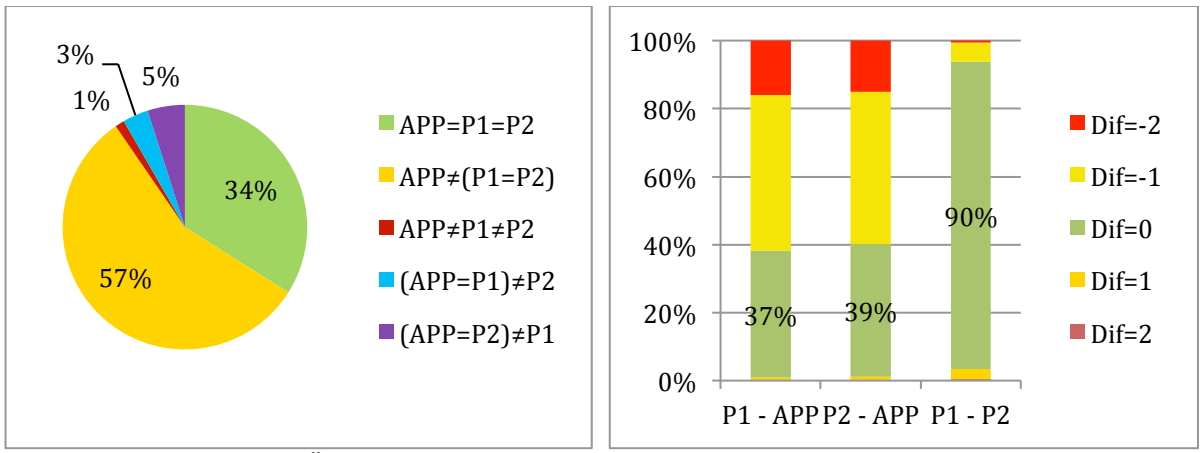

Abbildung 29: Grad der Übereinstimmung der lingualen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=324. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle 12 verdeutlicht anhand des Medians von 1 und des Mittelwertes von 0,86 die im Schnitt höhere Bewertung der APP im Vergleich zu den beiden Prüfpersonen. Ein signifikanter Unterschied liegt bei P1 vs. APP und P2 vs. APP vor, nicht aber zwischen den beiden Prüfpersonen.

Tabelle 12: Grad der Übereinstimmung der lingualen Zahnfelder von Automatisierter Plaque-Planimetrie, Prüfpersonen 1 und 2 mithilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	0,86	0,09	0,12
Median	1	0	0

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	-1,11	0,267	nein	0,55	0,584	nein	0,422
P1 vs. APP	**-17,76**	<0,01	**ja**	**13,19**	<0,01	**ja**	0,053
P2 vs. APP	**-16,56**	<0,01	**ja**	**12,66**	<0,01	**ja**	0,074

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=324. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

Tabelle 12 verdeutlicht anhand des Medians von 1 und des Mittelwertes von 0,86 die im Schnitt höhere Bewertung der APP im Vergleich zu den beiden Prüfpersonen. Ein signifikanter Unterschied liegt bei P1 vs. APP und P2 vs. APP vor, nicht aber zwischen den beiden Prüfpersonen.

5.3.4 Bukkale Risikozahnfelder A, B, C, D, F

Die Abbildung 30 (links) zeigt die Übereinstimmung der Bewertung der bukkalen Risikofelder zwischen den drei Auswertern von 25 %. Der Stichprobenumfang beträgt n=180. Eine komplette Unstimmigkeit zwischen den Auswertern liegt bei 5 % aller erhobenen Indexwerte vor. Abbildung 30 (rechts) zeigt die deutliche Differenz von -1 und -2 in knapp 60 % der Fälle bei P1 vs. APP sowie bei P2 vs. APP. Die APP wertete demzufolge höher als die beiden Prüfpersonen. Beide Abbildungen zeigen mit 79 % die größte Übereinstimmung zwischen den Prüfpersonen P1 vs. P2.

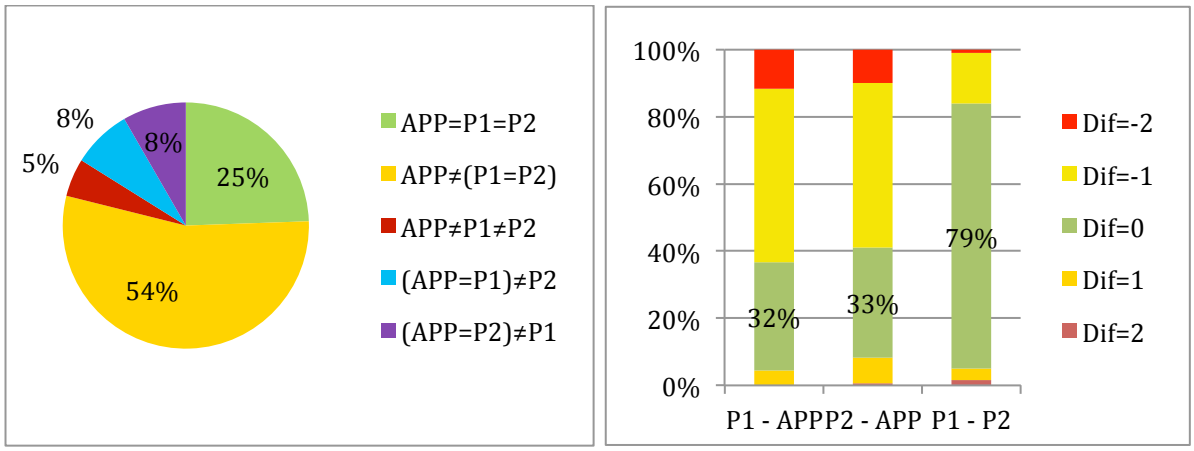

Abbildung 30: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Risikofelder (A, B, C, D, F) in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=180. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

In Tabelle 13 wird durch den Mittelwert von 0,91 und den Median von 1 der APP nochmals ihre höhere durchschnittliche Bewertung gegenüber den klinischen Auswertern erkennbar. Ein signifikanter Unterschied zwischen den drei Auswertern wird bei fast allen durchgeführten Tests deutlich. Lediglich der Wilcoxon-Test weist bei P1 vs. P2 einen als nicht signifikant zu betrachtenden Wert auf, sodass die Nullhypothese nicht abgelehnt werden kann.

Tabelle 13: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Risikofelder (A, B, C, D, F) von Automatisierter Plaque-Planimetrie, Prüfpersonen 1 und 2 mithilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	**P1**	**P2**
Mittelwert	0,91	0,20	0,31
Median	1	0	0

Bivariate Tests	**t**	**prob(t)**	**sign. (p=0,05)**	**W**	**prob(W)**	**sign. (p=0,05)**	**κ**
P1 vs. P2	**-1,99**	0,048	**ja**	1,67	0,094	nein	0,414
P1 vs. APP	**-11,85**	<0,01	**ja**	**9,51**	<0,01	**ja**	0,037
P2 vs. APP	**-9,69**	<0,01	**ja**	**8,06**	<0,01	**ja**	<0

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=180. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

5.3.5 Linguale Risikozahnfelder A, B, C, D, F

Die Abbildung 31 (links) zeigt die Übereinstimmung der lingualen Risikofelder zwischen den drei Auswertern von nur 16 %. Der Stichprobenumfang beträgt n=180. Eine komplette Unstimmigkeit zwischen den Auswertern liegt bei 2 % aller erhobenen Indexwerte vor. Abbildung 31 (rechts) zeigt die deutliche Differenz von -1 und -2 in knapp 80 % der Fälle bei P1 vs. APP sowie bei P2 vs. APP. Damit ist der Unterschied zwischen der APP und den Prüfpersonen auch im Vergleich zu den bukkalen Risikofeldern hier deutlich erhöht. Beide Abbildungen zeigen mit 88 % die größte Übereinstimmung zwischen den Prüfpersonen P1 vs. P2. Die Risikofelder (A, B, C, D, F) weisen die größten Abweichungen zwischen der APP und den Prüfpersonen auf. Bei zukünftig verbessernden Maßnahmen zwischen klinischer und computergestützter Auswertung sollte daher ein besonderes Augenmerk auf die Risikofelder gerichtet werden.

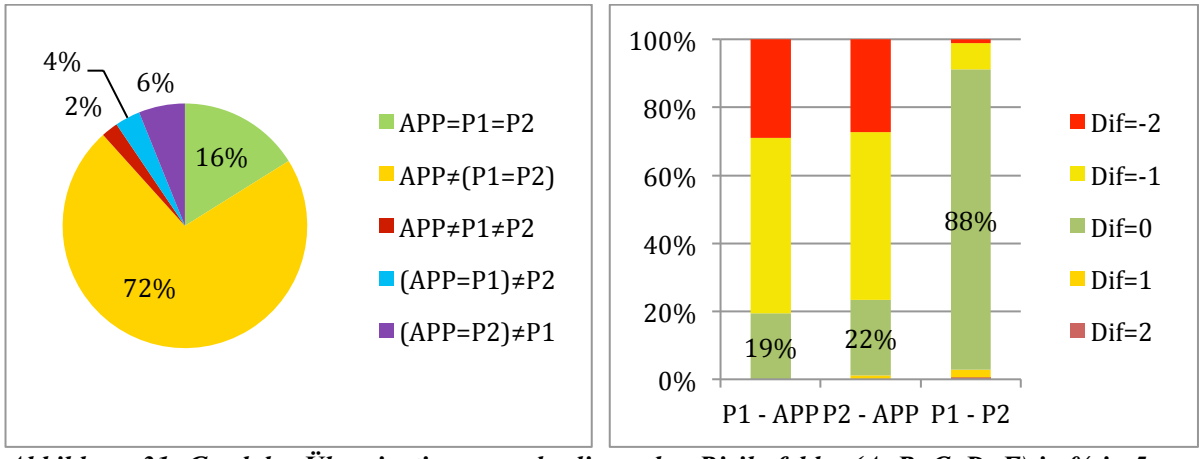

Abbildung 31: Grad der Übereinstimmung der lingualen Risikofelder (A, B, C, D, F) in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=180. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Die Prüfpersonen P1 und P2 unterscheiden sich lediglich in einem nicht signifikanten Maße voneinander. Der Mittelwert der APP weicht um mindestens 1 Indexwert von P1 und P2 ab. Bei P1 vs. APP und P2 vs. APP werden sehr starke Diskrepanzen hinsichtlich der Signifikanz deutlich.

Tabelle 14: Grad der Übereinstimmung der lingualen Risikofelder (A, B, C, D, F) von Automatisierter Plaque-Planimetrie, Prüfpersonen 1 und 2 mithilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	1,18	0,09	0,16
Median	1	0	0

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	-1,57	0,118	nein	0,90	0,367	nein	0,337
P1 vs. APP	**-19,12**	<0,01	**ja**	**12,82**	<0,01	**ja**	0,023
P2 vs. APP	**-16,94**	<0,01	**ja**	**12,07**	<0,01	**ja**	0,036

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=180. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

5.3.6 Stark unterschiedlich bewertete Zahnfelder

Bei der Testbürste 10 kommt es in 82 von 648 bewerteten Zahnfeldern zu Abweichungen von 2 Indexwerten zwischen zwei Beobachtern; dies entspricht 12,65 % der Bewertungen. Von den 82 stark unterschiedlich bewerteten Zahnfeldern gehören 77 zu den Risikofeldern A, B, C, D, F. Außerdem handelt es sich bei 65 von 82 Zähnen um Frontzähne. Besonders hoch ist damit die Unstimmigkeit zwischen der APP und den Prüfpersonen im gingivalen und approximalen Frontzahnbereich (vgl. A8).

6. Diskussion

Mikrobielle Biofilme sind eine wichtige Ursache bei der Entstehung von Karies. Somit ist eine regelmäßige Biofilmkontrolle ein entscheidender Ansatzpunkt bei der Kariesprävention (Rupf et al. 2014).

Lang et al. (1973) zeigten, dass die Etablierung einer reifen dentalen Plaque ungefähr 24 bis 36 Stunden dauert. Die Komplexität und die Stoffwechselvorgänge sowie die Mikroorganismen der Plaque sollten immer wieder hinterfragt und erforscht werden, um ein besseres Verständnis der Pathogenese einer Karies zu erlangen (McLean 2014).

Das Ziel der Hersteller von aktuellen Zahnpflegeprodukten sollte eine zufriedenstellende Entfernung dieser etablierten Plaque sein. Neben der Handhabung durch den Patienten ist besonders die Effizienz innovativer Zahnpflegeprodukte von großer Bedeutung. *Deacon et al.* führten 2010 mithilfe verschiedener Datenbanken (Cochrane, Central, Medline, Embase und Cinhal) einen Cochrane-Review über Studien durch, die elektrische Zahnbürsten miteinander verglichen, die entweder oszillierend, rotierend, wischend (side-to-side) oder multidimensional verfahren konnten und mithilfe von Plaque-Indizes (QHI, QHI modifiziert nach Turesky et al., PI nach Silness und Löe) und gingivalen Indizes (Gingivaler Index nach Löe und Silness, PBI) bewertet worden waren. Insgesamt konnten 17 Studien aus den Jahren bis 2010 gefunden werden, die den in dem Review beschriebenen Auswahlkriterien entsprachen. Das Ergebnis war ein klinisch insignifikanter Vorteil von rotierenden gegenüber wischenden (side-to-side) Zahnbürsten. Ähnlich aufgebaut jedoch aktueller und von größerem Umfang ist das Update eines Reviews aus dem Jahre 2005 von *Yaacob et al.* (2014). Hierbei wurden insgesamt 56 verschiedene Studien im Zeitraum von 1964 bis 2011 mit über fünftausend Teilnehmern verglichen, denen nach dem Zufallsprinzip entweder eine elektrische oder eine Handzahnbürste zugeteilt wurde. Eine Verminderung der Plaque-Anteile und niedrigeres Gingivitis-Risiko konnten festgestellt werden, jedoch war ein langfristiger Nutzen und Vorteil einer elektrischen Zahnbürste verglichen zu einer Handzahnbürste für die Zahngesundheit nicht eindeutig. Die Autoren befürworteten die Durchführung weiterer Studien, um einen klinisch relevanten Unterschied zwischen verschiedenen Typen von elektrischen Zahnbürsten zu validieren.

Eine objektive quasi-klinische und gut zu reproduzierende Bewertung von noch nicht veröffentlichten Produkten hilft den Herstellern bei möglichen Verbesserungen, wovon langfristig auch der Endverbraucher profitiert.

6.1 Material

In der hier durchgeführten Studie wurden unterschiedliche Zahnpflegeprodukte zur mechanischen Plaque-Entfernung eingesetzt. U. a. sind Handzahnbürsten, elektrische Zahnbürsten und Interdentalbürsten verwendet worden. Zusätzlich gab es Variationen der Putztechnik je nach Hersteller und Zahnbürste. Generell führte der Zahnputzroboter den Reinigungsvorgang mit zuvor eingestellten Putztechniken durch. Eine Ausnahme stellten allerdings die Reinigungsvorgänge mit den Interdentalbürsten dar, die von drei Prüfern durchgeführt werden mussten, da es noch keine Programmierung des Zahnputzroboters für Interdentalbürsten gab. Bei den verwendeten Testzähnen handelte es sich um Kunststoffzähne der Firma KaVo. Diese bieten durch ihre industrielle Fertigung eine hohe Übereinstimmung miteinander hinsichtlich anatomischer Form und Struktur. Zur Simulation der Plaque wurde eine bestimmte Mischung benutzt, die sich bereits in vorherigen Studien als besonders guter Plaque-Ersatz bewährt hatte (Staufer 2011, Lang et al. 2010). Ein großer Vorteil bestand in der einfachen Herstellung und den Haftungseigenschaften, die mit einer echten dentalen Plaque durchaus vergleichbar sind. Die deutliche Rotfärbung macht zudem einen zusätzlichen Gebrauch von Plaque-Revelatoren überflüssig, da sie sich deutlich von den weißlich-hellen Kunststoffzähnen abhebt.

Auf eine zusätzliche Testzahnpasta ist bewusst verzichtet worden, da sie die Auswertung der APP, die auf einer klar erkennbaren und scanfähigen Oberfläche basiert, unnötig erschweren würde. Hauptsächlich sollte die Reinigungseffizienz bei der rein mechanischen Plaque-Entfernung mit Zahnpflegeprodukten geprüft werden.

6.2 Methodik

6.2.1 Vorbereitung, Durchführung des Putzvorgangs und Fotodokumentation

Zu den einzelnen Arbeitsschritten zählten zunächst die Vorbereitung und Durchführung des Putzvorgangs. Große Bedeutung kommt dabei einer einfachen Handhabung und einer guten Reproduzierbarkeit des Ablaufs zu. Die von ORMED zur Verfügung gestellte SOP-Leitlinie (Standard Operating Procedure) gibt eine sehr genaue Übersicht über die einzelnen Versuchsabläufe und Vorbereitungsmaßnahmen. Somit ist auch ungeübtes Personal in der Lage, nach einer genauen Einweisung mithilfe des SOP die einzelnen Vorgänge mit dem Putzroboter und der APP durchzuführen und zu wiederholen. Sehr wichtig ist die gewissenhafte und korrekte Durchführung der einzelnen Schritte. Die späteren Ergebnisse dürfen nicht durch unsaubere Handhabung der künstlichen Plaque oder durch Nichteinhalten der zeitlichen Abstände verfälscht werden. Dies ist besonders bei der Trocknungsapparatur für die Plaque-Simulation wichtig. Nachdem der Zahnträger mit den Kunststoffzähnen bestückt worden war, musste ein gleichmäßiges Einfärben mit der künstlichen Plaque durch die Apparatur erfolgen. Bei unsachgemäßem Einspannen und zu langem Trocknen sind keine identischen Voraussetzungen mehr für den Putzvorgang des Roboters gegeben. Ein Vergleich von mehreren Zahnbürsten erfordert gleiche Ausgangsbedingungen, damit bei Auffälligkeiten ein Zusammenhang zwischen Zahnbürste und Putzvorgang hergestellt werden kann. Abweichungen bei der Anpresskraft und unsachgemäßes Montieren der Zahnbürste in den Zahnputzroboter führen zu möglichen Fehlinterpretationen und Ungenauigkeiten in der Auswertung. Die für die Prüfpersonen angefertigte Fotodokumentation soll ebenfalls eine gewissenhafte Durchführung ermöglichen. Schlechte Belichtung, unscharfe Bilder oder eine falsche Perspektive auf die zu untersuchenden Zahnfelder steigern den Aufwand der einzelnen Prüfpersonen und erhöhen u. U. die Abweichung bei der individuellen Interpretation. Je mehr Parameter bei der Auswertung zusammentreffen, desto sensibler reagiert diese auf Fehldeutungen des Betrachters.

