Die Robotersimulation der Plaquekontrolle – Einfluss von Zahnbürsten, Putzprogrammen und Plaquesimulationen

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Grades Doctor medicinae dentarium

der

Universität Witten/Herdecke

Fakultät für Gesundheit

vorgelegt von

Laura Civale

aus Hildesheim

2024

Dekan:	**Prof. Dr. Stefan Zimmer,** **Prof. Dr. Margarete Halek**
Mentor:	**Prof. Dr. med. Dr. h. c. Peter Gängler**
Zweitgutachter:	
Tag der Disputation:	

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 1
1 Einleitung 4
1.1 Dentale Plaque 6
1.1.1 Entstehung der dentalen Plaque 8
1.1.2 Klinische Bedeutung der dentalen Plaque 11
1.2 Häusliche Mundhygiene 18
1.2.1 Zahnbürsten 19
1.2.2 Zahnputztechniken 20
1.2.3 Putzkraft und Putzdauer 21
1.3 Testverfahren zur Beurteilung der Putzeffizienz von Zahnbürsten 23
1.3.1 Schwierigkeiten des In vivo-Testverfahrens 23
1.3.2 Robotergenerierte Testmethoden 25
1.4 Ziel der Arbeit 28
2 Material und Methode 29
2.1 Materialüberblick 29
2.1.1 Zahnputzroboter 30
2.1.2 Kunststoffzähne 31
2.1.3 Plaquesimulationen 31
2.1.4 APP (Automatisierte-Plaque-Planimetrie) 32
2.1.5 Zahnbürsten 33
2.2 Methodik 34
2.2.1 Räumliche Verhältnisse 34
2.2.2 Vorbereitende Maßnahmen 35
2.2.3 Anmischen der Plaquesimulation 35
2.2.4 Kalibrierung des Roboters 36
2.2.5 Vorbereitung der Typodonten für den Putzzyklus 36
2.2.6 Putzzyklus 37

2.2.7 Auswertung der Reinigungsleistung 37
2.3 Statistische Methoden 40
2.3.1 Auswahl der Zahnfelder 40
2.3.2 Statistische Auswertungsverfahren 41
3 Ergebnisse 45
3.1 Vergleich der Plaquesimulationen anorganisch versus organisch 45
3.1.1 Prüfung auf den Unterschied 47
3.1.2 Deskriptiv-statistische und grafische Auswertung 48
3.1.3 Einfluss des Faktors Zahnbürste auf die Reinigungsleistung 52
3.1.4 Deskriptive Statistiken zu den Wechselwirkungen der Zahnbürsten 53
3.1.5 Einfluss des Putzzyklus auf die Reinigungsleistung 55
3.1.6 Deskriptive Statistiken zu den Wechselwirkungen je Testprogramm 56
3.2 Vergleich der Zahnbürsten - Testzahnbürste Dontodent versus Referenzzahnbürste 58
3.2.1 Test auf den Unterschied 59
3.2.2 Deskriptiv-statistische Auswertung und grafische Darstellung 60
3.2.3 Plaquesimulation als Einflussfaktor der Reinigungsleistung 63
3.2.4 Deskriptive Statistiken zu den Wechselwirkungen je nach Plaquesimulation 64
3.2.5 Putzzyklus als Einflussfaktor der Reinigungsleistung 67
3.2.6 Deskriptive Statistiken zu den Wechselwirkungen je nach Roboterprogramm 68
3.3 Vergleich der Putzzyklen – Putzzyklus „lang“ versus Putzzyklus „kurz“ 71
Test auf den Unterschied 72
3.3.1 Deskriptiv-statistische Auswertung und grafische Darstellung 73
3.3.2 Einflussfaktor Plaquesimulation auf die Reinigungsleistung 76
3.3.3 Deskriptiv-statistische Auswertung der Wechselwirkungen je nach Plaquesimulation 77
3.3.4 Einflussfaktor Zahnbürste auf die Reinigungsleistung 80

4 Diskussion 81
4.1 Material und Methode 81
4.1.1 Zahnbürsten 81
4.1.2 Plaquesimulationen 85
4.1.3 Putzzyklen 88
4.1.4 Versuchsaufbau 90
4.1.5 Versuchsdurchführung 91
4.2 Ergebnisse – Plaque-Entfernung 92
4.3 Ausblick 99
5 Zusammenfassung 101
6 Summary 103
7 Tabellenverzeichnis 105
8 Abbildungsverzeichnis 108
9 Literaturverzeichnis 110
10 Lebenslauf 124
11 Eidesstattliche Erklärung 125
12 Danksagung 126

1 Einleitung

Die Mundhöhle gilt als Eintrittspforte zum menschlichen Körper. Natürlicherweise steht sie tagtäglich mit vielen Mikroorganismen in Kontakt. Sowohl die Luft, die durch den Mund oder die Nase eingeatmet wird, als auch die aufgenommene Nahrung passieren den Mundraum auf ihrem Weg in die Lungen beziehungsweise den Gastrointestinaltrakt. Man geht mittlerweile davon aus, dass die residente Mikroflora der Mundhöhle entscheidend zur Beibehaltung der oralen Gesundheit beiträgt. Im Mund befinden sich eine Vielzahl von Mikroorganismen wie Viren, Protozoen, Pilze, Archaeen und Bakterien (Wade, 2013). Sie bilden zusammen das sogenannte orale Mikrobiom. Aufgrund ihres hohen Vorkommens in der Mundhöhle stehen Bakterien in der wissenschaftlichen Literatur auch heute noch meist im Vordergrund (Radiac und Kapila, 2021).

Zur Prävention oraler Erkrankungen hat sich unter anderem die regelmäßige Reduktion bakterieller Beläge auf den Zahnoberflächen und am Zahnfleischsaum als gesundheitsfördernd erwiesen (Löe, 2000). Erst die Nutzung von erschwinglicheren Nylonborsten und Plastikgriffen Ende der 1930er Jahre machte die Zahnbürste finanziell für den Großteil der Bevölkerung zugänglich (Löe, 2000). Die Nylonfilamente ersetzten nun die Tierhaarborsten und die knöchernen Griffe (Stuart, 1997).

Klinische Studien zeigten, dass mit der Bildung einer maturierten Plaque eine Gingivitis einhergehen konnte, die sich aber durch Wiederaufnahme der Mundhygienemaßnahmen als reversibel offenbarte (Löe et al., 1965; Theilade et al., 1966). In den Industrienationen setzte sich die Zahnbürste als effektivstes Mittel zur häuslichen Plaquekontrolle durch (König und Navia, 1995).

Die Erkenntnis der Eigenverantwortlichkeit und das Bestreben nach oraler Gesundheit führen dazu, dass das allgemeine Interesse an Mund- und Zahnhygieneartikeln stetig wächst. Der Wunsch nach einem möglichst lebenslangen Zahnerhalt scheint mittlerweile zu einem reellen Ziel geworden zu sein. So gaben 85,5 % der Befragten jüngeren Erwachsenen (35- bis 44-Jährige) im Rahmen der 5. Deutschen Mundgesundheitsstudie an, dass sie selbst „sehr viel“ und „viel“ zur eigenen Mundgesundheit beitragen können. Die große Mehrheit der Studienteilnehmer in dieser Alterskategorie führte ebenfalls an, sich zweimal am Tag die Zähne zu putzen (Jordan et al., 2016).

Dass immer mehr Produkte von vielen verschiedenen Herstellern auf den Markt kommen, ist daher kaum verwunderlich. Dem Verbraucher soll es dabei so einfach wie möglich gestaltet werden, Plaque zu entfernen. Die Verweildauer der einzelnen Produkte auf dem Markt ist begrenzt, sodass sie schon nach kurzer Zeit durch neue, (vermeintlich) effizientere Modelle ersetzt werden. Die Unternehmen stehen in einer engen Konkurrenz zueinander, sind abhängig von der Weiterentwicklung und Innovation ihrer Produkte und arbeiten meist eng mit der Wissenschaft zusammen. Umso wichtiger erscheint es, die verfügbaren Produkte, wie zum Beispiel Zahnbürsten, vor ihrer Erscheinung auf dem Markt im Hinblick auf ihre Reinigungsleistung zu testen. Es bedarf einer zuverlässigen, objektiven Testmethode, um zu verlässlichen Ergebnissen zu kommen.

Hierzu eignen sich - neben in vivo-Studien - auch robotergestützte in-vitro-Testverfahren. Letztere gelten insbesondere als zeitsparend und gut reproduzierbar und finden mittlerweile weitläufig Anwendung.

Bis dato gibt es noch kein einheitliches, standardisiertes Verfahren zur robotergestützten Testung von Zahnbürsten. Dies zieht eine begrenzte Vergleichbarkeit der Studien untereinander nach sich, da es auf diesem Gebiet viele unterschiedliche Studiendesigns gibt. Das Institute for Oral Medicine (ORMED) an der Universität Witten/Herdecke verfügt über ein hochstandardisiertes, robotergestütztes Verfahren zur Testung von Zahnbürsten, welches seit 2014 als klinisch validiert gilt (Lang et al., 2014).

Daran anlehnend wurde die gleichermaßen verwendete Automatisierte Plaque-Planimetrie in zwei quasi-klinischen Studien validiert (Arnoldi, 2015; Egermann, 2016). Hierbei handelt es sich um ein computergestütztes Auswertungsverfahren der gereinigten Zahnflächen. Die hohe Objektivität dieser Methode wird durch einen automatisierten Vorgang gewährleistet, der zuerst die einzelnen Zahnflächen bildlich erfasst und dann mit Hilfe einer Analysesoftware den prozentualen Anteil der gereinigten Zahnfläche im Verhältnis zur gesamten Zahnfläche ermittelt (Gaengler et al., 2013).

1.1 Dentale Plaque

Von allen Mikroorganismen, die in der Mundhöhle zu finden sind und das sogenannte orale Mikrobiom bilden, gehört die Gattung der Bakterien zu den am besten erforschten (Dewhirst et al., 2010). Das hängt zum einen mit ihrer potenziellen Pathogenität und zum anderen mit der Vielzahl ihres Vorkommens zusammen. Während die Pathogenität einiger Spezies in der Vergangenheit in großem Umfang erforscht und belegt wurde, weiß man wenig darüber, dass die residenten Bakterien gleichwohl für die orale Gesundheit unverzichtbar sein können (Hojo et al., 2009). Laut der „Human Oral Microbiome Database“ konnten bis heute 774 unterschiedliche, orale Bakterienspezies kultiviert werden, davon sind 58 % offiziell benannt, 16 % unbenannt, aber dennoch kultiviert und 26 % sind als nicht kultivierte Phylotypen bekannt (eHOMD,2023). Als Phylotypen werden Organismen mit unterschiedlicher DNA-Sequenz beschrieben. Unter physiologischen Umständen lebt das Mikrobiom der Mundhöhle in Symbiose mit dem Wirt und verhindert die Vermehrung potentiell pathogener Mikroorganismen (Marsh und Zaura, 2017). Im Gegenzug stellt ihnen der Wirt einen nahrhaften Lebensraum zur Verfügung (Pitts et al., 2017).

Bereits Anthony van Leeuwenhoek beobachtete im 17. Jahrhundert unter seinem Mikroskop „animalcula“, das heißt kleine „Tierchen“ in seinem Zahnbelag. Unter anderem entdeckte er als erster die vielen, unterschiedlichen Phänotypen der Bakterien in der menschlichen Plaque (Porter, 1976).

G.W. Black verwendete erstmals den Begriff der dentalen Plaque, indem er von „gelatinous microbic plaque“ sprach (zit. n. Rosan und Lamont, 2000). Die dentale Plaque gilt als ein vielfältiger Zusammenschluss unterschiedlichster Mikroorganismen, die in einer extrazellulären Matrix aus Polymeren eingebettet sind und der Zahnoberfläche als Biofilm anhaften. Nahrungsreste, Speichelbestandteile und bakterielle Stoffwechselprodukte sind darin ebenfalls enthalten (Hellwig et al., 2013).

Bakterien können planktonisch vorliegen, das heißt einzelne Bakterien befinden sich im Speichel in einer flüssigen Phase. Andernfalls haften sie an festen Oberflächen und sind umschlossen von einer extrazellulären Matrix, die ihnen eine Anordnung in einer dreidimensionalen Struktur ermöglicht (Marsh und Martin, 2003).

Der Großteil des oralen Mikrobioms ist in Biofilmen angesiedelt. In der Mundhöhle sind Mikroorganismen unter anderem durch die Nahrungsaufnahme und den Speichelfluss

hohen Scherkräften ausgesetzt. Ihr Vorkommen in Biofilmen ermöglicht ihnen eine höhere Widerstandsfähigkeit gegen diese vorherrschenden Bedingungen (Radaic und Kapila, 2021). Verschiedene Studien zeigten, dass Bakterien innerhalb eines Biofilms auch resistenter auf antimikrobielle Substanzen in Zahnpasten und Mundspüllösungen reagieren (Wilson, 1996; Marsh, 2004). Diese gesteigerten Resistenzen können unterschiedliche Gründe haben: unter anderem kann das Alter eines Biofilms, die chemische Zusammensetzung des Wirkstoffs oder auch seine Struktur dafür verantwortlich sein (Marsh und Martin, 2003).

Biofilme sind in der Mundhöhle als solches nicht pathogen. Auch bei gesunden Menschen liegt ein Biofilm vor. Die kommensale Mikroflora verfügt über pro- und antiinflammatorische Aktivitäten, die für die Aufrechterhaltung des physiologischen Gleichgewichts eine Rolle spielen (Devine et al., 2015). Der dentale Biofilm besitzt in beispielsloser Art und Weise die Fähigkeit, sich an die äußeren Begebenheiten anzupassen, um den vorliegenden Lebensraum optimal für sich auszuschöpfen. Dabei entstehen komplexe Interaktionen zwischen den unterschiedlichen Spezies, die man sowohl im dysbiotischen als auch im eubiotischen Biofilm in synergistisch oder antagonistisch unterteilen kann (Marsh und Zaura, 2017). Die synergistischen Aktivitäten der Bakterien untereinander belaufen sich auf die Ausbildung von Nahrungsketten, den Gentransfer und die Zell-zu-Zell-Signalwege (Marsh und Zaura, 2017). Insbesondere der Ausbau von Nahrungsketten unterbindet die Konkurrenz der Bakterien um die vorhandenen Nahrungsmoleküle, sodass ihnen hierdurch die Co-Existenz ermöglicht wird. Mittels bestimmter Effektormoleküle wie zum Beispiel das Autoinducer-2, das von mehreren grampositiven wie auch gramnegativen Spezies synthetisiert wird, können die Bakteriengattungen untereinander kommunizieren und somit Einfluss auf die Biofilmbildung nehmen (Rickard et al., 2006). Der horizontale Gen-Transfer wird durch räumliche Nähe unterschiedlicher Spezies zueinander ermöglicht und gibt den Bakterien die Möglichkeit, genetisches Material untereinander auszutauschen. Daher rührt die hohe Flexibilität der im Biofilm lebenden Spezies, die eine Anpassung auf sich ändernde Lebensbedingungen beinhaltet (Roberts und Kreth, 2014). Ein Beispiel hierfür sind erworbene Antibiotikaresistenz-Gene, die im oralen Mikrobiom weitverbreitet sind und hauptsächlich durch den horizontalen Gen-Transfer weitergegeben werden (Sukumar et al., 2016). Dennoch kooperieren Bakterien-stämme nicht nur, sondern zeigen auch antagonistische Interaktionen gegeneinander. Diese kompetitiven Interaktionen umfassen die Synthese und Freisetzung von

Bakteriozinen, Wasserstoffperoxid und organischen Säuren, die bestimmten Spezies einen Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Spezies verschaffen.

Auch das orale Virom übt direkten Einfluss auf die in der Mundhöhle vorherrschenden Bakterienspezies aus. Den Großteil des Viroms machen Bakteriophagen aus, die fähig sind, Zellen zu lysieren. Diese bakteriellen Viren machen 20 – 80 % des Bakteriensterbens in der Mundhöhle aus (Radaic und Kapila, 2021). Man geht davon aus, dass ihnen deshalb auch eine wichtige Funktion in der Erhaltung der Symbiose zukommt (Marsh und Zaura, 2017). Wang et al. (2016) fanden heraus, dass das Vorhandensein bestimmter Phagen-Spezies mit einer gesunden Mikroflora korrelierte, die in Kombination mit den bekanntesten Parodontalpathogenen nicht vorzufinden waren. Und auch Ly et al. (2014) konnten belegen, dass das orale Virom bei Patienten mit einer Parodontitis vom mit Gesundheit assoziierten Virom abweicht.

1.1.1 Entstehung der dentalen Plaque

Schon wenige Minuten nach der Reinigung zieht sich die Cuticula, ein azellulärer Film, über die Zahnoberfläche. Es handelt sich hierbei um eine 0,1 – 1 µm dünne Schicht (Hellwig et al., 2013). Größtenteils besteht diese Pellikel aus Speichelproteinen, wie zum Beispiel den sauren, prolinreichen Proteinen, Glykoproteinen, Serumproteinen, Enzymen und Immunglobulinen (Hannig et al., 2005; Hellwig et al., 2013). Die Moleküle in der Pellikel, die die Anlagerung der Bakterien durch Rezeptoren ermöglichen, stammen daher entweder vom Wirt oder sind bakterieller Natur (Marsh und Martin, 2003).

In der Regel handelt es sich bei den adhäsionsaffinen Proteinen um Phosphoproteine wie Statherin und Histatin sowie die prolinreichen Proteine (Hannig und Joiner, 2006; Bernimoulin, 2003). Die negativ geladenen organischen Bestandteile des Speichels werden dabei von den positiv geladenen Calciumionen des Schmelzes angezogen und gehen eine elektrostatische Bindung ein (Meyer-Lueckel et al., 2012; Hellwig et al., 2013). Während des Anziehungsprozesses herrschen noch sehr schwache Van-der-Waals-Kräfte, die reversibel sind. Eine irreversible Bindung wird im weiteren Verlauf durch die Adhäsine der Bakterien gewährleistet (Marsh und Martin, 2003; Hojo et al., 2009).

Abgesehen von der Fähigkeit, den Bakterien eine Adhäsionsmöglichkeit zu bieten, scheint eine weitere Funktion der Cuticula jedoch der Schutz der Zahnoberfläche zu

sein (Hannig und Balz, 1999). Man geht ebenfalls davon aus, dass die Pellikel die Reibung zwischen Mundschleimhaut und den Zähnen minimiert (Lendenmann et al., 2000). Außerdem wird sie als physikalische Barriere bei der Diffusion von Säuren angesehen (Hannig, 1999) und gilt als Depot der für die Remineralisation wichtigen Calciumphosphate (Hannig et al., 2005).

Nur wenige Bakterienarten verfügen über Fortbewegungsmechanismen, die meisten werden passiv mit dem Speichel angeschwemmt (Marsh und Martin, 2003).

Die Entstehung und Reifung der Plaque erfolgt phasenweise (Marsh et al., 2011). Innerhalb weniger Stunden heften sich an die Cuticula vorerst grampositve, aerobe Kokken wie beispielsweise der Streptococcus salivarius, Streptococcus oralis oder der Streptococcus mitis (Macpherson et al., 1991; Nyvad und Kilian, 1987; Hellwig et al., 2013). Der Streptococcus gordonii gehört ebenfalls in die Gruppe der Erstbesiedler (Hojo et al., 2009; Kolenbrander, 2011). Nach vier Stunden liegt der prozentuale Anteil dieser Gruppe bei 56,0 % der kultivierbaren Spezies (Nyvad und Kilian, 1990). Sie gelten in diesem Zusammenhang als Pionierbakterien und kommen in kariesaktiven und kariesinaktiven Gebissen gleichermaßen vor (Nyvad und Kilian, 1990). Bei ungestörtem Wachstum bilden sie nach 3 - 6 Stunden eine einschichtige Zelllage (Meyer-Lueckel et al., 2012; Bernimoulin, 2003). Spezies der Aktinomyceten finden sich ebenfalls schon in der jungen Plaque (Macpherson et al., 1991; Hellwig et al., 2013). Nyvad und Kilian (1987) fanden heraus, dass die Aktinomyceten, wenngleich schon in der frühen Bildungsphase nachweisbar, ihren relativen Anteil erst nach Ablauf der ersten acht bis zwölf Stunden erhöhen und führten das auf eine längere Verdopplungszeit zurück.

Im Folgenden kommt es zur Co-Adhäsion weiterer Bakterien, die an ihrer Zelloberfläche ebenfalls Adhäsine tragen, die zu den Rezeptoren der bereits adhärenten Bakterien passen (Kolenbrander et al., 2000). Dies hat zur Folge, dass sich nach 6 - 12 Stunden durch die Reproduktion der Pionierbakterien und die Adhäsion weiterer Spezies die Anzahl an Mikroorganismen auf der Zahnoberfläche stark vermehrt. Die Vielfalt an unterschiedlichen Spezies wird durch die generell hohe Affinität der oralen Mikroorganismen für die Bindung an andere Mikroben begünstigt (Marsh und Zaura, 2017). Nachgewiesen werden können dann weitere Spezies der Streptokokken, Veillonellen, Prevotella, Eikenella spp., Capnocytophaga spp., Haemophilus spp. und Propionibacterius spp. (Hellwig et al., 2013).

Des Weiteren führt die Bildung eines Biofilms nicht nur zu einer Koaggregation von unterschiedlichen Spezies, sondern ermöglicht direkte Interaktionen (Kolenbrander, 2011), die - wie oben bereits ausgeführt - synergistisch und antagonistischer Natur sein können.

Manche Bakterien haben die Fähigkeit, durch die Spaltung von Saccharose das Polysaccharid Mutan zu bilden. Dabei handelt es sich um das Gerüstmaterial der extrazellulären Plaquematrix (Roulet et al., 2017). Diese Matrix ist nicht nur für den Zusammenhalt der Mikroorganismen wichtig, sondern kann selbst auch aktiv werden, indem sie Wasser, Nahrung und Enzyme für die Mikroorganismen speichert. Hinzu kommt, dass sie zum Beispiel die Durchlässigkeit für antimikrobielle Wirkstoffe erschwert (Marsh et al., 2011).

Nach ein paar Tagen ungestörten Plaquewachstums gesellen sich filamentöse Bakterien zu den Pionieren hinzu (Bernimoulin, 2003). In einem 7 - 12 Tage altem Zahnbelag dominieren anaerobe Stäbchen und Filamente die Plaque (Hellwig et al., 2013). Nach 14 Tagen liegt der Anteil der Streptokokken an der Gesamtzahl aller kultivierbaren Bakterienarten nur noch bei 15 % (Marsh und Martin, 2003). Mit dem zunehmenden, vertikalen Wachstumsmuster der Plaque verschiebt sich die Anzahl der Spezies zugunsten der Anaerobier (Ritz, 1967). Dies liegt darin begründet, dass mit zunehmender Schichtdicke der Plaque Bakterien, die nicht auf die Verstoffwechslung von Sauerstoff angewiesen sind, einen Wettbewerbsvorteil haben (Ritz, 1967). Es ist außerdem davon auszugehen, dass die Sauerstoffkonzentration in der Plaque durch die vorhandenen obligaten und fakultativen Aerobier in den oberflächlichen Schichten sinkt und durch andere Gase wie Kohlenstoffdioxid ersetzt wird (Marsh und Martin, 2003; Marsh, 2004).

Das Wachstum des Biofilms wird erst bei einer kritischen Größe und den damit einhergehenden Scherkräften unterbrochen. Umbauprozesse finden unentwegt statt (Marsh und Martin, 2003).

Genau wie supragingival kann auch der subgingivale Biofilm zu Zahnstein mineralisieren und imponiert unterhalb des Zahnfleisches als braun-rote im Gegensatz zur supragingivalen gelblich-weiße Ablagerung. Es gibt Prädilektionsstellen für die Entstehung des supragingivalen Zahnsteins. Diese Stellen befinden sich in unmittelbarer Nähe zu den Ausführungsgängen der großen Speicheldrüsen und betreffen im Unterkiefer die lingualen Flächen der Schneidezähne und im Oberkiefer die bukkalen

Flächen der Molaren (Dumitrescu und Kawamura, 2010). Aufgrund seiner rauen Oberfläche bietet er eine erhöhte Retention für jegliche Mikroorganismen, sodass er meist von Plaque belegt ist (Wolf et al., 2004).

1.1.2 Klinische Bedeutung der dentalen Plaque

Im fortgeschrittenen Stadium ist die Plaque durch die Selbstreinigungsmechanismen der Mundhöhle nicht mehr entfernbar. Sie gilt als eine der notwendigen Voraussetzungen für die Bildung einer Karies (König, 1971).

Bereits im Jahr 1892 führte Miller die Entstehung einer Karies auf das Vorhandensein von Mikroorganismen zurück, die dazu befähigt sind, bei der Fermentierung von Kohlenhydraten Säure zu produzieren. Er sprach in diesem Zusammenhang von einem „chemisch-parasitären Vorgang“, bei dem die Zahnhartsubstanz zuerst „entkalkt“ und sich im Folgenden „auflöst“. Hingegen früherer Thesen, die Karies würde durch ein bestimmtes Bakterium hervorgerufen, prägte Miller (1892) den Begriff der „Mischinfektion“.

Das Krankheitsbild der Karies hat sich im heutigen Verständnis dahingehend weiterentwickelt, als dass man von einer multikausalen Erkrankung spricht (Harris et al., 2004; Pitts et al., 2017).

Keyes vertrat die Theorie, dass die Karies ausschließlich in Abhängigkeit von dem Vorhandensein der drei Faktoren „Wirt“, „Bakterien“ und „Substrat“ entstehen kann (zit. n. Roulet, 2017). König (1971) modifizierte die Theorie und erweiterte die Bedingungen um den Faktor „Zeit“. Die Abbildung 1 zeigt das durch König entwickelte Modell der Kariesentstehung, welches noch heute Gültigkeit hat.

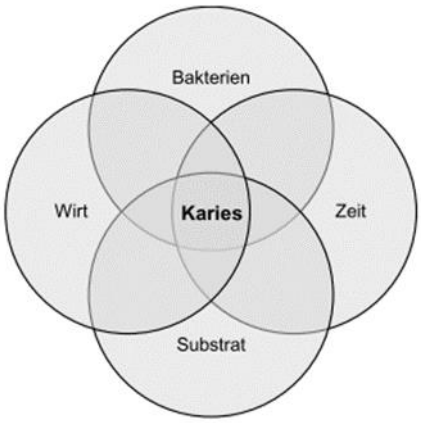

Abb. 1 Die Kariesentstehung durch das Zusammenspiel der vier Faktoren nach König

Die Karies ist demnach als eine ernährungsabhängige, durch eine Vielzahl von Bakterien hervorgerufene, unspezifische Infektionserkrankung von multifaktorieller Genese, die sich durch Progressions- und Stagnationsperioden auszeichnet und nicht zuletzt auch von der Immunabwehr des Wirts abhängig ist (Gängler und Arnold, 2007).

Von einer unspezifischen Infektionserkrankung spricht man, weil kein spezifisches Bakterium für die Entstehung einer Karies verantwortlich gemacht werden kann. Lange Zeit hat man den Streptococcus mutans als Hauptverursacher einer kariösen Läsion angesehen. Es handelt sich hierbei um ein azidogenes und säurestabiles Bakterium, das in früheren Studien ein erhöhtes Vorkommen in kariösen Läsionen zeigte (Loesche, 1986), aber im Regelfall nur einen kleinen relativen Anteil der Plaque ausmacht (Nyvad und Kilian, 1990). Im weiteren Verlauf der Forschung erkannte man, dass andere Bakterienspezies ebenfalls in der Lage sind, organische Säuren zu bilden, die der Zahnhartsubstanz schaden können. Daraus entwickelte sich die nicht-spezifische Plaquehypothese. Mit der Erkenntnis, dass der S. mutans in einem Biofilm ansässig sein kann, ohne dass es zur Bildung einer Karies kommt, verwarf man die spezifische Plaquehypothese nach Loesche (Takahashi und Nyvad, 2008). Heutzutage zählt der Streptococcus mutans zur residenten Mikroflora in der Mundhöhle (Fejerskov, 2004). Inzwischen gilt die ökologische Plaquehypothese nach Marsh als allgemein anerkannt (Marsh, 1994). Diese rückt den Fokus von bestimmten, verantwortlichen Spezies in den Hintergrund und hebt die Anpassung des Mikrobioms an äußere Einflüsse hervor. Demnach wird die Karies als ein Resultat aus der ökologischen Verschiebung der Mikroflora angesehen, die durch die äußeren Einflüsse und maßgeblich durch das vorherrschende Nahrungsangebot provoziert wurde. Als kariesbegünstigende Faktoren gelten somit der reduzierte Speichelfluss (Loesche, 1986) und der frequentierte Verzehr fermentierbarer Kohlenhydrate (Sheiham und James, 2014).

Die „Keystone-Pathogen Hypothesis“ (Hajishengallis et al., 2012) besagt, dass bestimmte, auch schon in kleinen Konzentrationen vorkommende Pathogene in der Lage sind, durch die Unterbindung der Wirtsabwehr die Mikroflora dahingehend zu verändern, sodass die Symbiose zwischen Wirt und den Kommensalbakterien aufgehoben wird.

Das bei einer Karies vorherrschende Ungleichgewicht zwischen Re- und Demineralisation zugunsten der Demineralisation kann also durch die erhöhte Verfügbarkeit von

Kohlenhydraten oder durch einen reduzierten Speichelfluss verstärkt werden (Takahashi und Nyvad, 2008).

Unter physiologischen Umständen herrscht eine Homöostase zwischen der Demineralisation und Remineralisation des Schmelzes. Dies geschieht durch ständiges Herauslösen und Wiedereinbauen der Calcium- und Phosphationen aus dem Zahnschmelz, die sich auch im Speichel befinden (Gängler und Arnold, 2007). Säureangriffe auf die Zahnhartsubstanz - wie zum Beispiel durch den Verzehr bestimmter Getränke - können durch den nahezu pH-neutralen Speichel abgemildert werden. Eine zuckerarme Kost sorgt hingegen für einen langsamen Abbau der Nahrungsmoleküle in der Plaque, sodass der pH-Wert der Zahnplaque nur leicht und nicht häufig abfällt (Meyer-Lueckel et al., 2012). Damit geht ein geringeres Kariesrisiko einher.

Daher ist die Pathogenität der Plaque in direkter Abhängigkeit von der Substratzufuhr zu verstehen. Um die Demineralisierung der Zahnhartsubstanz zu bewirken, ist ein verringerter pH-Wert in der Plaque notwendig. Bei häufigem Konsum niedermolekularer Kohlenhydrate kann die natürliche Homöostase der Plaque gestört werden, da die hohe Verfügbarkeit an Zucker das Wachstum der azidogenen Bakterienarten bestärkt, die sich von ihm nähren können (Hayes et al., 1983). In anderen Worten: übersteigt die Säureproduktion der Bakterien die natürliche Pufferkapazität des Speichels und der Plaque, sodass sich die Zusammensetzung des Biofilms ändert, so wird das Nahrungsangebot effizienter verstoffwechselt (Marsh und Martin, 2003).

Die Plaqueflüssigkeit ist dabei das Medium des Biofilms, welches im direkten Kontakt mit der Zahnoberfläche steht und den Fluss der Wasserstoff- und Mineralionen, der den Demineralisationsprozess charakterisiert, ermöglicht (Moreno und Margolis, 1988). Bei neutralem pH-Wert gilt die Plaqueflüssigkeit als übersättigt (Meyer-Lueckel et al., 2012). Der pH-Abfall an sich liegt im bakteriellen Stoffwechsel begründet: Um Energie zu erzeugen bauen manche Bakterienspezies der Plaque mittels Glykolyse Saccharose zu Brenztraubensäure und nachgehend zu Milchsäure um, was wiederum zum Abfall des pH-Werts in der Plaqueflüssigkeit führt (Marsh und Martin, 2003). Hierbei ist anzumerken, dass Bakterien auch in der Lage sind, andere organische Säuren zu produzieren, die der Zahnhartsubstanz schaden können. Lactat repräsentiert die am häufigsten produzierte Säure (Takahashi, 2005).

Der kritische pH-Wert in der Plaque, der zur Demineralisierung des Zahnschmelzes führen kann, liegt bei pH 5,5. Dass aus dem Zahn Mineralien heraus gelöst werden, liegt an der unreinen Form des Hydroxylappatits, welches bei einem pH-Wert-Abfall leichter löslich ist (Meyer-Lueckel et al., 2012). Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Demineralisation durch einen ansteigenden pH-Wert wieder gestoppt werden kann (Pitts et al., 2017; Meyer-Lueckel et al., 2012). Schlussendlich steigt das Risiko der Karies, wenn die Demineralisation der Zahnoberfläche der Remineralisation überwiegt. Mit anhaltender Säureproduktion steigt der Mineralverlust der Zahnhartsubstanz. In der oberen Schmelzschicht kommt es zu einer Vergrößerung der Poren, die wiederum den Säuren tieferes Eindringen in die Zahnhartsubstanz ermöglichen: Die Zahnsubstanz verliert an Härte (Pitts et al., 2017).

Einigen Bakterienspezies ist es möglich, neben extrazellulären Polysacchariden auch intrazelluläre Polysaccharide (Uceda et al., 2013) zu produzieren. Darunter versteht man ein glykogenähnliches Energiedepot, welches angelegt wird, falls die Nahrungsmoleküle nicht alle auf einmal verstoffwechselt werden können. So kann es in einer pathogenen Plaque auch in Fastenzeiten zur Säureproduktion kommen (Meyer-Lueckel et al., 2012). Van Ruyven et al. (2000) fanden heraus, dass intrazelluläre Polysaccharide produzierende Bakterien in der Plaque vermehrt vorkommen.

Alles in allem wird daher die Progression beziehungsweise Stagnation einer Demineralisierung durch die Plaque, die Ernährung, die Pufferkapazität und Fließrate des Speichels, die Mundhygiene und zahlreiche weitere verhaltensbedingte Faktoren wie regelmäßige Fluoridapplikationen beeinflusst (Pitts et al., 2017). Auswirkungen auf eine erleichterte Plaquebildung können auch Wirtsfaktoren wie die Zahnstruktur, Morphologie, Stellungsbesonderheiten, Zahnersatz oder auch kieferorthopädische Apparaturen haben. Dabei handelt es sich zum einen um Komponenten, die die Säureempfindlichkeit des Zahns durch zum Beispiel eine abnorme Schmelzstruktur erhöhen oder zum anderen die Adhärenz eines Biofilms begünstigen (Hara und Zero, 2010).

Auch bei den Zahnfleischerkrankungen nimmt der dentale Biofilm eine besondere Rolle ein.

Unter physiologischen Umständen herrscht auch im Hinblick auf die gesunden Gingiva-Verhältnisse ein Gleichgewicht zwischen der residenten Bakterienflora und dem Wirt. Durch unzureichende mechanische Reinigung der Zahnoberfläche kommt

es, im Falle einer Gingivitis, zur Ausbildung eines Biofilms am Zahnfleischrand. Die Gingivitis zählt mit der Parodontitis zu den häufigsten parodontalen Erkrankungen. Beide zeichnen sich durch die Ausbildung eines Biofilms aus, in dem hauptsächlich gram-negative Aerobier in pathologischer Vielzahl vorkommen und die Wirtsabwehr bezwingen (Gängler und Arnold, 2007).

Bei der chronisch marginalen Gingivitis handelt es sich um eine unspezifische Immunreaktion auf die Plaque, die den Zahnfleischsaum betrifft. Auch hier wird die Plaque mit zunehmender Größe anaerober. Man geht davon aus, dass die Gemeinschaft der Bakterienspezies in der Plaque durch eine unzureichende Mundhygiene so verändert wird, dass überwiegend Actinomyceten anstelle von Streptokokken vorzufinden sind (Marsh und Martin, 2003). Die vielfältigen Stoffwechselprodukte des Biofilms induzieren eine Wirtsreaktion, die es den Bakterien ermöglicht, in den subgingivalen Bereich zu gelangen (Wolf et al., 2004). Die Gingiva weist klinische Entzündungssymptome auf und zeigt eine erhöhte Ausscheidung an Sulkusflüssigkeit (Rosier et al., 2018) und eine Temperaturerhöhung (Niederman et al., 1995). Im Kontrast zur Parodontitis gilt die Gingivitis bei Entfernung des pathologischen Biofilms als reversibel (Löe et al., 1965). Nicht jede Gingivitis mündet aber auch zwangsläufig in eine Parodontitis, sie ist jedoch eine zwingende Voraussetzung für den Beginn des irreversiblen Abbaus des Parodonts (Meyle und Chapple, 2015). Man geht davon aus, dass bei der Entstehung einer Parodontitis sowohl die prädispositiven Faktoren als auch die verhaltens- und gesundheitsbedingten Aspekte des Wirts eine maßgebende Rolle spielen (Page und Kornman, 1997). Ein „empfänglicher“ Wirt ist demnach die notwendige Bedingung für die Entstehung einer Parodontitis (Wolf et al., 2012). Die „Empfänglichkeit“ des Wirts ergibt sich aus der genetischen Komponente und erworbenen Faktoren wie zum Beispiel dem Tabakrauchen, systemische Erkrankungen, der Ernährung und dem Stress (Bartold und Van Dyke, 2019). In einem Biofilm, der ungestört wächst, häufen sich Bakterien, die ihre Umgebung wahrnehmen und beeinflussen können („Quorum-sensing“), wie beispielsweise das Fusobacterium nucleatum (Meyle und Chapple, 2015). Die Quorum-sensing Mikroorganismen sorgen für stärkere Immunantworten und führen damit zur Entzündung des Zahnfleisches. Man spricht unter diesen Umständen von einer beginnenden Dysbiose, die bei parodontal-anfälligen Individuen zu einer Parodontitis führen kann (Meyle und Chapple, 2015).

Bei einer Parodontitis ist der pathologische Biofilm zwar für den Beginn und das Fortschreiten der Erkrankung verantwortlich, die eigentliche Schädigung des Parodonts hat die wirtseigene Immunantwort zu verantworten (Hajishengallis et al., 2012). Nach Einwanderung der Bakterien in durch die Gingivitis entstandene Pseudotasche kann subgingival ebenfalls ein Biofilm entstehen. Der subgingivale Biofilm enthält überwiegend gram-negative Spezies, die größtenteils obligat-anaerob und von den bei einer Gingivitis vorkommenden Spezies abweichen (Curtis et al., 2020). Die Parodontitis zeichnet sich durch den Attachment-Verlust zwischen Wurzeloberflächen der Gingiva und dem Alveolarknochen aus (Marsh und Martin, 2003). Histologisch ist zu beobachten, dass das Saumepithel, welches sich bei parodontal gesunden Gebissen am Boden des Sulkus befindet, hierbei entlang der Wurzel in die Tiefe wandert und damit die Parodontaltasche auskleidet (Marsh und Martin, 2003). Der Attachment-Verlust ist das Resultat komplexer molekularbiologischer Ereignisse, bei denen durch bakterielle Metaboliten Makrophagen dazu verleitet werden, Fibroblasten zur Sekretion von abbaustimulierenden Mediatoren zu animieren (Wolf et al., 2004). Der Wirt reagiert auf die Akkumulation der Plaque beispielsweise mit der Ausschüttung von Zytokinen, die die Knochenresorption stimulieren (Marsh und Martin, 2003).

Im Vergleich zur supragingivalen Umgebung bietet der subgingivale Bereich den Bakterien andere Lebensbedingungen. Beispielsweise sind sie geschützt vor Mundhygienemaßnahmen und Spülfunktion des Speichels. Daher zeichnet den subgingivalen Biofilm auch das Vorkommen und die Vermehrung von Bakterien aus, die an Oberflächen nicht adhärent sind, wie Spirochäten und bewegliche Stäbchen (Müller, 2012). Durch die Exposition zur proteinreichen Sulkusflüssigkeit, vermehren sich vornehmlich die Spezies, die proteolytisch aktiv sind (Marsh, 2003). Aus diesem Grund bleibt der pH-Wert des subgingivalen Biofilms neutral (Takahashi, 2005) bis alkalisch (Eggert et al., 1991; Marsh und Martin, 2003). Dieser neu erschaffene Lebensraum triggert die Vermehrung parodontalpathogener Keime, so profitieren insbesondere die säureintoleranten Spezies wie der Porphyromonas gingivalis davon.

Bei der bereits genannten „Keystone-Hypothesis“ übertragen Hajishengallis et. al (2012) den architektonisch geprägten Begriff des „Keystone“ (zu Deutsch „Schlussstein“ oder „Grundpfeiler“) auf die Ökologie der Mundhöhle. In der Architektur ist der Schlussstein der höchste Stein in einem Bogen, der eine tragende Rolle für die Stabilität des Bogens einnimmt. In diesem Zusammenhang sprechen Hajishengallis et. al (2012) von einem „Keystone-Pathogen“, ein Mikroorganismus, der das

Gleichgewicht der oralen Mikrobiota stört und eine Dysbiose erzeugt, womit eine wichtige Voraussetzung für die Entstehung einer Parodontitis erfüllt wird. Den Grund zur Annahme, dass es sich bei dem Porphyromonas gingivalis um ein solches Schlüsselpathogen handelt, bekräftigten die Autoren mit ihren Beobachtungen im Tiermodell. Hier führte schon eine geringe Konzentration des Porphyromonas gingivalis zu einer Parodontitis bei Mäusen (Hajishengallis et al., 2011). Dabei ist wichtig anzumerken, dass das Porphyromonas gingivalis auf die Interaktion mit den kommensalen Bakterien angewiesen ist. Dies zeigte eine Versuchsreihe in keimfreien Mäusen: dabei war das Porphyromonas gingivalis allein nicht in der Lage, eine Parodontitis auszulösen (Hajishengallis et al., 2011).

Da der Abbau des Zahnhalteapparats letzten Endes eine Reaktion des Wirts ist, liegt die Vermutung nahe, dass sogenannte „Keystone-Pathogene“ in der Lage sind, die körpereigene Immunabwehr negativ zu beeinflussen. Ein Beispiel hierfür ist die Unterdrückung des Komplementsystems. Durch die Ausschüttung des Enzyms Gingipain ist der Porphyromonas gingivalis in der Lage das Komplementprotein C5 zu spalten. Daraufhin kommt es zu einer Ansammlung von C5a im Gewebe, welches wiederum an einen synergen C5a-Rezeptor der Leukozyten andockt. Außerdem ist das P. gingivalis in der Lage, durch spezifische Oberflächenliganden die Toll-Like-2-Rezeptoren (TLR2) der Leukozyten zu binden. Die gleichzeitige Aktivierung des C5aR- und des TLR2-Signalwegs führt zu einer verstärkten Entzündungsreaktion, beeinträchtigt aber auch Abtötungskapazität der Leukozyten (Hajishengallis et al., 2012). Aufgrund der Nachweisbarkeit des P. gingivalis in gesunden Individuen wurde die Keystone-Hypothese von Hajishengallis et al. (2012) zur „Polymikrobiellen Synergie und Dysbiose (PSD)“-Hypothese erweitert. Diese lenkt den Fokus von einem einzelnen „Keystone-Pathogen“ zu einer Vielfalt an Parodontalpathogenen, die erst durch Synergismus ihre Pathogenität in einer dysbiotischen Gemeinschaft entfalten können. Laut Hajishengallis et al. (2012) müssen drei Bedingungen gegeben sein, um eine potenzielle krankheitsfördernde Dysbiose der mikrobiellen Gemeinschaft zu erzeugen. Dazu gehört das Exprimieren von Adhäsinen und Rezeptoren, die eine Anhaftung zwischen den unterschiedlichen Spezies, Zellen oder Oberflächen des Wirts ermöglichen. Des Weiteren ist es erforderlich, dass Mitglieder der mikrobiellen Gemeinschaft synergistisch miteinander interagieren oder sich zumindest nicht schaden. Und letztendlich müssen sie dazu in der Lage sein, die angeborene und erworbene Immunantwort des Wirts zu umgehen, um eine Gewebeentzündung

hervorzurufen (Hajishengallis et al. 2012). Radaic und Kapila (2021) gehen davon aus, dass ebenfalls das orale Virom in der dysbiotischen Gemeinschaft im Kontext der Entstehung einer Parodontitis eine Rolle spielt. Hierbei konnte ein Zusammenhang zwischen erhöhter viraler Diversität und Parodontitis belegt werden.

1.2 **Häusliche Mundhygiene**

Die häusliche Mundhygiene ist wahrscheinlich der wichtigste Schritt, den jeder einzelne unternehmen kann, um sein Risiko für die wohl am weitesten verbreiteten oralen Erkrankungen zu minimieren (Axelsson und Lindhe, 1978). In den vergangenen Jahrzehnten hat daher der Stellenwert der Aufklärung über zahnfreundliche Ernährung im Sinne der Gruppen- aber auch der Individualprophylaxe deutlich zugenommen. Kinder kommen häufig schon vor dem Kindergartenalter durch die Inanspruchnahme kontrollorientierter zahnärztlicher Dienstleistungen mit den Präventionsmaßnahmen oraler Erkrankungen in Kontakt (Jordan et al., 2016). Deren Erfolge sieht man in den seit zwei Jahrzehnten stetig rückläufiger Karieserfahrung bei den 12-Jährigen. 2016 wiesen 81,3 % der Kinder kariesfreie Gebisse auf, während es 1997 noch 41,8 % waren (Jordan et al., 2016). Einen weiteren großen Beitrag zu diesem Erfolg hat die Verwendung fluoridhaltiger Zahnpasta geleistet. Das systematische Review der Cochrane Database zeigte, dass durch die Verwendung von fluoridhaltigen Zahnputzmitteln der DMFS statistisch signifikant reduziert werden kann (Marinho et al., 2003).

Die häusliche Mundhygiene dreht sich um die Entfernung von Zahnbelägen, bevor diese zu einem ausgereiften Biofilm heranreifen können und um die Applikation fluoridhaltiger Substanzen auf die Zahnoberfläche (Borgström et al., 2000). Die mechanische Plaque-Entfernung bleibt hierbei die wichtigste Komponente für die Gingivitisprävention (Christou et al., 1998). Die größte Akzeptanz durch die Bevölkerung findet die Zahnbürste, die vornehmlich die okklusalen, bukkalen und oralen Flächen reinigt. Gjermo und Flötra (1970) konnten belegen, dass die Zahnbürste alleine keinen ausreichenden Zugang zu den Zahnzwischenräumen erreicht. Interdentalraumbürsten und Zahnseide sind die dafür am häufigsten verwendeten und empfohlenen Hilfsmittel, die in der breiten Bevölkerung aber aufgrund des damit verbundenen zusätzlichen Zeitaufwandes keine regelmäßige Anwendung finden.

Wichtig ist hierbei anzumerken, dass eine absolute Plaque-Entfernung nicht möglich ist und daher auch nicht angestrebt werden sollte, die Bildung jedweden Biofilms zu vermeiden. Vielmehr sollte durch eine adäquate Mundhygiene versucht werden, eine schwach virulente Flora zu erzeugen (Wolf et al., 2004).

1.2.1 Zahnbürsten

Aus heutiger Sicht ist die Zahnbürste als elementarer Bestandteil der häuslichen Mundhygiene nicht mehr wegzudenken. Das liegt darin begründet, dass die Reduktion bakterieller Beläge auf den Zähnen ein Faktor ist, der die Entstehung von Karies, Gingivitis und Parodontitis erheblich minimieren kann.

Heutzutage ist ein derart vielfältiges Angebot an unterschiedlichen Zahnbürsten auf dem Markt, welches den Konsumenten auf der Suche nach der passenden Zahnbürste vor eine Herausforderung stellen kann. Bestimmte Kriterien, die für eine gute Zahnbürste sprechen, haben sich in der Vergangenheit bewährt und sind durch eine Vielzahl von Studien belegt worden. Hierbei ist es aber noch einmal wichtig zu betonen, dass aufgrund der großen interindividuellen Unterschiede keine pauschale Empfehlung gemacht werden kann, sondern vielmehr die Empfehlung an die Bedürfnisse des Einzelnen angepasst werden sollte.

Zu den generellen Kriterien gehört zum einen die Größe des Zahnbürstenkopfes. Er sollte nicht zu groß sein, um alle Bereiche problemlos zu erreichen und somit eine Länge von circa 2-3 cm aufweisen und über 2-3 Borstenreihen verfügen (Roulet et al., 2017). Zum anderen sollte der Griff lang genug sein, damit die Zahnbürste gut in der Hand liegt und eine gleichmäßige Kraft der Borsten auf die Zähne ermöglicht (Otsuka et al., 2020).

Grundsätzlich werden Zahnbürsten mit Kunststoff- beziehungsweise Nylonborsten angeraten. Um der Traumatisierung des Zahnfleisches vorzubeugen, sollen die Borstenenden abgerundet sein (Imfeld et al., 2000). Abhilfe sollen auch sogenannte „tapered“ Filamente verschaffen. Dabei handelt es sich um sich verjüngende Borstenenden. Bei der Konfiguration des Bürstenkopfes gibt es die unterschiedlichsten Modelle. Die klassische Flachschnittzahnbürste mit ihrem ebenen Borstenfeld, Konfigurationen mit abgewinkelten Borsten, die V-förmig angeordnet sind, sogenannte „multi-level“ Zahnbürsten mit Büscheln auf verschiedenen Niveaus und die X-förmig angeordneten Büschel, die Abwinkelungen in mindestens zwei Richtungen enthalten

(Voelker et al., 2013). Die American Dental Association (ADA) sieht bei den manuellen Zahnbürsten die neueren Bürstenkopfkonfigurationen wie das „multilevel“ oder auch generell die abgewickelten Borsten im Vergleich zur Flachschnittzahnbürste als überlegen an (American Dental Association, 2019). Zahnbürsten mit einem ebenen Borstenfeld werden häufig mit einem Verkeilungseffekt der Borsten in Verbindung gebracht, die eine effiziente Reinigung der Kauflächen und schwierig zugänglichen Bereichen wie Approximalräumen erschweren (Roulet et al., 2017). Es gibt mehrere Studien, die belegen, dass Zahnbürsten mit einem planen Borstenfeld eine geringere Reinigungsleistung als die neueren Konfigurationen erzielen (Slot et al., 2012; Van der Weijden und Slot, 2015). Eine gleichermaßen neue X-förmige Anordnung der Borstenbüschel verspricht gleichfalls bessere Reinigungsergebnisse (Danser et al., 2003; Sharma et al., 2010). Um den Zugang zu schwer erreichbaren Nischen zu erleichtern, wurden ebenfalls sogenannte „Power Tips“ entwickelt. Das sind vereinzelt verlängerte Filamente, die über das allgemeine Niveau der Borsten hinausragen und insbesondere den Interdentalraum besser erreichen sollen (Stiller et al., 2010). In der Studie von Stiller et al. (2010) wurde der Zugang unterschiedlicher Bürstenkopfkonfigurationen in die Approximalbereiche gemessen. Die Zahnbürste mit den „Power Tips“ schnitt dabei im Vergleich zu einer Flachschnittzahnbürste und einer Zahnbürste mit X-förmiger Anordnung am besten ab.

1.2.2 Zahnputztechniken

Auch wenn es noch so viele unterschiedliche Bürstenkopfkonfigurationen gibt, so lautet der allgemeine Konsens, dass sie doch nur so gut reinigen, wie sie angewandt werden. Es empfehlen sich aus zahnmedizinischer Sicht verschiedene Techniken, auf die man zurückgreifen kann, um das Putzen mit der Handzahnbürste besonders effektiv zu gestalten. Im Folgenden werden die Putztechniken nach Bass, Stillmann und Fones beschrieben.

Insbesondere die Bass-Technik wird von Zahnärzten häufig empfohlen (Ganss et al., 2009). Sie gilt als effektiv hinsichtlich der Plaque-Kontrolle und bietet zugleich Schutz vor gingivalen Abrasionen (Schlueter et al., 2010). Die Zahnbürste wird hierbei im 45°-Winkel zum Gingivalsaum angelegt. Die Zahnreihe wird hierbei in Segmente von 2-3 Zähnen eingeteilt (Roulet et al., 2017). Mit einer rüttelnden Bewegung soll auch der Zahnfleischsaum vorsichtig bearbeitet werden. Daraufhin wird in der modifizierten Variante der Bass-Technik eine Wischbewegung in koronaler Richtung ausgeführt

(Schlueter et al., 2010). Von Vorteil ist bei dieser Technik, dass die Borsten auch die Zahnzwischenräume erreichen. Hinzu kommt, dass der Saumbereich gut gereinigt wird (Roulet et al., 2017).

Die Stillmanntechnik ist zum Beispiel für Patienten geeignet, die unter Rezessionen leiden, da hier die Zahnbürste parallel zur Zahnreihe angelegt wird und unter leichtem Andruck und Rüttelbewegungen nach koronal geführt. Bei Erreichen der Kaufläche erfolgt das Abrollen (Bass, 1957). Der Vorteil liegt darin, dass ein Fortschreiten der Rezession verhindert werden kann, jedoch setzt diese Technik Geschicklichkeit voraus und reinigt den Sulkus nur mäßig (Roulet et al., 2017).

Für Kinder und Patienten mit motorischen Einschränkungen wurde die Putztechnik nach Fones entwickelt. Es handelt sich hierbei um die älteste aller Putzmethoden (Bass, 1957). Rotierende Bewegungen der Zahnbürste, die senkrecht zur Zahnreihe steht, zeichnen diese Technik aus. Die Reinigung der Zähne erfolgt in Kopfbiss-stellung. In lingualen und palatinalen Bereichen werden bei geöffnetem Mund kleinere Kreise gemacht. Diese Technik erreicht ebenso nur mäßige Putzergebnisse in den approximalen Bereichen und in der Sulkusregion (Roulet et al., 2017).

Ein großer Nachteil der häufig empfohlenen modifizierten Bass-Methode ist die wahrscheinlich zeitaufwendigere Aneignung. In einer randomisierten, einfach blinden, kontrollierten Studie der Universität Giessen wurden 56 Probanden in zwei Gruppen eingeteilt, denen computergestützt entweder die Fones-Technik oder die modifizierte Bass-Technik vermittelt wurde. Eine Kontrollgruppe erlernte lediglich die Grundlagen des Zähneputzens. Im Endeffekt unterschieden sich die Papillenblutungswerte bei der Bass-Technik nicht signifikant von den Werten der Kontrollgruppe nach 28 Wochen, während die Fones-Technik überlegen war (Harnacke et al. 2012).

1.2.3 Putzkraft und Putzdauer

Nicht nur hinsichtlich der Konfiguration des Borstenkopfes nahm die Marktvielfalt der unterschiedlichen Zahnbürsten zu. So stellte sich beispielsweise heraus, dass Borsten mit höheren Härtegraden häufiger zu Traumatisierung der Gingiva führten (Khocht et al., 1993) als Zahnbürsten mit weichen Borsten (Ranzan et al., 2019; Zimmer et al., 2011). Um Verletzungen vorzubeugen, werden generell häufiger weiche Zahnbürsten empfohlen (American Dental Association, 2019). Wiegand et al. zeigten jedoch in einer Studie, dass der Dentinabrieb auf bereits erodiertem Dentin mit abnehmendem

Filamentendurchmesser zunahm. Dies wurde auf die stärkere Biegung der weichen Borsten zurückgeführt und der damit einhergehenden länger andauernden Kontaktzeit zwischen Borstenfeld und Zahnoberfläche (Wiegand et al., 2009). Nicht unerheblich scheint auch das verwendete Bürstmedium diesen Effekt zu beeinflussen (Dzakovich und Oslak, 2008; Wiegand et al., 2009). Die Studie von Wiegand et al. kam zu dem Ergebnis, dass mit steigendem RDA-Wert in der Zahnpasta auch der Dentinabrieb höher ist. Schlussfolgernd sollte in Hinblick auf die Borstenhärte keine pauschale Empfehlung ausgesprochen werden.

Auch die ausgeübte Kraft beim Putzen kann Einfluss auf das Verletzungspotenzial der Gingiva haben (Brandini et al., 2011). Es zeigte sich ebenfalls, dass die Wirksamkeit der Plaqueentfernung bei steigender Putzkraft erhöht wird (Van der Weijden et al., 1996). Die Ergebnisse klinischer Studien zur Anpresskraft zeigen sich heterogen, so wurde zum Beispiel in einer klinischen Studie von Fraleigh et al. (1967) ein Wert von 10 N ermittelt. Ganss et al. (2009) gaben eine durchschnittliche Kraft von 2,3 N ± 0,7 N bei 103 Probanden an. Der höchste Anpressdruck belief sich in dieser Studie auf 4,1 N. Van der Weijden et al. (1996, 1998) ermittelten bei ihren Probanden in zwei unterschiedlichen Studien höhere Werte von 2,6 N ± 0,7 N und 3,2 N ± 1,0 N.

Was die Putzdauer anbelangt, konnten Van der Weijden et al. (1993b) in ihrer klinischen Studie zeigen, dass das Putzergebnis mit der Putzzeit korrelierte. 20 Studienteilnehmer waren angewiesen, jegliche Mundhygienemaßnahmen für 24 Stunden zu unterlassen. Im Anschluss putzte ein Prüfleiter den Probanden die Zähne. Jeder Quadrant wurde mit einer anderen Zahnbürste geputzt, sodass vier Zahnbürsten miteinander verglichen werden konnten. Die Studie teilte sich - je nach Putzzeit - in insgesamt 5 Durchläufe. Die Putzzeit pro Quadrant betrug 7,5, 15, 30, 45 oder 90 Sekunden, sodass der kürzeste Durchlauf auf 30 Sekunden und der längste Durchlauf auf 6 Minuten für alle vier Quadranten kam. Die Autoren kamen zum Ergebnis, dass keine der Zahnbürsten ihr bestes Putzergebnis nach einer Putzzeit von insgesamt 30 Sekunden erreichte. Ganz im Gegenteil: alle Zahnbürsten zeigten eine zeitabhängige Putzeffizienz. Nach 7,5 Sekunden Putzzeit pro Quadrant wurden deutlich weniger Beläge entfernt als nach 30, 60 oder 90 Sekunden. Den Haupteffekt beobachteten Van der Weijden et al. (1993b) nach 30 Sekunden synergistisch, was der empfohlenen Putzdauer von 2 Minuten entspricht.

Je länger die Zähne demnach geputzt werden, desto mehr Beläge werden entfernt. Dennoch gibt es zahlreiche Studien, die belegen, dass die tatsächliche Putzzeit weit unter der empfohlenen Putzzeit von 2-3 Minuten liegt (Macgregor und Rugg-Gunn, 1979; Kleber et al., 1981; Rugg-Gunn und MacGregor, 1978). Die durchschnittliche Putzdauer liegt bei circa einer Minute. Demnach werden 15 Sekunden pro Quadranten aufgewandt.

1.3 Testverfahren zur Beurteilung der Putzeffizienz von Zahnbürsten

1.3.1 Schwierigkeiten des In vivo-Testverfahrens

Um die Reinigungsleistung von Zahnbürsten zu messen, können entweder in vivo oder in-vitro-Studien in Betracht gezogen werden. In vivo Studien bringen, trotz ihrer meist hohen Aussagekraft, häufig Nachteile im Hinblick auf ihre allgemeine Gültigkeit und Reproduzierbarkeit mit sich.

Es stellt eine gewisse Schwierigkeit dar, Probanden zu rekrutieren, die ein realistisches Abbild der Gesellschaft geben. Mundgesundheit und die soziale Herkunft stehen nachweislich miteinander in Verbindung (Schwendicke et al., 2015). Idealerweise sollten die Probanden demnach aus unterschiedlichen sozialen Hintergründen kommen, aber dennoch die festgelegten Einschlusskriterien erfüllen, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Demzufolge können die Gebisse der Probanden Unterschiede hinsichtlich der Zahnstellung, Zahnform und gegebenenfalls auch der Zahnanzahl aufzeigen. Des Weiteren variiert auch die Plaqueakkumulation, welche unter anderem auch durch vorhandene Restaurationen, Zusammensetzung des Speichels oder auch bestimmte Ernährungsgewohnheiten beeinflusst werden kann.

Ein weiterer Faktor ist die Compliance der Probanden, die die Studienergebnisse erheblich beeinflussen kann. Denn die in vivo-Testverfahren sind häufig auch mit Unannehmlichkeiten für den Studienteilnehmer verbunden, die beispielsweise über mehrere Tage auf die gewohnte Mundhygiene verzichten müssen, um eine aussagekräftige Menge an Zahnplaque zu züchten, oder auch mehrere Termine in bestimmten Zeitabständen zueinander wahrnehmen müssen.

Darüber hinaus sollten die gleichen Rahmenbedingungen für die Studienteilnehmer geschaffen werden. Dies beinhaltet häufig zum Beispiel, dass sie eine bestimmte Putzmethode erlernen müssen und ihre Putzfrequenz gegebenenfalls anpassen müssen. In vielen Studien werden Zahnmedizinstudenten oder auch zahnmedizinisches Fachpersonal als Probanden angeworben (Van der Weijden et al., 1993a; Lang et al., 2014). Kritisch betrachtet ist diese Gruppe nicht repräsentativ für den Großteil der Bevölkerung. Dennoch wird durch das generell gute Mundhygieneverhalten dieser Personengruppe die Umsetzung von Studien, die über einen längeren Zeitraum andauern, ermöglicht.

Besonders die zeitliche Komponente spielt bei den Nachteilen der in vivo-Testreihen eine Rolle. Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Zahnbürsten, die auf den Markt kommen, wäre es nur schwer umsetzbar, jede auch in eine mehrwöchige in vivo-Studie miteinzubeziehen. So wird in der Regel zu Beginn eine professionelle Zahnreinigung bei allen Probanden durchgeführt, um vergleichbare Ergebnisse zu erreichen. Zeitaufwendig können ebenfalls die Rekrutierung und Instruktion der einzelnen Patienten sein. Die bereits genannte Studie von Schlueter et al. (2010) zeigte, dass die Probanden insbesondere bei der Bass-Technik Schwierigkeiten hatten, diese auch über mehrere Monate wirklich anzuwenden.