6.2.2 Automatisierte Plaque-Planimetrie

Die Automatisierte Plaque-Planimetrie ist ein computergestütztes Auswertungsverfahren für die Effizienz mechanischer Plaque-Entfernung. Ein Techniker hatte Schablonen konstruiert, die von der APP auf die eingespannten Zähne projiziert wurden. Bei mehreren Kontrolldurchläufen mit zu 100 % plaquefreien Zähnen ist eine Abweichung von bis zu 6 %

festgestellt worden. Diese leichte Fehlbewertung wurde bei der späteren Übertragung in die Statistik dadurch berücksichtigt und ausgeglichen, dass ein Toleranzbereich von bis zu 94 % Reinigungsleistung als plaquefrei bewertet wurde. Ursachen für diese Ungenauigkeit der APP können Reflexionen auf der Zahnoberfläche oder eine leichte Abweichung der vorgefertigten Schablonen sein, sodass Schattierungen oder ein dunkler Hintergrund im Grenzbereich als Plaque identifiziert werden. Eine Anpassung kann bei ständiger Optimierung der APP und des Auswertungsverfahren durch einen Techniker erfolgen. Hierzu finden jährlich auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse Vergleiche mit Referenzwerten und eine Kalibrierung des optischen Rotabgleiches von Zahn zu Zahn und Feld zu Feld statt.

6.2.3 Quasi-klinische Auswertung der Prüfpersonen

Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um eine doppel-verblindete Kontrollstudie zwischen zwei klinischen Prüfpersonen und der APP, die als dritte „Testperson“ fungierte.
Vor der Auswertung fand eine Kalibrierung der klinischen Auswerter statt. Diese mussten nach einer ausführlichen Einweisung durch einen Mitarbeiter der Firma ORMED Fotos eigenständig, mithilfe des Navy-Plaque-Index nach *Lang et al.* (2011) und des Quigley-Hein-Index modifiziert nach *Turesky et al.* (1972) auswerten und die Ergebnisse in eine vorgefertigte Tabelle eintragen.
Die Bewertung der Zahnfelder durch die Prüfpersonen fand an einem Computer statt. Hierbei konnten die mit einer Spiegelreflexkamera hochauflösend angefertigten Zahnbilder genau betrachtet werden. Wichtig war vor allem, den bekannten Index korrekt auf die Zahnflächen zu projizieren, damit die Unterteilung der einzelnen Bereiche der Indizes genau übereinstimmte. Besonders bei dem Navy-Plaque-Index nach *Lang et al.* (2011) gibt es starke Unterschiede bei den einzelnen Indexzonen in Hinblick auf die Zahnformen der Molaren, Prämolaren und Frontzähne. Die Herausforderung bestand darin, die Grenzen – insbesondere oberhalb des Gingivasaums und zum Approximalraum – richtig festzulegen, da eine Abweichung von wenigen Millimetern eine Fehlinterpretation des Indexwertes zur Folge haben könnte. Außerdem liegen die einzelnen Felder des Navy-Plaque-Index in direktem Kontakt zueinander. Ein Verrutschen mit dem zuerst festgelegten Feld zieht eine Abweichung der anliegenden Felder nach sich. Zudem wurden bei der Bewertung den plaquefreien und den geringfügig mit Plaque bedeckten Feldern unterschiedliche Werte zugeteilt, was eine genaue Festlegung und Einhaltung der Feldbegrenzungen besonders erforderlich machte.

6.4 Ergebnisse der statistischen Auswertung

Es ist nicht verwunderlich, dass in den meisten Fällen die Übereinstimmung zwischen den Prüfpersonen P1 und P2 höher ist als die mit der APP. Einerseits führten die Prüfpersonen die Bewertung der Zahnflächen subjektiv anhand der ausgewählten Plaque-Indizes durch, andererseits sollte ja gerade die objektive Methodik der automatisierten optischen Planimetrie mit einer quasi-klinischen Auswertung verglichen und entsprechend verbessert werden.

Die Auswertung der Interdentalzahnbürsten zeigt eine positive Bilanz der APP gegenüber Prüfperson P2. P1 wies eindeutig eine individuelle Tendenz zu einer höheren Bewertung auf. Daraus resultieren die erkennbaren Abweichungen zu P2 und zu der APP. Die quasi-klinische Auswertung erfolgte mithilfe von Fotos der noch in den Zahnträger eingespannten Zähne. Durch die klinische Simulation blieb eine komplette einzelne Betrachtung der approximalen Felder für P1 und P2 aus. Die APP konnte die Felder X, Y und Z durch die Entfernung der Zähne aus dem Zahnträger und deren Fixierung in der vorgesehenen Einrichtung in der gesamten Ansicht scannen und bewerten. Es sollte demnach untersucht werden, wie nah eine quasi-klinische Auswertung ohne die Möglichkeit einer komplett einwandfreien Betrachtung an der automatisierten Planimetrie liegt bzw. liegen kann. Gerade Testbürste 1 und 2 (Interdentalbürsten) wiesen zufriedenstellende Ergebnisse bei allen Auswertern trotz erkennbarer individueller Tendenzen auf.
Bei den getesteten Handzahnbürsten und elektrischen Zahnbürsten ist die übereinstimmende Bewertung von P1 und P2 mit mindestens 67 % und maximal 85 % höher als die zwischen den quasi-klinischen Prüfpersonen und der APP, die sich meistens um 50 % bewegt. Bei genauerer Betrachtung der Ergebnisse sind zwei Ansätze von besonderer Bedeutung.
Zum einen wurde bei den elektrischen Zahnbürsten mit dem QHI ein Index mit sechs verschiedenen Bewertungsmöglichkeiten ausgewählt, was zu einer höheren Varianz bei der Bewertung führte. Dabei fiel auf, dass sich der Index sehr häufig um nur einen Wert bei den Auswertern und der APP unterschied und sich somit eine gemeinsame Tendenz zeigte. Zum ersten Mal wurde in der hier vorliegenden Studie der QHI, der in vielen Übersichten von *Deacon et al.* (2010), *Grender et al.* (2013) und *Yaacob et al.* (2014) als ein stark relevanter klinischer Index dient, an die Methodik der APP angepasst. Die so entstandenen Vergleiche zwischen quasi-klinischer Betrachtung und objektiver APP lassen ein positives Fazit zu, auch hinsichtlich weiterer Anwendungen des QHI in Bezug auf die APP. Jedoch sollte der Grad

der Übereinstimmung des QHI zwischen den Prüfpersonen als kritisch betrachtet werden. In der vorliegenden Untersuchung haben die Prüfpersonen immer unter identischen Voraussetzungen bewertet. Das bedeutet, die angefertigten Fotos der mit künstlicher Plaque belegten Zähne lagen den Auswertern gleichermaßen vor und konnten von ihnen in Ruhe an einem Computer begutachtet werden. Trotzdem erzielten die Prüfpersonen bei den beiden elektrischen Testbürsten nur in ungefähr zwei Drittel der Fälle eine vollkommen identische Übereinstimmung. Die Verwendung des QHI als ein wichtiger klinischer Index sollte daher aufgrund der vorliegenden Ergebnisse skeptisch betrachtet werden. Zu aktuellen Studien die klinisch orientiert sind und vor allem den QHI und den Navy-Plaque-Index verwenden, seien hier vor allem Autoren wie *Grender et al.* (2013) und *Klukowska et al.* (2010, 2014) genannt, die besonders viele klinische Vergleiche von Zahnbürsten für die Industrie durchgeführt haben. Ein aktueller Review von *Yaacob et al.* (2014) aus der Cochrane Database umfasst 56 Studien von denen 30 den QHI als relevanten Plaque-Index verwendeten.

Zum anderen fiel bei den Handzahnbürsten die hohe Anzahl der Risikofelder (A, B, C, D, F) unter den stark unterschiedlich bewerteten Zahnfeldern des Navy-Plaque-Index auf. Somit scheint besonders die Bewertung von Risikozahnfeldern eine Problematik beinhaltet zu haben. Häufig sind Tendenzen zu erkennen, wenn die APP sehr viel höher als die Prüfpersonen bewertete. Ein Grund hierfür könnten die unter klinisch simulierten Umständen schwerer festzulegenden Indexbegrenzungen durch die Prüfpersonen sein. Diese mussten bei jedem Zahn individuell neu eingeschätzt werden, so dass anders als bei der APP die subjektive Betrachtung des Zahnes eine größere Rolle spielte. Durch die grazile Gestaltung der Risikozahnfelder besonders im Frontzahnbereich reagierten diese sehr sensibel auf leichte Abweichungen der Begrenzungen. Oft reichten minimale Plaque-Anteile in diesen Risikobereichen aus, die subjektiv anderen Feldern zugeordnet wurden, was dann zu abweichenden Feldbewertungen führte. Die größeren Felder (E, G, H, I) reagierten weniger sensibel und waren klarer abzugrenzen, spielen allerdings auch eine geringere Rolle bei der dentalen Plaque und deren Prädilektionsstellen. Schon früher durchgeführte Studien zeigten einen besonders hohen Reinigungsbedarf des approximalen und gingivalen Zahnbereichs auf (Axelsson 1981, Galgut 1991, Furuichi et al. 1992).

Schätzle et al. (2010) nutzten für die Bewertung der Reinigungsleistung verschiedener elektrischer Zahnbürsten ein alternatives Auswertungs- und Scanverfahren. Dafür wurden die Prüfzähne erst mit Titandioxid bestrichen und anschließend gereinigt. Durch das Scannen der

Prüfzähne und die spätere Digitalisierung konnten die dunkleren plaquefreien Zonen ermittelt und mit einem speziellen Index bewertet werden. Im Vergleich dazu führt die APP eine direkte Bewertung aller Zahnflächen durch. Sie stellt also eine Kombination verschiedener Auswertungsverfahren dar, was zu einer großen Zeitersparnis und einer Vereinfachung bei der Handhabung führt.

6.5 Ausblick

Die Bewertung industriell gefertigter Zahnpflegeprodukte sollte anhand präziser und ausführlicher statistischer Gutachten erfolgen. Klinische Studien zeigen besonders verbrauchernah die Vor- und Nachteile bzw. Stärken und Schwächen innovativer Produkte. Allerdings kommen bei klinischen Studien oft erschwerende Faktoren wie das Suchen und Finden einer ausreichend hohen Probandenzahl, das Schaffen vergleichbarer Ausgangssituationen und eine identische Durchführung der Handlung bzw. Maßnahme durch die Probanden hinzu, sodass eine objektive Beurteilung der Qualität eines Produktes nicht immer eindeutig möglich ist.

Mit der von *Claydon und Addy* (1995) entwickelten Plaque-Planimetrie konnte ein Grundstein für die Erfassung einer computerbasierten Auswertungsmethodik gelegt werden. Die anschließend entstandene Validierungskette für ein robotergestütztes Reinigungsverfahren und eine Automatisierte Plaque-Planimetrie wurde in den Studien von *Bretz* (2010), *Staufer* (2011), *Lang et al.* (2011), *Fleuter* (2015) und *Arnoldi* (2015) klinischer und quasi-klinischer Hinsicht optimiert. Die Auswertungsmethodik der APP mithilfe des Putzroboters ermöglicht unter gleichbleibenden Umständen eine hohe Anzahl von Versuchsabläufen, auch mit sehr aufwendigen und klinisch schwer durchsetzbaren Bewertungskriterien. Die APP stellt in diesem Sinne ein sehr effizientes Bewertungssystem dar, sie sollte weiterhin genau betrachtet und gerade hinsichtlich klinischer Bewertungskriterien optimiert werden, da der Bezug zur Klinik eine essenzielle Rolle spielt. Interessant ist dabei der Vergleich zwischen direkter visueller Auswertung und Bewertung nach Fotodokumentation.

Ein alternativer Ansatzpunkt ist die Möglichkeit, in weiteren in vitro Studien auf die APP zu verzichten und die vom Roboter geputzten Zähne von klinischem Personal bewerten zu lassen. Dies beinhaltet allerdings ein klinisch orientiertes aufwendigeres Verfahren zur Effektivitätsbestimmung von Zahnpflegeprodukten, das auch direkt durch in vivo Studien ersetzt werden könnte.

7. Zusammenfassung

In der Industrie werden tagtäglich innovative Zahnpflegeprodukte entwickelt und verbessert. Die gewissenhafte Beurteilung solcher Produkte stellt hohe Anforderungen an objektive Testverfahren und dentale Indizes.

Ziel dieser Arbeit ist ein kritischer Vergleich zwischen drei Bewertern, die unter Verwendung des Navy-Plaque-Index nach *Lang et al.* (2011) und des modifizierten Quigley-Hein-Index nach *Turesky et al.* (1972) die Reinigungseffizienz von Zahnpflegeprodukten bei der mechanischen Plaque-Entfernung ausgewertet haben. Die Besonderheit lag darin, dass neben zwei quasi-klinischen Bewertungen, die durch geschultes klinisches Personal P1 und P2 durchgeführt wurden, auch eine computergesteuerte Bewertung durch die Automatisierte Plaque-Planimetrie (APP) erfolgte. *Bretz* (2010) hat den Vorteil einer erweiterten Unterteilung des bereits mehrfach modifizierten Navy-Plaque-Index für eine sensiblere Bewertung der mit Plaque belegten Zähne gezeigt. *Claydon und Addy* (1995, 1996) schufen durch die Einführung der Fotodokumentation und die Auswertung des Navy-Plaque-Index mit Schablonen eine aufwendige, jedoch für In-vitro-Studien sehr gut geeignete Methode der Plaque-Bewertung. Auf dieser Basis ergaben sich große Vorteile bei der vorliegenden Beurteilung der Reinigungseffizienz von Zahnpflegeprodukten. Um dem hohen Zeitaufwand einer sehr ausführlichen Bewertungsmethode entgegenzuwirken, entwickelte ORMED in Zusammenarbeit mit der Firma Schiffer eine computergestützte Auswertungsmethodik für die APP. Die Vorbereitung und der Putzvorgang der zu untersuchenden Zähne wurden nach standardisierten und reproduzierbaren Maßnahmen mithilfe des SOPs (Standard Operating Procedure) durchgeführt, so erfolgte z. B. der Zahnputzvorgang durch den Roboter nach genauen Richtlinien.

Um ein breites Auswertungsspektrum zu erhalten, kamen zehn verschiedene Zahnbürsten bzw. Interdentalbürsten von unterschiedlichen Herstellern in insgesamt 46 Durchläufen zum Einsatz. Die Anzahl der Durchläufe der Testbürsten variierte zwischen Pilot-, explorativen und statistisch vollständigen Testdurchläufen. Abweichungen standen nicht eindeutig mit der Anzahl der Testdurchläufe in Verbindung.

Die größte Kongruenz war zwischen den klinischen Auswertern festzustellen. Dies ist sowohl auf die subjektive Komponente bei menschlichen Beurteilungen zurückzuführen als auch auf das gleiche zugrunde liegende Auswertungskonzept.

Leicht unterschiedliche Betrachtungsweisen der Zähne erschwerten besonders die Bewertungen der Risikozahnfelder A, B, C, D und F, die sich im Saum- und Übergangsbereich befinden und deren Grenzen nicht immer eindeutig festzulegen waren. Für die APP wurden die Zähne einzeln in vorgesehene Halterungen gespannt, was eine objektive „Zahn-für-Zahn-Auswertung“ anhand der programmierten Schablonen erlaubte. Der Vorteil besteht in der hohen Auflösung der computerassistierten optischen Plaque-Planimetrie, die eine exakte und einheitliche Bewertung der Zahnfelder ermöglicht. Im Gegensatz dazu sind bei der visuellen Auswertung durch die Prüfpersonen eindeutig individuelle subjektive Tendenzen erkennbar. Fehlbewertungen der APP sind bei einer fehlerhaften Software, ungenauer Programmierung der Indexbegrenzungen oder Verschmutzungen und Reflexionen auf der Zahnoberfläche, die von der APP als Plaque angesehen werden, möglich.

Diese Studie beschreibt zusammen mit derjenigen von *Arnoldi* (2015) den letzten Teil der Validierungskette, indem ein quasi-klinischer Vergleich mit der Automatisierten Plaque-Planimetrie geschaffen wurde. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass durch dieses Robotertestverfahren mit klinischer Simulation der Putzvorgänge und anschließender computergesteuerter Auswertung eine sehr gute Grundlage für in vitro durchgeführte Testverfahren mit quasi-klinischem Vergleich gegeben ist.

8. Summary

In industry new dental care products are continuously developed and improved. A careful evaluation of such products puts high requirements on objective test procedures as well as dental indices.

This work was aimed at critically comparing three evaluations of the cleaning efficiency of dental care products used to mechanically remove plaque by utilizing both the Navy-plaque-index according to Lang et al. (2011) and the modified Quigley-Hein-Index according to Turesky et al. (1972). In particular, besides two quasi-clinical evaluations performed by trained clinical staff P1 and P2 a computer-based judgement was performed by automated plaque planimetry (APP). Bretz (2010) demonstrated the advantage of an enhanced division of the already several times modified Navy-Plaque-Index for a more sensitive evaluation of teeth covered by plaque. By introducing photographic documentation and evaluation of the Navy-plaque-index via stencils Claydon und Addy (1995, 1996) created an elaborate but also very suitable method to judge plaque for in-vitro-studies. On this basis there were great advantages of the here described evaluation of the cleaning efficiency of dental care products. In order to manage the high expenditure of time of a very extensive method of evaluation ORMED in collaboration with Schiffer developed a computer-based method to estimate APP. The preparation and brushing procedure of the teeth to be examined were performed according to standardized and reproducable measures by SOPs (standard operating procedures) e. g. the brushing procedure by the robot was performed according to strict guidelines.

To obtain a broad spectrum of evaluations ten different toothbrushes or interdental brushes by different manufacturers were applied to a total of 46 test procedures. The number of test procedures of the toothbrushes varied between pilot-, explorative, and statistically complete test procedures. Deviations were not clearly connected with the number of test procedures.

The highest congruence was detected between the clinical evaluators. This is attributed to both the subjective component of human evaluations and the same concept the evaluations were based on.

Slightly different observation angles in particular hampered the evaluations of the risk tooth fields A, B, C, D and E, which are located at the gingival margin and interdental areas. Here, the boundaries could not always be defined clearly. For the APP the teeth were separately mounted into fixations, which allowed for an objective ‘tooth by tooth evaluation’ via the

programmed stencils. The advantage lies in the high resolution of the computer-based optical plaque-planimetry which allows an exact and consistent evaluation of the dental fields. In contrast, the visual evaluations by the evaluating individuals unequivocally showed individual and subjective tendencies. Misinterpretations of APP are possible in case of deficient software, improper programming of index boundaries or impurities and reflections of the dental surface which are interpreted as plaque by the APP.

Together with the study by Arnoldi (2015) this one describes the last part of the chain of validation by creating a quasi-clinical comparison with the automated plaque planimetry. All in all it could be shown that by this procedure using a robot that clinically simulates brushing procedures and subsequent computer-based evaluation a very good basis for performing in-vitro-test-procedures with quasi-clinical comparison is given.

10. Literaturverzeichnis

Arnoldi, F. *Automatisierte Plaque-Planimetrie zur Effektivitätsbewertung der robotergenerierten Plaquereduktion.* Zahnmed. Diss. Universität Witten/Herdecke. 2015.

Axelsson P. *Concept and practice of plaque-control.* Pediatr Dent 1981; 1: 101–13.

Axelsson P, Nyström B, Lindhe J. *On the prevention of caries and periodontal disease. Results of a 15-year longitudinal study in adults*. J Clin Periodontol 1991; 18: 182–9.

Axelsson P, Nyström B, Lindhe J. *The long-term effect of a plaque control program on tooth mortality, caries and periodontal disease in adults. Results after 30 years of maintenance*. J Clin Periodontol 2004; 31: 749–57.

Biesbrock AR, Walters PA, Bartizek RD, Goyal CR, Qaqish JG. *Plaque removal efficacy of an advanced rotation-oscillating power toothbrush versus a new sonic toothbrush*. Am J Dent 2008; 21: 185–8.

Bortz, J. *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. 6. Auflage. Heidelberg: Springer 2005.

Bortz J, Döring N. *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. 4. Auflage. Heidelberg: Springer 2006.

Bretz MJ. *Vergleichende Plaque-Planimetrie am Beispiel der Reinigungswirkung eines Kauschaums*. Zahnmed. Diss. Universität Witten/Herdecke. 2010.

Chava VK: *An evaluation of the efficacy of a curved bristle and conventional toothbrush. A comparative clinical study*. J Periodontol 2000; 71: 785–9.

Claydon N, Addy M. *Comparative single-use plaque removal by toothbrushes of different designs*. J Clin Periodontol 1996; 23: 1112–6.

Claydon N, Addy M. *The use of planimetry to record and score the modified Navy index and other area-based plaque indices. A comparative toothbrush study*. J Clin Periodontol 1995; 22: 670–3.

Danser MM, Timmerman MF, Ijzermann Y, Bulthuis H, van der Velden U, van der Weijden GA. *Evaluation of the incidence of gingival abrasion as a result of toothbrushing*. J Clin Periodontol 1998b; 25: 701–6.

Danser MM, Timmerman MF, Ijzerman Y, van der Velden U, Warren PR, van der Weijden FA. *A comparison of electric toothbrushes in their potential to cause gingival abrasion of oral soft tissues*. Am J Dent 1998a, 11: 35–9.

Deacon SA, Glenny A-M, Deery C, Robinson PG, Heanue M, Walmsley AD, Shaw WC. *Different powered toothbrushes for plaque control and gingival health.* Cochrane Database of Systematic Reviews 2010, Issue 12. Art. No.: CD004971. DOI: 10.1002/14651858.CD004971.pub2.

Dewhirst FE, Chen T, Izard J, Paster BJ, Tanner AC, Yu WH. *The human oral microbiome*. J Bacteriol 2010; 192(19): 5002–17.

Dewhirst FE, Izard J, Paster BJ, Tanner AC, Wade WG, Yu WH. *The Human Oral Microbiome Database* 2008. Available online at: http://www.HOMD.org

Dörfer CE, von Bethlenfalvy ER, Staehle HJ, Pioch T. *Comparison of the safety and efficacy of an oscillating/rotating battery-powered toothbrush and a standard manual toothbrush*. Am J Dent 2001; 14: 25B–28B.

Eberhart J, Frentzen M, Thoms M. *Neue optische Methoden zur Kariesdetektion. Fluoreszenzbasierte Verfahren zur Erkennung nichtkavitierter Läsionen.* ZWR 2007; 116: 148–56.

Ellen RP, Lépine G, Nghiem PM. *In vitro models that support adhesion specificity in biofilms of oral bacteria*. Adv Dent Res 1997; 11: 33–42.

Elliot JR, Bowers GM, Clemmer BA, Rovelstad GH. *Evaluation of an oral physiotherapy center in the reduction of bacterial plaque and periodontal disease*. J Periodontol 1972; 43: 221–4.

Fischman SL. *Current status of indices of plaque.* J Clin Periodontol 1986; 13: 371–4.

Fleuter M. *Klinische Validierung einer robotergestützten Methode zur Beurteilung der Reinigungseffizienz von Kinderzahnbürsten.* Zahnmed. Diss. Universität Witten/Herdecke. 2015.

Frandsen AM, Barbano JP, Suomi JD, Chang JJ, Houston R. *A comparison of the effectiveness of the Charters, Scrub and roll methods of toothbrushing in removing plaque.* Scand J Dent Res 1972; 809: 267–71.

Furuichi Y, Lindhe J, Ramberg P, Volpe AR. *Patterns of de novo plaque formation in the human dentition*. J Clin Periodontol 1992; 19: 423–33.

Galgut PN. *The need for interdental cleaning.* Dent Health (London) 1991; 30: 8–11.

Gängler P, Hoffmann T, Willershausen B, Schwenzer N, Ehrenfeld M. *Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie.* 3. Auflage. Stuttgart: Thieme 2010.

Gehring F. *Mikrobiologische Aspekte der Kariesentstehung.* Zahnärztl Praxis 1984; 35: 480–3.

Goyal CR, Qaqish J, He T, Grender J, Walters P, Biesbrock AR. *A randomized 12-week study to compare the gingivitis and plaque reduction benefits of a rotation-oscillation power toothbrush and a sonic power toothbrush*. J Clin Dent 2009; 20: 9–8.

Grender J, Williams K, Walter P, Klukowska M, Reick H. *Plaque removel efficacy of oscillating-rotating power toothbrushes: Review of six comparative clinical trials.* Am J Dent 2013; 26: 68–74.

Gujarati DN. *Basic Econometrics*, fourth edition, New York: McGraw-Hill Higher Education 2003.

Hellwege KD. *Die Praxis der Zahnmedizinischen Prophylaxe – Ein Leitfaden für die Individualprophylaxe, Gruppenprophylaxe und initiale Parodontaltherapie*. 6. Auflage. Stuttgart: Thieme 2003.

Hellwig E, Klimek J, Attin T. *Einführung in die Zahnerhaltung* 3. Auflage. München: Urban & Fischer 2003.

Imfeld T, Sener B, Simonovic I. *In-Vitro-Untersuchung der mechanischen Wirkung von handelsüblichen Handzahnbürsten.* Acta Med Dent Helv 2000; 5: 37–47.

Jordan RA, Markovic L. *Das Lawinenmodell – geschichtlicher Ursprung und klinische Implikation*. Dtsch Zahnärztl Z 2007; 62: 76–82.

Klukowska M, Grender JM, Conde E, Ccahuana-Vasquez RA, Goyal CR. *A randomized 12-week clinical comparison of an oscillating-rotating toothbrush to a new sonic brush in the reduction of gingivitis and plaque*. J Clin Dent Res 2014; 25(2): 26–31.

Klukowska M, Sharma N, Qaqish J, Grender JM, Rooney JE, Hoke PD, Cunningham P. *Gingivitis reduction from a power toothbrush with novel brush head*. J Dent Res 2010; 89 (Spec Iss A): Abstr 3695.

König KG. *Karies und Kariesprophylaxe*. München: Goldmann 1971.

König KG. *Karies und Parodontopathien.* Stuttgart, New York: Thieme 1987.

Kramer E. *Prohylaxefibel – Grundlagen der Zahngesundheitsvorsorge.* 9. Auflage. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag 2004.

Lang NP, Cumming BR, Löe H. *Toothbrushing frequency as it relates to plaque development and gingival health*. J Periodont 1973; 44: 396–405.

Lang T, Bretz MJ, Jennes B, Gaengler P. *Planimetrical Plaque Assessment of In-between Oral Hygiene Products.* J Dent Res 2011; Vol. 90. Abstr 713.

Lang T, Staufer S, Jennes B, Gaengler P. *Assessment of plaque removal efficiency by robot simulation of tooth brushing.* J Dent Res 2010; Vol. 89. Abstr 2514.

Lang T, Staufer S, Jennes B, Gaengler P. *Clinical validation of robot simulation of toothbrushing - comparative plaque removal efficacy*. BMC Oral Health 2014; 14: 82.

Lange DE, Plagmann H, Eenboom A, Promesberger A. *Klinische Bewertungsverfahren zur Objektivierung der Mundhygiene*. Dtsch Zahnärztl Z 1977; 32: 44–7.

Löe H. *The gingival index, the plaque index and the retention index systems*. J Periodontol 1967; 38: 610–6.

McLean JS. *Advancements toward a systems level understanding of the human oral microbiome.* Front. Cell. Infect. Microbiol. 2014; 4: 98.

Mierau HD. *Der freiliegende Zahnhals*. Dtsch Zahnärztl Z 1992; 47: 643–53.

Mierau HD, Haubitz L, Völk W. *Gewohnheitsmuster beim Gebrauch der Handzahnbürste*. Dtsch Zahnärztl Z 1989; 44: 836–40.

Niemi ML, Sandholm L, Ainamo J. *Frequency of gingival lesions after standardized brushing as related to stiffness of toothbrush and abrasiveness of dentifrice*. J Clin Periodontol 1984; 11: 254–61.

Orland FJ, Blayney JR, Harrison RW, Reyniers JA, Trexler PC, Wagner M, Gordon HA, Luckey TD. *Use of germfree animal technic in the study of experimental dental caries. I. Basic observations on rats reared free of all microorganisms.* J Dent Res 1954; 33: 147–74.

Quigley GA, Hein JH. *Comparative cleaning efficiency of manual and power brushing.* J Am Dent 1962; 65: 26–9.

Quirynen BA, Dekeyser C, van Steenberghe D. *Discriminating power of five plaque indices*. J Periodontol 1991; 62: 100–5.

Rams TE, Oler J, Listgarten MA, Slots J. *Utility of Ramfjord index teeth to assess periodontal disease progression on longitudinal studies*. J Clin Periodontol 1993; 20: 147–50.

Rateitschak KH, Rateitschak EM, Wolf HF. *Farbatlanten der Zahnmedizin: Parodontologie*. 2. Auflage. Stuttgart, New York: Thieme 1989.

Reddy S. *Essentials of clinical periodontology and periodontics.* 2. Edition, New Delhi: Jaypee Brothers Medical Publishers 2008.

Rinne H. *Taschenbuch der Statistik*, 3. Auflage, Frankfurt am Main: Harri Deutsch 2003.

Roulet JF, Fath S, Zimmer S. *Lehrbuch Prophylaxeassistentin*. 3. Auflage, Elsevier GmbH, München: Elsevier 2006.

Roulet JF, Zimmer S. *Farbatlanten der Zahnmedizin 16 – Prophylaxe und Präventivmedizin*. Stuttgart: Thieme 2003.

Rupf S, Hannig C, Hannig M: *Kariesprophylaxe – aktueller Stand und zukünftige Herausforderungen.* Dtsch Zahnärztl Z 2014; 69: 594–606.

Rustogi KN, Curtis JP, Volpe AR. *Refinement of the modified Navy plaque index to increase plaque scoring efficiency in gumline and interproximal tooth areas*. J Clin Dent 1992; 3: 9–12.

Schafer F, Nicholson JA, Gerritsen N, Wright RL, Gillam DG, Hall C. *The effect of oral care feed-back devices on plaque removal and attitudes towards oral care.* Int Dent J 2003; 53: 404–8.

Schäfer C. *Unerwünschte Wirkungen von Plaque-Anfärbemitteln*. Prophylaxe Impuls 2002; 6: 12–6.

Schätzle M, Sener B, Schmidlin PR, Imfeld T, Attin T. *In vitro tooth cleaning efficacy of electric toothbrushes around brackets*. Eur J Orthod 2010; 32(5): 481–9.

Shaloub A, Addy M, *Evaluation of accuracy and variability of scoring area based plaque indices. A labotory model*. J Clin Periodontol 2000; 27: 16–21.

Sharma NC, Galustians J, Qaqish HJ, Cugini MA. *A comparison of two electric toothbrushes with respect to plaque removal and subject preference*. Am J Dent 1998; 11: 29–33.

Sharma NC, Galustians HJ, Qaqish J, Cugini M, Warren PR. *The effect of two power toothbrushes on calculus and stain formation*. Am J Dent 2002; 15: 71–6.

Sharma NC, Qaqish J, Klukowska M, Grender M, Rooney J. *The plaque removal efficacy of a novel power brush head.* J Clin Dent 2010; 21: 19–22.

Silness J. Löe, H. *Periodontal disease in pregnancy. Correlation between oral hygiene and periodontal conditions.* Acta odontol Scand 1964; 22: 121–35.

Staufer S. *Validierung einer robotergestützten Methode zur Beurteilung der klinischen Reinigungseffizienz von Handzahnbürsten.* Zahnmed. Diss. Universität Witten/Herdecke. 2011

Takahashi N. *Oral microbiome metabolism: From "Who are they?" to "What are they doing?".* J Dent Res 2015; 94: 1628–37.

Turesky S, Glickman I, Sandberg R. *In vitro chemical inhibition of plaque formation*. J Periodontol 1972; 43: 263–9.

Tanzer JM. *On changing the cariogenic chemistry of coronal plaque*. J Dent Res 1989; 68: 1576–87.

Van der Weijden GA, Timmerman MF, Versteeg PA, Piscaer M, van der Velden U. *High and low brushing force in relation to efficacy and gingival abrasion*. J Clin Periodontol 2004; 31: 620–4.

Weber T. *Memorix Zahnmedizin*. 3. Auflage. Stuttgart: Thieme 2010, S. 118.

Weiß C. *Basiswissen Medizinische Statistik*. 5. Auflage. Heidelberg: Springer 2010.

Yaacob M, Worthington HV, Deacon SA, Deery C, Walmsley AD, Robinson PG, Glenny AM. *Powered versus manual toothbrushing for oral health*. Cochrane Database of Systematic Reviews 2014, Issue 6. Art. No.: CD002281. DOI: 10.1002/14651858.CD002281.pub3.

Zimmer S. *Kariesprophylaxe als multifaktorielle Präventionsstrategie*. Habilitationsschrift, Humboldt-Universität zu Berlin, Zentrum für Zahnmedizin, Berlin 2000.

Anhang

Die statistischen Einzelergebnisse der Ergebnisdarstellung 5, die nicht in 5.1, 5.2 und 5.3 näher beschrieben werden, sind im Anhang A1-A7 durch alle Werte der prozentualen Übereinstimmung und ihrer bivariaten Signifikanztests für weiterführende Vergleiche von robotergenerierten Plaque-Planimetrie Daten zusammengefasst.

A1 – Testbürste 1 – Interdentalbürste (IBF/06/13/fünf Durchläufe)

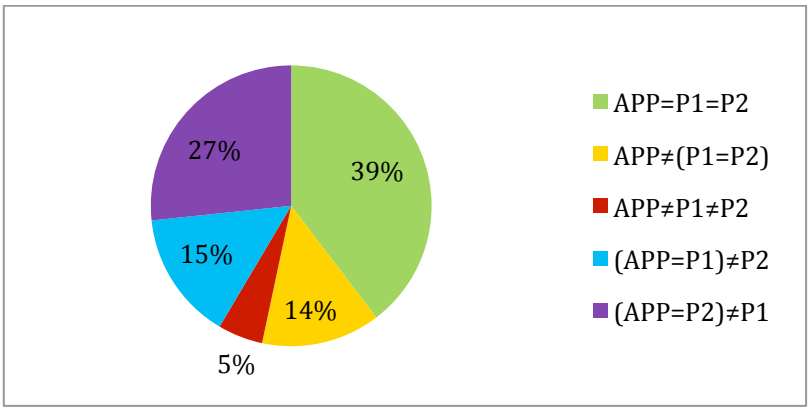

Abbildung A1.1: Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=270. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a).