Die Dokumentation der verbleibenden Plaquemenge erfolgt zumeist durch eine Prüfperson. An diesem Punkt kann die Objektivität gefährdet werden, wenn die Studie nicht Prüfer-verblindet durchgeführt wird. An sich hat sich der modifizierte Navy-Plaque-Index nach Rustogi et al. (1992) für klinische Studien bewährt. Bei jeder Zahnfläche erfolgt der Ja/Nein-Entscheid, ob Plaque vorhanden ist. Dieser Index wurde von Claydon und Addy (1995) ein weiteres Mal modifiziert: mit Hilfe einer durchsichtigen Deckschablone werden die Zahnoberflächen bukkal und oral in 9 Areale eingeteilt. Die Entscheidungsfindung wird damit für die bewertende Person erleichtert. Dies beleuchtet, dass die Plaqueentfernung bei in vivo-Studien häufig ausschließlich oral und bukkal erfolgt. Die Interdentalräume können klinisch aufgrund der erschwerten Sichtverhältnisse nicht in unterschiedliche Felder unterteilt werden. Daraus ergibt sich, im Vergleich zu der Plaque-Planimetrie der in-vitro-Methode, eine ungenauere Beurteilung der Reinigungsleistung dieser Bereiche.

1.3.2 **Robotergenerierte Testmethoden**

Ähnlich wie bei in vivo-Verfahren treten auch bei den in-vitro-Testmethoden Schwierigkeiten auf. Diese belaufen sich hauptsächlich auf die Simulation realer Verhältnisse. Hierfür werden in der Regel Roboter verwendet, die die Bewegungen des Zähneputzens nachahmen.

1972 wurde durch Arnold und Trost erstmalig eine Bürstmaschine benutzt, die das horizontale „Schrubben“ imitierte. Als Plaquesimulation diente hier eine Farbe auf Wasserbasis, die auf Zahnmodelle aufgebracht wurde (Arnold und Trost, 1972).

Nygaard-Østby et al. (1979) wollten den Reinigungseffekt von Zahnbürsten im Approximalbereich simulieren und verwendeten hierfür ebenfalls eine Bürstmaschine. Um unterschiedliche Putzkräfte zu erzeugen, wurde die Bürstenhalterung der Maschine mit verschiedenen Gewichten beschwert. Als Nachahmung der Zahnoberflächen diente ein Block mit Furchen, der mit einer Kraft von 2,5 N - 10 N gereinigt wurde. Der Roboter ahmte in dieser Studie nicht nur ein horizontales, sondern auch ein vertikales Putzmuster nach. Als Plaquesimulation nutzte man eine druckempfindliche Folie, die den approximalen Zugang der Zahnbürste sowie die Reinigungseffizienz dokumentieren sollte.

Volpenhein et al. erweiterten die Methode, indem sie die kreisförmigen Bewegungen mit in ihre Testreihe aufnahmen. Die Integration dieser Putztechnik ergab sich aus Videosequenzen, die zuvor gewonnen wurden und Probanden beim gewohnheitsmäßigen Zähneputzen zeigten. Die Anpresskraft lag konstant bei 300 g, die Modelle wurden im 90°-Winkel und zum Vergleich auch im 45°-Winkel von der Zahnbürste gereinigt. Ebenfalls modifizierten Volpenhein et al. (1994) die Plaquesimulation, die die Anhaftung an die Oberfläche des Typodontens sicherstellte. Hierzu verwendete man eine rot gefärbte Lösung auf der Basis eines Ethylesters des Copolymers Polymethylvinylether und dem Anhydrid der Maleinsäure (PVM/MA Copolymeren).

Die erste Studie, die die Benutzung eines 6-achsigen Roboters beinhaltete, wurde von Ernst et al. (1997) durchgeführt. Es sollten dabei zwei unterschiedliche Bürstenköpfe für eine elektrische Zahnbürste miteinander verglichen werden. Die verwendeten Zahnmodelle wurden zuvor mit Hilfe eines Aluminiumoxidpulvers sandgestrahlt. Als künstlicher Zahnbelag wurde eine artifizielle Plaque benutzt, die binnen zwei Minuten aufgetragen wurde. Die Reinigung erfolgte insgesamt zwei Minuten lang robotergestützt (1 Minute Oberkiefermodell, 1 Minute Unterkiefermodell) und mit einer

Anpresskraft von 1,8 N ± 0,2 N. Die Auswertung nahmen zwei, in Bezug auf die Bürstenköpfe, verblindete Prüfpersonen mit Hilfe eines Plaque-Indexes vor.

Seit 2000 führen Imfeld et al. (2000) eine standardisierte, robotergenerierte Testmethode zur Bewertung der Reinigungseffizienz verschiedener Zahnbürsten durch. Wie in den zuvor beschriebenen Methoden integrieren sie gleichermaßen horizontale, vertikale und rotierende Putzbewegungen in ihre Versuchsreihen. Als Plaquesimulation kommt eine weiße Suspension aus Titanoxyd in Ethanol zum Einsatz. Zur Auswertung entfernte man die Zähne aus dem Modell und ließ einen Scanner die approximalen und bukkalen Flächen aufzeichnen. Ein für diese Zwecke entwickeltes Computerprogramm erfasste danach den prozentualen Anteil der plaquefreien Zahnoberflächen. Mit diesem planimetrischen Auswertungsverfahren optimierte man die Objektivität der in-vitro-Testverfahren maßgeblich.

2014 wurde die Korrelation zwischen randomisierten klinischen Studien und robotergenerierten Studien zur mechanischen Plaquereduktion durch den sechs-achsigen Roboter des ORMED-Instituts der Universität Witten/Herdecke belegt. An dieser Studie nahmen 27 Probanden teil, bei denen vorweg eine professionelle Zahnreinigung vorgenommen wurde. Daraufhin erfolgte der dreitägige Verzicht auf die häusliche Mundhygiene, um eine repräsentative Menge an Plaque zu erzielen. Das Zähneputzen wurde videodokumentiert und mit den drei Putzmethoden (horizontal, rotierend, schrubbend), über die der Roboter verfügt, ausgeführt. Die Anpresskraft wurde auf 3,5 N festgelegt und die Dauer des Putzdurchlaufs konstant gehalten. Die robotergenerierte Versuchsreihe wurde mit anorganischer Plaquesimulation vorgenommen und mit Hilfe der Automatisierten Plaque Planimetrie ausgewertet (Lang et al., 2014).

Eine der größten Herausforderungen in der in-vitro-Testmethode ist die realistische Nachahmung der humanen Plaque. Denn diese ist aufgrund ihrer Zusammensetzung und mechanischen Eigenschaften einzigartig.

So kommen als Plaqueersatz beispielsweise Farben zum Einsatz, die auf das Modell aufgetragen werden (Ernst et al., 1997). Wie schon erwähnt haben sich Titanium-Oxid-Applikationen ebenfalls bewährt (Imfeld et al., 2000; Schätzle et al., 2009). Weit verbreitet ist auch der Gebrauch von Okklusionssprays als Plaquesimulation (Ledder et al., 2019; Baldys, 2007), die durch das Aufsprühen eine regelmäßige Beschichtung gewährleisten. Völker verwendete für ihre Versuche ein Gemisch aus Laktritz und

Wasser, das im erhitzten Zustand flüssig war und ein Eintauchen der Modelle ermöglichte. Die frisch aufgetragene Plaque musste danach 24 Stunden trocknen (Völker, 2006). Setzwein (2002) verwendete für die Simulation des Zahnbelags eine Kombination aus Tee und Methylenblau.

Abgesehen davon gab es bislang mehrere Ansätze, die biologische Komponente des natürlichen Zahnbelags zu simulieren. So züchteten Hope et al. (2003) in einem speziellen Verfahren mit Hilfe eines „Constant-depth film fermentors“ einen bakteriellen Biofilm auf Hydroxylappatitscheiben. Hierbei handelt es sich um ein Glasgefäß, das nach oben und unten von einer Edelstahlplatte begrenzt wird. Die obere Platte verfügt über Anschlüsse für den Eintritt des Mediums, welches beigemengt werden soll. Die untere Platte zeigt eine Abflussöffnung. In dem Glasbehälter befindet sich eine Edelstahlscheibe, die kleine Behältnisse enthält, in der der Biofilm wächst. Ein Schaber, der über den Behältnissen kreist, sorgt für eine konstante Tiefe des Biofilms (Pratten, 2007). Hope und Wilson (2003) nutzen diese Methode, um zu zeigen, dass eine approximale Reinigung bei elektrischen Schallzahnbürsten auch ohne direkten Kontakt der Borsten mit den Zahnoberflächen erreicht wird. Hierfür wurden die Hydroxylappatitscheiben mit dem anhaftenden Biofilm an den approximalen Flächen der Modellzähne befestigt und nachgehend roboter-generiert mit unterschiedlichen Zahnbürsten gereinigt. Die Plaquesimulation basierte auf unterschiedlichen Bakterienspezies, die zuvor aus dem menschlichen Speichel gewonnen wurden. Der Reifungsprozess dauerte acht Tage. In dieser Zeit ist es gelungen, einen strukturell dem humanen Zahnbelag sehr ähnlichen Biofilm zu züchten.

2005 wurde die Herstellung des in-vitro-Biofilms weiter optimiert, in dem er dreimal am Tag in einem zeitlichen Rahmen von 30 Minuten mit einer Saccharose-Lösung touchiert wurde, da dies die Plaque-Struktur beeinflusst und den durchschnittlichen Zuckerkonsum simulieren soll. Nachfolgend wurde eine Spülung mit artifiziellem Speichel durchgeführt (Hope et al., 2005).

In der vorliegenden Studie wird versucht, mit der organischen Plaquesimulation die Haftungseigenschaften humaner, gereifter Plaque nachzuahmen. Sie soll dabei mit der anorganischen Plaquesimulation verglichen werden, welche bislang für die robotergenerierte Plaquereduktion bei ORMED zum Einsatz kam. Natürlich tragen beide Arten der Plaquesimulation die Absicht, der physiologischen Plaque in ihrer Konsistenz und in ihren Eigenschaften besonders nahzukommen.

1.4 Ziel der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den Einfluss unterschiedlicher Faktoren auf die Robotersimulation der Plaqueentfernung zu untersuchen.

Es sollten zwei verschiedene Plaqueformulierungen miteinander verglichen werden. Hierbei war das Ziel herauszufinden, ob die Reinigungsergebnisse unter Anwendung der neuartigen organischen Plaquesimulation nach Flad (2019) gleichwertige Reinigungsergebnisse liefert wie die konventionelle anorganische Plaqueformulierung, die bereits Bestandteil der klinischen Validierung des robotersimulierten Zähneputzens des ORMED- Institute for oral medicine an der Universität Witten/Herdecke durch Lang et. al (2014) war.

Eine weitere Fragestellung betraf die Putzzyklen: der Putzzyklus „lang“, oder auch „ORMED 12/2010“ sollte im Rahmen dieser Studie mit dem Putzzyklus „kurz“, beziehungsweise „ORMED 01/2016“ verglichen werden. Mit der Gegenüberstellung der beiden Programme soll ermittelt werden, ob die Verkürzung des Putzzyklus Auswirkungen auf die erzielten Reinigungsergebnisse hat.

Des Weiteren durchliefen zwei unterschiedliche Zahnbürsten die Testreihe. Es galt zu überprüfen, inwiefern der Faktor Zahnbürste die Plaquekontrolle des Roboters beeinflusst.

2 Material und Methode

2.1 Materialüberblick

Die verwendeten Materialien dieser Versuchsreihe lassen sich in unterschiedliche Kategorien unterteilen. Für die in-vitro-Testung von Mundhygieneprodukten braucht man zunächst Material und Gerätschaften, die den menschlichen Probanden als solchen ersetzen. Um die Objektivität zu erhöhen, wurde in dieser Versuchsreihe ebenfalls die Auswertungsperson durch eine Maschine ersetzt. Des Weiteren fallen die Mundhygieneprodukte, deren Leistung ermittelt werden soll, in eine weitere Kategorie des angewandten Materials. Darüber hinaus kommen Mundhygienemittel zum Einsatz, die auf ihre Leistung überprüft werden.

Material, das den Probanden ersetzt:

- Zahnputzroboter der Firma Kawasaki (Kobe, Japan)
- Unterkieferzahnträger mit entsprechender Bezahnung der Firma KaVo®
- Plaquesimulationen (organisch, anorganisch)
- Kunststoffzähne der Firma KaVo®

Material, das die Auswertungsperson ersetzt:

- Automatisierte Plaque-Planimetrie

Zu testendes Material, beziehungsweise Mundhygieneartikel:

- Zwei unterschiedliche Zahnbürsten

Material, das die praktische Umsetzung des Versuchsablaufs erleichtert:

- Färbungs- und Trocknungsapparatur
- Entriegelungsapparatur für die KaVo® Typodonten
- Zange zum Entfernen der Kunststoffzähne
- Pinsel zum Auftragen der organischen Plaquesimulation

2.1.1 **Zahnputzroboter**

Zunächst einmal müssen die Putzbewegungen des Menschen als solches unter in-vitro-Bedingungen ersetzt werden. Die Abb. 2 zeigt den Zahnputzroboter, der in dieser Arbeit zum Einsatz kam. Es handelt sich um das Modell des Typs FS02N der Firma Kawasaki (Kobe, Japan), welches über sechs Achsen verfügt und Bewegungen mit 3,8 mm/s durchführen kann. Dabei beträgt die Wiederholungsgenauigkeit ±0,03 mm. Seine Programmierung beinhaltetet drei Bewegungsmuster. Zum einen die vertikalen Bewegungen, ein schrubbendes Muster, welches an das horizontale Schrubbmuster angelehnt ist und zum anderen ein rotierendes Muster. Die Typodonten werden in den fixierten Modellträger eingespannt und dann von bukkal und lingual gereinigt.

2014 zeigte die Reinigungsleistung des Roboters in einer Studie von Lang et al. eine gute Korrelation zu dem klinisch standardisierten Zähneputzen. Der Einsatz des Roboters zu Testzwecken von Zahnbürsten gilt seither als klinisch validiert.

In dieser Arbeit werden zwei Roboterprogramme miteinander verglichen. Es handelt sich einerseits um das konventionelle Langprogramm Putzzyklus "lang" und andererseits das modifizierte Kurzprogramm Putzzyklus "kurz". Die Roboterprogramme unterscheiden sich durch unterschiedliche Abfolgen der obengenannten Bewegungsmuster. Das Programm Putzzyklus "lang" umfasst das horizontale, vertikale und rotierende Putzmuster, welches jeweils dreimal wiederholt wird. Analog dazu beinhaltet das Kurzprogramm von ORMED ebenfalls alle drei Putzmuster, jedoch unterscheidet sich hierbei die Anzahl der Wiederholungen. In diesem Programm führt der Roboter das horizontale Putzmuster zweifach durch, während das vertikale und rotierende Muster nur einmal durchlaufen wird. Insgesamt kommt demnach das modifizierte Programm von 2016 auf eine kürzere Putzdauer und ist auf der einen Seite zeitsparender und auf der anderen Seite ergibt sich daraus eine realistischere Putzdauer und damit auch eine realitätsnähere Gestaltung der Testreihen.

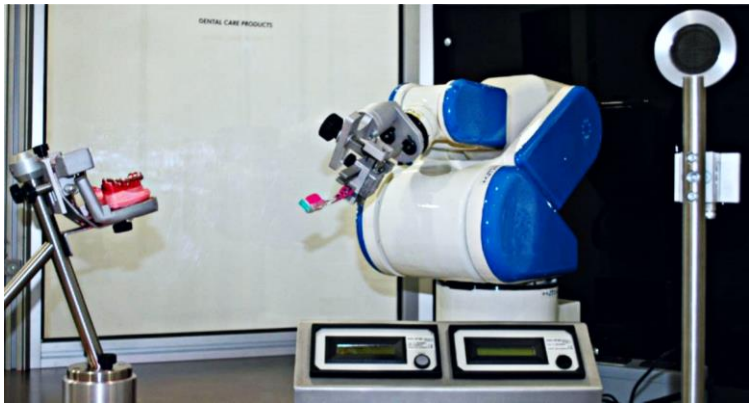

Abb. 2 Der Zahnputzroboter mit dem fixierten Modellträger (Lang et al., 2014)

2.1.2 **Kunststoffzähne**

Die Modelle, die eine natürliche Dentition simulieren, sind von der Firma KaVo (Biberach, Deutschland) und enthalten kreisrunde Aussparungen, in welche die dazugehörigen Kunststoffzähne von KaVo eingesteckt werden. Die Bezahnung des Modells funktioniert mit einem patentierten Schnappmechanismus, der dafür sorgt, dass die Zähne immer in der richtigen Position fixiert werden können. Beim Einrasten in diese Position ist ein Klickgeräusch vernehmbar. Für die Versuchsreihe werden ausschließlich Unterkiefermodelle und die Zähne 33-48 verwendet - wie in Abb. 3 dargestellt. Die Zahnmodelle simulieren das Gebiss eines parodontal vorgeschädigten Erwachsenen mittleren Alters mit offen gestalteten Approximalräumen und freiliegenden Wurzeloberflächen. Durch die integrierten anatomischen Merkmale wie die Speesche Kurve, die Poundsche Linie und die Wilson Kurve (KaVo Dental, 2021), kann die Testreihe angelehnt an die natürlichen Verhältnisse durchgeführt werden.

Abb. 3 KaVo-Modell aus unterschiedlichen Perspektiven (Biberach, Deutschland)

2.1.3 **Plaquesimulationen**

Als eine besondere Schwierigkeit der in-vitro-Testmethode gilt die Nachahmung des humanen Zahnbelags aufgrund der Komplexität seiner Zusammensetzung und Konsistenz. Es gibt wie bereits erwähnt viele unterschiedliche Ansätze, die Plaque zu imitieren. In dieser Arbeit finden zwei unterschiedliche Simulationen Anwendung. Bislang wurde für die robotergenerierte Testmethode am Institute for Oral Medicine ORMED (Witten, Deutschland) ein Zahnbelag verwendet, der aus anorganischen Zutaten besteht. Diese konventionelle Plaquesimulationsmethode wird im Rahmen dieser Versuchsreihe der organischen Plaque nach Flad gegenübergestellt. Die Besonderheit der organischen Plaque nach Flad liegt in ihrer Formulierung, die an Nahrungsbestandteile angelehnt ist. Beide Plaque-Ersatzmittel werden rot eingefärbt,

um die Reinigungsleistung für die Automatisierte Plaque-Planimetrie messbar zu machen. Die artifizielle Plaque nach Flad (2019) wurde am Institut für Pharmazeutische Technologie und Biopharmazie der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster einer Viskositätsprüfung unterzogen, welche einen Vergleich der Viskosität mit zukünftig hergestellten Plaquesimulationen ermöglicht. Hierfür wurde im Rahmen der Studie von Flad (2019) ein Sprungversuch durchgeführt, der zeigte, dass die artifizielle Plaque ein strukturvisköses Medium ist, das hinsichtlich seiner Viskosität in Abhängigkeit von der Scherbelastung steht. Aufgrund dessen konnte kein konstanter Viskositätswert ermittelt werden. Demnach verfügte sie bei geringer Scherbelastung über eine Viskosität von 34,6 - 40,2 Pa*s und bei hoher Scherbelastung zwischen 1,99 - 2,83 Pa*s.

2.1.4 **APP (Automatisierte-Plaque-Planimetrie)**

Bei der automatisierten Plaque-Planimetrie (APP), handelt es sich um eine Messeinheit von ORMED und M+C Schiffer, welche vollautomatisiert die Reinigungsleistung ermittelt und somit die Auswertungsperson ersetzt.

Hierfür wird jeder einzelne Zahn in unterschiedliche Zahnfelder unterteilt (vgl. Abb. 4 und Abb. 5), welche anhand des modifizierten Navy-Plaque-Index nach Rustogi et al. festgelegt werden.

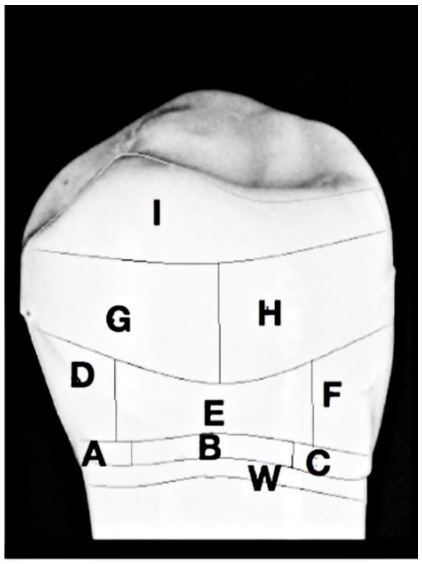

Abb. 4 Planimetrische Felder A-I, W
(Gaengler et al., 2013)

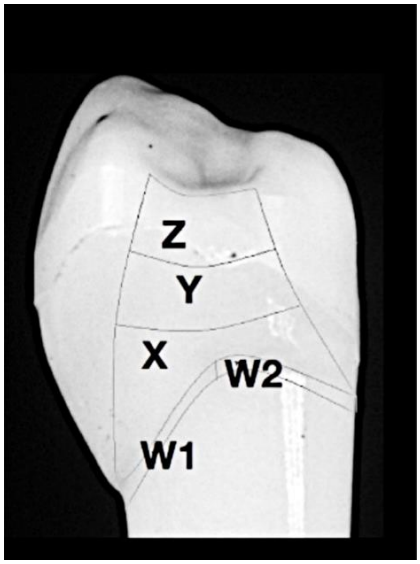

Abb. 5 Planimetrische Felder X-Z, W1, W2
(Gaengler et al., 2013)

Die automatisierte Plaque-Planimetrie beinhaltet eine Dunkelkammer, eine Fotoeinheit mit integrierter Kamera und Beleuchtung für optimale Lichtgegebenheiten, einen Schlitten mit Haltevorrichtungen für die KaVo®-Zähne, einen Monitor und ein Touch-panel. Die Erfassung geschieht durch das eigenständige Fotografieren der einzelnen Zähne. Der Schlitten, auf dem die Zähne befestigt werden, ist in der horizontalen Ebene beweglich. So wird gewährleistet, dass jeder Zahn immer wiederkehrend an derselben Stelle in der Apparatur bildlich erfasst wird. Die Zähne werden dabei um die eigene Achse in der Vorrichtung gedreht und alle Zahnflächen dabei bildlich erfasst. Jeder Zahn wird von mesial, distal, vestibulär und oral fotografiert. Daraufhin erfolgt die computergesteuerte Bildbearbeitung und Auswertung. Hierfür kommt eine Analysesoftware zum Einsatz. Es existiert eine Schablone für jeden Zahn, die die unterschiedlichen Planimetrie-Felder auf den fotookumentierten Zahn projiziert. Die Ermittlung der plaque-belegten Zahnoberfläche erreicht sie mit einer Pixel-genauen Zählfunktion. Mit den dabei ermittelten Pixelpunkten und der bekannten Gesamtanzahl an Pixelpunkten des Planimetriefeldes berechnet sie den prozentualen Anteil der gereinigten Fläche. Demnach entspricht eine gänzlich belagsfreie Oberfläche einer Reinigungseffizienz von 100 %.

2.1.5 **Zahnbürsten**

Es durchliefen zwei unterschiedliche Zahnbürsten die Testreihe. Bei beiden Modellen handelt es sich um Flachschnittmodelle, die sich durch ein ebenes Borstenfeld auszeichnen. Die Borsten unterscheiden sich hauptsächlich in ihrer Härte.

Dontodent ist eine Eigenmarke der Drogeriekette „dm-drogerie markt GmbH + Co. KG“ und bei der hier verwendeten Zahnbürste handelt es sich um das Modell „3324 Adult Brush Sensitive“ von M+C-Schiffer (siehe Abb. 6). Ihre Gesamtlänge beträgt 18,6 cm und weist eine Breite von 1,6 cm auf. Im Vergleich zum Bürstengriff befinden sich der Bürstenhals und -kopf in einer abgewinkelten Position. Die Größe des Bürstenkopfs misst 2,1 cm Länge und 1,4 cm an der breitesten Stelle. Das Borstenfeld besteht aus 33 Büscheln, von dem jedes Borstenbüschel über 50 Filamente verfügt. Insgesamt kommt die Bürste demnach auf 1650 Filamente, die eine Länge von 12 mm aufweisen. Die Testzahnbürste Dontodent besitzt weiche Borsten mit superfeinen Borstenenden, den sogenannten „tapered“ Filamenten (Schiffer, 2016).

Abb. 6 Die Testzahnbürste Dontodent in 3 Ansichten

Die Abb. 7zeigt das zweite Zahnbürstenmodell, bei dem es sich um die Referenzzahnbürste des Institute for Oral Medicine ORMED (Witten, Deutschland), handelt. Diese verfügt über ein dichtgepacktes („multitufted“), planes Borstenfeld mit abgerundeten Borsten. Der Bürstenkopf besteht aus 42 Büscheln, die im Gegensatz zur Testzahnbürste Dontodent in Dreier- beziehungsweise Vierer-Reihen angeordnet sind. Daraus ergibt sich auch ein insgesamt längerer Bürstenkopf. Außerdem zeichnet sich die Zahnbürste durch ein mittelhartes Borstenfeld aus.

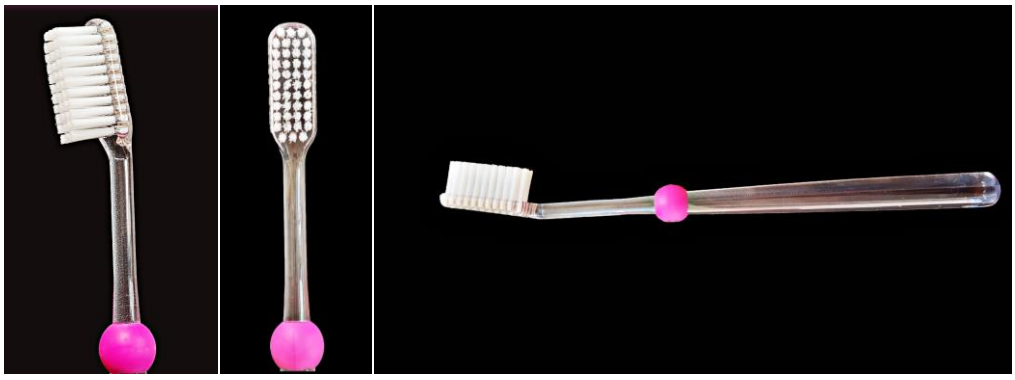

Abb. 7 Die Referenzzahnbürste in 3 Ansichten

2.2 **Methodik**

2.2.1 **Räumliche Verhältnisse**

Die Versuchsreihe fand am Institut Institute for Oral Medicine ORMED im ZBZ (Zahnmedizinisches Biowissenschaftliches Zentrum) in Witten statt. Die Zimmertemperatur wurde konstant bei 22 C gehalten und regelmäßig kontrolliert.

2.2.2 Vorbereitende Maßnahmen

Zunächst einmal mussten die Unterkiefermodellträger der Firma KaVo® mit den dazugehörigen Kunststoffzähnen von 33-48 bestückt werden. Daraufhin wurden die Modelle mit Isopropylalkohol konditioniert und getrocknet. Im Anschluss wurden die Kunststoffzähne auf die korrekte Position überprüft, damit sich alle Zähne in der korrekten, reproduzierbaren Lage zueinander befanden.

2.2.3 Anmischen der Plaquesimulation

Aufgrund der Verwendung zweier unterschiedlicher Plaquesimulationen wurden die Versuche strikt voneinander im Sinne einer organischen und anorganischen Methode getrennt durchgeführt. Beide Simulationen wurden mit Hilfe einer Waage exakt nach der jeweiligen Rezeptur angemischt. Trocknungszeiten wurden eingehalten und mit Hilfe einer Stoppuhr kontrolliert.

Die konventionelle Plaque wurde angemischt und in ein Tauchbecken eingefüllt. Daraufhin wird das Modell in die Vorrichtung oberhalb des Tauchbeckens eingespannt und mit der künstlichen Plaque benetzt. Noch innerhalb der Vorrichtung wird die Plaque getrocknet. Nach zwei Minuten konnte sie in den Modellhalter des Zahnputz-roboters eingespannt werden. Die Benetzung der Zahnoberflächen mit der organischen Plaquesimulation konnte aufgrund der hohen Viskosität nicht mit der Tauch- und Trocknungsapparatur stattfinden. Stattdessen wurde der künstliche Zahn-belag hierbei in einem gleichmäßig dünnen Film mit Hilfe eines Pinsels auf die Kunststoffzähne aufgetragen (vgl. Abb. 8). Die Zahnzwischenräume wurden dabei gänzlich von der organischen Plaque nach Flad ausgefüllt. Im Rahmen der organischen Methode erfolgte an dieser Stelle eine exakt 15-minütige Trocknungszeit der Typodonten. Bei Nichteinhaltung dieser Zeitspanne ist die Masse noch zu feucht und zieht Schlieren beim Putzvorgang, sodass die Reinigungsleistung der Zahnbürste verfälscht werden könnte.

Abb. 8 Beschichtete Kunststoffzähne mit der organischen Plaquesimulation nach Flad

2.2.4 **Kalibrierung des Roboters**

Jedes Zahnbürstenmodell musste vor Ausführung des jeweiligen Putzprogrammes an einer gläsernen, planen Scheibe mit aufgedrucktem Fadenkreuz des Roboters ausgerichtet werden. Die Zahnbürste wurde in die Universalvorrichtung eingespannt und korrekt eingestellt. Hierbei ist wichtig, dass der Bürstenkopf mittig in dem Auflagefeld anliegt. Ist dies nicht der Fall, resultiert ein ungünstiges Zahnflächenkontaktvermögen der Zahnbürste, was zu erheblichen Einbußen in der Reinigungsleistung führen kann. Eine Konstante innerhalb dieser robotergestützten Methode ist nicht nur die Ausrichtung der Zahnbürste, sondern auch die Anpresskraft. Im Rahmen dieser Testreihe wurde eine Anpresskraft von drei Newton gewählt. Bei der Einstellung der Anstellkraft gilt ebenfalls die Faustregel, die Kraft gleichmäßig auf den Bürstenkopf zu übertragen. Hierzu wird die Zahnbürste durch den Roboter an den Druckmesser angelegt. Der Kraftmesser ist zweigeteilt, sodass die Verteilung der drei Newton im Verhältnis 1:1 (anteriorer Bürstenkopf: posteriorer Büstenkopf) erfolgte. Ein Touchpanel informiert hierbei stetig über die Verteilung der Anpresskraft auf den beiden Messfeldern. Angestrebt wurden demnach 1,5 N auf jeder Seite, wobei sich hier eine Abweichung von ±0,025 N im Toleranzbereich befindet.

2.2.5 **Vorbereitung der Typodonten für den Putzzyklus**

Bei der anorganischen Methodik wurden die artifizielle Plaque in das Becken der Tauch- und Trocknungsapparatur gefüllt. Auf diese Art und Weise ist die gleichmäßige Benetzung der Kunststoffzähne mit dem künstlichen Zahnbelag gegeben. In der Tauch- und Trocknungsapparatur wird der Zahnträger in der vorgesehenen Halterung montiert. Das Gerät enthält einen Führungsarm, welcher das Modell in das Becken mit der anorganischen Plaquesimulation taucht. Im Anschluss wird das Modell wieder hochgefahren und unter rotierender Bewegung 300 Sekunden durch 58 C warme Luft getrocknet. Nach diesem Trocknungsprozess schloss sich eine Wartezeit von 120 Sekunden an. In dieser Zeit musste das Modell im fixierten Träger des Roboters befestigt werden. Durch die Befestigung des Trägers wird die immer gleiche Position des Modells gewährleistet. Die Fixierung des Typodonten geschieht durch eine Fixationsschraube. Etwaige Spalten zwischen Modell und Modellträger weisen auf eine inkorrekte Befestigung des Kiefermodells hin. Wie bereits oben beschrieben erfolgte im Anschluss die Einstellung der Anpresskraft von 3 N. Die bereits zuvor eingestellte Ausrichtung wurde in diesem Schritt ebenfalls noch einmal kontrolliert.

2.2.6 **Putzzyklus**

Durch die Steuerung des Touchpanels führt der Roboter die gewünschten Befehle durch. Man unterscheidet dabei drei unterschiedliche Bewegungsmodi. Diese imitieren die drei gängigsten Putzmethoden: rotierende Bewegungen, horizontales Schrubben und vertikale Bewegungen im Sinne der „rot-weiß“-Technik. Unabhängig vom ausgewählten Programm erfolgte die Vorgehensweise des Zahnputzroboters immerzu identisch. Jeden Putzzyklus beginnt er am dritten Molaren des vierten Quadranten von bukkaler Seite. Hiernach führt der Roboter die Bewegungen ebenfalls von 48 startend lingual weiter fort.

Der Putzzyklus „lang“ hat eine insgesamte Dauer von 180 Sekunden. In dieser Zeit werden die drei häufigsten durchgeführten Putzbewegungen durch den Roboter imitiert. Jedes Modell durchläuft jeweils dreimal den Putzzyklus „Schrubbend“, „rotierend“ und „rot-weiß“. Demnach werden die Kunststoffzähne neunmal mit der Zahnbürste bearbeitet. Der Putzzyklus „kurz“ umfasst hingegen insgesamt nur vier Durchläufe und wurde entwickelt, um die Testreihen realitätsnaher zu gestalten. Hierbei führte der Roboter das horizontale Schrubbmuster doppelt durch, während das rotierende und vertikale Muster nur einfach abliefen. Die Putzzeit verkürzt sich aus diesem Grund auf insgesamt 80 Sekunden. Im Anschluss musste das Modell vorsichtig aus der Halterung entfernt werden, sodass keine Berührung der gerade gereinigten Zahnoberflächen die Reinigungsleistung verfälschen konnte.

2.2.7 **Auswertung der Reinigungsleistung**

Mithilfe der Entriegelungsapparatur wurden alle Zähne gleichzeitig aus ihrem sicheren Verschluss gelöst und mit einer Zange deutlich unterhalb der Wurzelfelder aus dem Modell entfernt und in die Zahnträger der Automatisierten Plaqueplanimetrie (APP) eingebracht. Auch hier wurde penibel darauf geachtet, unter keinen Umständen die Zahnkrone und den Wurzelhals zu berühren. Die Kunststoffzähne rasteten bei korrektem Einfügen in die Halterung ein, vernehmbar war die richtige Position durch ein Klickgeräusch. Jeder Kunststoffzahn verfügt über eine kongruente Vorrichtung, die durch Beschriftungen gekennzeichnet sind. Dies gewährleistet eine reproduzierbare Position der einzelnen Zähne in der APP. Lediglich der Zahn 33 wurde nicht in die Spezialhalterungen der APP eingebracht, da dieser nur eingespannt wurde, um den Zahnzwischenraum 33,32 auch mit auswerten zu können. Die ermittelte Reinigungs-

leistung umfasste demnach die Ergebnisse der Zähne 32-48. Nachdem die Kunststoffzähne eines Zahnträgers in die APP eingebracht und nochmals auf den korrekten Sitz in der Halterung kontrolliert wurden, konnte der Scanvorgang mit einem Startbefehl initiiert werden. Die Schutztür musste vor dem Startbefehl stets verschlossen sein.

Die Automatisierte-Plaque-Planimetrie erhebt den Prozentsatz der gereinigten Fläche jedes einzelnen Zahnfeldes. Eine Kamera erfasste die Kunststoffzähne bildlich und wertete sie mittels Zählung der Pixelpunkte eigenständig und vollautomatisiert aus. Die Auswertung der Planimetriefelder geschah in Echtzeit und konnte auf einem separatem Bildschirm überwacht werden. Hiernach wurden die Daten auf einen Computer übertragen und abgespeichert. Im Anschluss konnten der Zahnträger gesäubert, die Testzähne entfernt und für die Wiederverwendung gereinigt werden.

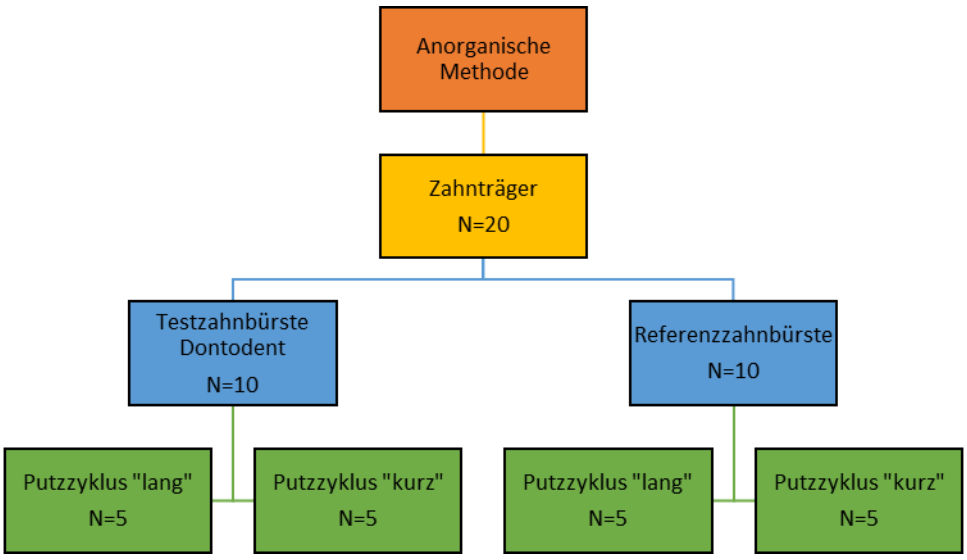

Abb. 9 Anorganische Methode – Übersicht.
Die anorganische Versuchsreihe umfasste insgesamt 20 Zahnträger, von denen zehn mit der Testzahnbürste Dontodent gereinigt wurden. Von diesen zehn Zahnträgern wurden fünf mit dem Putzzyklus „lang“ und fünf mit dem Putzzyklus „kurz“ bearbeitet. Die übrigen zehn Zahnträger durchliefen die Testreihe in Kombination mit der Referenzzahnbürste. Hiervon wurden fünf mit dem Putzzyklus „lang“ und fünf mit dem Putzzyklus „kurz“ gereinigt.

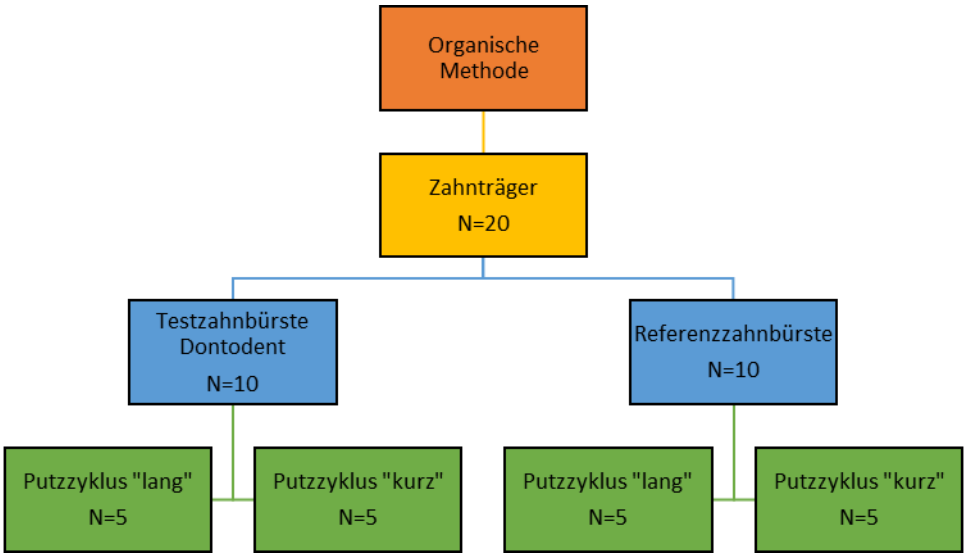

Abb. 10 Organische Methode – Übersicht.

Die organische Methode umfasste insgesamt ebenfalls 20 KaVo-Modelle, von denen jeweils 10 mit der Testzahnbürste Dontodent und 10 von der Referenzzahnbürste bearbeitet wurden. Jeweils fünf wurden mit dem Putzzyklus „lang“ und fünf mit dem Putzzyklus „kurz“ gereinigt.

Die anorganische Methode umfasste insgesamt 20 Zahnträger (vgl. Abb. 9). Hiervon wurden jeweils zehn mit der Testzahnbürste Dontodent und zehn mit der Referenzzahnbürste von ORMED gereinigt. Wiederum durchliefen davon fünf den Putzzyklus „lang“ und fünf das Putzzyklus „kurz“. Analog dazu verlief die organische Methode (vgl. Abb. 10). Insgesamt belief sich die Anzahl der mit der Plaque nach Flad beschichteten Zahnträger auf N=20. Jeweils zehn KaVo-Modelle wurden dann entweder von der Testzahnbürste Dontodent oder der Referenzzahnbürste gereinigt. Demnach wurde für insgesamt zehn Modelle in der organischen Methode der Putzzyklus „kurz“ und für weitere zehn Zahnträger der Putzzyklus „lang“ verwendet. Analog dazu durchliefen in der anorganischen Methode ebenfalls jeweils zehn Zahnträger die beiden unterschiedlichen Putzzyklen.

2.3 Statistische Methoden

2.3.1 Auswahl der Zahnfelder

Insgesamt verfügt jeder Zahn über 30 Felder, die 24 koronale Bereiche (9 bukkal, 9 lingual, 3 jeweils approximal) und 6 Wurzelfelder umfassen. Es wurden pro Zahnträger 10 Zähne ausgewertet. Daraus ergibt sich eine Gesamtzahl von 300 Feldern pro Typodonten. Bei einer Summe von 40 verwendeten KaVo-Modellen entspricht dies einem Umfang von insgesamt 12.000 bewerteten Zahnfeldern.

Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurden die jeweils plaquefreien Bereiche der lingualen und bukkalen Glattflächenfelder A-I ausgewertet (vgl. Abb. 11 und Abb. 12). Hinzu kam die statistische Auswertung der Approximalflächen X, Y, jeweils mesial und distal. Darüber hinaus wurden die Felder ABCDF jeweils bukkal und lingual aufgrund ihrer unmittelbaren Nähe zur Gingiva und zu den Interdentalräumen noch einmal separat bewertet und als Risikofelder betitelt. Der Begriff Risikofelder rührt daher, dass sich dort vermehrt Zahnbelag akkumulieren kann, da sie häufig durch die gewöhnlichen Putzbewegungen nicht ausreichend von Plaque befreit werden. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf das Vermögen der Zahnbürste ziehen, diese Bereiche zu erreichen. Die Reinigungsleistung in den Risikofeldern dienen daher im weiteren Sinne der Gingivitisprävention. Separat wurden ebenfalls die Wurzelglattflächen untersucht (W(bukkal)+W(lingual)). Davon ausgenommen wurden die approximalen Wurzelflächen W1+W2 mesial und W1+W2 distal, die gleichermaßen gesondert ausgewertet wurden.

Abb. 11 Planimetriefelder der Glattflächen (Egermann,2016)

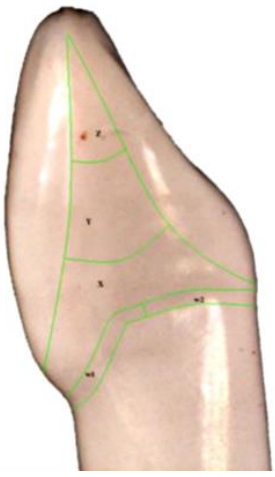

Abb. 12 Planimetriefelder des Approximalraumes (Egermann,2016)

2.3.2 **Statistische Auswertungsverfahren**

Die Untersuchung umfasste Datensätze für den Vergleich zweier Plaquesimulationsmethoden, zweier Zahnbürsten und zweier Roboterprogramme. Prinzipiell erfolgte die statistische Auswertung durchweg mit dem Vergleich zweier Gruppen miteinander. Bei dem Datensatz dieser Testreihe handelt es sich um mindestens ordinal-skalierte Messwerte. Dies bedeutet, dass die Messwerte in eine Rangfolge eingefügt werden können. In diesem Fall beziehen sich die unterschiedlichen Ränge auf die erreichte Reinigungsleistung. Zunächst erfolgte ein Vortest, der Kolmogorov-Smirnov-Test, um zu prüfen, ob die vorliegenden Reinigungswerte normalverteilt sind.

Tab. 1 Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung aller Studienparameter

Zahnseite / Parameter	N	Test-statistik	p
Bukkal	40	0.347	0.000
Lingual	40	0.332	0.000
Mesial	40	0.164	0.008
Distal	40	0.116	0.185
ABCDF Bukkal	40	0.250	0.000
ABCDF Lingual	40	0.245	0.000
W Bukkal	40	0.143	0.037
W Lingual	40	0.228	0.000
W1+W2 Mesial	40	0.232	0.000
W1+W2 Distal	40	0.197	0.000
Total	40	0.225	0.000

N = Stichprobengröße
p = Signifikanzwert
Die empirischen Verteilungen der Reinigungswerte sämtlicher Zahnseitenparameter unterscheiden sich *signifikant* von der Normalverteilung nach Gauß ($\alpha = 0.20$).

Bei einer Normalverteilung nach Gauß können parametrische, statistische Verfahren wie zum Beispiel der T-Test Anwendung finden. Dieser beschreibt eine zuverlässige Methode der Prüfung auf den Unterschied von Messwerten, die anhand des Vergleichs zweier Mittelwerte durchgeführt wird. Liegt keine symmetrische Verteilung der Werte vor, können nur nicht parametrische oder auch verteilungsfreie Verfahren zur Auswertung verwendet werden.

In Tab. 1 ist erkennbar, dass die empirischen Verteilungen der Reinigungswerte sämtlicher Zahnseitenparameter dieser Studie sich signifikant von der Normalverteilung nach Gauß unterscheiden. Aus diesem Grund kam im Rahmen der vorliegenden Studie der Mann-Whitney-U-Test sowohl bei der Testung der Haupteffekte als auch bei der Testung der Wechselwirkungen zum Einsatz. Er kann bei zwei unabhängigen Stichproben alternativ zum t-Test herangezogen werden. Der Vergleich der beiden Stichproben erfolgt mittels zweier Mediane, die auf einen Unterschied getestet werden. Dabei wird entweder die Nullhypothese bestätigt, was bedeutet, die Summe der Rangplätze der unterschiedlichen Stichproben sind gleich, oder es wird eine Alternativhypothese aufgestellt, da die Rangsummen ungleich sind. Dennoch zeigt der Mann-Whitney-U-Test ausschließlich, ob ein Unterschied vorliegt und inwiefern dieser signifikant ist. Über die Größe der Unterschiede kann dieser Test keinen Aufschluss geben.

Aus diesem Grund wurden zudem sowohl für die Testung der Haupteffekte als auch für die Testung auf vorhandene Wechselwirkungen deskriptiv statistische Auswertungen vorgenommen, bei denen Lage- und Streumaße erfasst wurden (vgl. Abb. 13). Mit den Lagemaßen wird angegeben, in welchem Bereich sich die Messwerte konzentrieren (Weiß, 2007). Hierdurch wird eine weitere Einschätzung der zusammengefassten Messwerte und deren Größenunterschiede zueinander ermöglicht. Zu den ermittelten Lagemaßen gehören der Mittelwert, der Median und die Perzentile. Der Mittelwert als bekanntestes Lokalisationsmaß birgt den Nachteil, dass er sich insbesondere bei asymmetrischen Verteilungen von Ausreißern stark beeinflussen lässt. Dieses Phänomen rührt von der Berechnungsweise, da alle Messwerte hierbei addiert und durch die Anzahl der vorhandenen Stichproben dividiert werden. Anders verhält es sich mit dem Median, der Ausreißern gegenüber robust ist (Weiß, 2007): hierbei werden ordinal skalierte Daten in eine aufsteigende Rangliste sortiert und anschließend wird das Zentrum der Messwerte bestimmt, der auch Zentralwert genannt wird. Auch wenn der Median hier also dem Mittelwert überlegen ist, ist es dennoch sinnvoll beide Werte zu bestimmen, da der Vergleich beider Werte Aufschluss über die Symmetrie der Verteilung gibt. Differieren die Werte stark voneinander, so wird dies durch Ausreißer hervorgerufen, die den Mittelwert verzerren (Weiß, 2007). Perzentile gehören zu den speziellen Quantilen. Das 25. Perzentil beschreibt, dass 25 % aller Messwerte unterhalb des angegebenen Wertes liegen,

während das 75. Perzentil zeigt, dass 75 % aller Messwerte unterhalb des angegebenen Wertes angesiedelt sind. Demnach liegen nur noch 25 % der Messwerte über diesem angegeben Wert. Durch Grafiken wie die sogenannten Whisker-Box-Plots können sowohl Lage- als auch Streuungsmaße visualisiert werden. Dabei werden die Stichproben mit einer Box repräsentiert, dessen untere Begrenzung dem 1. Quartil entspricht und die obere Begrenzung dem 3. Quartil. Der Linie im Kasten selbst stellt den Median dar. Die von der Box ausgehenden senkrechten Linien zeigen das Minimum und das Maximum der Verteilung an. Als Streuungsmaß dient die Ermittlung der Standardabweichung, die die Homogenität bzw. Heterogenität einer Stichprobe anzeigt. Des Weiteren wurden in dieser Arbeit Fehlerbalkendiagramme erstellt, um Streuungen innerhalb der Stichprobe - ausgehend vom Mittelwert - grafisch darzustellen. Das markierte Zentrum des Balkens zeigt den Mittelwert und die Höhe der einzelnen Balken basierend auf der Standardabweichung.

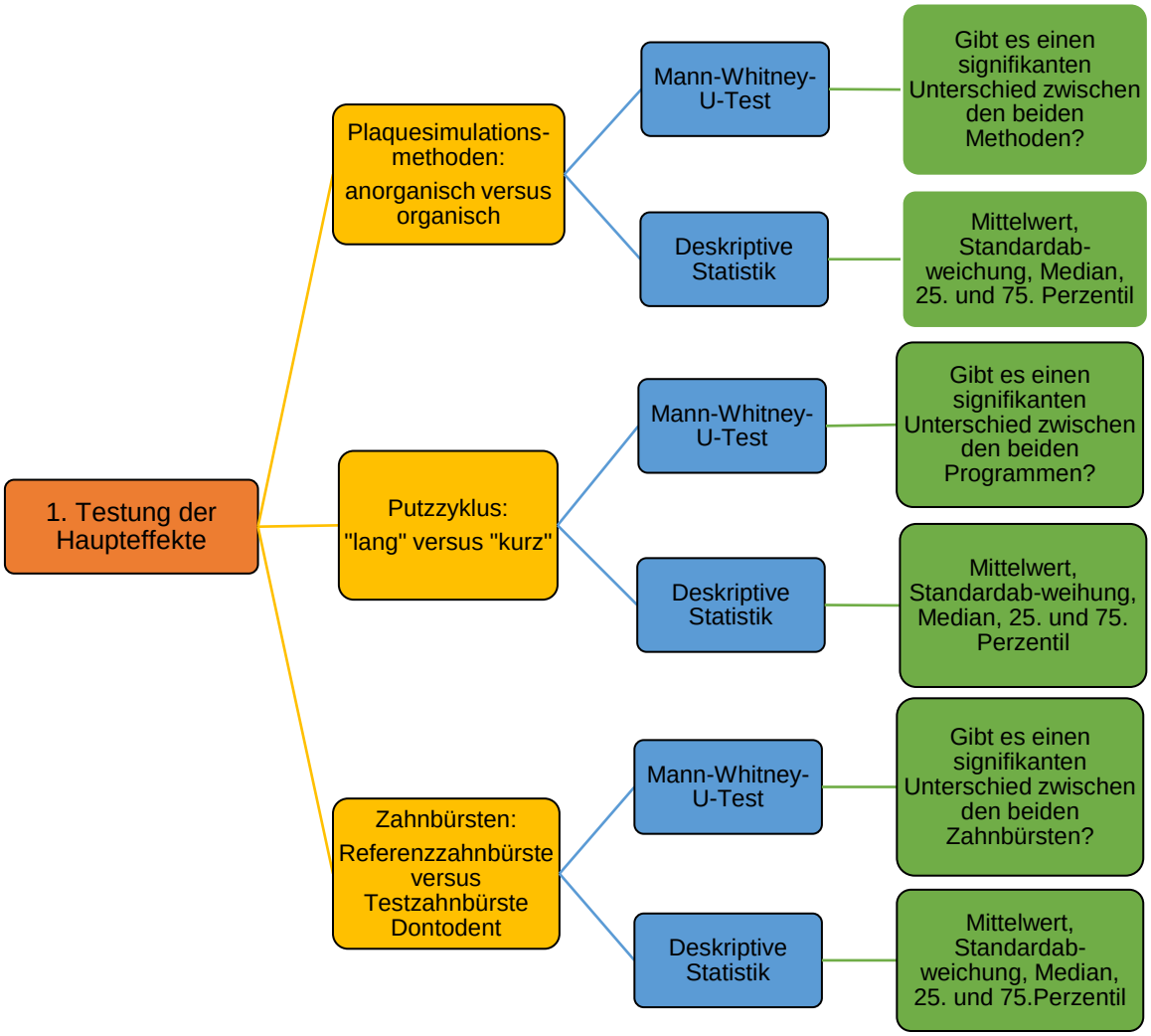

Abb. 13 Statistische Auswertung: Testung der Haupteffekte - ein Überblick.

Die anorganische und organische Plaquesimulation werden anhand des Mann-Whitney-U-Test auf einen Unterschied geprüft. Daraufhin soll mittels der deskriptiven statistischen Auswertung die Größe des Unterschieds ermittelt werden. Analog ist das Vorgehen bei dem Vergleich beider Putzzyklen und Zahnbürsten miteinander.

Der Datensatz umfasst insgesamt 12.000 Beobachtungen, die sich aus der Anzahl der Putzversuche (n=40) mit je zehn Zähnen pro Zahnträger und 30 planimetrischen Feldern pro Zahn ergibt.

Die Automatisierte-Plaque-Planimetrie (APP) generierte den Datensatz aus der vollautomatisierten Fotodokumentation. Die statistischen Verfahren wurden mittels der Statistiksoftware IBM SPSS Statistics, Version 19 (SPSS GmbH, München) realisiert.

Im Rahmen der Auswertung mussten Extremwerte eliminiert werden. Diese wurden lediglich bei der Verteilung der Reinigungswerte der Zahnbürsten – und hier ausschließlich bei der Referenzzahnbürste – festgestellt. Als Extremwert wird ein Wert angesehen, der sich außerhalb des 3. Interquartilabstandes vom ersten bzw. dritten Quartil der jeweiligen Verteilung lokalisiert. Dies betraf die 2. Referenzzahnbürste der anorganischen Methode und die jeweils bukkalen und lingualen Felder des 1. und 2. Durchlaufs, sowie die Risikozahnfelder ABCDF im 2. Durchlauf. Damit reduzierte sich der Stichprobenumfang der Referenzzahnbürste in der anorganischen Methode um insgesamt vier Felder (das bedeutet eine Reduzierung von 3000 beobachteten Feldern auf 2996 Beobachtungen).

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der jeweils zwei verschiedenen Plaquesimulationen, Zahnbürsten und Putzzyklen ausgewertet und miteinander verglichen. Die Abb. 14 zeigt eine Übersicht der Abkürzungen, die in den Tabellen im folgenden Kapitel verwendet werden.

Abkürzungen in Tabellen

M	Arithmetrischer Mittelwert
SD	Standardabweichung
Med	Median
25. Perz.	Wert des 25. Perzentils
75. Perz.	Wert des 55. Perzentils

Die Differenz zwischen 25. und 75. Perzentilwert stellt den Interquartilabstand (IQR bzw. QA) dar.

Abb. 14 Übersicht der verwendeten Abkürzungen

3.1 Vergleich der Plaquesimulationen anorganisch versus organisch

In diesem Kapitel sollen die Reinigungsleistungen unter Verwendung der verschiedenen Plaquesimulationen einander gegenübergestellt werden. Die Abb. 15 dient der Veranschaulichung der Vorgehensweise bei der Auswertung der Daten. Zunächst wird der gesamte Datensatz in die Auswertung miteinbezogen, um den gesamten Stichprobenumfang zu bewerten. Schließlich wird der Einfluss der unterschiedlichen Zahnbürsten oder Putzzyklen auf das Reinigungsergebnis ermittelt.

Abb. 15 Übersicht über die Auswertung der Reinigungsergebnisse beider Plaquesimulationen.

Das Kapitel 3.1.1 umfasst den gesamten Datensatz, das heißt die Reinigungsergebnisse beider Zahnbürsten und Putzzyklen werden verglichen, um festzustellen, ob es einen Unterschied hinsichtlich der Reinigungseffizienz zwischen den beiden Methoden gibt. Im Anschluss soll die Größe des Unterschieds anhand der deskriptiven Statistik dargestellt werden (Kapitel 3.1.2). In Kapitel 3.1.3 und 3.1.4 werden die Reinigungsleistungen der Testzahnbürste Dontodent und der Referenzzahnbürste ORMED in der jeweiligen Plaquesimulationsmethode gesondert betrachtet. Analog ist das Vorgehen bei der Ermittlung der Einflussnahme des jeweiligen Putzzyklus: hier werden die Reinigungsleistungen des Putzzyklus „lang“ und „kurz“ gesondert voneinander betrachtet, um herauszufinden, ob einer der beiden Zyklen Auswirkungen auf die Reinigungsleistung in der jeweiligen Plaquesimulationsmethode hat (Kapitel 3.1.5, 3.1.6).

3.1.1 **Prüfung auf den Unterschied**

Das Ziel war es, herauszufinden, ob es einen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Reinigungsleistung zwischen der organischen, artifiziellen Plaque und der anorganischen, artifiziellen Plaque gab. Es wurden die Datensätze beider Putzzyklen und Zahnbürsten in den Vergleich eingepflegt, um herauszufinden, ob sich die Reinigungsleistungen der beiden Plaquesimulationen, ungeachtet des Putzzyklus und der verwendeten Zahnbürste, voneinander abheben.

Wie in Tab. 2 ersichtlich, unterscheiden sich beide Methoden der Plaquesimulation in Bezug auf Reinigungseffizienz sehr signifikant bis hochsignifikant voneinander. Zutreffend ist dies für alle Zahnfelder. Generell gilt, je näher der U-Wert bei 0 liegt, desto größer ist der Unterschied zwischen den beiden Stichproben. Eine Überlegenheit einer der beiden Methoden, lässt sich anhand des Mann-Whitney-U-Tests aber noch nicht feststellen.

Tab. 2 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen organischer und anorganischer Plaquesimulation bei der Reinigungsleistung. Die Ergebnisse beider Zahnbürsten und Putzzyklen werden zusammengefasst betrachtet.

Zahnfeld / Parameter	U	Z	p (exakt)
Bukkal	103.0	-2.624**	0.008
Lingual	0.0	-5.410***	0.000
Mesial	0.0	-5.410***	0.000
Distal	6.0	-5.248***	0.000
ABCDF Bukkal	35.0	-4.463***	0.000
ABCDF Lingual	6.0	-5.248***	0.000
W Bukkal	16.0	-4.977***	0.000
W Lingual	0.0	-5.410***	0.000
W1+W2 Mesial	0.0	-5.410***	0.000
W1+W2 Distal	37.0	-4.409***	0.000
Total	0.0	-5.410***	0.000

n_1 = 20 Zahnträger organische Plaque
n_2 = 20 Zahnträger anorganische Plaque
U = Teststatistik des MW-Testes
Z = Normalisierte Teststatistik
p = Signifikanzwert
** = sehr signifikant ($p \leq 0.01$)
*** = hoch signifikant ($p \leq 0.001$)

3.1.2 **Deskriptiv-statistische und grafische Auswertung**

Um eine Tendenz der Größe des Unterschieds bezüglich der Reinigungseffizienz der beiden Methode zu erkennen, eignet sich insbesondere die Betrachtung des Medians. Auffallend ist hierbei, dass die Reinigungsleistung des Roboters unter Verwendung der anorganischen Plaquesimulation durchweg höher ist als mit der organischen Methode.

Tab. 3 Deskriptive Statistiken der Reinigungsleistung (in %) bei organischer und anorganischer Plaquesimulation. Die Ergebnisse beider Zahnbürsten und Putzzyklen werden zusammengefasst betrachtet.