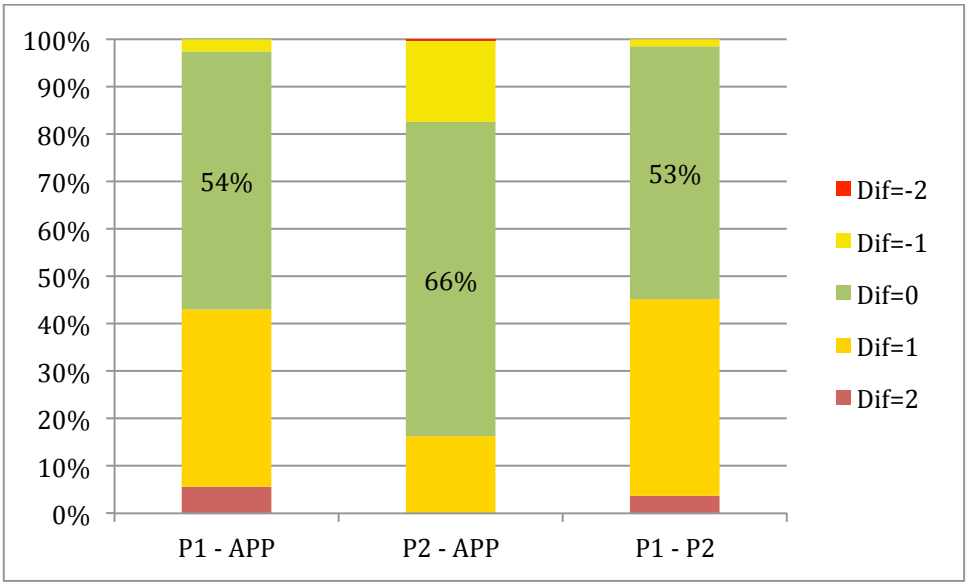

Abbildung A1.2: Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=270. Weitere Erläuterungen Abbildung 21 (b).

Tabelle A1.1: Grad der Übereinstimmung der gesamten Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	1,13	1,59	1,12
Median	1	2	1

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	**7,75**	<0,01	**ja**	**6,03**	<0,01	**ja**	0,262
P1 vs. APP	**7,98**	<0,01	**ja**	**6,49**	<0,01	**ja**	0,272
P2 vs. APP	-0,21	0,831	nein	0,06	0,954	nein	0,492

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=270. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

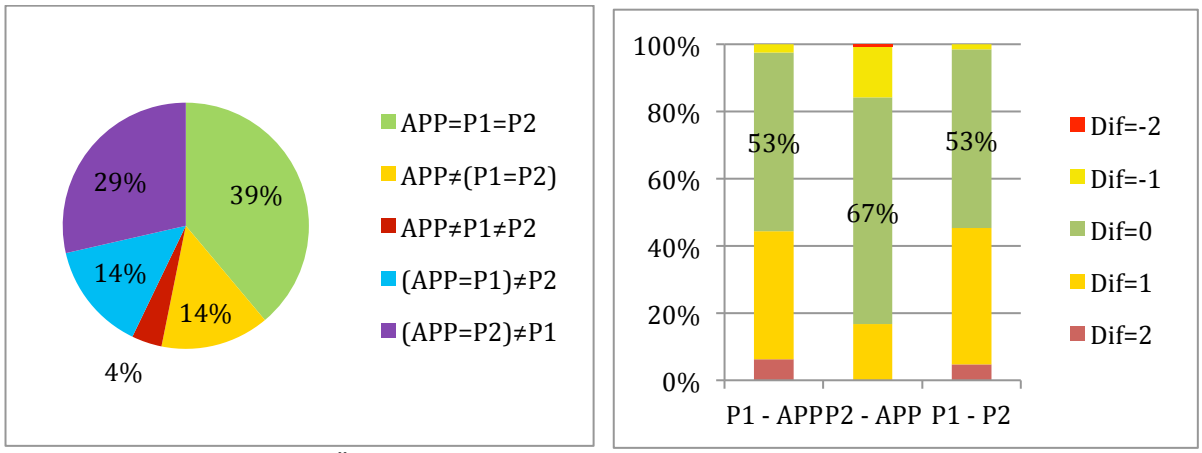

Abbildung A1.3: Grad der Übereinstimmung der distalen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=126. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A1.2: Grad der Übereinstimmung der distalen Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	1,15	1,63	1,15
Median	1	2	1

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	**5,38**	<0,01	**ja**	**4,15**	<0,01	**ja**	0,239
P1 vs. APP	**5,86**	<0,01	**ja**	**4,84**	<0,01	**ja**	0,248
P2 vs. APP	0	1,00	nein	0,16	0,870	nein	0,510

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=126. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

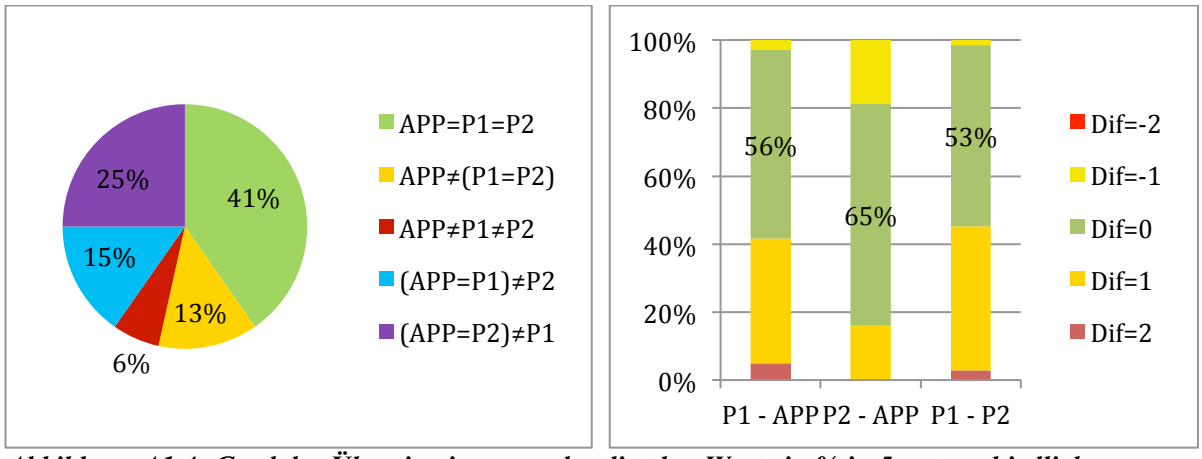

Abbildung A1.4: Grad der Übereinstimmung der distalen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=144. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A1.3: Grad der Übereinstimmung der mesialen Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	1,12	1,56	1,09
Median	1	2	0

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	**5,58**	<0,01	**ja**	**4,37**	<0,01	**ja**	0,278
P1 vs. APP	**5,45**	<0,01	**ja**	**4,37**	<0,01	**ja**	0,296
P2 vs. APP	-0,29	0,772	nein	0,22	0,828	nein	0,476

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=144. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

Tabelle A1.4: Zahnfelder mit stark unterschiedlicher Bewertung

APP	P1	P2	Zahnfläche	Zahnfeld	Durchlauf
0	2	0	31D	Z	1
0	2	1	32D	Y	1
0	2	0	32D	Z	1
0	2	1	32M	Y	1
0	2	1	32D	Y	2
0	2	1	42M	Y	2
0	2	1	32M	Y	2
1	2	0	46D	Y	3
0	2	0	48M	Y	3
0	2	1	46M	Y	3
0	2	1	32M	Y	3
2	1	0	45D	Z	4
0	2	0	42D	Z	4
0	2	0	31D	Z	4
1	2	0	31M	Z	4
0	2	1	31D	Z	5
0	2	0	32D	Z	5
0	2	1	48M	Y	5
1	2	0	46M	Y	5
1	2	0	45M	Y	5

A2 – Testbürste 3 – Interdentalbürste (IBF/06/13/fünf Durchläufe)

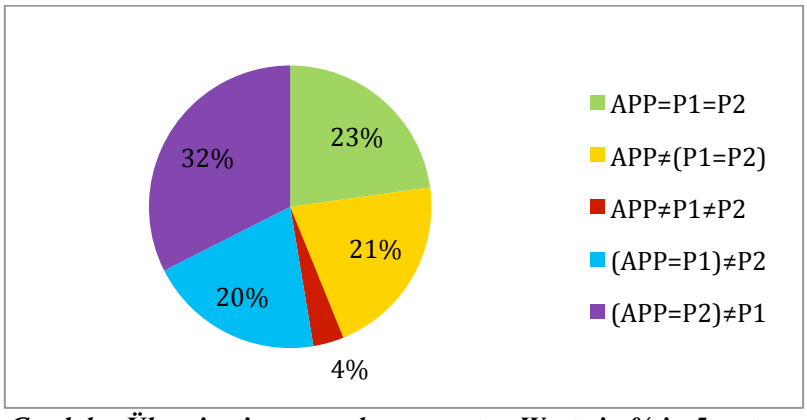

Abbildung A2.1: Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=114. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a).

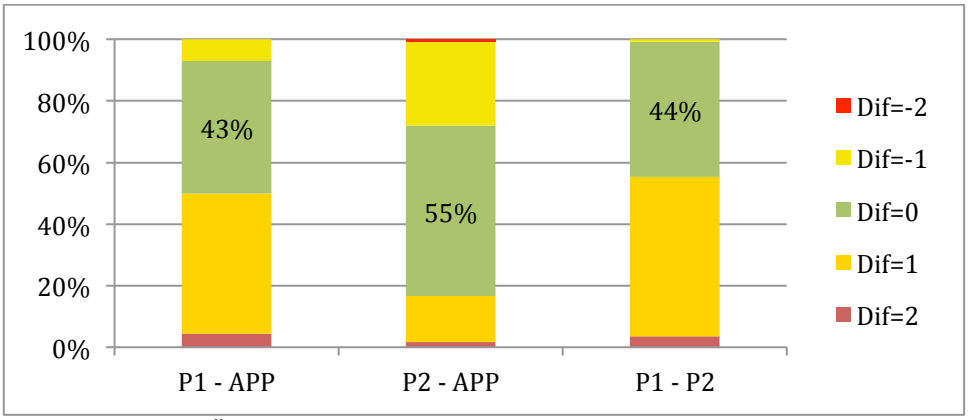

Abbildung A2.2: Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=114. Weitere Erläuterungen Abbildung 18 (b).

Tabelle A2.1: Grad der Übereinstimmung der gesamten Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	**P1**	**P2**
Mittelwert	0,83	1,31	0,73
Median	1	1	0

Bivariate Tests	**t**	**prob(t)**	**sign. (p=0,05)**	**W**	**prob(W)**	**sign. (p=0,05)**	**κ**
P1 vs. P2	**5,74**	<0,01	**ja**	**5,03**	<0,01	**ja**	0,256
P1 vs. APP	**5,12**	<0,01	**ja**	**4,44**	<0,01	**ja**	0,156
P2 vs. APP	-0,97	0,334	nein	1,21	0,322	nein	0,322

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=114. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

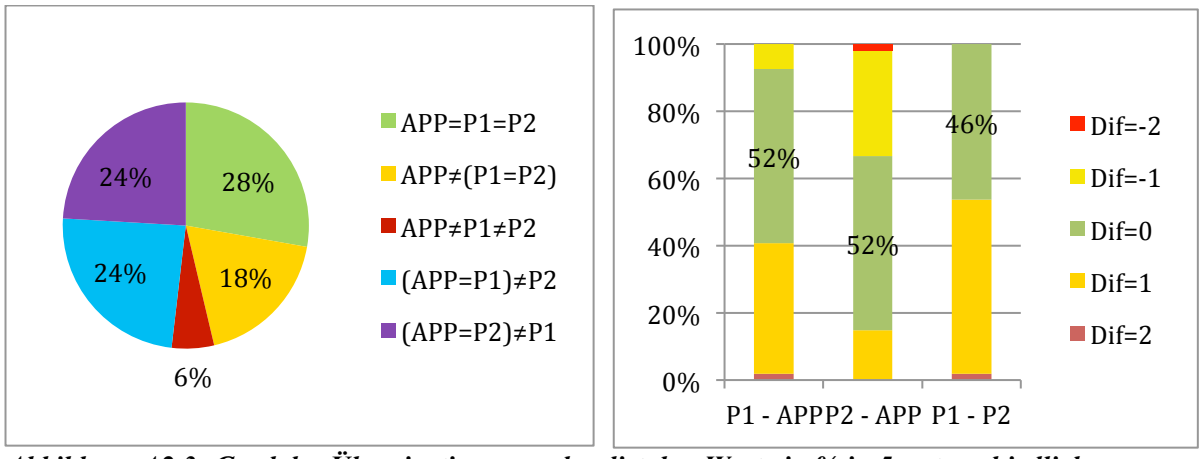

Abbildung A2.3: Grad der Übereinstimmung der distalen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=54. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A2.2: Grad der Übereinstimmung der distalen Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	**P1**	**P2**
Mittelwert	0,94	1,30	0,74
Median	1	1	0

Bivariate Tests	**t**	**prob(t)**	**sign. (p=0,05)**	**W**	**prob(W)**	**sign. (p=0,05)**	**κ**
P1 vs. P2	**3,85**	<0,01	**ja**	**3,38**	0,038	**ja**	0,270
P1 vs. APP	**2,61**	0,010	**ja**	**2,27**	0,023	**ja**	0,258
P2 vs. APP	-1,31	0,193	nein	1,35	0,177	nein	0,287

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=54. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

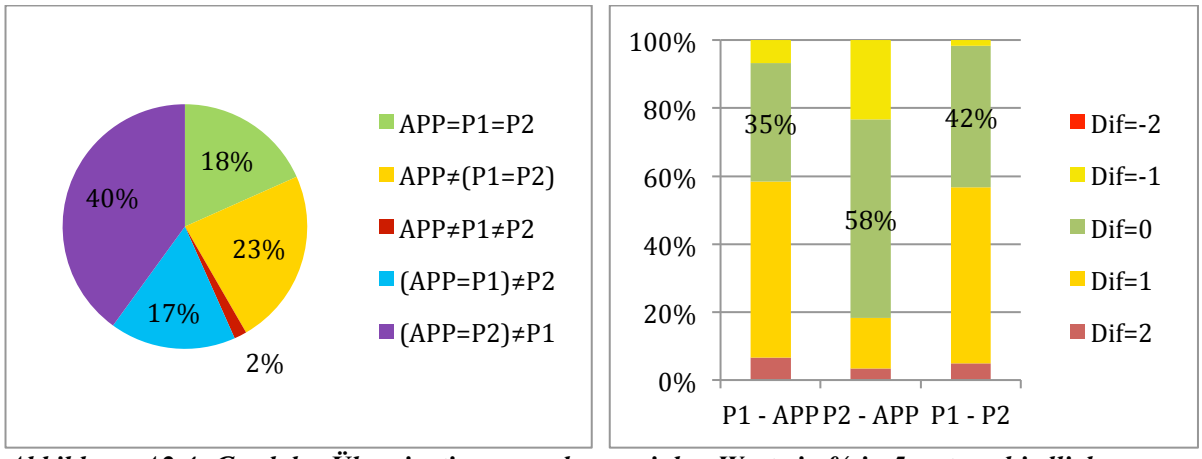

Abbildung A2.4: Grad der Übereinstimmung der mesialen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=60. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A2.3: Grad der Übereinstimmung der mesialen Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	0,73	1,32	0,72
Median	1	1	0

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	**4,23**	<0,01	**ja**	**3,70**	0,029	**ja**	0,244
P1 vs. APP	**4,61**	<0,01	**ja**	**3,95**	<0,01	**ja**	0,071
P2 vs. APP	-0,11	0,313	nein	0,42	0,675	nein	0,349

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=60. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

Tabelle A2.4: Zahnfelder mit stark unterschiedlicher Bewertung

APP	P1	P2	Zahnfläche	Zahnfeld	Durchlauf
2	1	0	46D	Z	1
1	2	0	45D	Y	1
0	2	0	46M	Y	1
1	2	0	46M	Z	1
0	2	2	32M	X	1
0	2	1	42D	Y	2
0	2	0	46M	Y	2
0	2	2	32M	X	2

A3 – Testbürste 4 – Kinderhandzahnbürste (KZB/04/13/vier Durchläufe)

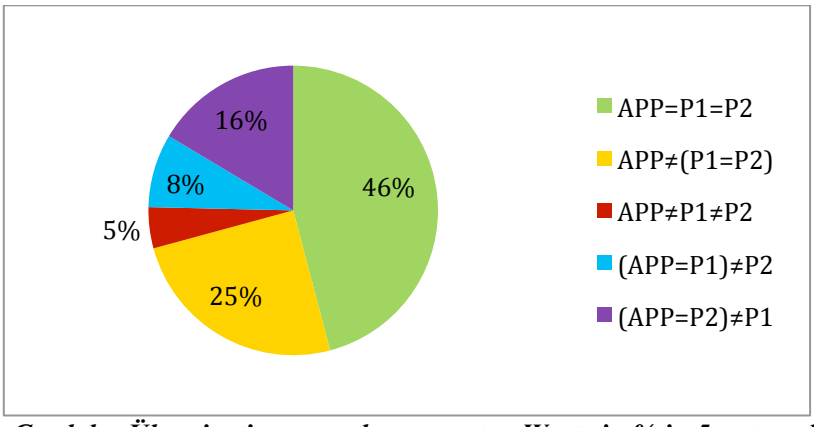

Abbildung A3.1: Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=414. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a).