Zahnfeld / Parameter	Statistik	Plaquesimulation	
		Organisch	Anorganisch
Bukkal	M	49.57	88.98
	SD	37.84	3.77
	Med	47.05	89.35
	25. Perz.	10.40	85.50
	75. Perz.	90.96	92.50
Lingual	M	56.42	95.19
	SD	32.33	1.01
	Med	63.03	95.21
	25. Perz.	25.09	94.53
	75. Perz.	89.99	96.08
Mesial	M	23.65	58.86
	SD	11.56	6.32
	Med	26.49	58.43
	25. Perz.	12.78	53.51
	75. Perz.	33.25	63.58
Distal	M	22.13	44.94
	SD	10.57	5.48
	Med	24.82	45.60
	25. Perz.	13.50	40.70
	75. Perz.	29.77	47.60
ABCDF Bukkal	M	24.74	45.60
	SD	16.32	3.75
	Med	26.87	45.50
	25. Perz.	7.08	44.29
	75. Perz.	40.33	48.63
ABCDF Lingual	M	35.83	72.72
	SD	22.55	3.54
	Med	31.12	72.86
	25. Perz.	13.89	70.76
	75. Perz.	60.53	75.67
W Bukkal	M	15.20	40.64
	SD	9.79	8.62
	Med	12.54	37.03
	25. Perz.	8.43	35.14
	75. Perz.	21.51	48.05
W Lingual	M	35.25	82.78
	SD	24.09	2.43
	Med	32.70	83.25
	25. Perz.	13.15	81.67
	75. Perz.	59.29	84.62
W1+W2 Mesial	M	19.73	47.88
	SD	7.07	2.74
	Med	18.78	47.63
	25. Perz.	15.86	45.72
	75. Perz.	24.25	50.36
W1+W2 Distal	M	24.18	38.47
	SD	8.94	3.43
	Med	22.48	38.72
	25. Perz.	17.64	35.98
	75. Perz.	29.02	40.79
Total	M	30.67	61.60
	SD	15.92	2.53
	Med	28.88	61.58
	25. Perz.	15.17	59.72
	75. Perz.	46.52	63.11

n_1 = 20 Testdurchläufe mit der organischen Plaquesimulation

n_2 = 20 Testdurchläufe mit der anorganischen Plaquesimulation

Die Überlegenheit der Reinigungsleistung in der anorganischen Methode trifft, wie in Tab. 3 ersichtlich, auf alle erhobenen Zahnflächen zu. Zudem wird deutlich, dass die unterschiedlichen Zahnseiten sich untereinander in Bezug auf die erreichte Reinigungsleistung zum Teil deutlich abheben. So werden zum Beispiel die bukkalen und lingualen Zahnflächen bei beiden Simulationsmethoden besser gereinigt. Hier erreichte die organische Methode ihre höchste Reinigungsleistung, die im Median bei 63,03 % auf der lingualen Zahnfläche liegt. Approximale Flächen hingegen wurden insbesondere in Verbindung mit der organischen Plaquesimulation schlechter gereinigt. Hier erreichte der Zahnputzroboter im Median nur eine Reinigungsleistung von circa 26 % (mesial) und 25 % (distal). Dasselbe gilt für die Risikofelder ABCDF Bukkal, Lingual und ebenso für alle Wurzeloberflächen. Aber auch unter der anorganischen Methode fanden sich auf den oben genannten Flächen die niedrigsten Werte. Alles in allem schnitten die Testreihen mit der organischen Methode in Bezug auf die Reinigungsleistung des Roboters deutlich schlechter ab als die Versuche in Verbindung mit der anorganischen Simulation. Die Standardabweichungen fallen in der anorganischen Methode deutlich niedriger aus. Im Vergleich zur anorganischen Simulation liegen die Messwerte der organischen Methode im 25. und 75. Perzentil auf allen Zahnfeldern weiter gestreut, was ebenfalls auf einen heterogenen Datensatz hinweist. Diese Annahme bestätigen Abb. 16 und Abb. 17. Die starke Streuung der Reinigungsleistung bei der organischen Methode wird in den Box-and-Whisker-Plots durch die Länge der Boxen (=Interquartilsabstand) und der großen Differenz zwischen Minimum und Maximum dargestellt. Besonders auffallend ist die Heterogenität des Datensatzes auf den bukkalen und lingualen Glattflächen. Nichtsdestotrotz lässt sich hier erkennen, dass es auch bei der organischen Methode Testreihen gab, die annähernde Reinigungswerte wie in der anorganischen Methode erreichten. In anderen Worten ist die Variabilität der Reinigungseffekte bei der organischen Methode sehr viel höher. Bei der anorganischen Methode liegen insgesamt niedrigere Streuungen vor. Es galt also zu prüfen, ob die Ergebnisse von den unterschiedlichen Parametern wie zum Beispiel die Auswahl der Zahnbürste beeinflusst werden.

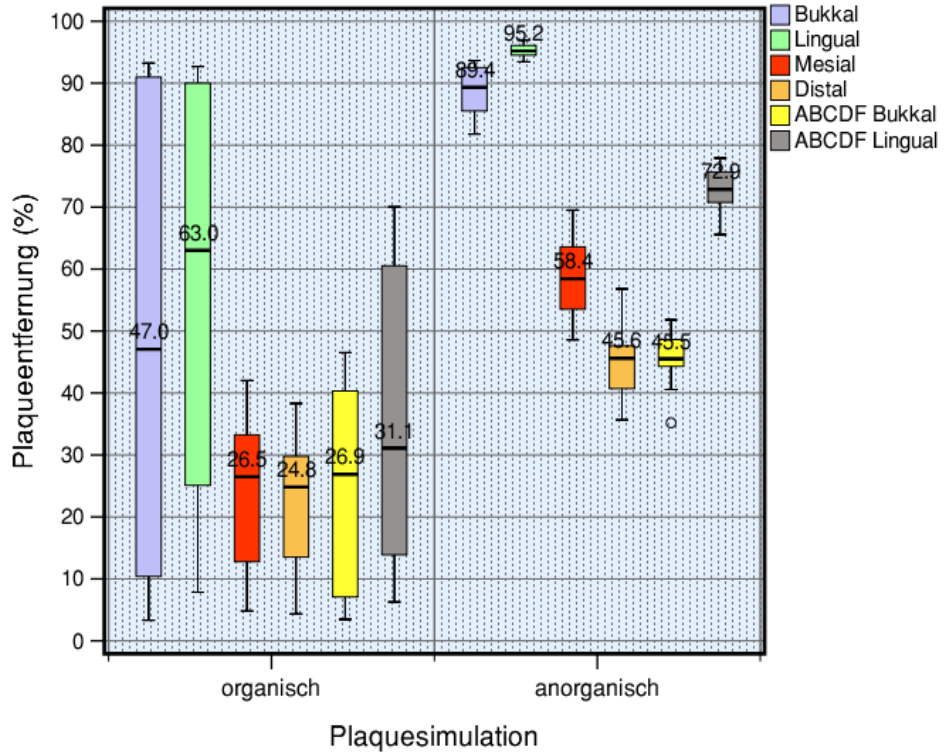

Abb. 16 Gegenüberstellung der Plaque-Entfernung beider Plaque-Simulationsmethoden auf den Feldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual. Die Grafik umfasst die Reinigungsleistung beider Zahnbürsten und Putzzyklen.

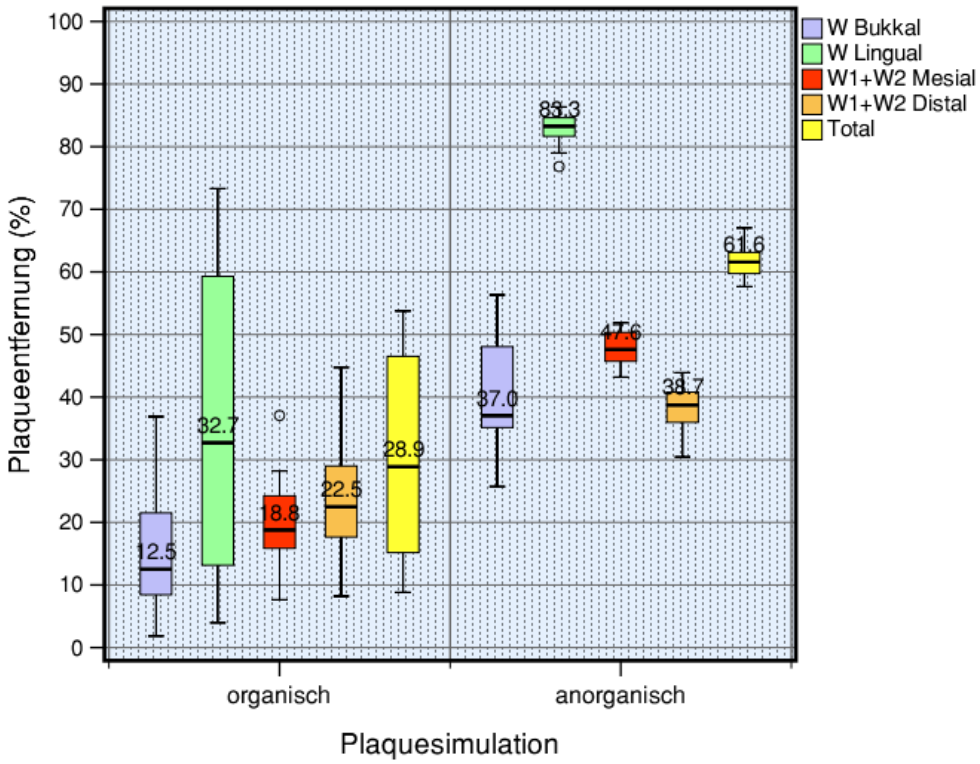

Abb. 17 Gegenüberstellung der Plaqueentfernung beider Plaque-Simulationsmethoden auf den Feldern W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total. Die Grafik umfasst die Reinigungsleistung beider Zahnbürsten und Putzzyklen.

3.1.3 **Einfluss des Faktors Zahnbürste auf die Reinigungsleistung**

Da im vorigen Kapitel ein Unterschied hinsichtlich der erzielten Reinigungsleistungen zwischen den Plaquesimulationsmethoden beobachtet wurde, soll im Folgenden geprüft werden, ob die Wahl der Zahnbürste dieses Ergebnis beeinflusst haben könnte. Hierfür betrachten wir nun die Reinigungsleistungen der Zahnbürsten mit der jeweiligen Simulation gesondert voneinander. Die Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Test in Tab. 4 zeigen, dass es hinsichtlich der bukkalen Zahnfelder keinen signifikanten Unterschied zwischen der organischen und anorganischen Simulation in Verbindung mit der Referenzzahnbürste gab. Dies lässt Grund zur Annahme, dass sie in der Lage war, die bukkalen Zahnfelder ähnlich gut von der organischen wie von der anorganischen Plaquesimulation zu befreien. Abgesehen von dieser Beobachtung wurden auf allen anderen Flächen hoch signifikante Unterschiede belegt, sodass sich hierbei eine Wechselwirkung ausschließen lässt.

Tab. 4 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen **organischer** und **anorganischer Plaquesimulation** bei der **Referenzzahnbürste** auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total. Die beiden Putzzyklen werden zusammengefasst betrachtet.

Zahnfeld / Parameter	U	Z	P (exakt)
Bukkal	39.0	-0.832	0.436
Lingual	0.0	-3.780***	0.000
Mesial	0.0	-3.780***	0.000
Distal	0.0	-3.780***	0.000
ABCDF Bukkal	13.0	-2.797**	0.004
ABCDF Lingual	6.0	-3.326***	0.000
W Bukkal	2.0	-3.628***	0.000
W Lingual	0.0	-3.780***	0.000
W1+W2 Mesial	0.0	-3.780***	0.000
W1+W2 Distal	4.0	-3.477***	0.000
Total	0.0	-3.780***	0.000

n_1 = 10 Zahnträger mit anorganischer Plaque und der Referenzzahnbürste

n_2 = 10 Zahnträger mit organischer Plaque und der Referenzzahnbürste

U = Teststatistik des MW-Testes

Z = Normalisierte Teststatistik

p = Signifikanzwert

** = sehr signifikant ($p \leq 0.01$)

*** = hoch signifikant ($p \leq 0.001$)

3.1.4 **Deskriptive Statistiken zu den Wechselwirkungen der Zahnbürsten**

In Tab. 5 werden die deskriptiv-statistischen Auswertungen der zwei Zahnbürsten und der beiden Plaquesimulationen gegenübergestellt, um mögliche Interaktionen zwischen den Parametern darzustellen.

Tab. 5 Deskriptive Statistiken der Reinigungsleistung (in %) bei organischer und anorganischer Plaquesimulation. Die Testzahnbürste Dontodent wird gesondert von der Referenzzahnbürste unter Verwendung der organischen bzw. anorganischen Plaquesimulation auf den Feldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Bukkal, W1+W2 Distal, Total, betrachtet. Die Daten beider Putzzyklen werden zusammengefasst.

Zahnfeld / Parameter	Statistik	Testzahnbürste Dontodent		Referenz-zahnbürste	
		Organisch	Anorganisch	Organisch	Anorganisch
Bukkal	M	14.38	86.94	84.76	91.02
	SD	9.60	3.77	13.40	2.56
	Med	10.40	85.83	90.96	91.66
	25. Perz.	9.58	84.20	86.90	88.71
	75. Perz.	17.34	90.23	92.09	93.41
Lingual	M	27.31	95.79	85.53	94.60
	SD	15.35	0.83	9.33	0.83
	Med	25.09	96.08	89.99	94.75
	25. Perz.	17.67	95.21	79.38	93.78
	75. Perz.	30.71	96.42	92.49	95.20
Mesial	M	17.10	53.54	30.19	64.17
	SD	11.21	3.03	7.82	3.52
	Med	15.06	53.51	32.94	63.58
	25. Perz.	7.05	51.30	26.13	62.14
	75. Perz.	28.80	55.38	35.01	67.93
Distal	M	17.67	41.30	26.59	48.58
	SD	11.88	4.38	7.10	3.86
	Med	15.49	40.70	27.62	47.45
	25. Perz.	7.10	36.68	24.33	46.50
	75. Perz.	27.09	44.29	30.80	50.14
ABCDF Bukkal	M	9.86	44.78	39.61	46.42
	SD	6.54	4.53	5.27	2.78
	Med	7.08	44.88	40.33	45.99
	25. Perz.	5.86	42.91	38.04	45.15
	75. Perz.	12.68	46.30	42.13	48.81
ABCDF Lingual	M	18.52	74.45	53.13	70.99
	SD	12.87	2.60	15.56	3.60
	Med	13.89	74.11	60.53	71.26
	25. Perz.	7.04	72.12	37.22	68.67
	75. Perz.	26.01	77.11	64.22	73.68
W Bukkal	M	7.93	34.49	22.46	46.79
	SD	3.93	5.03	8.35	6.89
	Med	8.43	35.14	21.51	48.05
	25. Perz.	6.21	33.15	13.50	42.76
	75. Perz.	11.06	36.81	27.51	51.93
W Lingual	M	14.71	82.13	55.79	83.42
	SD	9.85	2.66	13.80	2.11
	Med	13.15	82.39	59.29	83.97
	25. Perz.	6.84	81.42	44.30	82.08
	75. Perz.	21.12	83.57	65.52	85.17

Zahnfeld / Parameter	Statistik	Testzahnbürste Dontodent		Referenz-zahnbürste	
		Organisch	Anorganisch	Organisch	Anorganisch
W1+W2 Mesial	M	17.05	47.02	22.40	48.73
	SD	8.67	2.50	3.80	2.83
	Med	15.86	46.65	21.28	49.27
	25. Perz.	10.90	45.47	19.29	46.79
	75. Perz.	17.88	47.80	25.96	51.51
W1+W2 Distal	M	23.59	38.97	24.78	37.97
	SD	11.59	4.13	5.79	2.69
	Med	19.29	39.87	23.83	38.25
	25. Perz.	14.77	36.29	20.49	35.46
	75. Perz.	31.52	41.80	28.09	38.94
Total	M	16.81	59.94	44.52	63.27
	SD	6.71	1.88	7.95	1.96
	Med	15.17	59.72	46.52	62.34
	25. Perz.	10.96	58.56	42.53	61.73
	75. Perz.	22.62	60.15	48.85	64.98

n_1 = 10 Testzahnbürsten Dontodent

n_2 = 10 Referenzzahnbürsten

Die Testzahnbürste Dontodent erzielte in Verbindung mit der anorganischen Methode eine deutlich höhere Belagsentfernung als die Dontodent Zahnbürste mit der organischen Plaquesimulation. Bei der Referenzzahnbürste hingegen sind die Mediane der anorganischen und organischen Methode auf der bukkalen Zahnfläche mit 91,6 % und 90.96 % nahezu identisch. Die Wirkung der Plaquesimulationsmethode wechselt in diesem Fall also je nachdem, welche Zahnbürste betrachtet wird. Bei der lingualen Zahnfläche ist dieser Effekt, wenn auch geringer, ebenfalls zu beobachten. Auch hier ist die Reinigungsleistung der Dontodent Zahnbürste deutlich höher in Verbindung mit der anorganischen Plaquesimulation. Das Risikofeld ABCDF bukkal zeigt eine ausgeprägte Diskrepanz zwischen den Werten der organischen und anorganischen Simulationsmethode in Verbindung mit der Dontodent Zahnbürste. Auch hier kann man erkennen, dass die Referenzzahnbürste in Kombination mit der organischen Plaquesimulation der anorganischen Plaquesimulation nur um circa 5 % im Median unterlegen ist. Eine weitere Beobachtung ist, dass die Referenzzahnbürste mit der organischen Plaquesimulation sich zwar auf den bukkalen, lingualen und dem Risikofeld ABCDF-Bukkal den Werten der anorganischen Methode annähert, aber in den Approximalbereichen, Wurzeloberflächen und Risikofeldern unabhängig von der Wahl der Zahnbürste sichtlich schlechtere Ergebnisse erzielt.

Alles in allem erzielte die Kombination aus organischer Plaquesimulation in Verbindung mit der Testzahnbürste Dontodent die schwächsten Reinigungsergebnisse.

3.1.5 **Einfluss des Putzzyklus auf die Reinigungsleistung**

In diesem Kapitel wird die Reinigungsleistung in Abhängigkeit des gewählten Putzzyklus in der organischen bzw. anorganischen Methode betrachtet. Es geht der Fragestellung nach, ob die Wahl des Putzzyklus sich auf die Reinigungsergebnisse auswirkt. Im Mann-Whitney-U-Test (siehe Tab. 6) wurden teils hoch signifikante Unterschiede zwischen den Plaquesimulationsmethoden bei dem Putzzyklus “lang“ festgestellt. Um den Stichprobenumfang zu erhöhen wurden die Datensätze beider Zahnbürsten zusammengefasst. Lediglich auf den bukkalen Flächen der gesonderten Auswertung des Putzzyklus „lang“ konnte kein signifikanter Unterschied bestätigt werden, sodass man hierbei von einer Wechselwirkung sprechen kann. Demnach konnte bei den bukkalen Zahnfeldern auch die Wahl des Putzzyklus das Reinigungsergebnis beeinflussen.

Tab. 6 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen **organischer** und **anorganischer Plaquesimulation** bei **dem Putzzyklus „lang“** auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Bukkal, W1+W2 Distal, Total. Die Reinigungsleistung beider Zahnbürsten wird zusammengefasst. Die erzielten Werte des Putzzyklus „kurz“ werden nicht berücksichtigt.

Zahnfeld / Parameter	U	Z	p (exakt)
Bukkal	40.0	-0.756	0.481
Lingual	0.0	-3.780***	0.000
Mesial	0.0	-3.780***	0.000
Distal	3.0	-3.553***	0.000
ABCDF Bukkal	11.0	-2.948**	0.002
ABCDF Lingual	2.0	-3.628***	0.000
W Bukkal	5.0	-3.402***	0.000
W Lingual	0.0	-3.780***	0.000
W1+W2 Mesial	0.0	-3.780***	0.000
W1+W2 Distal	14.0	-2.721**	0.005
Total	0.0	-3.780***	0.000

n_1 = 10 Durchläufe mit organischer Plaquesimulation unter dem Putzzyklus „lang“
n_2 = 10 Durchläufe mit anorganischer Plaquesimulation unter dem Putzzyklus „lang“
U = Teststatistik des MW-Testes
Z = Normalisierte Teststatistik
p = Signifikanzwert
** = sehr signifikant ($p \leq 0.01$)
*** = hoch signifikant ($p \leq 0.001$)

3.1.6 **Deskriptive Statistiken zu den Wechselwirkungen je Testprogramm**

Dargestellt werden soll in Tab. 7, inwiefern sich die Reinigungsleistung je nach Auswahl des Putzzyklus bei der organischen und anorganischen Methode unterscheidet.

Tab. 7 Deskriptive Statistiken der Reinigungsleistung (in %) bei organischer und anorganischer Plaquesimulation für die beiden Putzzyklen auf den Feldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Bukkal, W1+W2 Distal, Total. Die Reinigungsleistung unter dem Putzzyklus „lang“ und Putzzyklus „kurz“ wird gesondert betrachtet. Die beiden Zahnbürsten werden zusammengefasst betrachtet.

Zahnfeld / Parameter	Statistik	Putzzyklus „lang“		Putzzyklus „kurz“	
		Organisch	Anorganisch	Organisch	Anorganisch
Bukkal	M	50.68	86.61	48.46	91.35
	SD	38.24	2.89	39.48	3.03
	Med	47.05	86.85	42.05	92.50
	25. Perz.	15.62	84.22	10.35	90.23
	75. Perz.	91.05	88.71	90.00	93.41
Lingual	M	60.51	94.88	52.33	95.51
	SD	32.14	1.26	33.71	0.60
	Med	68.18	94.57	47.87	95.40
	25. Perz.	27.36	93.78	22.83	95.17
	75. Perz.	90.01	96.19	86.77	95.98
Mesial	M	26.77	58.44	20.52	59.27
	SD	8.66	6.57	13.62	6.38
	Med	29.17	56.35	20.33	60.44
	25. Perz.	24.00	52.63	7.05	55.38
	75. Perz.	32.56	64.46	33.94	63.36
Distal	M	25.42	43.88	18.84	45.99
	SD	8.91	6.21	11.50	4.74
	Med	27.58	45.94	16.39	45.39
	25. Perz.	23.17	36.68	8.26	43.88
	75. Perz.	30.80	47.71	27.17	47.49
ABCDF Bukkal	M	25.84	44.66	23.63	46.54
	SD	16.00	3.88	17.43	3.57
	Med	29.89	45.39	20.64	45.85
	25. Perz.	12.03	44.24	6.52	44.34
	75. Perz.	38.77	46.30	40.49	50.04
ABCDF Lingual	M	40.96	71.48	30.69	73.96
	SD	21.41	4.16	23.58	2.38
	Med	40.28	71.69	26.93	73.66
	25. Perz.	25.92	68.67	7.04	71.86
	75. Perz.	61.78	74.58	48.71	75.76
W Bukkal	M	13.73	41.04	16.66	40.24
	SD	10.34	9.07	9.52	8.61
	Med	11.14	40.59	12.84	36.91
	25. Perz.	6.21	34.95	11.06	35.84
	75. Perz.	20.96	49.58	27.44	43.34
W Lingual	M	38.71	81.97	31.79	83.58
	SD	23.08	1.70	25.81	2.85
	Med	38.16	82.39	25.22	84.62
	25. Perz.	17.58	81.05	8.50	81.91
	75. Perz.	60.88	83.47	54.82	85.47

Zahnfeld / Parameter	Statistik	Putzzyklus „lang“		Putzzyklus „kurz“	
		Organisch	Anorganisch	Organisch	Anorganisch
W1+W2 Mesial	M	22.13	48.34	17.32	47.41
	SD	6.49	2.51	7.11	3.02
	Med	20.03	47.80	16.90	47.63
	25. Perz.	17.88	46.49	10.90	45.47
	75. Perz.	25.56	50.80	22.93	49.75
W1+W2 Distal	M	25.96	38.18	22.41	38.76
	SD	10.12	3.96	7.69	2.99
	Med	25.43	38.72	20.41	38.46
	25. Perz.	20.35	36.09	16.58	35.86
	75. Perz.	29.85	40.61	26.79	40.98
Total	M	33.07	60.95	28.27	62.26
	SD	14.15	2.29	17.94	2.70
	Med	30.64	60.70	23.12	62.34
	25. Perz.	22.62	58.99	12.67	60.15
	75. Perz.	46.75	62.18	46.29	63.60

n_1 = 10 Durchläufe des Putzzyklus „lang“

n_2 = 10 Durchläufe des Putzzyklus „kurz“

Betrachtet man die Werte der organischen Methode beider Programme fällt auf, dass das Kurzprogramm bei nahezu allen Flächen unterlegen ist. Bei der anorganischen Simulation verhält sich dies entgegengesetzt: hier erzielt der Putzzyklus „kurz“ nahezu identische und zum Teil sogar minimal höhere Reinigungswerte. Hinzu kommt, dass die Messwerte der organischen Methode in Kombination mit dem konventionellen Putzzyklus „lang“ eine geringere Standardabweichung aufweist, die aber nichtsdestotrotz im Vergleich zu anorganischen Methode insgesamt höher ausfällt. Wechselwirkungen, wie etwa die Beeinflussbarkeit der Reinigungseffekte durch eines der beiden Roboterprogramme sind nicht erkennbar. Lediglich auf den bukkalen Zahnflächen erzielte die organische Methode bessere Ergebnisse in Verbindung mit dem Putzzyklus „lang“. Und dennoch liegen die Reinigungsergebnisse der organischen Methode deutlich unterhalb denen der anorganischen Testreihe, was darauf schließen lässt, dass die Reinigungsergebnisse durch die Auswahl des Putzzyklus nicht maßgeblich beeinflusst wurden.

3.2 Vergleich der Zahnbürsten - Testzahnbürste Dontodent versus Referenzzahnbürste

Abb. 18 Übersicht über die Auswertung der Reinigungsergebnisse beider Zahnbürsten.

Das Kapitel 3.2.1 umfasst den gesamten Datensatz, das heißt die Reinigungsergebnisse beider Plaquesimulationen und Putzzyklen, um festzustellen, ob es einen Unterschied hinsichtlich der Reinigungseffizienz zwischen den beiden Zahnbürsten gibt. Im Anschluss soll die Größe des Unterschieds anhand der deskriptiven Statistik dargestellt werden (Kapitel 3.2.2). In Kapitel 3.2.3 und 3.2.4 werden die Reinigungsleistungen der Plaquesimulationsmethoden organisch / anorganisch gesondert betrachtet. Hierbei werden die Putzzyklen nicht differenziert voneinander ausgewertet. Analog zu den Plaquesimulationen werden dann die Reinigungsleistungen der Zahnbürsten unter den Putzzyklen miteinander verglichen: hier werden die Daten des Putzzyklus „lang“ und „kurz“ getrennt voneinander bewertet, um herauszufinden, ob einer

der beiden Zyklen Auswirkungen auf die Reinigungsleistung hat, die Plaque-simulationen wurden hingegen zusammengefasst betrachtet (Kapitel 3.2.5, 3.2.6).

3.2.1 **Test auf den Unterschied**

Wie aus Abb. 18 hervorgeht, soll im Folgenden das Augenmerk auf die Reinigungsfähigkeit der unterschiedlichen Zahnbürsten gelegt werden. Hierbei werden erst einmal die Zahnbürsten und Putzzyklen zusammenfassend betrachtet, um eine generelle Überlegenheit einer Bürste ungeachtet des Putzzyklus und der verwendeten Plaquesimulation festzustellen.

Die Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Test (siehe Tab. 8) zeigen, dass sich die Reinigungsleistungen der Testzahnbüste Dontodent und der Referenzzahnbürste auf den bukkalen Feldern hoch signifikant voneinander unterscheiden. Signifikante Unterschiede wurden auch für die Felder mesial, ABCDEF bukkal und W bukkal gefunden, sodass auch in der Gesamtheit der Felder ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Zahnbürsten hinsichtlich ihrer Effizienz gefunden wurde. Auf den lingualen, distalen, ABCDF lingualen, W lingualen und auf den approximalen Wurzelfeldern konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Tab. 8 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen Testzahnbürste Dontodent und Referenzzahnbürste bei der Reinigungsleistung. Die Datensätze beider Putzzyklen und Plaquesimulationen werden zusammengefasst auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal betrachtet.

Zahnfeld/ Parameter	U	Z	p (exakt)
Bukkal	33.0	-4.298***	0.000
Lingual	166.0	-0.409	0.696
Mesial	118.0	-2.218*	0.026
Distal	134.0	-1.785	0.076
ABCDF Bukkal	116.0	-2.272*	0.023
ABCDF Lingual	169.0	-0.590	0.569
W Bukkal	98.0	-2.759**	0.005
W Lingual	136.0	-1.731	0.086
W1+W2 Mesial	147.0	-1.434	0.157
W1+W2 Distal	183.0	-0.460	0.659
Total	112.0	-2.380*	0.017

n_1 = 20 Testzahnbürsten „Dontodent“
n_2 = 20 Referenzzahnbürsten ORMED (n_2= 18 auf den Flächen „Bukkal“,„Lingual“, n_2= 19 auf den Flächen „ABCDF Lingual“)
U = Teststatistik des MW-Testes; Z = Normalisierte Teststatistik
p = Signifikanzwert
* = signifikant (p ≤ 0.05)
** = sehr signifikant (p ≤ 0.01)
*** = hoch signifikant (p ≤ 0.001)

3.2.2 **Deskriptiv-statistische Auswertung und grafische Darstellung**

Im Großen und Ganzen hatte, wie der Mann-Whitney-U-Test zeigte, die Auswahl der Zahnbürste eine hoch signifikante Auswirkung auf die Reinigungsleistung. Hieraus kann jedoch noch nicht erschlossen werden, welche Zahnbürste überlegen ist.

Die ermittelten Mediane in Tab. 9 zeigen, dass die mittelharte Referenzzahnbürste von ORMED insgesamt eine bessere Belagsentfernung erreichte und der Dontodent Zahnbürste hinsichtlich der Reinigungsfähigkeit auf allen Flächen überlegen war. Jedoch kam es hier auch zu Schwankungen bezüglich der unterschiedlichen Zahnflächen. Die mit Abstand beste Reinigung wurde hier auf den bukkalen und lingualen Flächen erreicht, während die Wurzeloberflächen W1+W2 mesial und W1+W2 distal Problemstellen aufzeigen. Ganz ähnlich verhält es sich mit der erreichten Reinigungsleistung der Testzahnbürste Dontodent. Die am besten gereinigten Flächen waren ebenfalls die bukkalen und lingualen Bereiche. Lediglich auf der W1+W2 distal war die Testzahnbürste Dontodent der Referenzzahnbürste mit 36,19 % im Median knapp überlegen. Alles in allem kann die Referenzzahnbürste mit ihrer Reinigungseffizienz als dominierend angesehen werden.

Tab. 9 Deskriptive Statistiken der Reinigungsleistung (in %) auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total bei der Dontodent- und Referenzzahnbürste. Es werden beide Zahnbürsten gesondert betrachtet, während die Datensätze beider verwendeten Putzzyklen und Plaquesimulationen zusammengefasst werden.

Zahnfeld / Parameter	Statistik	Zahnbürste	
		Testzahnbürste Dontodent	Referenz-zahnbürste
Bukkal	M	50.66	91.02
	SD	37.89	2.25
	Med	59.73	91.20
	25. Perz.	10.40	89.99
	75. Perz.	85.83	92.67
Lingual	M	61.55	92.27
	SD	36.69	3.98
	Med	77.79	93.52
	25. Perz.	25.09	91.02
	75. Perz.	96.08	94.99
Mesial	M	35.32	47.18
	SD	20.33	18.40
	Med	40.57	50.07
	25. Perz.	15.06	32.94
	75. Perz.	53.51	63.58
Distal	M	29.49	37.59
	SD	14.93	12.57
	Med	36.06	40.94
	25. Perz.	15.49	27.62
	75. Perz.	40.70	47.45

Zahnfeld / Parameter	Statistik	Zahnbürste	
		Testzahnbürste Dontodent	Referenz-zahnbürste
ABCDF Bukkal	M	27.32	43.02
	SD	18.73	5.38
	Med	30.16	44.98
	25. Perz.	7.08	40.33
	75. Perz.	44.88	46.40
ABCDF Lingual	M	46.48	63.96
	SD	30.08	11.82
	Med	58.58	66.83
	25. Perz.	13.89	61.78
	75. Perz.	74.11	71.86
W Bukkal	M	21.21	34.62
	SD	14.31	14.54
	Med	19.64	36.21
	25. Perz.	8.43	21.51
	75. Perz.	35.14	48.05
W Lingual	M	48.42	69.61
	SD	35.29	17.13
	Med	56.45	76.25
	25. Perz.	13.15	59.29
	75. Perz.	82.39	83.97
W1+W2 Mesial	M	32.04	35.57
	SD	16.58	13.90
	Med	40.14	35.83
	25. Perz.	15.86	21.28
	75. Perz.	46.65	49.27
W1+W2 Distal	M	31.28	31.37
	SD	11.57	8.07
	Med	36.19	35.13
	25. Perz.	19.29	23.83
	75. Perz.	40.79	38.25
Total	M	38.38	53.90
	SD	22.64	11.14
	Med	43.17	57.54
	25. Perz.	15.17	46.52
	75. Perz.	59.72	62.34

n_1 = 20 Testzahnbürsten Dontodent
n_2 = 15 Referenzzahnbürsten

Abb. 19 und Abb. 20 zeigen die großen Streuungen der Reinigungswerte bei der Testzahnbürste Dontodent. Auch die Werte der Referenzzahnbürste weisen Streuungen auf. Besonders auffällig ist jedoch, dass bei der Referenzzahnbürste dies nicht für Reinigungswerte auf den bukkalen und lingualen Flächen gilt, welche die geringsten Abweichungen aufzeigen und die Reinigungsleistung hier mit 91,2 % und 93,5 % in einem hohen Bereich angesiedelt ist.

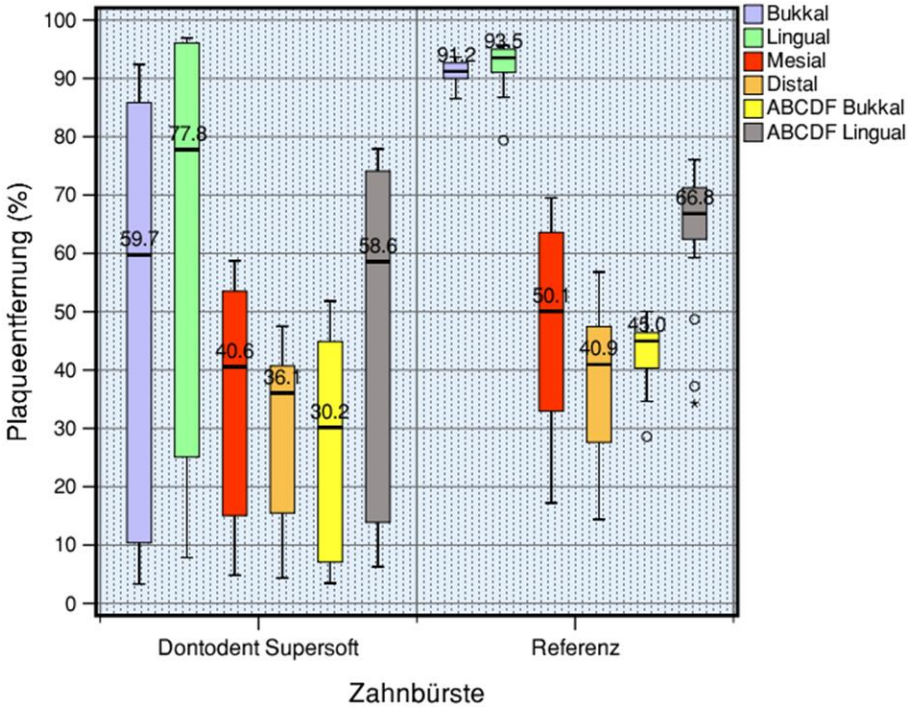

Abb. 19 Plaqueentfernung
Testzahnbürste Dontodent versus Referenzzahnbürste auf den Feldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual. Die Datensätze beider Putzzyklen und Plaquesimulationen werden zusammengefasst betrachtet. Auffallend sind hier die hohen Streuungen, welche Rückschlüsse auf einen inhomogenen Datensatz ermöglichen.

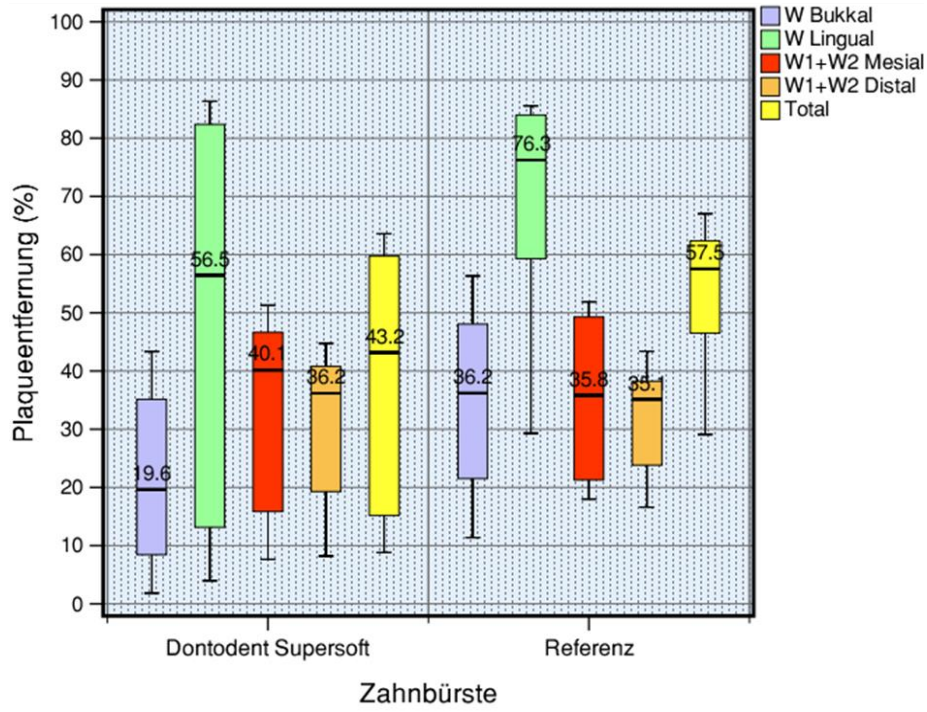

Abb. 20 Plaqueentfernung
Testzahnbürste Dontodent versus Referenzzahnbürste auf den Feldern W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal,Total. Die Datensätze beider Putzzyklen und Plaquesimulationen werden zusammengefasst betrachtet. Auffallend sind hier die hohen Streuungen, welche Rückschlüsse auf einen inhomogenen Datensatz ermöglichen.

3.2.3 **Plaquesimulation als Einflussfaktor der Reinigungsleistung**

Im Folgenden soll beschrieben werden, inwiefern die Plaquesimulationsmethoden die Reinigungsleistung der beiden Zahnbürsten beeinflussen. Hierbei werden Reinigungsleistungen der beiden Zahnbürsten unter den beiden Plaquesimulationen gesondert betrachtet, um herauszufinden, ob die Wahl der Plaquesimulationsmethode einen Effekt auf die Reinigungsleistung der Bürsten hat. Der Mann-Whitney-U-Test (siehe Tab. 10 und Tab. 11) machte deutlich, dass die Zahnbürsten in Kombination mit beiden Plaquesimulationsmethoden hoch signifikante beziehungsweise sehr signifikante Unterschiede hinsichtlich ihrer Leistung aufwiesen. In der organischen Methode zeigten sie lediglich auf den distalen Zahn- und Wurzelfeldern keine signifikanten Unterschiede zwischen den Zahnbürsten. In der anorganischen Methode wiesen die bukkalen sowie die lingualen, mesialen und distalen Risikofelder auf keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Zahnbürsten hin.

Tab. 10 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen Dontodent- und Referenzzahnbürste bei der **organischen** Plaquesimulation auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total. Die organische Plaquesimulation wird gesondert betrachtet, während die Datensätze beider Putzzyklen zusammengefasst werden.

Zahnfeld / Parameter	U	Z	p (exakt)
Bukkal	0.0	-3.554***	0.000
Lingual	0.0	-3.554***	0.000
Mesial	17.0	-2.495*	0.011
Distal	26.0	-1.814	0.075
ABCDF Bukkal	0.0	-3.780***	0.000
ABCDF Lingual	2.0	-3.511***	0.000
W Bukkal	4.0	-3.477***	0.000
W Lingual	1.0	-3.704***	0.000
W1+W2 Mesial	17.0	-2.495*	0.011
W1+W2 Distal	40.0	-0.756	0.481
Total	0.0	-3.780***	0.000

n_1 = 10 Testzahnbürsten Dontodent in Kombination mit der organischen Plaquesimulation,

n_2 = 10 Referenzzahnbürsten in Kombination mit der organischen Plaquesimulation (n_2= 8 auf den Flächen „Bukkal“, „Lingual“; n_2 = 9 auf den Flächen „ABCDF Lingual“)

U = Teststatistik des MW-Testes

Z = Normalisierte Teststatistik

p = Signifikanzwert

* = signifikant ($p \leq 0.05$)

*** = hoch signifikant ($p \leq 0.001$)

Tab. 11 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen Dontodent- und Referenz-zahnbürste bei der **anorganischen** Plaquesimulation auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total. Die anorganische Plaquesimulation wird gesondert betrachtet, während die Datensätze beider Putzzyklen zusammengefasst werden.

Zahnfeld / Parameter	U	Z	p (exakt)
Bukkal	17.0	-2.495*	0.011
Lingual	14.0	-2.721**	0.005
Mesial	1.0	-3.704***	0.000
Distal	11.0	-2.948**	0.002
ABCDF Bukkal	38.0	-0.907	0.393
ABCDF Lingual	23.0	-2.041*	0.043
W Bukkal	8.0	-3.175***	0.001
W Lingual	35.0	-1.134	0.280
W1+W2 Mesial	30.0	-1.512	0.143
W1+W2 Distal	33.0	-1.285	0.218
Total	12.0	-2.873**	0.003

$n_1 = 10$
$n_2 = 10$
U = Teststatistik des MW-Testes
Z = Normalisierte Teststatistik
p = Signifikanzwert
* = signifikant ($p \leq 0.05$)
** = sehr signifikant ($p \leq 0.01$)
*** = hoch signifikant ($p \leq 0.001$)

3.2.4 **Deskriptive Statistiken zu den Wechselwirkungen je nach Plaque-simulation**

Um die Leistung beider Zahnbürsten auf den jeweiligen Feldern zu vergleichen, wurden Lage- und Streumaße ermittelt, die eine Gegenüberstellung der Zahnbürsten in Tab. 12 in Verbindung mit der jeweiligen Plaque-Simulationsmethode ermöglicht. So soll herausgefunden werden, ob die Reinigungsleistungen sich in Abhängigkeit zu der verwendeten Plaquesimulationsmethode verändern. Die Datensätze beider Putz-zyklen wurden zusammengefasst.

Tab. 12 Deskriptive Statistiken der Reinigungsleistung (in %) der beiden Zahnbürsten auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total bei **organischer** und **anorganischer** Plaquesimulation. Die Datensätze beider Putzzyklen werden zusammengefasst betrachtet.

Zahnfeld / Parameter	Statistik	Organisch		Anorganisch	
		Testzahn-bürste	Referenz-zahnbürste	Testzahn-bürste	Referenz-zahnbürste
Bukkal	M	14.38	91.02	86.94	91.02
	SD	9.60	1.96	3.77	2.56
	Med	10.40	91.20	85.83	91.66
	25. Perz.	9.58	90.44	84.20	88.71
	75. Perz.	17.34	92.38	90.23	93.41
Lingual	M	27.31	89.37	95.79	94.60
	SD	15.35	4.49	0.83	0.83
	Med	25.09	90.51	96.08	94.75
	25. Perz.	17.67	88.37	95.21	93.78
	75. Perz.	30.71	92.56	96.42	95.20
Mesial	M	17.10	30.19	53.54	64.17
	SD	11.21	7.82	3.03	3.52
	Med	15.06	32.94	53.51	63.58
	25. Perz.	7.05	26.13	51.30	62.14
	75. Perz.	28.80	35.01	55.38	67.93
Distal	M	17.67	26.59	41.30	48.58
	SD	11.88	7.10	4.38	3.86
	Med	15.49	27.62	40.70	47.45
	25. Perz.	7.10	24.33	36.68	46.50
	75. Perz.	27.09	30.80	44.29	50.14
ABCDF Bukkal	M	9.86	39.61	44.78	46.42
	SD	6.54	5.27	4.53	2.78
	Med	7.08	40.33	44.88	45.99
	25. Perz.	5.86	38.04	42.91	45.15
	75. Perz.	12.68	42.13	46.30	48.81
ABCDF Lingual	M	18.52	56.16	74.45	70.99
	SD	12.87	13.01	2.60	3.60
	Med	13.89	61.78	74.11	71.26
	25. Perz.	7.04	48.71	72.12	68.67
	75. Perz.	26.01	64.22	77.11	73.68
W Bukkal	M	7.93	22.46	34.49	46.79
	SD	3.93	8.35	5.03	6.89
	Med	8.43	21.51	35.14	48.05
	25. Perz.	6.21	13.50	33.15	42.76
	75. Perz.	11.06	27.51	36.81	51.93
W Lingual	M	14.71	55.79	82.13	83.42
	SD	9.85	13.80	2.66	2.11
	Med	13.15	59.29	82.39	83.97
	25. Perz.	6.84	44.30	81.42	82.08
	75. Perz.	21.12	65.52	83.57	85.17
W1+W2 Mesial	M	17.05	22.40	47.02	48.73
	SD	8.67	3.80	2.50	2.83
	Med	15.86	21.28	46.65	49.27
	25. Perz.	10.90	19.29	45.47	46.79
	75. Perz.	17.88	25.96	47.80	51.51
W1+W2 Distal	M	23.59	24.78	38.97	37.97
	SD	11.59	5.79	4.13	2.69
	Med	19.29	23.83	39.87	38.25
	25. Perz.	14.77	20.49	36.29	35.46
	75. Perz.	31.52	28.09	41.80	38.94

Zahnfeld / Parameter	Statistik	Organisch		Anorganisch	
		Testzahn-bürste	Referenz-zahnbürste	Testzahn-bürste	Referenz-zahnbürste
Total	M	16,81	44,52	59,94	63,27
	SD	6,71	7,95	1,88	1,96
	Med	15,17	46,52	59,72	62,34
	25. Perz.	10,96	42,53	58,56	61,73
	75. Perz.	22,62	48,85	60,15	64,98

n_1 = 10 Zahnträger mit der organischen Simulationsmethode

n_2 = 10 Zahnträger mit der anorganischen Simulationsmethode
(n_2 = 8 auf den Feldern „Bukkal“, „Lingual“;
n_2 = 9 auf den Feldern „ABCDF Lingual“)

Die Dontodent Zahnbürste erzielt bei anorganischer Plaquesimulation ähnlich hohe Werte wie die Referenzzahnbürste. Bei genauerer Begutachtung der Auswertungsergebnisse kann man sehen, dass die Dontodent Zahnbürste dennoch auf nahezu allen Flächen schlechter abschneidet. Lediglich auf den ABCDF Lingual- und auf den lingualen Flächen war sie der Referenzzahnbürste um circa 3 % bzw. 2 % im Median überlegen. Vergleicht man die Ergebnisse der Referenzzahnbürste beider Plaquesimulationen fällt auf, dass die Reinigungswerte beider Zahnbürsten auf den bukkalen Flächen im Median mit 91,1 % und 91,6 % nahezu identisch sind. Einen ähnlichen Effekt zeigen die lingualen Zahnflächen, wenn auch die Reinigungseffektivität der Referenzzahnbürste in Kombination mit der anorganischen Simulation auf allen Zahnflächen bessere Ergebnisse erreicht hat. Die Dontodent Zahnbürste weist in Verbindung mit der organischen Plaque-Simulation die schlechtesten Reinigungswerte auf. Insgesamt erreichte die Zahnbürste in der organischen Methode im Mittel nur eine Reinigungsleistung von 16,81 %. Eine Wechselwirkung kann man bei den Werten der bukkalen Zahnfläche erkennen. Hier erreichte die Dontodent Zahnbürste in Verbindung mit der organischen Methode eine Reinigungsleistung im Median von nur 10,4 %, wohingegen sie in der anorganischen Methode 85,8 % erreichte. Auch bei den Werten der anderen Zahnflächen sieht man eine deutliche Diskrepanz der Reinigungsergebnisse in Abhängigkeit der angewandten Plaquemethode. Alles in allem erkennt man auch hier die Überlegenheit der Referenzzahnbürste gegenüber der Testzahnbürste Dontodent, auch wenn diese Dominanz in der anorganischen Methode weniger eklatant ist als in der organischen Testreihe.

3.2.5 **Putzzyklus als Einflussfaktor der Reinigungsleistung**

Ob die Wahl des Putzzyklus die Reinigungsleistung der Zahnbürsten beeinflusste, soll im Folgenden betrachtet werden. Hierfür wurden die Reinigungsleistungen der Bürsten unter den zwei unterschiedlichen Zyklen gesondert ausgewertet. Insgesamt konnte im Mann-Whitney-U-Test weder in Verbindung mit dem Programm Putzzyklus "lang" (siehe Tab. 13) noch bei Putzzyklus "kurz" (siehe Tab. 14) ein signifikanter Unterschied zwischen den Leistungen beider Zahnbürsten ermittelt werden. Dennoch gab es Zahnfelder, die in Abhängigkeit des Programms auf Unterschiede hinwiesen. So stellten sich bei den bukkalen Flächen beider Programme hoch signifikante bis sehr signifikante Unterschiede zwischen den Zahnbürsten heraus.

Tab. 13 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen Testzahnbürste Dontodent- und Referenzzahnbürste auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total bei dem Putzzyklus „lang“. Die Ergebnisse des Putzzyklus „kurz“ werden nicht berücksichtigt. Beide Plaquesimulationsmethoden werden zusammengefasst betrachtet.

Zahnfeld / Parameter	U	Z	p (exakt)
Bukkal	1.0	-3.593***	0.000
Lingual	45.0	0.000	1.000
Mesial	33.0	-1.285	0.218
Distal	40.0	-0.756	0.481
ABCDF Bukkal	22.0	-2.117*	0.035
ABCDF Lingual	50.0	0.000	1.000
W Bukkal	20.0	-2.268*	0.023
W Lingual	41.0	-0.680	0.529
W1+W2 Mesial	45.0	-0.378	0.739
W1+W2 Distal	43.0	-0.529	0.631
Total	25.0	-1.890	0.063

n_1 = 10 Testzahnbürsten Dontodent mit dem Putzzyklus „kurz“

n_2 = 10 Referenzzahnbürsten mit dem Putzzyklus „kurz“
(n_2 = 9 auf den Feldern „Bukkal“, „Lingual“)

U = Teststatistik des MW-Testes

Z = Normalisierte Teststatistik

p = Signifikanzwert

* = signifikant ($p \leq 0.05$)

*** = hoch signifikant ($p \leq 0.001$)

Tab. 14 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen Test- und Referenzzahnbürste auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total bei dem Putzzyklus „kurz“. Die Ergebnisse des Putzzyklus „lang“ werden nicht berücksichtigt. Beide Plaquesimulationsmethoden werden zusammengefasst betrachtet.

Zahnfeld / Parameter	U	Z	p (exakt)
Bukkal	9.0	-2.939**	0.002
Lingual	38.0	-0.572**	0.604
Mesial	26.0	-1.814	0.075
Distal	30.0	-1.512	0.143
ABCDF Bukkal	36.0	-1.058	0.315
ABCDF Lingual	33.0	-0.980	0.356
W Bukkal	30.0	-1.512	0.143
W Lingual	30.0	-1.512	0.143
W1+W2 Mesial	30.0	-1.512	0.143
W1+W2 Distal	48.0	-0.151	0.912
Total	31.0	-1.436	0.165

n_1 = 10 Testzahnbürste Dontodent mit dem Putzzyklus „lang“

n_2 = 10 Referenzzahnbürste mit dem Putzzyklus „lang“
(n_2 = 9 auf den Feldern „Bukkal“, „Lingual“, „ABCDF Lingual“)

U = Teststatistik des MW-Testes

Z = Normalisierte Teststatistik

p = Signifikanzwert

** = sehr signifikant ($p \leq 0.01$)

3.2.6 **Deskriptive Statistiken zu den Wechselwirkungen je nach Roboterprogramm**

Tab. 15 auf der folgenden Seite zeigt die Ergebnisse der statistisch-deskriptiven Auswertungen, der Leistung beider Zahnbürsten je nach angewandtem Roboter-programm.

Am stärksten ist der Unterschied der Zahnbürsten auf den bukkalen Zahnfeldern. Hier schnitt die Testzahnbürste Dontodent bei beiden Programmen im Vergleich zur Referenzzahnbürste deutlich schlechter ab. Während die Referenzzahnbürste eine Reinigungsleistung von circa 91-93 % in beiden Programmen erreichte, befreite die Testzahnbürste Dontodent nur circa 53-60 % der bukkalen Zahnfelder von dem künstlichen Zahnbelag. Insgesamt wird deutlich, dass die Dontodentzahnbürste in Kombination mit dem Langprogramm von 2012 bessere Reinigungswerte erreichte als mit dem Kurzprogramm. Hier war auch die Standardabweichung mit 26,6 % am

höchsten, während sie bei der Referenzzahnbürste in Kombination mit dem Putzzyklus "lang" am niedrigsten war (10,7 %).

Tab. 15 Deskriptive Statistiken der Reinigungsleistung (in %) der beiden Zahnbürsten auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total bei den Programmen Putzzyklus "lang" und Putzzyklus "kurz". Die Datensätze der beiden Plaquesimulationsmethoden werden zusammengefasst betrachtet.

Zahnfeld/ Parameter	Statistik	Putzzyklus „lang“		Putzzyklus „kurz“	
		Testzahnbürste	Referenzzahnbürste	Testzahnbürste	Referenzzahnbürste
Bukkal	M	50.58	90.08	50.75	91.96
	SD	36.68	1.98	41.06	2.20
	Med	59.73	90.72	52.59	92.62
	25. Perz.	15.62	88.71	10.35	92.09
	75. Perz.	84.22	91.05	90.23	93.41
Lingual	M	64.38	92.74	58.72	91.80
	SD	35.55	1.67	39.50	5.51
	Med	77.83	93.45	62.63	94.99
	25. Perz.	27.36	92.63	22.83	91.02
	75. Perz.	96.19	93.78	95.98	95.20
Mesial	M	38.72	46.50	31.92	47.87
	SD	16.42	19.29	24.03	18.49
	Med	41.93	46.70	35.18	52.08
	25. Perz.	28.80	31.94	7.05	33.94
	75. Perz.	52.63	64.46	55.38	63.36
Distal	M	32.23	37.07	26.74	38.10
	SD	11.40	12.81	17.99	13.01
	Med	36.06	37.75	29.03	40.94
	25. Perz.	27.09	28.07	8.26	27.17
	75. Perz.	38.33	47.71	43.88	46.58
ABCDF Bukkal	M	27.30	43.20	27.34	42.84
	SD	17.42	4.87	20.91	6.12
	Med	30.16	45.09	27.79	43.64
	25. Perz.	12.03	38.77	6.52	40.49
	75. Perz.	44.24	46.52	45.58	46.27
ABCDF Lingual	M	49.61	62.82	43.35	65.23
	SD	27.97	10.68	33.26	13.50
	Med	58.81	65.97	49.42	70.65
	25. Perz.	25.92	61.78	7.04	63.08
	75. Perz.	74.58	68.67	73.64	73.68
W Bukkal	M	19.72	35.04	22.70	34.20
	SD	14.61	16.12	14.63	13.63
	Med	17.50	40.63	20.40	33.39
	25. Perz.	6.21	20.96	11.06	27.44
	75. Perz.	34.95	49.58	36.40	42.76
W Lingual	M	50.64	70.04	46.20	69.17
	SD	34.06	14.34	38.19	20.33
	Med	57.54	73.21	48.97	78.89
	25. Perz.	17.58	60.88	8.50	54.82
	75. Perz.	82.40	82.08	81.91	85.17
W1+W2 Mesial	M	35.37	35.10	28.70	36.03
	SD	14.77	14.56	18.37	13.98
	Med	41.04	36.84	29.52	35.83
	25. Perz.	17.88	20.76	10.90	22.93
	75. Perz.	46.80	48.79	45.79	49.75

Zahnfeld/ Parameter	Statistik	Putzzyklus „lang“		Putzzyklus „kurz“	
		Testzahn-bürste	Referenz-zahnbürste	Testzahn-bürste	Referenz-zahnbürste
W1+W2 Distal	M	32.67	31.47	29.89	31.28
	SD	11.28	8.55	12.29	8.02
	Med	36.19	31.62	34.17	35.34
	25. Perz.	29.85	22.77	16.65	24.90
	75. Perz.	40.61	38.74	40.98	37.40
Total	M	40.12	53.90	36.63	53.90
	SD	20.43	10.70	25.64	12.16
	Med	43.45	56.97	37.40	57.54
	25. Perz.	22.62	46.75	12.67	46.29
	75. Perz.	58.99	62.18	60.15	62.45

n_1 = 10 Zahnträger im Putzzyklus „lang“

n_2 = 10 Zahnträger im Putzzyklus „kurz“

(n_2 = 9 auf den Feldern „Bukkal“ und „Lingual“ beider Putzzyklen;
n_2 = 9 auf den Feldern „ABCDF Lingual“ bei dem Putzzyklus „kurz“)

3.3 Vergleich der Putzzyklen – Putzzyklus „lang“ versus Putzzyklus „kurz“

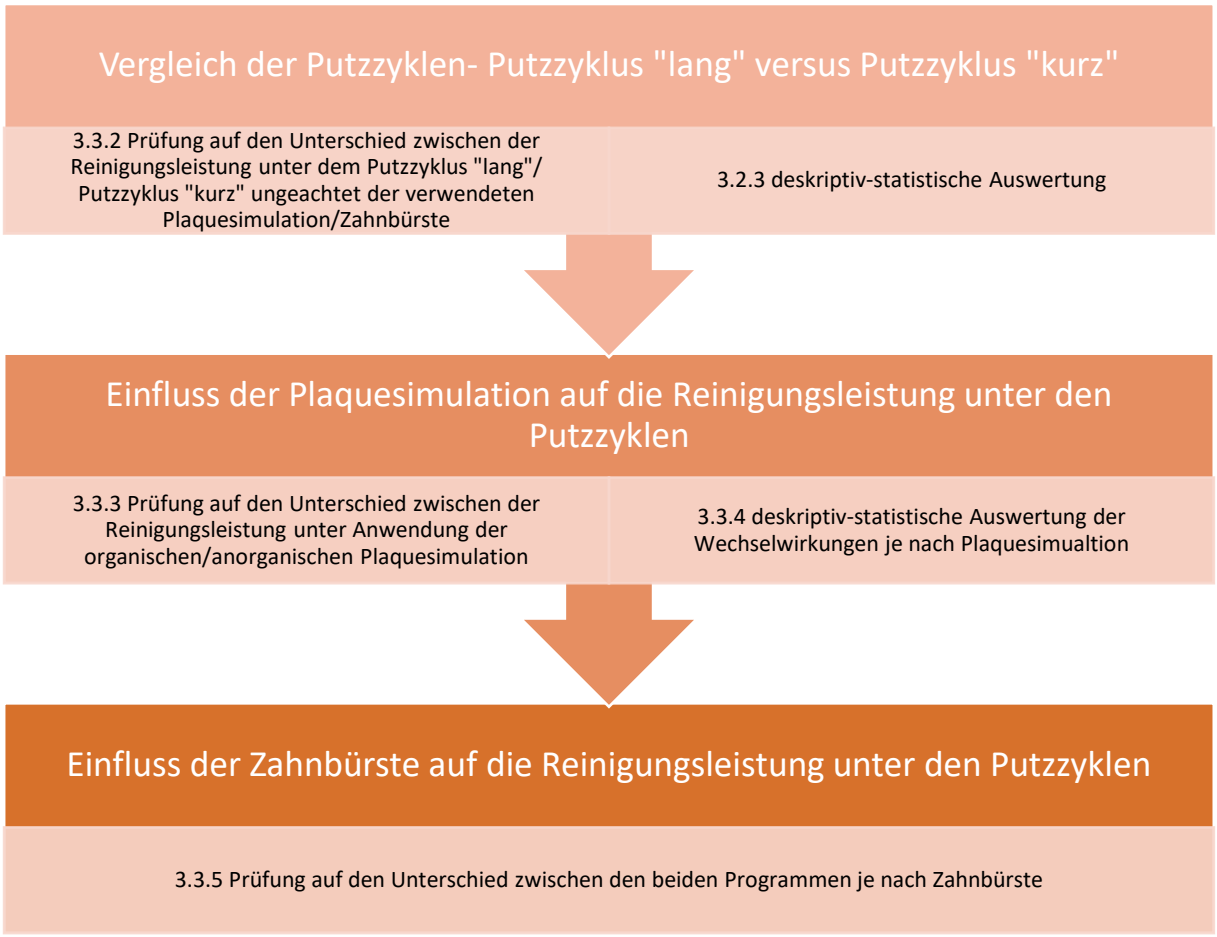

Abb. 21 Übersicht über die Auswertung der Reinigungsergebnisse der Putzzyklen.

Das Kapitel 3.3.2 umfasst den gesamten Datensatz, das heißt die Reinigungsergebnisse beider Plaquesimulationen und Zahnbürsten. Damit soll überprüft werden, ob es einen Unterschied hinsichtlich der Reinigungseffizienz zwischen den beiden Putzzyklen gibt. Im Anschluss soll die Größe des Unterschieds anhand der deskriptiven Statistik dargestellt werden (Kapitel 3.3.2). In Kapitel 3.3.3 und 3.3.4 werden die Reinigungsleistungen der Plaquesimulationsmethoden organisch/anorganisch gesondert betrachtet. Hierbei werden die Ergebnisse beider Zahnbürsten zusammengefasst. Im Kapitel 3.3.5 werden die Reinigungsleistungen der Zahnbürsten unabhängig voneinander in dem jeweiligen Putzzyklus ausgewertet.

Test auf den Unterschied

Wie auch der Abb. 21 zu entnehmen, werden in diesem Kapitel die beiden verwendeten Putzzyklen miteinander verglichen. Vorerst wurde in den Mann-Whitney-U-Tests (vgl. Tab. 16) der gesamte Datensatz beider Zahnbürsten und Plaquesimulationsmethoden miteinbezogen. Hier konnte bereits kein signifikanter Unterschied zwischen dem Putzzyklus „lang“ und dem Putzzyklus „kurz“ festgestellt werden. Dies war zutreffend für alle Zahnfelder.

Tab. 16 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen den Programmen Putzzyklus "lang" und Putzzyklus "kurz" bei der Reinigungsleistung auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total. Die Datensätze der beiden Plaquesimulationsmethoden und der Zahnbürsten werden zusammengefasst betrachtet.

Zahnfeld/ Parameter	U	Z	p (exakt)
Bukkal	149.0	-1.380	0.174
Lingual	190.0	-0.271	0.799
Mesial	190.0	-0.271	0.799
Distal	190.0	-0.271	0.799
ABCDF Bukkal	183.0	-0.460	0.659
ABCDF Lingual	191.0	-0.243	0.820
W Bukkal	191.0	-0.243	0.820
W Lingual	185.0	-0.406	0.698
W1+W2 Mesial	175.0	-0.676	0.512
W1+W2 Distal	181.0	-0.514	0.620
Total	193.0	-0.189	0.862

n1 = 20 Zahnträger im Putzzyjkus „lang“

n2 = 20 Zahnträger im Putzzyklus „kurz“

U = Teststatistik des MW-Testes

Z = Normalisierte Teststatistik

3.3.1 **Deskriptiv-statistische Auswertung und grafische Darstellung**

Noch deutlicher wird diese Beobachtung bei der deskriptiv-statistischen Auswertung. Wie in Tab. 17 ersichtlich, liefert das Kurzprogramm auf allen Flächen vergleichbare Reinigungswerte. Die übliche, stärkere Reinigungsleistung auf den bukkalen und lingualen Flächen ist ebenso zu beobachten wie die im Vergleich dazu niedrigere Plaque-Entfernung in den Approximalbereichen, Risikofeldern ABCDF und Wurzeloberflächen. Die einzige Ausnahme gilt hierbei für die W1+W2 lingual, da beide Programme hier im Median eine Leistung von circa 73 % und 75 % erzielten. Das konventionelle Langprogramm zeigte sich auf fast allen Flächen minimal überlegen. Nur auf den Wurzelfeldern erreichte das modifizierte Kurzprogramm von 2016 höhere Reinigungsleistungen. Die Standardabweichung des Putzzyklus "lang" ist mit 17,37 % etwas geringer als die des Programms 01/2016, die bei 21,45 % liegt. In den Whisker-Box-Plots (vgl. Abb. 22 und Abb. 23) fällt der große Interquartilsabstand beider Programme ins Auge. Die Streuungen fielen im Putzzyklus „kurz“ tendenziell sogar noch höher aus als im konventionellen Programm.