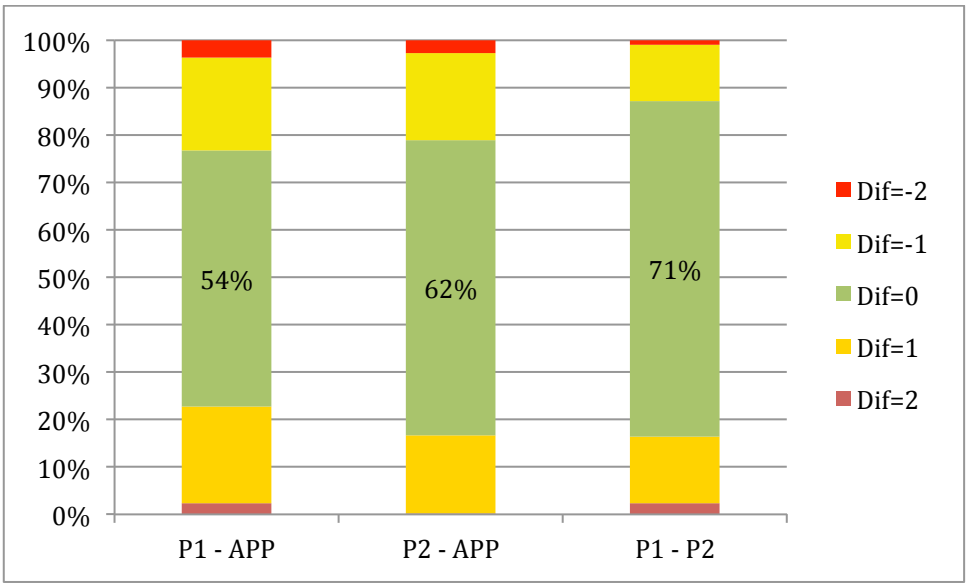

Abbildung A3.2: Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=414. Weitere Erläuterungen Abbildung 21 (b).

Tabelle 3.1: Grad der Übereinstimmung der gesamten Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	1,26	1,24	1,19
Median	1	1	1

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	0,96	0,338	nein	1,06	0,291	nein	0,546
P1 vs. APP	-0,33	0,745	nein	0,03	0,976	nein	0,277
P2 vs. APP	-1,33	0,183	nein	1,15	0,249	nein	0,404

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=414. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

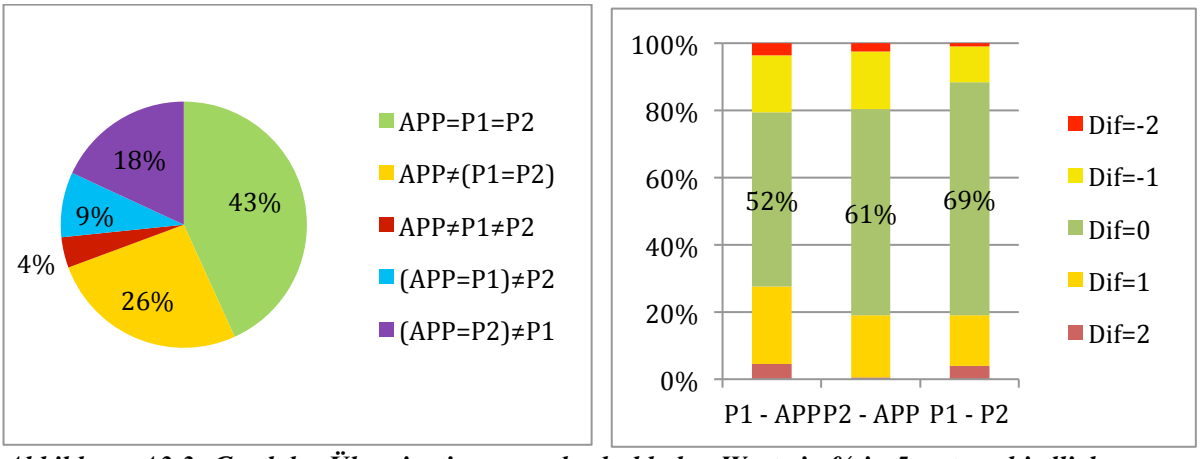

Abbildung A3.3: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=199. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A3.2: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	1,05	1,13	1,03
Median	1	1	1

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	1,38	0,169	nein	1,34	0,180	nein	0,535
P1 vs. APP	1,03	0,302	nein	1,00	0,315	nein	0,268
P2 vs. APP	-0,33	0,739	nein	0,32	0,747	nein	0,406

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=199. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

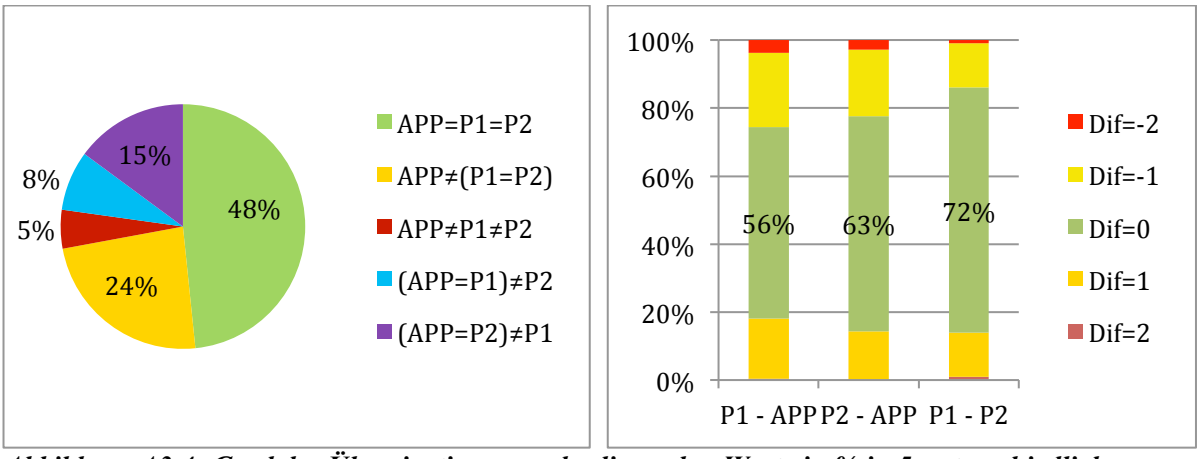

Abbildung A3.4: Grad der Übereinstimmung der lingualen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=215. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A3.3: Grad der Übereinstimmung der lingualen Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	1,45	1,34	1,34
Median	2	2	1

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	-4,42	1,00	nein	0,169	0,865	nein	0,543
P1 vs. APP	-1,62	0,107	nein	0,91	0,364	nein	0,263
P2 vs. APP	-1,67	0,096	nein	1,13	0,258	nein	0,372

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=215. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

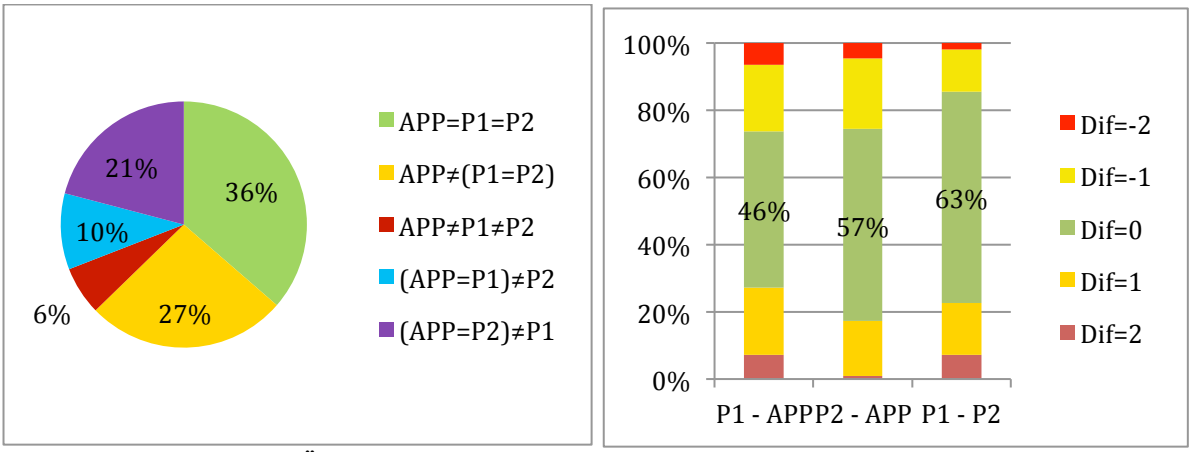

Abbildung A3.5: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Werte (ABCDF) in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=110. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A3.4: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Zahnfelder (ABCDF) von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	1,00	1,02	0,88
Median	1	1	1

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	1,29	0,198	nein	1,20	0,232	nein	0,439
P1 vs. APP	0,18	0,862	nein	0,17	0,866	nein	0,189
P2 vs. APP	-1,16	0,245	nein	1,10	0,271	nein	0,346

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=110. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

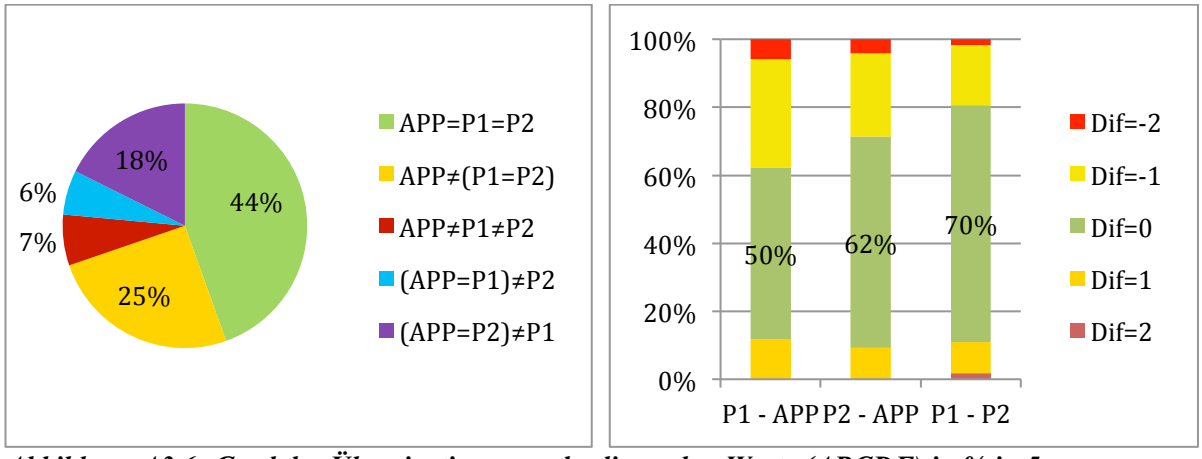

Abbildung A3.6: Grad der Übereinstimmung der lingualen Werte (ABCDF) in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=119. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A3.5: Grad der Übereinstimmung der lingualen Zahnfelder (ABCDF) von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	1,57	1,25	1,34
Median	2	1	2

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	-0,82	0,415	nein	0,62	0,535	nein	0,514
P1 vs. APP	**-3,40**	<0,01	**ja**	**2,60**	<0,01	**ja**	0,336
P2 vs. APP	**-2,64**	<0,01	**ja**	**2,06**	0,040	**ja**	0,163

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=119. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

Tabelle A3.6: Zahnfelder mit stark unterschiedlicher Bewertung

APP	P1	P2	Zahnfläche	Zahnfeld	Durchlauf
2	0	1	46l	A	1
2	0	1	85l	D	1
2	0	1	85l	G	1
2	0	0	42L	D	1
1	2	0	46l	C	2
2	0	0	46l	D	2
0	2	1	46l	E	2
2	0	0	85l	D	2
2	0	0	85l	F	2
1	0	2	31L	D	2
2	1	0	32L	A	2
0	2	1	42B	B	2
2	0	1	42B	D	2
0	2	0	41B	B	2
2	0	0	41B	C	2
0	2	0	41B	D	2
2	0	0	41B	F	2
0	2	1	41B	I	2
0	2	0	31B	A	2
1	2	0	31B	B	2
0	2	0	31B	D	2
0	2	0	32B	D	2
2	0	1	42L	D	3
0	2	1	85b	A	3
1	2	0	42B	B	3
2	0	0	41B	C	3
2	0	0	31B	B	3
2	1	0	85l	E	4
1	0	2	41L	F	4
1	2	0	31L	D	4
0	0	2	46b	A	4
2	0	1	42B	A	4
0	2	0	41B	A	4
2	0	0	41B	C	4
1	0	2	31B	A	4

A4 – Testbürste 5 – Kinderhandzahnbürste (KZB/04/13/vier Durchläufe)

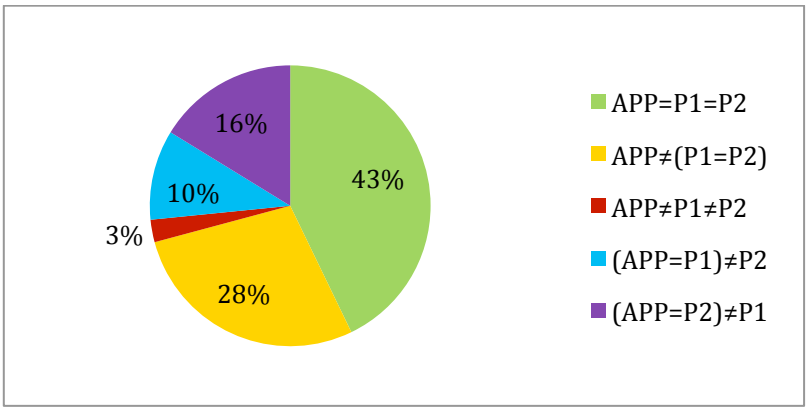

Abbildung A4.1: Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=425. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a).

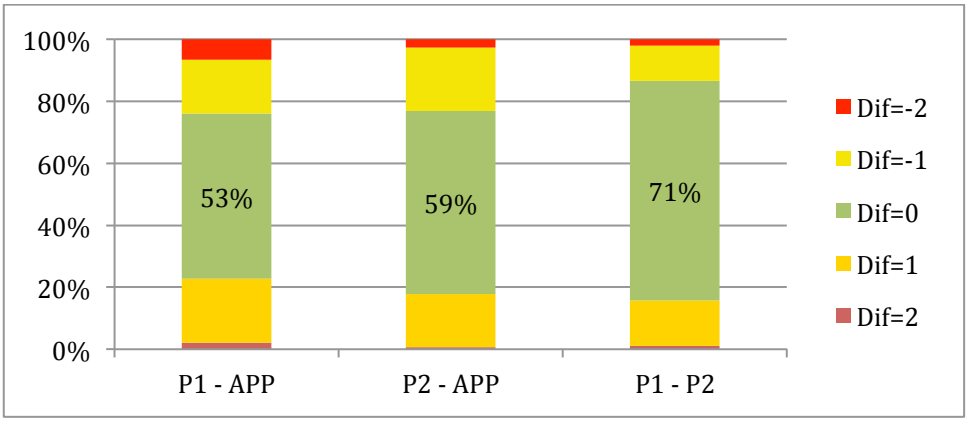

Abbildung A4.2: Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=425. Weitere Erläuterungen Abbildung 21 (b).

Tabelle A4.1: Grad der Übereinstimmung der gesamten Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	1,19	1,14	1,12
Median	1	1	1

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	0,26	0,792	nein	0,32	0,748	nein	0,556
P1 vs. APP	-1,10	0,271	nein	0,74	0,457	nein	0,279
P2 vs. APP	-1,40	0,161	nein	1,12	0,262	nein	0,361

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=425. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

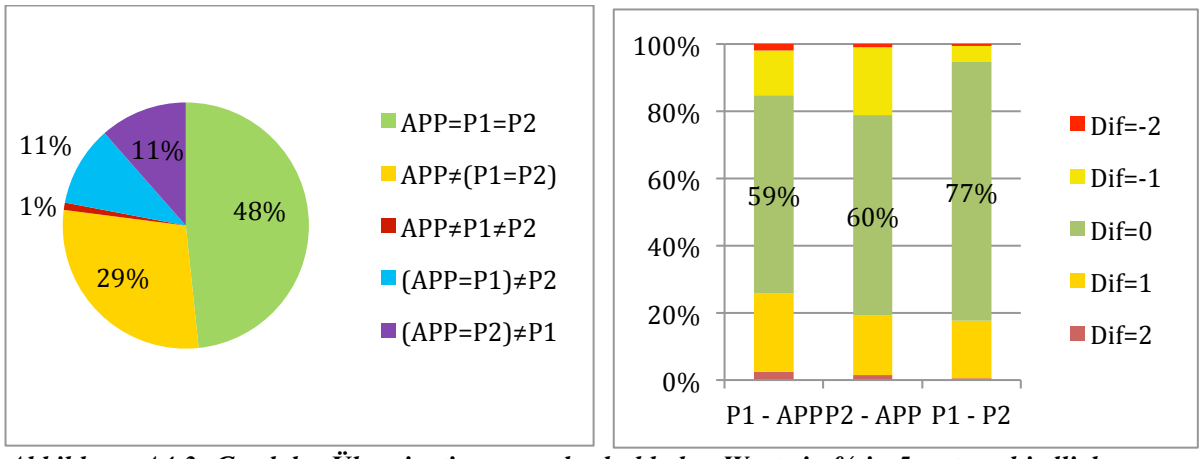

Abbildung A4.3: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=209. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A4.2: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	1,00	1,11	0,99
Median	1	1	1

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	1,63	0,104	nein	1,53	0,126	nein	**0,654**
P1 vs. APP	1,50	0,135	nein	1,44	0,149	nein	0,372
P2 vs. APP	-0,19	0,845	nein	0,19	0,851	nein	0,385

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=209. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

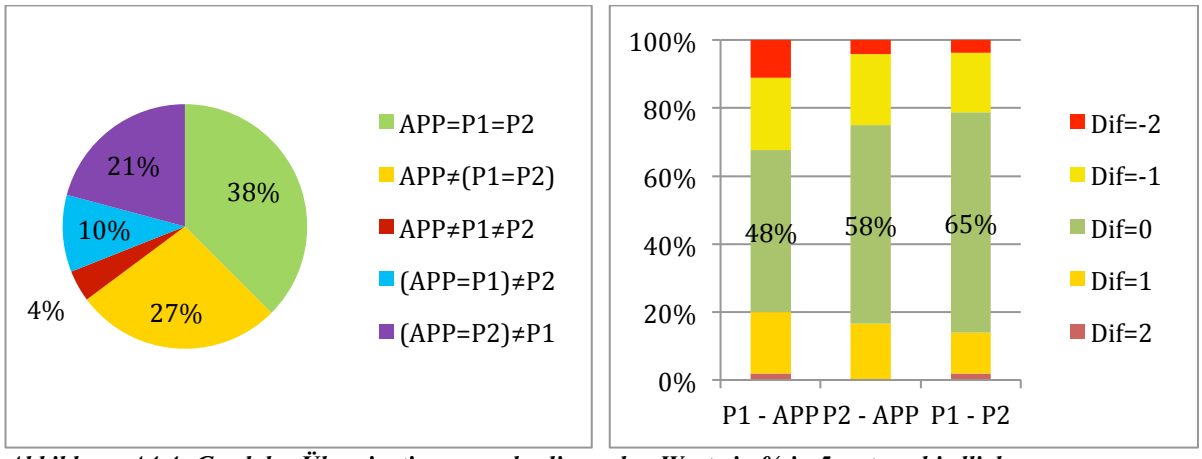

Abbildung A4.4: Grad der Übereinstimmung der lingualen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=216. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A4.3: Grad der Übereinstimmung der lingualen Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	1,38	1,16	1,25
Median	1	1	1

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	-1,25	0,213	nein	0,98	0,329	nein	0,457
P1 vs. APP	**-3,13**	<0,01	**ja**	**2,36**	0,018	**ja**	0,181
P2 vs. APP	-1,92	0,056	nein	1,42	0,157	nein	0,310

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=216. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

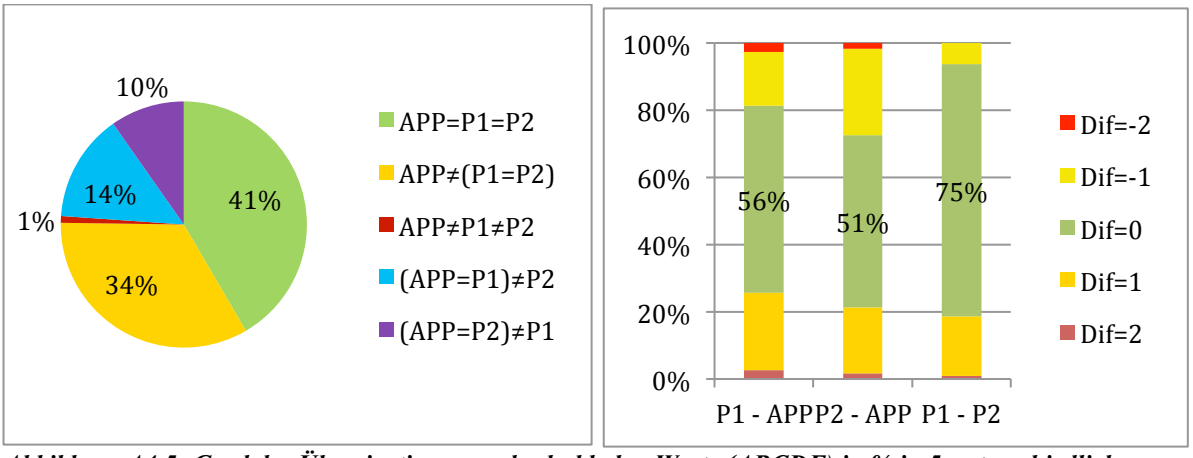

Abbildung A4.5: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Werte (ABCDF) in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=113. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A4.4: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Zahnfelder (ABCDF) von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	0,84	0,91	0,78
Median	1	1	1

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	1,27	0,206	nein	1,18	0,238	nein	**0,622**
P1 vs. APP	0,70	0,486	nein	0,57	0,565	nein	0,324
P2 vs. APP	-0,62	0,536	nein	0,68	0,494	nein	0,246

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=113. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

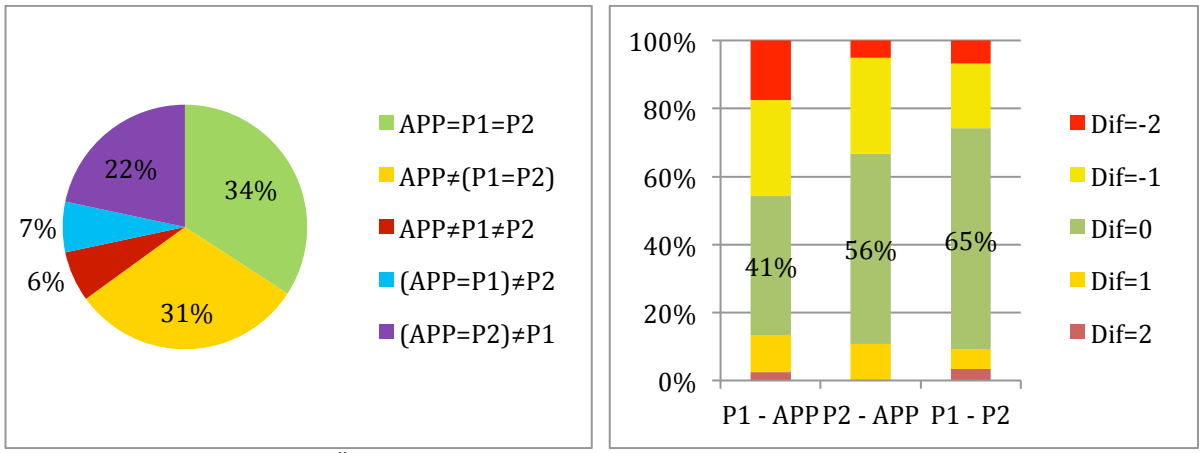

Abbildung A4.6: Grad der Übereinstimmung der lingualen Werte (ABCDF) in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=120. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A4.5: Grad der Übereinstimmung der lingualen (ABCDF) Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	1,46	0,98	1,18
Median	2	1	1

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	-1,86	0,065	nein	1,68	0,093	nein	0,476
P1 vs. APP	**-4,84**	<0,01	**ja**	**3,99**	<0,01	**ja**	0,127
P2 vs. APP	**-2,95**	<0,01	**ja**	**2,38**	0,017	**ja**	0,293

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=120. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

Tabelle A4.6: Zahnfelder mit stark unterschiedlicher Bewertung

APP	P1	P2	Zahnfläche	Zahnfeld	Durchlauf
0	2	0	46l	B	1
0	2	0	85l	B	1
2	0	2	85l	F	1
2	0	1	42L	A	1
2	0	2	42L	B	1
2	0	2	42L	C	1
2	0	1	42L	D	1
2	0	2	41L	B	1
2	0	1	41L	C	1
0	2	1	31L	E	1
2	0	1	32L	A	1
2	0	0	46l	D	2
2	0	0	41L	A	2
2	0	2	41L	C	2
1	2	0	32L	D	2
2	0	2	32L	F	2
2	0	1	42B	C	2
2	0	1	46l	D	3
2	0	1	41L	A	3
2	0	1	41L	C	3
2	0	2	32L	C	3
0	2	0	32L	D	3
2	0	2	32L	F	3
2	0	0	41B	C	3
0	2	2	41B	H	3
0	2	1	32B	I	3
0	2	0	32B	C	3
2	0	2	32B	E	3
2	0	0	85l	B	4
2	0	0	85l	C	4
2	0	0	85l	E	4
2	0	0	85l	F	4
2	0	0	85l	H	4
2	0	0	85l	I	4
2	0	0	32L	A	4
0	2	2	85b	A	4
0	2	2	85b	D	4
2	0	0	41B	C	4

A5 – Testbürste 6 – Elektrische Zahnbürsten (EZB/05/13/sieben Durchläufe)

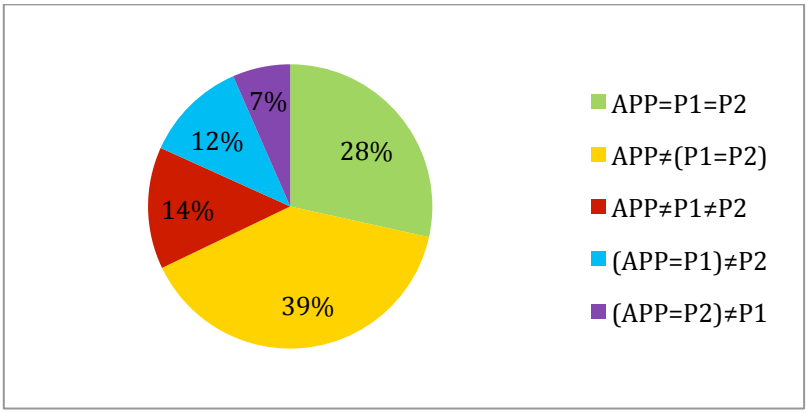

Abbildung A5.1: Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=137. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a).

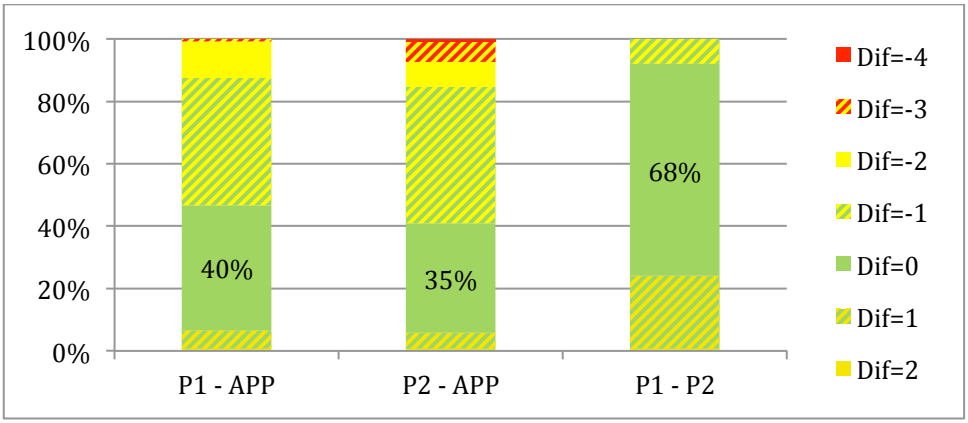

Abbildung A5.2: Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=137. Weitere Erläuterungen Abbildung 21 (b).

Tabelle A5.1: Grad der Übereinstimmung der gesamten Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	**P1**	**P2**
Mittelwert	3,60	3,01	2,84
Median	4	3	3

Bivariate Tests	**t**	**prob(t)**	**sign. (p=0,05)**	**W**	**prob(W)**	**sign. (p=0,05)**	**κ**
P1 vs. P2	**1,38**	0,169	nein	1,13	0,258	nein	0,559
P1 vs. APP	**-5,57**	<0,01	**ja**	**5,02**	<0,01	**ja**	0,175
P2 vs. APP	**-6,70**	<0,01	**ja**	**5,99**	<0,01	**ja**	0,139

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=137. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

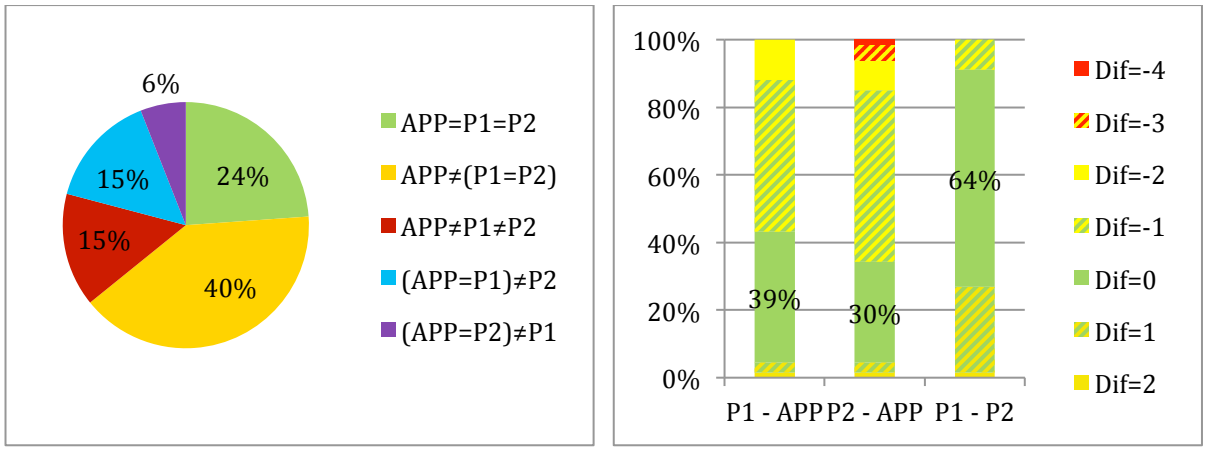

Abbildung A5.3: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=67. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A5.2: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	**P1**	**P2**
Mittelwert	3,30	2,67	2,48
Median	3	3	2

Bivariate Tests	**t**	**prob(t)**	**sign. (p=0,05)**	**W**	**prob(W)**	**sign. (p=0,05)**	**κ**
P1 vs. P2	**1,31**	0,194	nein	1,02	0,309	nein	0,472
P1 vs. APP	**-4,70**	<0,01	**ja**	**4,06**	<0,01	**ja**	0,139
P2 vs. APP	**-5,86**	<0,01	**ja**	**4,93**	<0,01	**ja**	0,043

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=67. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

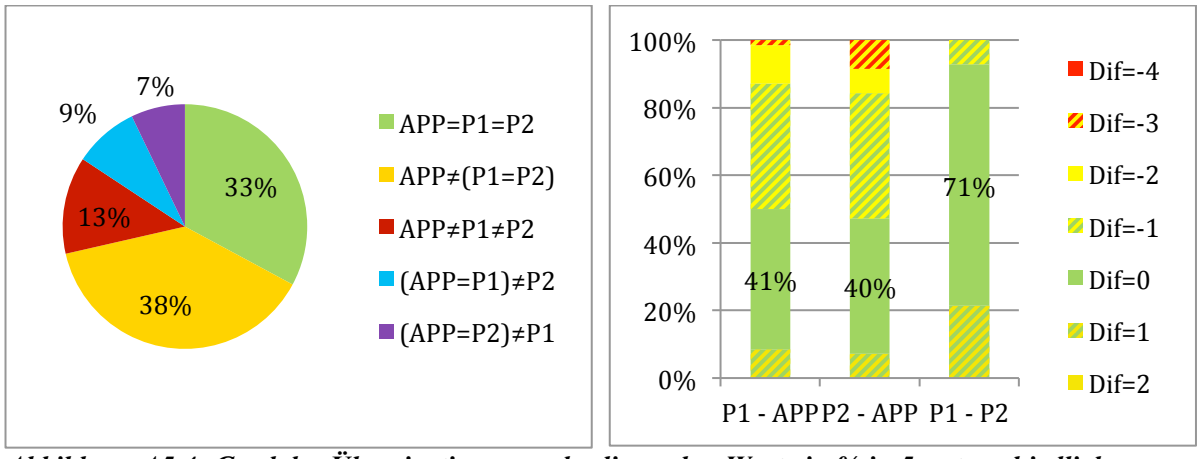

Abbildung A5.4: Grad der Übereinstimmung der lingualen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=70. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A5.3: Grad der Übereinstimmung der lingualen Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	3,89	3,33	3,19
Median	4	3	3

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	0,82	0,413	nein	0,64	0,520	nein	**0,602**
P1 vs. APP	**-3,79**	<0,01	**ja**	**3,49**	<0,01	**ja**	0,173
P2 vs. APP	**-4,37**	<0,01	**ja**	**4,07**	<0,01	**ja**	0,210

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=70. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

Tabelle A5.4: Zahnfelder mit stark unterschiedlicher Bewertung

APP	P1	P2	Zahnfläche	Durchlauf
4	2	1	45l	1
4	2	1	43l	1
4	2	0	43b	3
4	2	1	43b	4
5	3	2	48b	5
4	2	1	44l	6
4	1	1	43l	6
4	2	1	42l	6
4	2	1	41l	6
4	2	1	43b	7

A6 – Testbürste 8 – Handzahnbürste (MZB/04/13/vier Durchläufe)

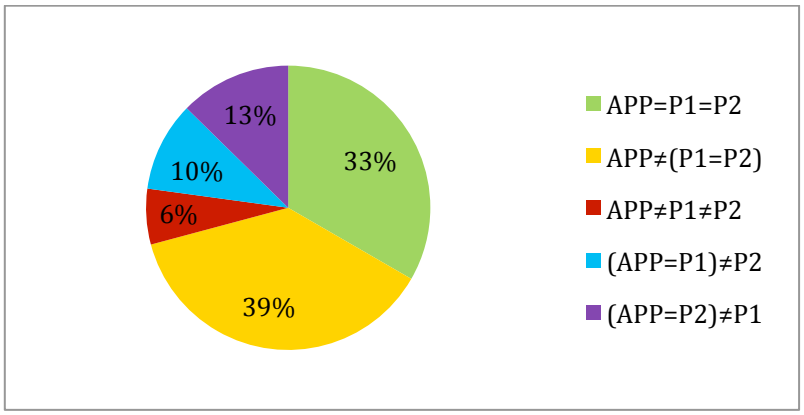

Abbildung A6.1: Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=648. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a).