Tab. 17 Deskriptive Statistiken der Reinigungsleistung (in %) auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total bei den Programmen Putzzyklus "lang" und Putzzyklus „kurz“. Die Datensätze der beiden Plaquesimulationsmethoden und Zahnbürsten werden zusammengefasst betrachtet.

Zahnfeld/ Parameter	Statistik	Putzprogramm	
		„lang“	„kurz“
Bukkal	M	68.65	69.91
	SD	32.19	35.02
	Med	85.50	90.11
	25. Perz.	47.05	42.05
	75. Perz.	90.35	92.61
Lingual	M	77.69	73.92
	SD	28.30	32.08
	Med	93.08	93.52
	25. Perz.	68.18	47.87
	75. Perz.	94.57	95.40
Mesial	M	42.61	39.90
	SD	17.89	22.41
	Med	43.29	45.30
	25. Perz.	29.17	20.33
	75. Perz.	56.35	60.44
Distal	M	34.65	32.42
	SD	12.06	16.35
	Med	36.06	38.72
	25. Perz.	27.58	16.39
	75. Perz.	45.94	45.39

Zahnfeld/ Parameter	Statistik	Putzprogramm „lang“	Putzprogramm „kurz“
ABCDF Bukkal	M	35.25	35.09
	SD	14.88	16.97
	Med	41.23	42.52
	25. Perz.	29.89	20.64
	75. Perz.	45.64	46.20
ABCDF Lingual	M	56.22	52.32
	SD	21.69	27.55
	Med	65.97	70.35
	25. Perz.	40.28	26.93
	75. Perz.	71.69	73.66
W Bukkal	M	27.38	28.45
	SD	16.91	14.98
	Med	29.43	29.22
	25. Perz.	11.14	12.84
	75. Perz.	40.63	36.91
W Lingual	M	60.34	57.69
	SD	27.31	32.02
	Med	73.12	75.07
	25. Perz.	38.16	25.22
	75. Perz.	82.39	84.62
W1+W2 Mesial	M	35.24	32.36
	SD	14.27	16.33
	Med	41.04	35.72
	25. Perz.	20.03	16.90
	75. Perz.	47.80	47.63
W1+W2 Distal	M	32.07	30.58
	SD	9.76	10.13
	Med	35.57	35.34
	25. Perz.	25.43	20.41
	75. Perz.	38.84	38.46
Total	M	47.01	45.26
	SD	17.37	21.45
	Med	55.37	55.70
	25. Perz.	30.64	23.12
	75. Perz.	60.70	62.34

n_1 = 20 Zahnträger im Putzzyklus „lang“

n_2 = 20 Zahnträger im Putzzyklus „kurz“

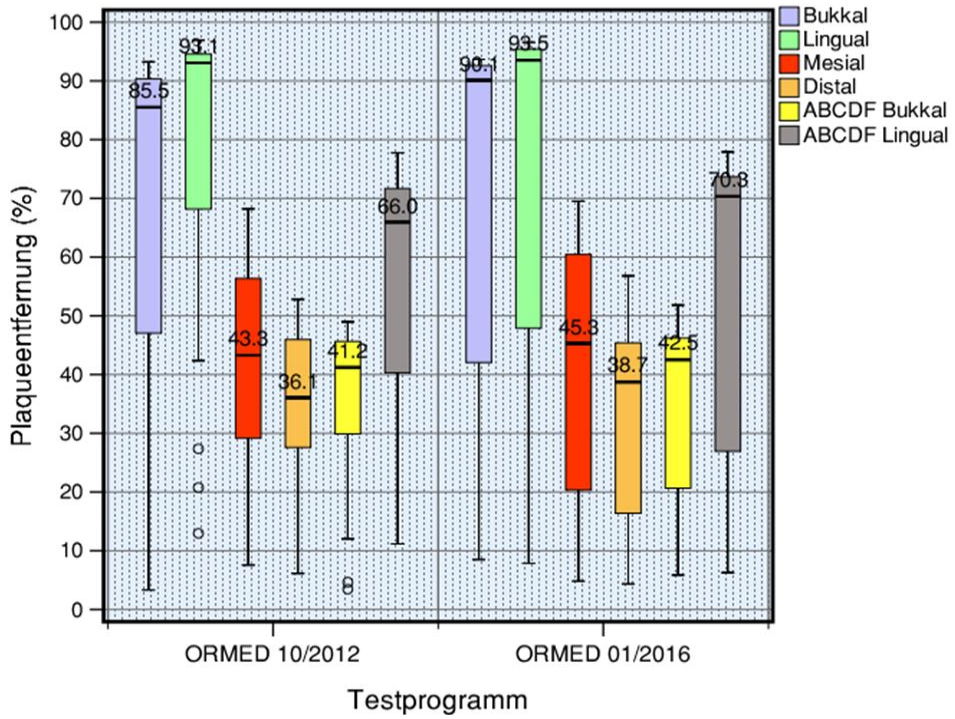

Abb. 22 Grafisch-statistische Darstellung der Reinigungsleistung bei Putzzyklus "lang" (ORMED 10/2012) und Putzzyklus "kurz" (ORMED 01/2016) auf den Feldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual. Die Datensätze beider Plaquesimulationsmethoden und Zahnbürsten werden zusammengefasst. Auffallend sind die Streuungen, die Hinweis auf einen inhomogenen Datensatz geben.

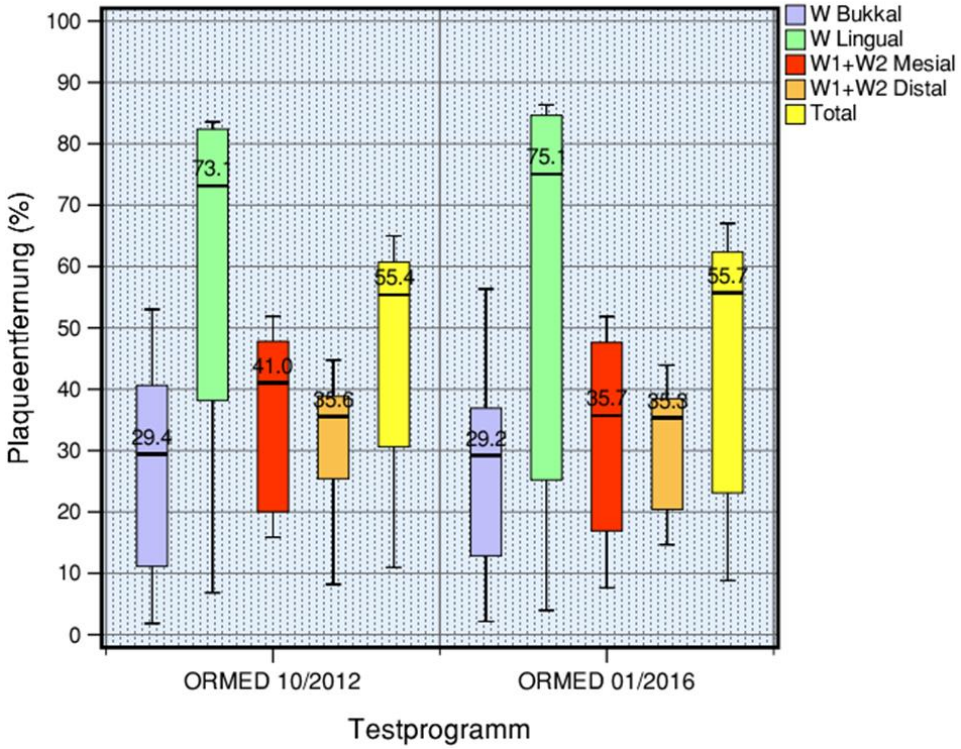

Abb. 23 Grafisch-statistische Darstellung der Reinigungsleistung bei Putzzyklus "lang" und Putzzyklus "kurz" auf den Feldern W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal,Total. Die Datensätze beider Plaquesimulationsmethoden und Zahnbürsten werden zusammengefasst. Auffallend sind hier die Streuungen, die Hinweis auf einen inhomogenen Datensatz geben

3.3.2 **Einflussfaktor Plaquesimulation auf die Reinigungsleistung**

Um herauszufinden, wie die großen Interquartilsabstände zustande gekommen sind, wurden die Ergebnisse noch einmal hinsichtlich auf einen möglichen Einfluss der Plaquesimulationsmethode überprüft.

Bei der organischen und auch bei der anorganischen Plaquesimulation gab es im Mann-Whitney-U-Test (siehe Tab. 18 und Tab. 19) keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der unterschiedlichen Testprogramme. Jedoch zeigen die Programme mit der anorganischen Simulation einen sehr signifikanten Unterschied auf den bukkalen Zahnfeldern in Verbindung mit der anorganischen Plaquesimulation. Hier ist demnach von einer wechselnden Wirkung zwischen anorganischer Plaquesimulation und den Testprogrammen auszugehen.

Tab. 18 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen dem Putzzyklus „lang“ und Putzzyklus „kurz“ bei **organischer** Plaquesimulation auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total. Die Datensätze der organischen Plaquesimulation werden, wie die Putzzyklen auch, gesondert betrachtet, während die Ergebnisse beider Zahnbürsten zusammengefasst werden.

Zahnseite / Parameter	U	Z	p (exakt)
Bukkal	46.0	-0.302	0.796
Lingual	42.0	-0.605	0.579
Mesial	36.0	-1.058	0.315
Distal	33.0	-1.285	0.218
ABCDF Bukkal	50.0	0.000	1.000
ABCDF Lingual	37.0	-0.983	0.353
W Bukkal	38.0	-0.907	0.393
W Lingual	39.0	-0.832	0.436
W1+W2 Mesial	33.0	-1.285	0.218
W1+W2 Distal	36.0	-1.058	0.315
Total	40.0	-0.756	0.481

n_1 = 10 Zahnträger mit organischer Plaquesimulation und Putzzyklus „lang“
n_2 = 10 Zahnträger mit organischer Plaquesimulation und Putzzyklus „kurz“
U = Teststatistik des MW-Testes
Z = Normalisierte Teststatistik
p = Signifikanzwert

Tab. 19 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen dem Putzzyklus „lang“ und Putzzyklus „kurz“ bei **anorganischer** Plaquesimulation auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total. Die Datensätze der anorganischen Plaquesimulation werden, wie auch die Putzzyklen, gesondert betrachtet, während die Ergebnisse beider Zahnbürsten zusammengefasst werden.

Zahnseite / Parameter	U	Z	p (exakt)
Bukkal	13.0	-2.797**	0.004
Lingual	32.0	-1.361	0.190
Mesial	46.0	-0.302	0.796
Distal	46.0	-0.302	0.796
ABCDF Bukkal	38.0	-0.907	0.393
ABCDF Lingual	32.0	-1.361	0.190
W Bukkal	49.0	-0.076	0.971
W Lingual	24.0	-1.965	0.052
W1+W2 Mesial	42.0	-0.605	0.579
W1+W2 Distal	46.0	-0.302	0.796
Total	33.0	-1.285	0.218

$n_1 = 10$, $n_2 = 10$
U = Teststatistik des MW-Testes
Z = Normalisierte Teststatistik
p = Signifikanzwert
** = sehr signifikant ($p \leq 0.01$)

Um dies weiter zu überprüfen, wurden die Messwerte deskriptiv-statistisch ausgewertet und in Tab. 20 dargestellt.

3.3.3 Deskriptiv-statistische Auswertung der Wechselwirkungen je nach Plaquesimulation

Betrachtet man in Tab. 20 den Median der Plaque-Simulationsmethoden auf dem bukkalen Zahnfeld ist zu erkennen, dass die Reinigungswerte beider Roboterprogramme mit 86,85 % und 92,50 % stärker voneinander abweichen als bei den übrigen Feldern. Hier lässt sich demnach für die Gesamtheit aller Werte und Flächen und je nach Plaque-Simulationsmethode keine wechselnde Wirkung feststellen. Unter beiden Programmen der organischen Methode fällt auf, dass die Reinigungswerte insgesamt niedriger sind. Der Putzzyklus „kurz“ zeigt sich hier mit 23,12 % im Median dem Langprogramm mit 30,64 % unterlegen. Dennoch ist auch hier zu erkennen, dass die Standardabweichung in der organischen Methode mit 14,15 % (Putzzyklus „kurz") und 17,94 % (Putzzyklus „lang“) deutlich höher ist als in der anorganischen Methode. Zur weiteren Veranschaulichung dieser Beobachtung dienen Abb. 24 und Abb. 25.

Tab. 20 Deskriptive Statistiken der Reinigungsleistung (in %) der Programme Putzzyklus "lang" und Putzzyklus „kurz“ auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total. Die Putzergebnisse unter den beiden Plaquesimulationen werden gesondert betrachtet. Die Ergebnisse beider Zahnbürsten werden zusammengefasst.

Zahnseite/ Parameter	Statistik	Organisch		Anorganisch	
		P 10/2012	P 01/2016	P 10/2012	P 01/2016
Bukkal	M	50.68	48.46	86.61	91.35
	SD	38.24	39.48	2.89	3.03
	Med	47.05	42.05	86.85	92.50
	25. Perz.	15.62	10.35	84.22	90.23
	75. Perz.	91.05	90.00	88.71	93.41
Lingual	M	60.51	52.33	94.88	95.51
	SD	32.14	33.71	1.26	0.60
	Med	68.18	47.87	94.57	95.40
	25. Perz.	27.36	22.83	93.78	95.17
	75. Perz.	90.01	86.77	96.19	95.98
Mesial	M	26.77	20.52	58.44	59.27
	SD	8.66	13.62	6.57	6.38
	Med	29.17	20.33	56.35	60.44
	25. Perz.	24.00	7.05	52.63	55.38
	75. Perz.	32.56	33.94	64.46	63.36
Distal	M	25.42	18.84	43.88	45.99
	SD	8.91	11.50	6.21	4.74
	Med	27.58	16.39	45.94	45.39
	25. Perz.	23.17	8.26	36.68	43.88
	75. Perz.	30.80	27.17	47.71	47.49
ABCDF Bukkal	M	25.84	23.63	44.66	46.54
	SD	16.00	17.43	3.88	3.57
	Med	29.89	20.64	45.39	45.85
	25. Perz.	12.03	6.52	44.24	44.34
	75. Perz.	38.77	40.49	46.30	50.04
ABCDF Lingual	M	40.96	30.69	71.48	73.96
	SD	21.41	23.58	4.16	2.38
	Med	40.28	26.93	71.69	73.66
	25. Perz.	25.92	7.04	68.67	71.86
	75. Perz.	61.78	48.71	74.58	75.76
W Bukkal	M	13.73	16.66	41.04	40.24
	SD	10.34	9.52	9.07	8.61
	Med	11.14	12.84	40.59	36.91
	25. Perz.	6.21	11.06	34.95	35.84
	75. Perz.	20.96	27.44	49.58	43.34
W Lingual	M	38.71	31.79	81.97	83.58
	SD	23.08	25.81	1.70	2.85
	Med	38.16	25.22	82.39	84.62
	25. Perz.	17.58	8.50	81.05	81.91
	75. Perz.	60.88	54.82	83.47	85.47
W1+W2 Mesial	M	22.13	17.32	48.34	47.41
	SD	6.49	7.11	2.51	3.02
	Med	20.03	16.90	47.80	47.63
	25. Perz.	17.88	10.90	46.49	45.47
	75. Perz.	25.56	22.93	50.80	49.75
W1+W2 Distal	M	25.96	22.41	38.18	38.76
	SD	10.12	7.69	3.96	2.99
	Med	25.43	20.41	38.72	38.46
	25. Perz.	20.35	16.58	36.09	35.86
	75. Perz.	29.85	26.79	40.61	40.98

Zahnseite/ Parameter	Statistik	Organisch		Anorganisch	
		P 10/2012	P 01/2016	P 10/2012	P 01/2016
Total	M	33.07	28.27	60.95	62.26
	SD	14.15	17.94	2.29	2.70
	Med	30.64	23.12	60.70	62.34
	25. Perz.	22.62	12.67	58.99	60.15
	75. Perz.	46.75	46.29	62.18	63.60

n_1 = 10 Zahnträger mit organischer Plaquesimulation

n_2 = 10 Zahnträger mit anorganischer Simulation

Die Heterogenität der Werte bei der organischen Methode ist durchweg größer bei beiden Roboterprogrammen, während die Plaque-Entfernung bei der anorganischen Methode insgesamt deutlich weniger Streuungen aufweist. Grafisch lässt sich dieser Effekt in den Abbildungen 24 und 25 darstellen. Ungeachtet welcher Putzzyklus verwendet wurde fällt auf, dass die Streuungen um die Mittelwerte in der organischen Methode deutlich höher ausfallen.

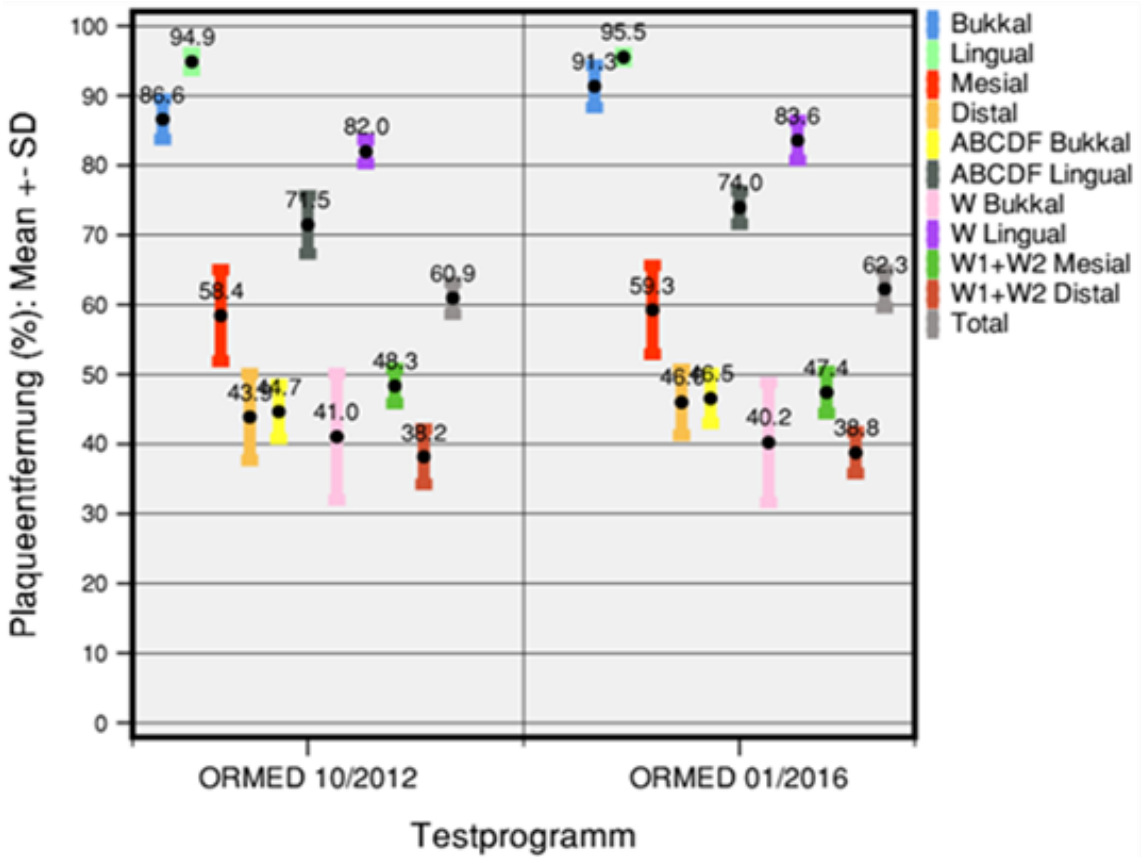

Abb. 24 Grafisch-statistische Darstellung der Reinigungsleistung der **anorganischen Methode** unter dem Putzzylus „lang“ (ORMED 10/2012) gegenüber dem Putzzyklus „kurz“ (ORMED 01/2016) auf den Feldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Bukkal, Total. Die Datensätze der Zahnbürsten werden zusammengefasst dargestellt.

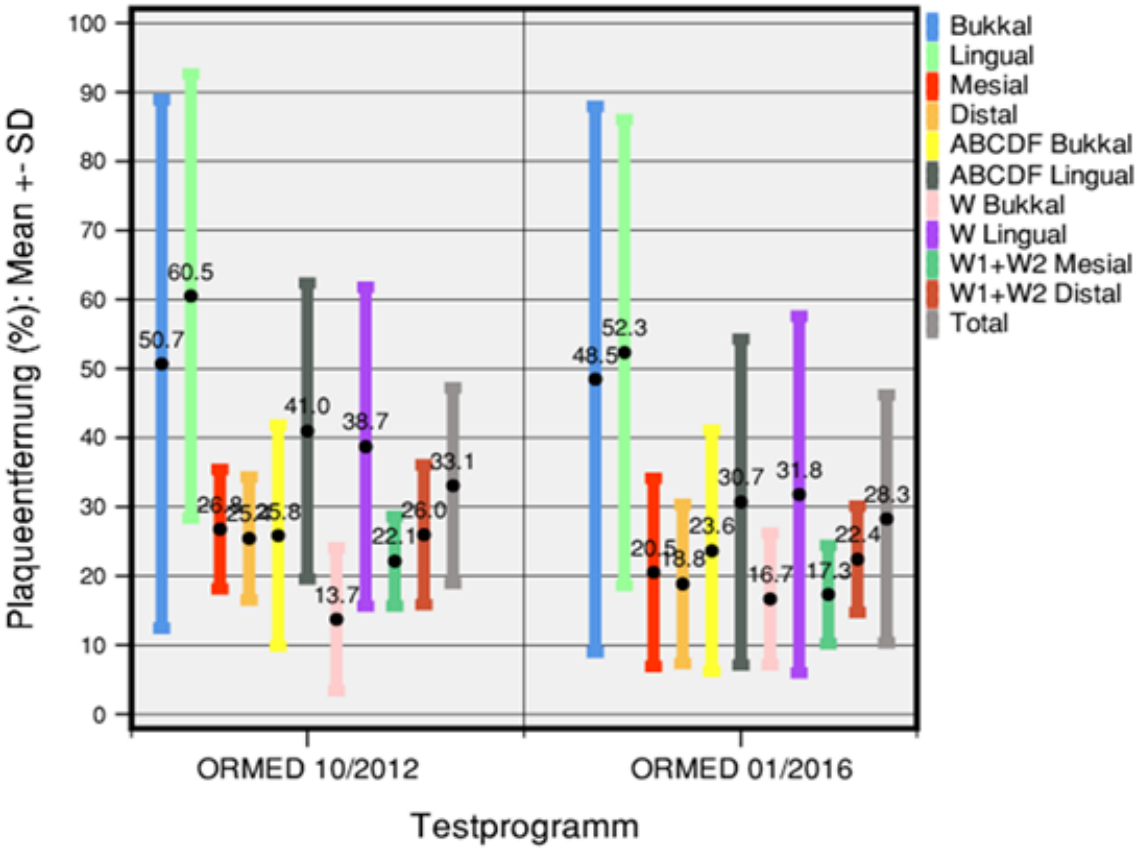

Abb. 25 Grafisch-statistische Darstellung der Reinigungsleistung der **organischen Methode** unter dem Putzzyklus „lang“ (ORMED 10/2012) gegenüber dem Putzzyklus „kurz“ (ORMED 01/2016) auf den Feldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Bukkal, Total. Die Datensätze der beiden Zahnbürsten werden zusammengefasst dargestellt. Auffallend im Gegensatz zu der anorganischen Plaquesimulation sind in der organischem Methode die großen Streuungen.

Alles in allem stellte sich in der statistisch-deskriptiven Auswertungen heraus, dass die besten Reinigungsergebnisse der Putzzyklus „kurz“ in Verbindung mit der anorganischen Plaquesimulation erreicht. Dicht gefolgt vom Putzzyklus „lang“ in Kombination mit der anorganischen Plaquesimulation. Von einer Wechselwirkung der Roboterprogramme je nach Plaquesimulationsmethode ist demnach nicht auszugehen.

3.3.4 **Einflussfaktor Zahnbürste auf die Reinigungsleistung**

Es konnte im Mann-Whitney-U-Test kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Programmen je nach Zahnbürste festgestellt werden. Eine ausgeübte Wechselwirkung kann demnach ausgeschlossen werden.

4 Diskussion

4.1 Material und Methode

4.1.1 Zahnbürsten

Um die Effizienz der häuslichen Mundhygiene zu steigern und möglichst an die unterschiedlichen Bedürfnisse der Endverbraucher anzupassen, wurden viele verschiedene Bürstenkopfkonfigurationen entwickelt. Bis dato existiert keine ausreichende Evidenz über eine bestimmte Bürstenkopfkonfiguration, die allen anderen überlegen ist (Van der Weijden; Hioe, 2005). Wenn auch früher von Zahnärzten ausschließlich ein weiches, planes Borstenfeld empfohlen wurde, deckt sich diese Empfehlung heutzutage nicht mehr mit der vorhandenen, breitgefächerten Studienlage. Die Verfasser der S3-Leitlinie “Häusliches mechanisches Biofilmmanagement in der Prävention und Therapie der Gingivitis“ empfehlen ebenfalls keinen bestimmten Zahnbürstentyp uneingeschränkt weiter (Graetz, 2018).

Die Studienlage kommt diesbezüglich zu keinem einheitlichen Ergebnis. Neue Zahnbürsten werden mit dem Ziel entworfen, eine bessere Eindringbarkeit in schwer zu erreichende Areale wie zum Beispiel die Zahnzwischenräume zu gewährleisten.

Dies gilt zum Beispiel für neuartige Bürstenkopfdesigns mit abgewinkelten Borsten, die in einigen Studien den herkömmlichen Konfigurationen überlegen erscheinen (Sharma et al., 2010; Slot et al., 2012). Slot et al. veröffentlichten 2012 ein systematisches Review, in dem sie die Effizienz herkömmlicher Zahnbürsten miteinander verglichen. Hierbei kamen die Verfasser zum Schluss, dass eine Zahnbürste mit abgewinkelten Borsten im Gegensatz zu einer Flachschnittzahnbürste je nach verwendetem Plaque-Index eine 12-15 % höhere Reinigungseffizienz erzielt. Staudt et al. (2001) widerlegen wiederum die Unterlegenheit der konventionellen Flachschnittzahnbürsten. Abgesehen von der Borstenkonfiguration, gibt es andere Faktoren, die maßgeblich den Reinigungserfolg des Verbrauchers beeinflussen. Staudt et al. beobachteten diesbezüglich in ihrer Studie im Jahr 2001, dass keines der untersuchten Bürstenkopfdesigns (multilevel, flat-trimm, curve) in der Lage war, die Putzergebnisse einer ungünstigen Putztechnik auszugleichen.

In dieser Studie wurden zwei Zahnbürsten ausgewählt, die zwar die gleiche Bürstenkopfkonfiguration aufweisen und über eine ähnliche Bürstenkopfgröße und Anordnung

der Büschel verfügen, die sich aber in ihrer Borstenhärte und der Gestaltung der Borstenenden unterscheiden. Somit liegt der Fokus der Reinigungsleistung in dieser Studie nicht auf der Bürstenkopfkonfiguration.

Der Härte- und Flexibilitätsgrad wird durch das Material, den Durchmesser und der Länge der Borsten beeinflusst. Demnach sind Bürsten mit schmalem Borstendurchmesser flexibler (Dyer et al., 2000). Zusätzlich haben auch die Anzahl der Büschel und deren Durchmesser und die Anzahl der Borsten innerhalb eines Büschels Einfluss auf die Elastizität einer Bürste (Rawls et al., 1990).

Hinsichtlich des Einflusses, den die Borstenhärte auf die Effizienz ausübt, ist die Studienlage heterogen: Borsten niedrigeren Durchmessers zeigten in einer groß angelegten in-vitro-Studie von Imfeld et al. zum Beispiel eine deutliche Überlegenheit (Imfeld et al., 2000).

Dennoch gibt es auch Studien, die einen Zusammenhang zwischen der Borstensteifigkeit und Plaque-Entfernung belegen. Zahnbürsten mit einem harten Borstenfeld entfernen demnach effizienter den vorhandenen Biofilm als weiche Zahnbürsten (Zimmer et al., 2011; Zanatta, 2011).

Es gilt als allgemein anerkannt, dass härtere Borsten generell abrasiver sind. Zimmer et al. untersuchten im Rahmen einer klinischen Studie unter anderem die Plaque-Entfernung von Zahnbürsten mit unterschiedlicher Borstenhärte. Es kamen Zahnbürsten mit den Härtegraden weich, mittel und hart zum Einsatz. Das Besondere an dieser Testreihe ist, dass sich die verwendeten Zahnbürsten nur in der Flexibilität der Borsten, nicht aber in der Bürstenkopfkonfiguration unterschieden. Die Ergebnisse bestätigten die Vermutung, dass im Hinblick auf die Reinigungseffizienz die Zahnbürste mit den harten Borsten vorne lag. Die mittelharte Zahnbürste erreichte ebenfalls bessere Reinigungswerte als die Zahnbürste mit dem weichen Borstenfeld (Zimmer et al., 2011).

Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie. Die Testzahnbürste Dontodent war in Kombination mit beiden Plaquesimulationen der Referenzzahnbürste mit ihren mittelharten Borsten unterlegen.

Eine weitere Besonderheit der in dieser Studie verwendeten Dontodent-Zahnbürste sind die konisch auslaufenden Filamente (s. Abb. 26). Im Gegensatz hierzu zeigt die

ORMED Referenzzahnbürste abgerundete Borstenenden. Letztere werden gegenwärtig standardmäßig verwendet, da mehrere Studien in der Vergangenheit belegten, dass nicht abgerundete Borsten abrasiver sind als abgerundete (Hennequin-Hoenderdos et al., 2017; Breitenmoser et al., 1979). Aus diesem Grund rät die American Dental Association (ADA) von Borsten mit scharfen Kanten ab (American Dental Association, 2019).

Eine Innovation waren folglich die „tapered“ Borstenenden. So geben die Hersteller an, dass die konischen Borstenenden effizienter Plaque entfernen und dabei weichgewebeschonend vorgehen (Hoogteijling et al., 2018). Ähnlich wie im Hinblick auf Bürstenkopfkonfiguration und Borstenhärte kommen die Studien, die die „tapered“ Borsten auf ihre Effizienz testen, zu keinem einheitlichen Ergebnis.