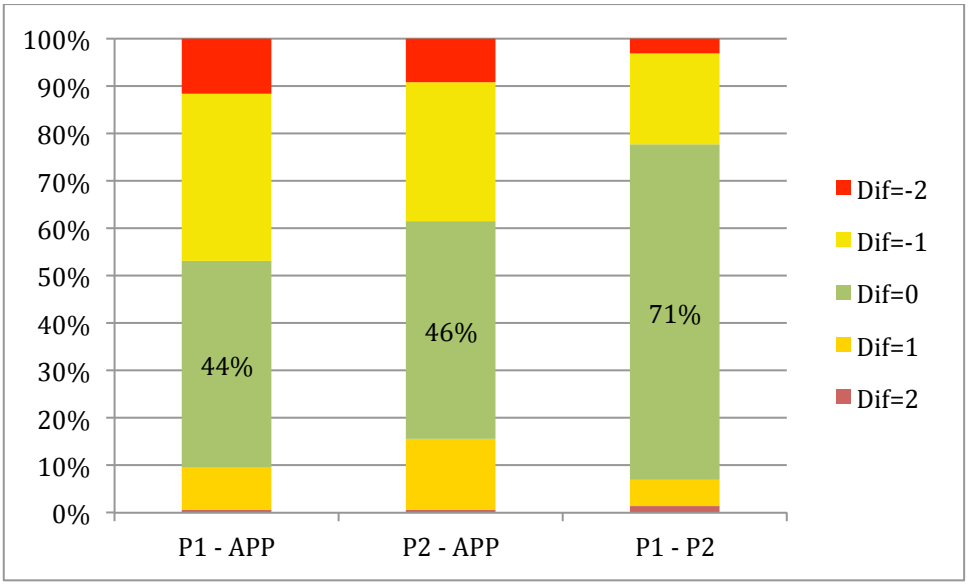

Abbildung A6.2: Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=648. Weitere Erläuterungen Abbildung 21 (b).

Tabelle A6.1: Grad der Übereinstimmung der gesamten Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	0,79	0,31	0,48
Median	1	0	0

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	**-4,96**	<0,01	**ja**	**4,78**	<0,01	**ja**	0,396
P1 vs. APP	**-13,54**	<0,01	**ja**	**12,25**	<0,01	**ja**	0,108
P2 vs. APP	**-8,53**	<0,01	**ja**	**7,80**	<0,01	**ja**	0,121

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=648. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

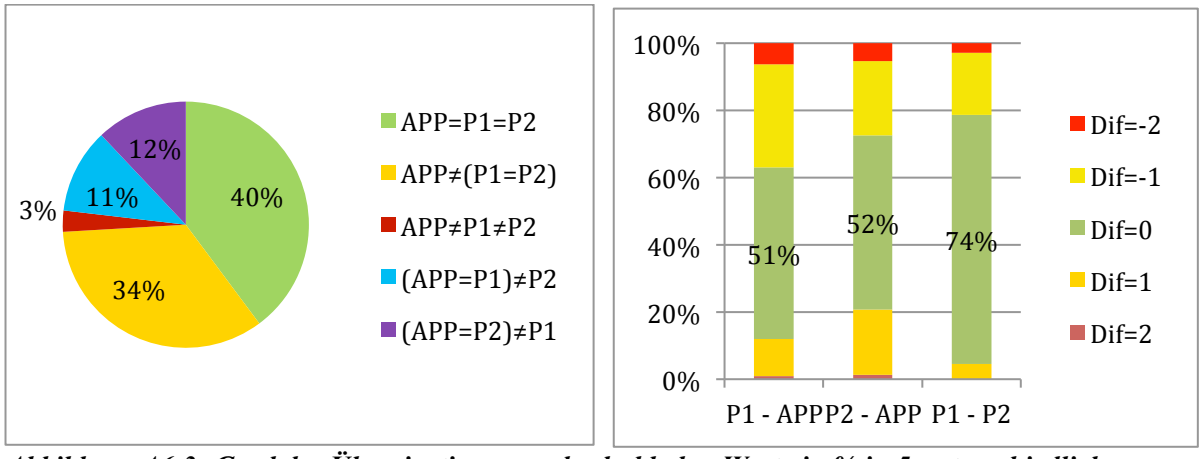

Abbildung A6.3: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=324. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A6.2: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	0,61	0,31	0,50
Median	1	0	0

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	**-4,08**	<0,01	**ja**	**3,75**	<0,01	**ja**	0,477
P1 vs. APP	**-6,40**	<0,01	**ja**	**5,99**	<0,01	**ja**	0,119
P2 vs. APP	**-2,17**	0,030	**ja**	**2,20**	0,028	**ja**	0,150

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=324. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

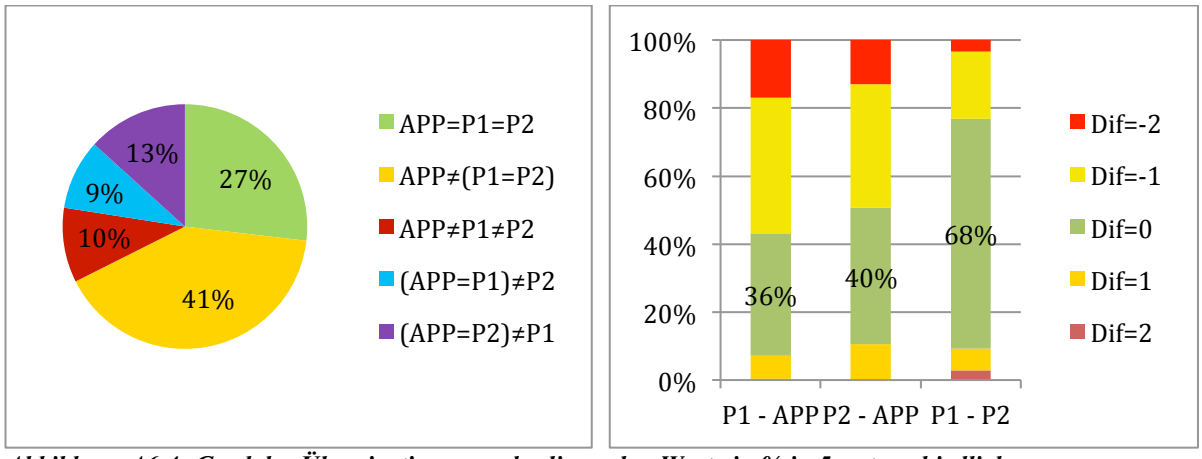

Abbildung A6.4: Grad der Übereinstimmung der lingualen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=324. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A6.3: Grad der Übereinstimmung der lingualen Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	0,97	0,31	0,45
Median	1	0	0

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	**-2,95**	<0,01	**ja**	**3,02**	<0,01	**ja**	0,308
P1 vs. APP	**-12,88**	<0,01	**ja**	**11,24**	<0,01	**ja**	0,102
P2 vs. APP	**-9,94**	<0,01	**ja**	**8,76**	<0,01	**ja**	0,105

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=324. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

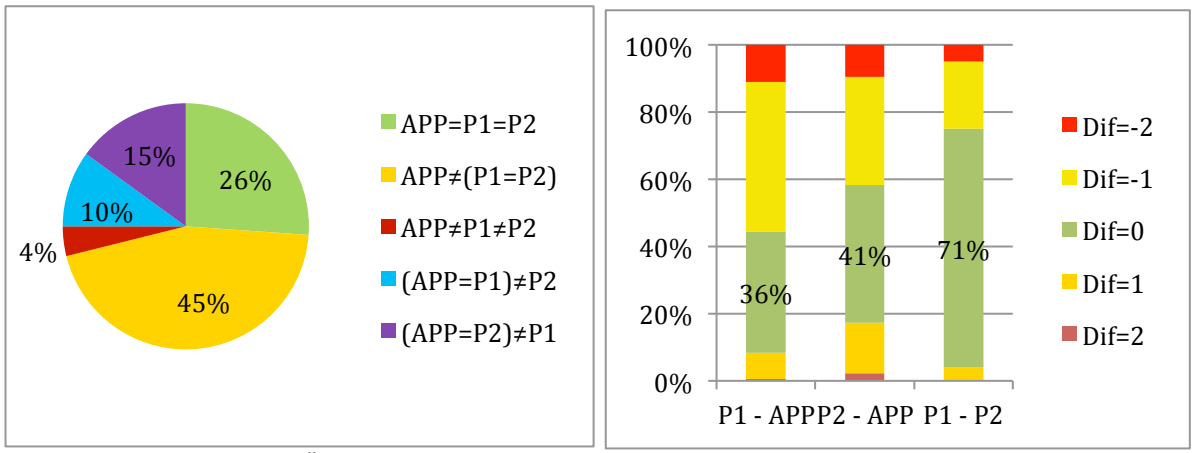

Abbildung A6.5: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Werte (ABCDF) in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=180. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A6.4: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Zahnfelder (ABCDF) von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	0,84	0,27	0,53
Median	1	0	0

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	**-3,66**	<0,01	**ja**	**3,34**	<0,01	**ja**	0,374
P1 vs. APP	**-8,68**	<0,01	**ja**	**8,05**	<0,01	**ja**	0,086
P2 vs. APP	**-4,38**	<0,01	**ja**	**4,47**	<0,01	**ja**	0,107

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=180. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

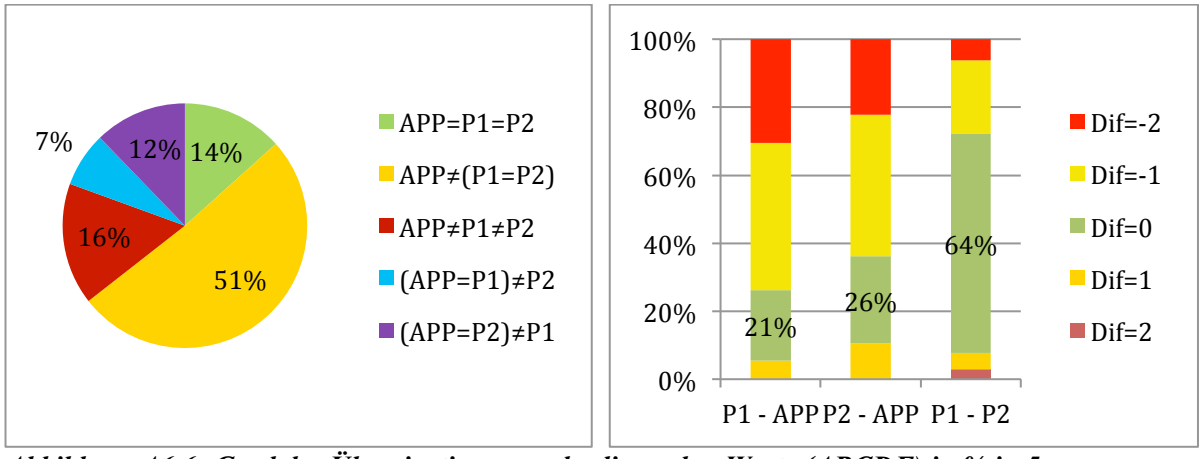

Abbildung A6.6: Grad der Übereinstimmung der lingualen Werte (ABCDF) in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=180. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A6.5: Grad der Übereinstimmung der lingualen Zahnfelder (ABCDF) von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	1,21	0,22	0,45
Median	1	0	0

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	**-3,60**	<0,01	**ja**	**3,02**	<0,01	**ja**	0,148
P1 vs. APP	**-15,04**	<0,01	**ja**	**11,31**	<0,01	**ja**	0,003
P2 vs. APP	**-10,40**	<0,01	**ja**	**8,73**	<0,01	**ja**	<0

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=180. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

Tabelle A6.6: Zahnfelder mit stark unterschiedlicher Bewertung

APP	P1	P2	Zahnfläche	Zahnfeld	Durchlauf
2	0	0	45L	A	1
2	0	0	45L	D	1
2	0	0	44L	D	1
2	0	0	43L	A	1
2	0	1	42L	C	1
2	0	1	42L	D	1
2	0	0	41L	C	1
1	0	2	41L	D	1
1	0	2	31L	C	1
1	0	2	31L	F	1
2	0	1	32L	A	1
2	0	1	32L	C	1
2	0	0	43B	C	1
2	0	0	42B	A	1
2	0	0	41B	C	1
0	0	2	31B	A	1
2	0	0	31B	C	1
2	0	0	45L	A	2
2	0	0	45L	D	2
2	0	0	44L	A	2
2	0	0	44L	D	2
2	0	1	44L	F	2
2	0	0	43L	A	2
2	0	0	43L	D	2
2	0	2	42L	A	2
2	0	1	42L	B	2
2	0	0	42L	C	2
2	0	0	42L	D	2
2	0	1	41L	A	2
2	0	0	41L	D	2
1	0	2	31L	C	2
1	0	2	31L	F	2
2	0	0	32L	A	2
2	0	0	32L	D	2
2	0	1	43B	A	2
2	0	0	43B	C	2
2	0	0	42B	A	2
2	0	0	42B	D	2
0	1	2	41B	A	2
2	0	0	41B	C	2
2	0	2	31B	C	2
2	0	0	32B	A	2
2	1	0	47L	D	3
2	2	0	47L	G	3

1	2	0	47L	H	3
1	2	0	46L	C	3
1	2	0	46L	F	3
2	0	0	45L	A	3
2	0	0	45L	D	3
2	0	0	45L	F	3
2	1	0	44L	A	3
2	2	0	44L	D	3
2	2	0	44L	G	3
2	0	0	43L	A	3
2	0	0	43L	C	3
2	0	0	43L	D	3
2	0	0	43L	F	3
2	0	1	42L	B	3
2	0	0	42L	C	3
2	0	0	42L	D	3
2	0	1	41L	A	3
2	0	0	41L	D	3
1	2	0	41L	E	3
0	2	1	31L	E	3
2	0	0	32L	A	3
1	2	0	32L	D	3
0	2	1	46B	C	3
2	0	0	46B	D	3
2	0	0	43B	C	3
0	0	2	41B	A	3
2	0	0	41B	C	3
1	0	2	31B	C	3
2	0	1	47L	D	4
2	0	1	47L	F	4
2	0	0	46L	C	4
2	0	1	46L	F	4
2	0	0	45L	A	4
2	0	0	45L	D	4
2	0	2	44L	A	4
2	0	0	43L	A	4
2	0	0	43L	D	4
2	0	0	42L	A	4
2	0	0	42L	B	4
2	1	0	42L	C	4
2	0	0	42L	D	4
2	0	1	41L	A	4
2	0	1	41L	D	4
2	0	2	31L	C	4
2	0	2	31L	F	4
2	1	0	32L	A	4
2	0	1	32L	B	4
2	0	2	32L	C	4

1	2	0	32L	D	4
1	0	2	32L	F	4
0	2	1	47B	E	4
0	2	1	46B	I	4
1	0	2	45B	D	4
1	0	2	44B	D	4
1	0	2	43B	A	4
2	0	0	43B	C	4
2	0	2	42B	A	4
2	0	0	42B	D	4
0	0	2	41B	A	4
2	0	0	41B	C	4
2	0	0	32B	A	4
2	0	0	32B	C	4

A7 – Testbürste 9 – Handzahnbürste (MZB/04/13/vier Durchläufe)

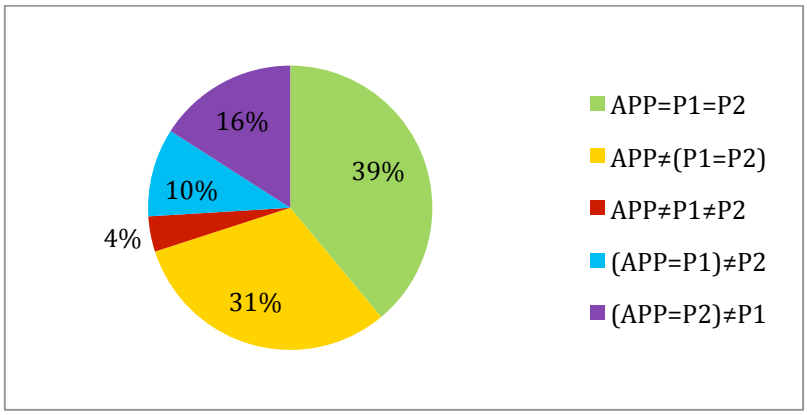

Abbildung A7.1: Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=647. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a).

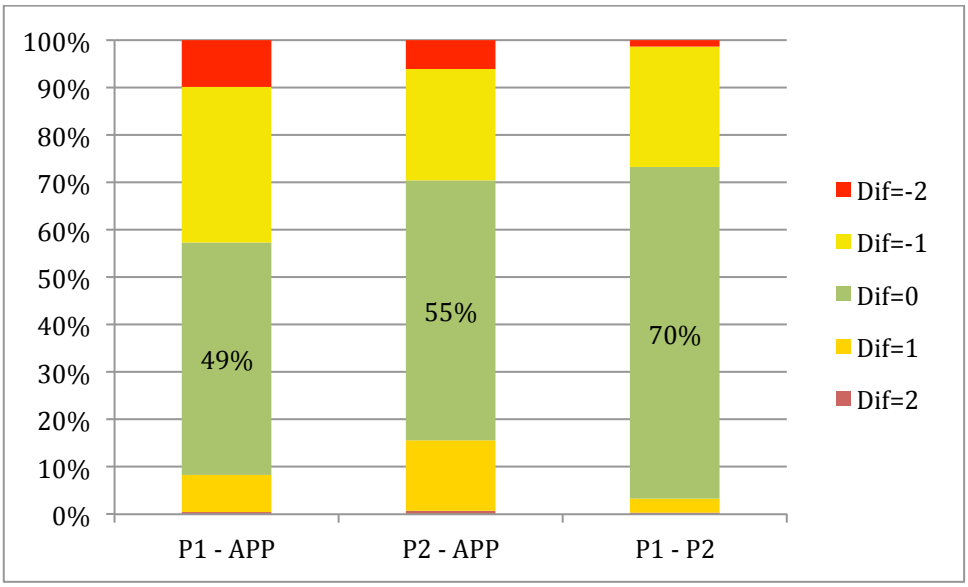

Abbildung A7.2: Grad der Übereinstimmung der gesamten Werte in % als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=647. Weitere Erläuterungen Abbildung 21 (b).

Tabelle A7.1: Grad der Übereinstimmung der gesamten Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	0,77	0,33	0,58
Median	1	0	0

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	**-6,94**	<0,01	**ja**	**6,87**	<0,01	**ja**	0,448
P1 vs. APP	**-11,91**	<0,01	**ja**	**11,00**	<0,01	**ja**	0,180
P2 vs. APP	**-5,11**	<0,01	**ja**	**4,58**	<0,01	**ja**	0,255

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=647. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

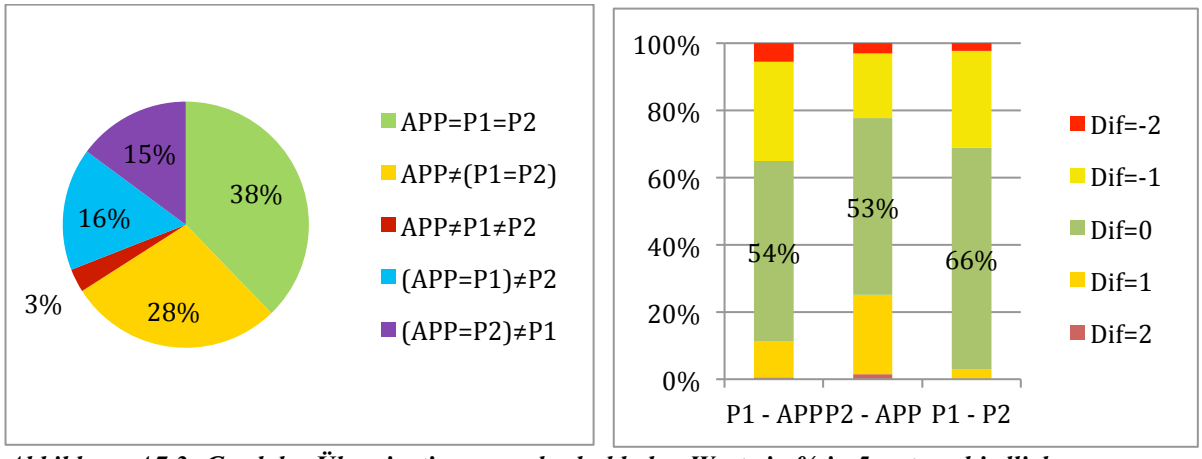

Abbildung A7.3: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=323. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A7.2: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	0,56	0,27	0,57
Median	0	0	1

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	**-6,49**	<0,01	**ja**	**6,04**	<0,01	**ja**	0,364
P1 vs. APP	**-6,13**	<0,01	**ja**	**5,63**	<0,01	**ja**	0,118
P2 vs. APP	0,25	0,802	nein	0,34	0,733	nein	0,156

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=323. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

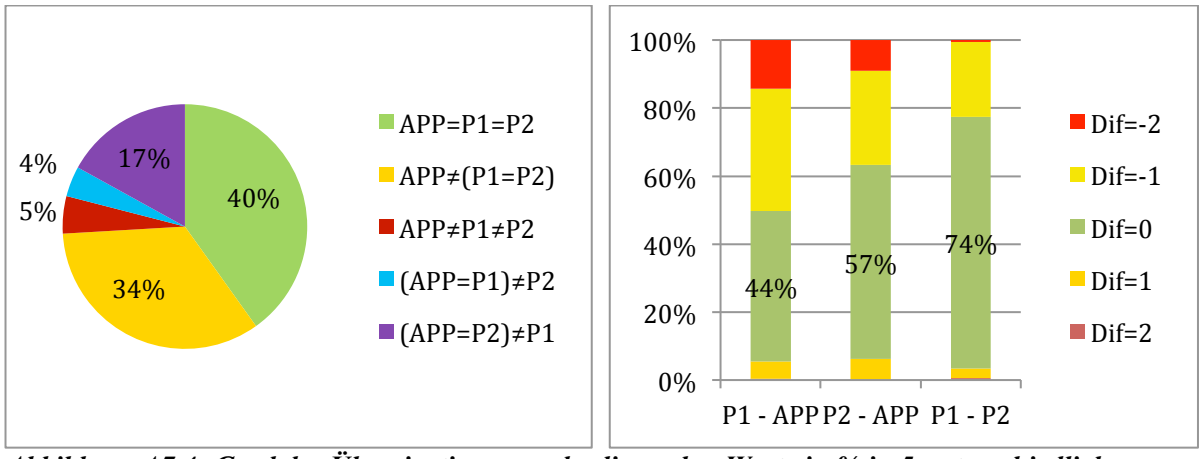

Abbildung A7.4: Grad der Übereinstimmung der lingualen Werte in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=324. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A7.3: Grad der Übereinstimmung der lingualen Zahnfelder von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	0,98	0,40	0,59
Median	1	0	0

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	**-3,59**	<0,01	**ja**	**3,72**	<0,01	**ja**	0,529
P1 vs. APP	**-10,91**	<0,01	**ja**	**9,89**	<0,01	**ja**	0,207
P2 vs. APP	**-7,31**	<0,01	**ja**	**6,65**	<0,01	**ja**	0,344

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=324. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

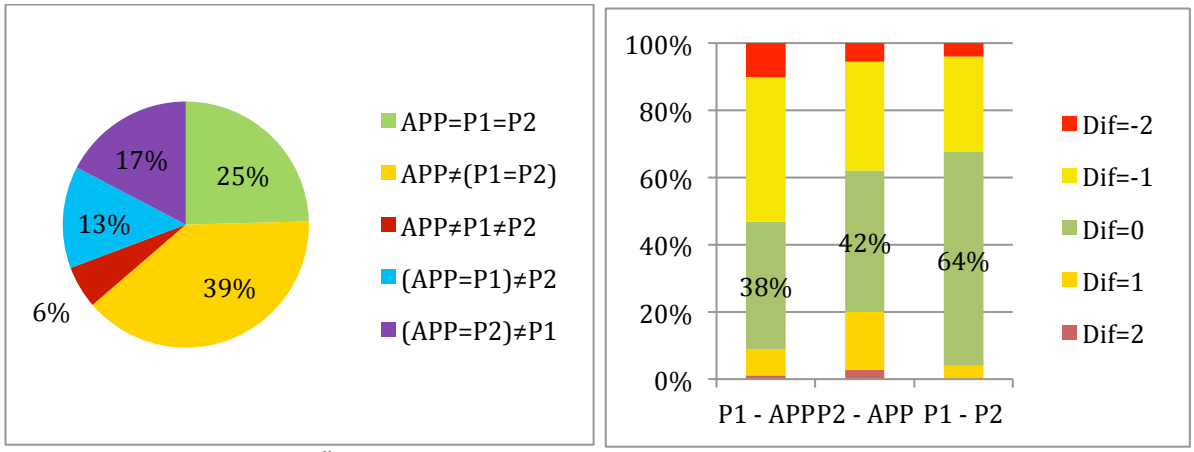

Abbildung A7.5: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Werte (ABCDF) in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=179. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A7.4: Grad der Übereinstimmung der bukkalen Zahnfelder (ABCDF) von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	0,80	0,27	0,60
Median	1	0	0

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	**-4,62**	<0,01	**ja**	**4,47**	<0,01	**ja**	0,312
P1 vs. APP	**-7,79**	<0,01	**ja**	**7,33**	<0,01	**ja**	0,071
P2 vs. APP	**-2,87**	<0,01	**ja**	**2,86**	<0,01	**ja**	0,066

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=179. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

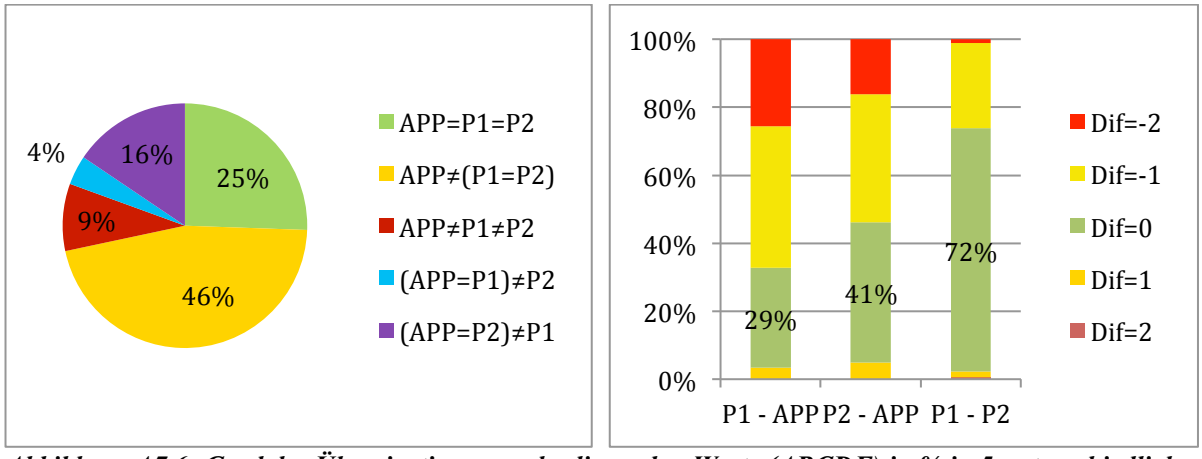

Abbildung A7.6: Grad der Übereinstimmung der lingualen Werte (ABCDF) in % in 5 unterschiedlichen Konstellationen (links) und als bivariater Vergleich zwischen den 3 Auswertern untereinander (rechts)

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=180. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung 21 (a) und (b).

Tabelle A7.5: Grad der Übereinstimmung der lingualen Zahnfelder (ABCDF) von APP, P1 und P2 mit Hilfe des Mittelwertes und des Medians sowie bivariater Signifikanztests

	APP	P1	P2
Mittelwert	1,25	0,36	0,60
Median	1	0	0

Bivariate Tests	t	prob(t)	sign. (p=0,05)	W	prob(W)	sign. (p=0,05)	κ
P1 vs. P2	**-3,28**	<0,01	**ja**	**3,25**	<0,01	**ja**	0,466
P1 vs. APP	**-12,58**	<0,01	**ja**	**10,20**	<0,01	**ja**	0,116
P2 vs. APP	**-8,82**	<0,01	**ja**	**7,59**	<0,01	**ja**	0,184

Erläuterungen: Stichprobenumfang: n=180. Weitere Erläuterungen siehe Tabelle 2.

Tabelle A7.6: Zahnfelder mit stark unterschiedlicher Bewertung

APP	P1	P2	Zahnfläche	Zahnfeld	Durchlauf
2	0	1	47L	F	1
2	0	1	45L	A	1
2	0	0	45L	D	1
2	0	1	45L	F	1
2	0	0	43L	A	1
2	0	0	43L	B	1
2	0	0	43L	C	1
2	0	0	43L	D	1
2	0	1	43L	F	1
2	0	0	42L	B	1
2	0	0	42L	C	1
2	0	1	31L	A	1
2	0	1	43B	C	1
2	0	1	42B	A	1
2	0	1	42B	C	1
2	0	1	42B	D	1
0	2	2	41B	A	1
2	0	1	41B	C	1
1	0	2	31B	C	1
0	0	2	31B	F	1
2	0	0	45L	A	2
2	0	0	45L	D	2
2	0	0	45L	F	2
2	0	0	44L	F	2
2	0	0	43L	C	2
2	0	0	43L	D	2
2	0	2	42L	A	2
2	0	1	42L	B	2
2	0	0	42L	D	2
2	0	1	41L	A	2
2	0	1	41L	D	2
0	0	2	44B	A	2
2	0	0	43B	A	2
2	0	0	43B	C	2
2	0	2	42B	A	2
2	0	2	42B	D	2
2	0	0	41B	C	2
0	1	2	32B	A	2
2	0	0	47L	A	3
2	0	0	47L	D	3
2	0	1	45L	A	3
2	0	0	45L	D	3
2	0	0	45L	F	3
2	0	1	44L	F	3

2	0	0	43L	A	3
2	0	0	43L	C	3
2	0	0	43L	D	3
2	0	1	42L	A	3
2	0	1	42L	B	3
2	0	0	42L	D	3
2	0	1	41L	A	3
1	2	0	32L	A	3
2	0	2	32L	C	3
0	2	0	32L	G	3
2	0	0	47B	C	3
2	1	0	45B	C	3
2	0	0	43B	C	3
2	0	2	42B	A	3
0	0	2	42B	C	3
2	0	0	41B	C	3
2	0	0	47L	D	4
2	0	0	43L	A	4
2	0	0	43L	D	4
2	0	1	42L	A	4
2	0	1	42L	B	4
2	0	0	42L	D	4
2	0	0	41L	A	4
2	0	0	41L	D	4
2	0	0	32L	A	4
0	2	1	46B	C	4
2	0	1	43B	C	4
2	0	0	42B	A	4
2	0	0	42B	D	4
2	0	0	41B	C	4

A8 – Testbürste 10 – Handzahnbürste (MZB/04/13/vier Durchläufe)

Tabelle A8: Zahnfelder mit stark unterschiedlicher Bewertung

APP	P1	P2	Zahnfläche	Zahnfeld	Durchlauf
2	0	0	45L	A	1
2	0	0	45L	D	1
2	0	0	44L	D	1
2	0	0	44L	F	1
2	0	0	43L	A	1
2	0	0	43L	D	1
2	0	0	42L	C	1
2	0	0	42L	D	1
2	0	0	41L	B	1
2	0	1	41L	D	1
2	0	1	31L	A	1
2	0	0	31L	D	1
2	0	0	32L	A	1
2	0	2	32L	F	1
2	0	1	43B	A	1
2	1	0	43B	C	1
2	0	1	43B	D	1
2	0	0	42B	A	1
2	0	1	42B	C	1
2	0	0	42B	F	1
2	0	0	41B	B	1
2	0	1	41B	C	1
2	0	0	41B	F	1
2	0	1	31B	C	1
2	0	0	45L	A	2
2	0	0	45L	F	2
2	0	0	44L	A	2
2	0	0	44L	D	2
2	0	1	43L	A	2
2	0	0	43L	D	2
2	0	0	42L	B	2
2	0	0	42L	C	2
2	0	0	41L	A	2
2	0	0	41L	D	2
2	0	0	32L	A	2
2	0	0	42B	A	2
2	0	0	41B	C	2
2	0	0	47L	D	3
2	0	0	45L	A	3
2	0	0	45L	D	3
2	0	0	45L	F	3
2	0	0	43L	A	3

2	0	0	43L	C	3
2	0	0	43L	D	3
2	0	0	43L	F	3
2	0	0	42L	A	3
2	0	0	42L	B	3
2	0	0	42L	C	3
2	0	0	42L	D	3
2	0	0	41L	A	3
2	0	0	32L	A	3
1	0	2	46B	F	3
2	0	0	43B	A	3
2	0	0	43B	C	3
2	2	0	42B	A	3
2	0	0	42B	D	3
0	0	2	41B	A	3
2	0	0	41B	C	3
2	0	0	41B	F	3
1	2	0	32B	A	3
2	2	0	32B	C	3
0	2	0	32B	E	3
2	0	0	45L	A	4
2	0	0	45L	D	4
2	0	0	45L	F	4
2	0	0	44L	D	4
2	0	0	43L	A	4
2	0	0	43L	C	4
2	0	0	43L	D	4
2	1	0	42L	A	4
2	0	0	42L	C	4
2	0	0	42L	D	4
2	0	0	41L	C	4
2	0	0	41L	F	4
2	0	0	31L	A	4
2	2	0	32L	A	4
2	0	2	32L	C	4
2	0	0	43B	A	4
2	0	0	43B	C	4
2	0	0	43B	D	4
2	0	1	31B	C	4
2	0	0	32B	A	4

Einen besonderen Dank möchte ich aussprechen,

meinem Mentor Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Peter Gängler,
Herrn Dr. Tomas Lang,
der Statistikerin Frau Dr. Barbara Jennes,
meinem ehemaligen Kommilitonen und sehr guten Freund Frederik Arnoldi
und meinen Eltern Margret und Rolf Egermann
sowie meinen Brüdern Michael, Christian und Andreas.

A9 – Lebenslauf

Persönliche Daten

Vorname	Stefan
Nachname	Egermann
Wohnhaft in	Große Busch 18 59348 Lüdinghausen
Geburtsdatum	31. Juli 1989
Geburtsort	Lüdinghausen
Staatsbürgerschaft	Deutsch
Familie	Dr. Rolf Egermann (Vater) Margarete Egermann (Mutter) Dr. Michael Egermann (Bruder)

Schulbildung

1995 - 1999	Marienschule Seppenrade
1999 - 2008	Gymnasium Canisianum in Lüdinghausen mit Abschluss der allgemeinen Hochschulreife

Studium

WS 2008/2009 – SS 2009	Studium Bsc. Geography an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster
WS 2009/2010	Beginn des Studiums der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde an der Universität Witten/Herdecke
Dezember 2014	Abschluss des Studiums der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde an der Universität Witten/Herdecke mit dem Staatsexamen

Beruf

Dezember 2014	Beginn der Tätigkeit als Assistenzzahnarzt in der Praxis-Klinik Dr. Rolf Egermann & Kollegen

A10 – Eidesstattliche Erklärung:

Ich versichere (an Eides statt), dass ich die zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnheilkunde vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema „Zahnbürstenentwicklungen im vergleichenden Robotertest mit quasi-klinischer Auswertung“ selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und die in der Arbeit verwendete Literatur vollständig zitiert habe. Ich habe diese Dissertation weder in dieser noch in einer ähnlichen Form an einer anderen Hochschule eingereicht.

Ort, Datum

Unterschrift