Demnach zeigte die in-vitro-Studie von Yankell et al. (2003) die Überlegenheit von „tapered“ Borsten gegenüber der konventionellen Borsten.

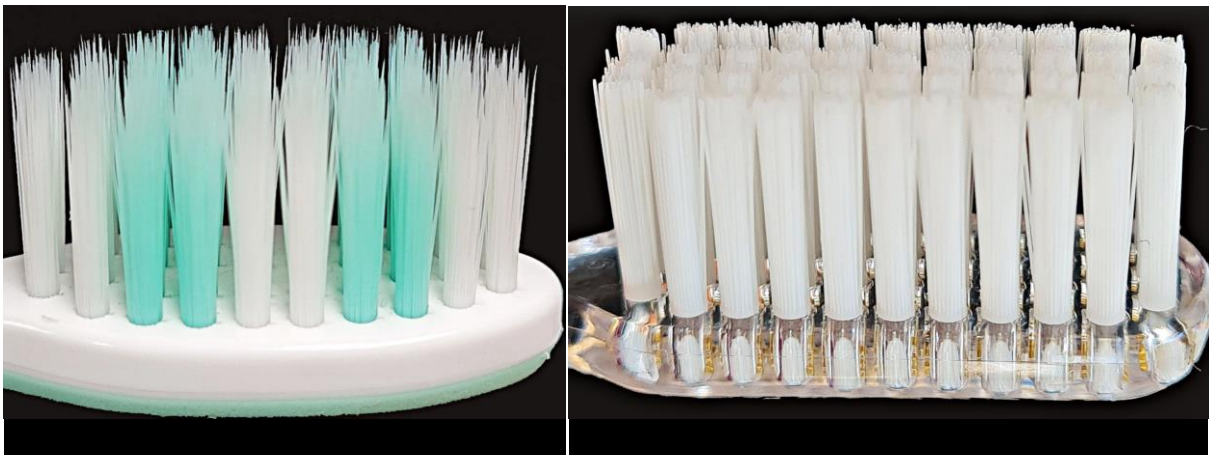

Abb. 26 Nahaufnahme der konischen Filamente der Testzahnbürste Dontodent (linkes Bild) und der abgerundeten Borsten der Referenzzahnbürste (rechtes Bild)

Kreifeldt et al. (1980) überprüften in ihrer Studie die Effizienz von abgenutzten Zahnbürsten und stellten dabei fest, dass sich die Borsten mit zunehmenden Alter der Bürste verjüngen. Die niedrigere Effizienz begründeten die Autoren mit der erhöhten Flexibilität der Borsten, sodass nicht mehr adäquat die Beläge entfernt werden können.

Versteeg et al. (2008) verglichen im Rahmen einer klinischen Studie ebenfalls die Plaque-Entfernung einer „tapered“ Zahnbürste mit der ADA-Referenzzahnbürste (vgl. Abb. 26). Es handelte sich um ein Split-mouth-Design mit 21-tägiger Mundhygienekarenz im Unterkiefer an insgesamt 22 Probanden. Die Ergebnisse zeigten, dass schon in der ersten Woche nach Wiederaufnahme der Mundhygiene eine signifikante

Menge an Plaque mit beiden Zahnbürsten entfernt wurde. Nach 4 Wochen reduzierten sich die Blutungen mit dem BOP-Blutungsindex 0-2 (0 = keine Blutung, 1 = Blutung, 2 = starke Blutung) (Lie et al., 1998) bei der ADA Referenzzahnbürste von 1.86 (Tag 21) auf 1.21 und bei der „tapered“ Zahnbürste von 1.86 (Tag 21) auf 1.35. Demnach war die konventionelle Flachschnittzahnbürste mit den abgerundeten Borstenenden den konischen Filamenten wie auch in der vorliegenden Studie überlegen. Die Länge der Filamente der Dontodent Zahnbürste aus dieser Studie sind mit 12 mm im Vergleich zu anderen Zahnbürsten lang (Otsuka et al., 2020). In der Studie von Otsuka et al. (2020) waren Zahnbürsten mit dieser Filamentenlänge eher auf den hinteren Rängen hinsichtlich ihrer Reinigungsleistung angeordnet.

Hoogteiljing et. al (2018) bestätigten in ihrem systematischen Review, dass hinsichtlich der Plaque-Entfernung nicht ausreichend Evidenz darüber vorliegt, um dieses Filamentdesign dem konventionellen, abgerundeten Borstentyp als überlegen anzusehen. Die gingivalen Indizes der ausgewerteten Studien zeigten einen signifikanten Vorteil der „tapered“ Borsten, deren klinische Relevanz laut der Autoren dennoch als vernachlässigbar eingeordnet wurde. Durch die konischen Filamente geht jedoch wahrscheinlich ein niedrigeres Verletzungspotenzial der Weichgewebe einher (Versteeg et al., 2008). Lee et al. (2017) fanden in ihrer Studie heraus, dass nur 1,4-20,2 % der Borsten untersuchter Kinderzahnbürsten eine akzeptable Abrundung aufwiesen, obwohl sie als abgerundet deklariert wurden. Dies beleuchtet die teils mangelhafte technische Umsetzung der Borstenabrundung während des Herstellungsprozesses einer Zahnbürste. Unter Berücksichtigung dieser Schwierigkeit könnten demnach „tapered“ Borsten, dessen Konus chemisch hergestellt wird (Hoogteijling et al., 2018), ein niedrigeres Verletzungspotenzial aufweisen als insuffizient mechanisch abgerundete Borsten.

Dass jedoch nicht alle abgerundeten Filamente auch mit einem erhöhten Verletzungs-potenzial einhergehen, zeigte eine Studie von Caporossi et al. (2019). Die Autoren verglichen in ihrer klinischen Studie im Split-mouth-Design eine Zahnbürste mit „tapered“ und eine Zahnbürste mit weichen, abgerundeten Borsten. Hierbei stellte sich letztere als effizienter hinsichtlich der Plaque-Entfernung heraus. Des Weiteren machten die Autoren darauf aufmerksam, dass die Überlegenheit der abgerundeten Filamente in der Effizienz nicht mit einem erhöhten Verletzungspotenzial korrelierte. Ranzan et al. (2019) kamen in ihrem systematischen Review zu einem ähnlichen Fazit.

Es konnte hinsichtlich des Verletzungspotenzials kein Unterschied zwischen „tapered“ und abgerundeten Filamenten aufgezeigt werden.

Wie auch in den meisten obengenannten Studien konnte in dieser Studie die Überlegenheit der „tapered“ Borsten in Bezug auf die Reinigungsleistung nicht belegt werden. Insbesondere mit der organischen Simulation, dem modifizierten Kurzprogramm war die Dontodent-Zahnbürste der mittelharten Referenzzahnbürste deutlich unterlegen. Dieses Ergebnis rührt wahrscheinlich von der hohen Flexibilität der Borsten, die sich zum Ende hin noch weiter verjüngen und damit noch weicher werden, sodass insbesondere die hochviskose organische Plaquesimulation schwieriger entfernt werden konnte.

4.1.2 **Plaquesimulationen**

Um eine in-vitro-Studie unter möglichst realitätsnahen Bedingungen ablaufen zu lassen, bedarf es einer Methode, den menschlichen Zahnbelag zu simulieren. Entscheidend für den Erfolg dieser Nachahmung sind die Konsistenz, die Anhaftung an den künstlichen Zähnen und die einfache, kostengünstige Reproduzierbarkeit. Außerdem sollte die Plaquesimulation chemisch ähnliche Strukturen und Moleküle beinhalten wie die humane Plaquematrix. Für die Versuchsdurchführung ist es hilfreich, dass sie sich optisch von der Oberfläche der Zähne unterscheidet und verarbeitungsunempfindlich ist. In Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit sollte sie kostengünstig und unkompliziert in der Herstellung sein.

In der Literatur sind vielfältige Methoden beschrieben, um die humane Plaque nachzuahmen. Die Verwendung eines Titandioxidpulvers als Plaqueersatzmittel ist häufig beschrieben (Schätzle et al., 2010; Schätzle et al., 2009; Imfeld et al., 2000; Noeke, 2016). Ebenfalls gängig ist die Verwendung von Okklusionssprays (Ledder et al., 2019; Tuna et al., 2019). Der Vorteil dieser Methoden im Vergleich zu den in dieser Studie verwendeten Plaquesimulationen liegt in der Simplizität der Anwendung und dem entfallenden Herstellungsprozess. Jedoch birgt insbesondere die Anwendung von Farben die Problematik des flächigen Abplatzens des künstlichen Zahnbelags auch ohne direkten Borstenkontakt. Eine sonderlich realitätsnahe Plaquesimulation ist mit diesen Methoden nicht möglich, da die Konsistenz und Zusammensetzung der Plaquesimulation der natürlichen, humanen Plaque unähnlich ist.

Andere Studien setzten in ihren Testreihen komplexere Techniken ein, um den menschlichen Zahnbelag zu simulieren. Zum Beispiel wurde in einer Studie von Carter et al. auf Glasobjektträgern eine artifizielle Plaque unter schrittweiser Hinzugabe einer Streptococcus sanguis- und Streptococcus mutans-Kultur entwickelt (Carter et al., 2001). In dem fünf Wochen andauerndem Herstellungsprozess wurden den Bakterienkulturen immer abwechselnd entweder eine Saccharose-Lösung oder eine Phosphatpuffer-Lösung beigesetzt (Carter et al., 2001). Da die Testreihe unter aeroben Bedingungen stattfand, konnten auch nur solche Bakterienkulturen gezüchtet werden. Die Nachteile dieser Methodik liegen in der Komplexität, der Langwierigkeit des Herstellungsprozesses und der Kultivierung der Plaquesimulation auf Glasobjektträgern, die der natürlichen Morphologie der Zähne und den Zahnzwischenräumen nicht gerecht wird.

Rajeswaran et al. (2021) verwendeten für ihre Studie natürliche Zähne, die in Acrylblöcken befestigt und 24 Stunden in eine S. Mutans-Lösung getaucht wurden. Um zu testen, ob sich auf der Zahnoberfläche ein Biofilm gebildet hatte, beschickte man die Zähne nachgehend mit einem Plaqueindikator. Im Anschluss wurden die Blöcke in den Putzsimulator gespannt, der die Zähne über einen Zeitraum von 3 Monaten gereinigt und die Reinigungsleistung der Zahnbürsten sowie die Abnutzung der Borsten ermittelte.

Hope et al. (2005) nutzen im Rahmen ihrer Untersuchungen einen constant depth film fermentor (CDFF) zur Herstellung der artifiziellen Plaque (Wilson, 1999). Der CDFF ermöglicht die Herstellung artifizieller Biofilme, die der mikrobiellen Zusammensetzung humaner Plaque gleicht (Pratten und Wilson, 1999). Die Plaque wurde auf Hydroxidappatitscheiben gezüchtet und anschließend in den Approximalraum eines Typodonten eingebracht, um die Plaque-Entfernung lediglich durch die Schwingung zweier elektrischer Zahnbürsten zu messen (vgl. Abb. 27).

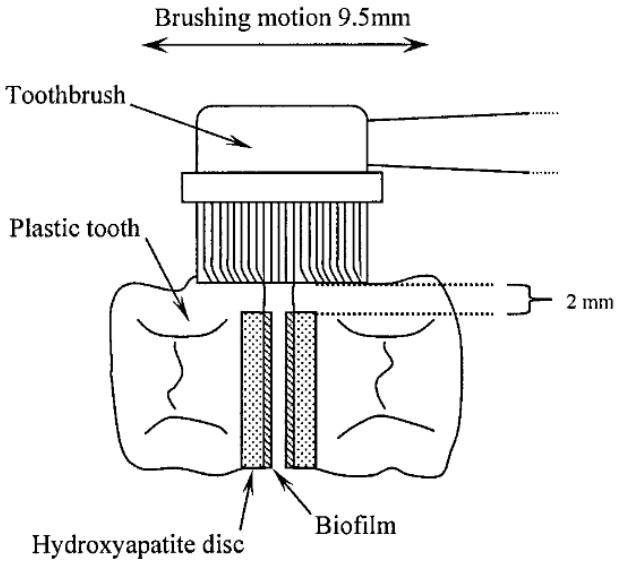

Abb. 27 Eingebrachte Hydroxylappatit-Scheiben im Interdentalraum eines Typodonten von Hope et al. (2005). Hope CK, Petrie A, Wilson M. *Efficacy of removal of sucrose-supplemented interproximal plaque by electric toothbrushes in an in vitro model.* Appl Environ Microbiol. 2005;71(2):1114-1116. Nachdruck mit freundlicher Genehmigung von der American Society for Microbiology.

Der große Nachteil dieser Testverfahren liegt in ihrem Zeitaufwand und der verhältnismäßig minimalen Menge der gewonnenen artifiziellen Plaque. Außerdem wächst der in den oben genannten Verfahren erzeugte Biofilm unter anderen Bedingungen als die humane Plaque in der Mundhöhle. So zeigten Stoodley et al., dass Biofilme, die unter starken Scherkräften wie zum Beispiel turbulenten Strömungen wuchsen, anders strukturiert sind als solche, die ohne Scherkräfte wuchsen. Unter höheren Scherkräften reifende Biofilme sind demnach adhärenter und zeigen eine stärkere Biofilmmatrix (Stoodley et al., 2002). Insbesondere die Verwendung von Biofilmen mit nur einer Spezies kann dazu führen, dass sich dieser mechanisch leichter entfernen lässt (Verkaik et al., 2010). Des Weiteren können nur kleine Mengen des künstlichen Zahnbelags erzeugt werden. Ob die Adhäsion des gezüchteten Zahnbelags auch auf Kunststoffzähnen möglich wäre, ist aufgrund der glatten Oberfläche fraglich.

Die Stärke der organischen Plaquesimulation von ORMED liegt in ihrer Beschaffenheit, die, ähnlich wie die humane, maturierte Plaque, die Anhaftung an die Kunststoffzähne problemlos realisiert. Angestrebt wurde hierbei eine Simulation nach dem Prinzip der 3-day-plaque-regrowth (Claydon und Addy, 1995), um eine aussagekräftige Menge an Zahnbelag zu gewährleisten. Hintergrund hierfür ist die Plaqueakkumulation, die in den ersten vier Tagen den stärksten Anstieg

verzeichnet (Furuichi et al., 1992). In der besagten Studie lag der prozentuale Anteil der plaquefreien Flächen an Tag 1 bei 57 %, daraufhin unterließen die Studienteilnehmer jegliche Mundhygiene. Nach vier Tagen lag der Anteil der plaquefreien Flächen nur noch bei 14 %. Nach einer Woche zeigten nur noch 7 % der Zahnflächen keine aufweisenden Beläge. An Tag 14 kamen die belagsfreien Zahnoberflächen nur noch auf 4 %.

Ein weiterer Vorteil der organischen Plaque nach Flad (2019) ist die standardisierte Konsistenz, die durch die Viskositätsprüfung am Institut für Pharmazeutischen Technologie und Biopharmazie an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster bewiesen wurde. Ein positiver Aspekt ergibt sich auch aus der Zusammensetzung, die auf anorganische Bestandteile gänzlich verzichtet. In zukünftigen Studien wäre es interessant, die organische Plaquesimulation dahingehend weiterzuentwickeln, dass sie mit der Tauch- und Trocknungsapparatur von ORMED kompatibel ist, um eine standardisierte Beschickung des Typodonten zu erreichen. Hinsichtlich der Bestandteile wäre das Hinzufügen von Saccharose, bestimmter Bakterien- und Pilzkulturen denkbar, um der humanen Plaque mit der Simulation noch näher zu kommen (Flad, 2019).

4.1.3 **Putzzyklen**

Die robotergestützte Plaque-Entfernung wurde 2011 und 2014 klinisch validiert (Staufer, 2011; Lang et al., 2014). Diese Validierung wurde mit dem Putzzyklus „lang“ durchgeführt. In der vorliegenden Studie sollte das konventionelle Langprogramm von 2010 mit dem modifizierten Putzzyklus von 2016 verglichen werden. Die Reproduzierbarkeit ist der klare Vorteil der in-vitro-Zahnbürstentests. Diese ergibt sich aus den konstant gehaltenen Parametern wie der Anpresskraft, der Putzzeit und den ausgeführten, standardisierten Bewegungsmustern. Mehrere klinische Studien bewiesen, dass ihre Probanden sich im Mittel mit einer Anpresskraft von 2,6 ± 0,7 N (Van der Weijden et al., 1996), 3,2 ± 1,0 N (Van der Weijden et al., 1998), 2,3 ± 0,7 N (Ganss et al., 2009) die Zähne putzten. Die gewählte Anpresskraft von 3 N bei dieser Studie korreliert mit den genannten Ergebnissen der oben genannten, klinischen Studien sehr gut. Die in dieser Studie verwendeten Roboterprogramme unterscheiden sich in ihrer Putzdauer und den angewandten Bewegungsmustern. Während das Langprogramm über einen Putzzyklus von 180 Sekunden verfügt, kommt das Kurzprogramm auf nur 80 Sekunden. Auf das gesamte Gebiss übertragen entspricht

dies einer Putzdauer von 320 Sekunden. Wenn man das mit der allgemein empfohlenen Putzdauer 120-180 Sekunden vergleicht, mag einem das sehr lang vorkommen. Insbesondere in Anbetracht der Tatsache, dass die meisten Menschen sich, der Empfehlungen zuwider, noch kürzer die Zähne putzen. In einer Studie von Ganss et al. (2009) erfüllten nur 25,2 % der Probanden das Kriterium der ausreichenden Putzzeit von 120 Sekunden und des angemessenen Anpresskraft von 3 N. Dabei ist eine ausreichende Putzzeit ausschlaggebend für eine effiziente Belagsentfernung. Gallagher et al. (2009) fanden in einer klinischen Studie heraus, dass nach drei Minuten Putzzeit 55 % mehr Plaque entfernt wurde als nach 30 Sekunden. Die verlängerte Putzdauer der Roboterprogramme liegt in der Standardisierung des Putzvorganges begründet. Das bedeutet, dass in den vorliegenden Programmierungen die drei unterschiedlichen (rotierend, horizontal, vertikal) Bewegungsmuster vereint werden. Ganss et al. konnten zeigen, dass Erwachsene ohne Instruktionen das rotierende Bewegungsmuster vermehrt verwendeten, dicht gefolgt von dem horizontal-schrubbenden Muster. Die wenigsten Probanden der Studie verwendeten vertikale Wischbewegungen (Ganss et al., 2009). Durch die Kombination der unterschiedlichen Bewegungsmuster ergibt sich bei den Roboterprogrammen folglich die insgesamt erhöhte Putzdauer, testet die Zahnbürsten aber dafür mit den drei gängigsten Putzmethoden. Das Putzzyklus "kurz" verfügt über die Betonung der horizontalen Bewegungen. Das bedeutet, dass die horizontale Sequenz zweimal durchgeführt wird. Auch Imfeld et. al (2000) gewichteten in ihrer Studie 2000 die horizontalen Bewegungen doppelt, da sie beim Normalverbraucher am häufigsten Anwendung findet. Winterfeld et al. (2015) fanden in einer klinischen Studie heraus, dass sich die Probanden zumeist auch nicht auf nur eine Bewegung beschränken, sondern viel mehr eine Kombination aus mehreren Bewegungsmustern ausführten. Dieses Phänomen wird durch die Roboterprogramme von ORMED ebenfalls berücksichtigt.

Durch die Verwendung des modifizierten Kurzprogrammes kann die robotergenerierte Testmethode sowohl realitätsnäher als auch zeitsparender gestaltet werden.

4.1.4 **Versuchsaufbau**

Hinsichtlich des Testens von Zahnbürsten benötigt man demnach ein Medium, dass die komplexen Bewegungen des Zähneputzens nachahmen kann. Hier eignet sich zum einen eine oder mehrere unabhängige, kalibrierte Personen oder zum anderen ein Roboter. Die robotergestützten Methoden unterscheiden sich im Groben durch die Art des genutzten Roboters. Hier gibt es bislang Studien mit 2-, 4- und 6-achsigen Robotern. Während ein 2-achsiger Roboter lediglich schrubbende Bewegungen ausführen kann, kann ein 6-Achsen Roboter horizontale, vertikale und rotierende Bewegungen ausführen. Es gilt demnach auch zu entscheiden, welche Putztechnik simuliert werden soll. Die Studienlage hierzu ist vielfältig. Zahlreiche Studien nutzen für ihre Simulationen eine 2-Achsen-Bürstmaschine (Ledder et al., 2019; Setzwein, 2002; Sander et al., 2006) aber es gibt auch Roboterprogramme, die die modifizierte Bass-Technik (Noeke, 2016) anwenden, ebenso wie die Stillmanntechnik (Völker, 2006). Auch wenn die modifizierte Bass-Technik am häufigsten empfohlen wird (Winterfeld et al., 2015), so wird sie doch nur von sehr wenigen Personen korrekt angewandt. Demnach spiegelt die ausschließliche Verwendung einer bestimmten Putztechnik nicht das Putzverhalten der Mehrheit wider. Daraus ergibt sich, wie in der vorliegenden Studie auch, die Verwendung von Kombinationsprogrammen. Die klinische Validierung der robotergenerierten Zahnbürstentests bei ORMED wurde im Jahr 2011 durch Staufer durchgeführt.

Die Simulation der Zähne wurde in dieser Studie mit Kunststoffzähnen der Firma KaVo (Biberach/Riß, Deutschland) realisiert. Die Verwendung von Kunststoffzähnen schafft nahezu identische Voraussetzungen, da die breite, anatomische Varianz klinischer Studien entfällt. Nichtsdestotrotz werden durch die Anordnung der Zähne in einer Modellbasis anatomische Merkmale wie zum Beispiel die Speesche Kurve imitiert (KaVo Dental). Ein weiterer Vorteil, der sich aus den eingespannten Kunststoffzähnen in eine Modellbasis ergibt, ist die Ausbildung von Approximalbereichen. Bei der Auswertung können diese gänzlich durch die Möglichkeit der Entfernung der Zähne aus der Basis bewertet werden. Bei Gips- oder auch Echtzahnmodellen ist dies nicht möglich. Durch die Option der Wiederverwendung der KaVo-Modelle (Biberach/Riß, Deutschland) nach erfolgreicher Reinigung stellt dies eine immer gleiche, kostengünstige und ressourcensparende Nachbildung der Zähne dar.

Die Validierung der Automatisierten Plaque-Planimetrie wurde im Jahr 2015 in einer quasi-klinischen Studie vorgenommen (Arnoldi, 2015; Egermann, 2016). Diese Auswertungsmethode bringt vielerlei Vorteile mit sich. Durch das Einspannen der einzelnen Zähne in die dafür vorgesehene Halterung, ist der Aufnahmewinkel immer nahezu identisch. Auf jeden Zahn wird immer wiederkehrend die jeweilige Schablone projiziert, sodass eine genaue Einteilung in kleinste Abschnitte ermöglicht wird. Wo das menschliche Auge Probleme hat, einzelne, kleine Bereiche voneinander abzugrenzen, erreicht die APP durch die Projektion von Planimetriefeldern dies mühelos. Anhand der Pixel-Zähl-Funktion der APP (Gängler et al. 2013) wird darauffolgend die prozentuale Reinigungsleistung erfasst. Dies hat den großen Vorteil der hohen Präzision der Ergebnisse im Vergleich zu Auswertungen durch menschliche Betrachter. Natürlich gibt es auch bei dieser Methode potenzielle Fehlerquellen. Bei unsachgemäßer Positionierung der Zähne in die dafür vorgesehene Vorrichtung werden die Planimetriefelder nicht sinngemäß auf die Zahnoberfläche projiziert. Dies kann auch schon bei minimalen Positionierungsunterschieden passieren. Hierbei hat der menschliche Betrachter einen klaren Vorteil. Weiß man jedoch um die Problematik der mangelnden Anpassungsfähigkeit der projizierten Planimetriefelder, so kann man beim Einspannen der Zähne in die Vorrichtung hierauf ein besonderes Augenmerk legen.

4.1.5 **Versuchsdurchführung**

Mit Hilfe der robotergenerierten Testmethode ist es möglich geworden, ein hoch standardisiertes in-vitro-Verfahren zu gewährleisten. Für eine erfolgreiche Testreihe müssen dennoch Rahmenbedingungen gewissenhaft eingehalten werden, um die Reproduzierbarkeit und Originalität der Ergebnisse sicher zu stellen.

Die Wichtigkeit der präzisen Ausführung besteht schon bei dem Herstellungsprozess der artifiziellen Plaque. Um die optimale Konsistenz zu gewährleiten, sind die exakten Mischverhältnisse zu beachten.

Bei der anorganischen Methode kann für die gleichmäßige Beschichtung der Modelle die dafür vorgesehene Tauch- und Trocknungsapparatur verwendet werden. Hierbei ist auf die korrekte Einspannung der Modellbasis zu achten, da sonst keine ebenmäßige Beschichtung erfolgen kann. Um identische Voraussetzungen zu schaffen, sollten beide Plaquesimulationen nicht zu lange getrocknet werden. Durch ihre

klebrige und zähflüssige Konsistenz ist die Verwendung der Tauch- und Trocknungsapparatur bei der organischen Plaquesimulation nicht möglich. Hier muss das Plaqueersatzmittel von Hand mit einem Pinsel auf die Modellzähne aufgebracht werden. Unterdessen muss darauf geachtet werden, einen möglichst gleichmäßigen Film zu erzielen. Durch diese Technik kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Plaquefilm dennoch ungleich verteilt wird.

Die exakte Positionierung der Modellbasis in die Vorrichtung des Putzroboters ist genauso essenziell wie die korrekte Ausrichtung der Zahnbürste. Das Ziel hierbei ist, dass das Borstenfeld gleichmäßig belastet wird, damit schlussendlich auch alle Filamente gleichmäßigen Kontakt mit der Zahnoberfläche erreichen. Ebenso wichtig ist die richtige, ausgeglichene Einstellung der Putzkraft. Schon minimale Abweichungen von den 150 g jeder Seite des Bürstenkopfs können zur falschen Belastung der Zahnbürste führen.

Die APP ermöglicht bei sachgerechter Anwendung eine standardisierte, pixelgenaue Auswertung der Zahnoberfläche. Dennoch können Reflexionen auf der Zahnoberfläche oder nicht immer identische Projektion der Planimetriefelder zu einer Abweichung führen. Insbesondere birgt das Einspannen der Zähne in die Vorrichtung die Gefahr, den Zahn in der falschen Position einzuspannen, sodass die Projektion fehlerhaft vorgenommen wird (Egermann, 2016).

4.2 Ergebnisse – Plaque-Entfernung

Der Versuchsaufbau ermöglicht einen Vergleich hinsichtlich der Reinigungsleistung der zwei unterschiedlichen Zahnbürsten, Plaquesimulationen und Roboterprogrammierungen. Parameter, die Einfluss auf die Reinigungseffizienz ausüben, wie zum Beispiel der Anpressdruck, die Bewegungsmuster, Zahnstellung und die Auswertungsmethode konnten konstant gehalten werden.

Generell gibt es auf dem Gebiet der in-vitro-Zahnbürstentests viele unterschiedliche Studiendesigns, die nur eine eingeschränkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander zulassen. Im Folgenden werden dennoch die ermittelten Putzleistungen anderer, aber ähnlich aufgebauten Studien miteinander verglichen.

In der Studie von Arnoldi et al. (2015) ging es zwar vorrangig um die Validierung der Automatisierten Plaque-Planimetrie, dennoch wurden hierfür auch unterschiedlichste

Zahnbürsten auf ihre Reinigungsleistung überprüft. Unter den veröffentlichten Ergebnissen findet sich die Zahnbürste „SENSITIVE“, die die lingualen und bukkalen Zahnfelder zu 95,19 % reinigte. Aufgrund der Verwendung der anorganischen Plaquesimulation durch Arnoldi lässt sich seine Studie am besten mit den Ergebnissen der anorganischen Methode dieser Arbeit vergleichen. Die Zahnbürste mit dem weichen Borstenfeld dieser Studie erreichte mit 85,8 % (bukkal) und 96,08 % (lingual) ähnlich hohe Werte.

Wenn auch in der in-vitro-Studie von Flad et al. (2019) ebenfalls die organische Plaquesimulation von ORMED verwendet wurde, so sind die Ergebnisse zu dieser Studie doch unterschiedlich. Flad et.al untersuchten die Reinigungseffizienz der Dr. Best® Original (GlaxoSmithKlein, Bühl, Deutschland) verglichen mit einer experimentellen Zahnbürste (Institute for Oral Medicine ORMED, Witten, Deutschland). Des Weiteren kamen hierbei auch verschiedene Bürstmedien zum Einsatz. Anders als in der vorliegenden Studie wurden die Zahnmodelle manuell 40 Sekunden gereinigt und schlussendlich die Reinigungseffizienz mit der Automatisierten Plaque Planimetrie prozentual ermittelt. Insgesamt wurden dabei in der Studie von Flad niedrigere Reinigungseffizienzen festgestellt. Die höchste Reinigungsleistung lag bukkal im Molarenbereich laut Flad im Median bei 51,97 %, während in der vorliegenden Arbeit die Referenzzahnbürste auf den bukkalen Zahnflächen in Verbindung mit der organischen Plaquesimulation auf 91,20 % kam. Dies rührt wahrscheinlich von der kürzeren Putzdauer im Studiendesign von Flad. Ein weiterer Grund für die stark voneinander abweichenden Ergebnisse kann auch die alleinige Verwendung der horizontalen Schrubbtechnik sein (Flad, 2019). Imfeld et. al (2000) zeigten in ihrer Studie, dass 21 von 22 Zahnbürsten bei der horizontalen Putztechnik die schlechtesten Reinigungseffizienzen aufwiesen. Der niedrigste Wert bei dieser Technik lag bei 32,0 %. Die Flachschnitt-Medium Zahnbürste von Dr. Best® erreichte laut Flad auf der bukkalen Zahnfläche im Median nur 29 %, demnach könnten die Werte auch auf die horizontale Putztechnik zurückzuführen sein. Von den prozentualen Reinigungseffizienzen lassen sich am ehesten die Dr. Best® Classic aus der Studie von Flad mit den Ergebnissen der Testzahnbürste Dontodent unter Verwendung der organischen Simulation vergleichen. Im Median lag das Ergebnis laut Flad bei der Dr. Best® Classic bei 18,70 %, die Testzahnbürste Dontodent erreichte in dieser Arbeit eine Effizienz von 15,17 % in Verbindung mit der organischen Plaquesimulation. Gleichzeitig ist dies aber auch die schwächste Reinigungsleistung,

die im Rahmen dieser Studie ermittelt wurde. Im Kontrast hierzu kam die Referenzzahnbürste in Verbindung mit der organischen Plaquesimulation auf eine Reinigungseffizienz von durchschnittlich 46,52 %.

Die oben genannten Ergebnisse zeigen deutliche Diskrepanzen zwischen den Zahnbürsten und den Plaquesimulationsmethoden innerhalb der vorliegenden Studie. Im direkten Vergleich der beiden Simulationen wurden sehr signifikant bis hochsignifikant unterschiedliche Putzergebnisse erreicht. Als besonders ungünstig auf die Reinigungsleistung wirkt sich demnach die Kombination aus der organischen Plaquesimulation und der Testzahnbürste Dontodent aus. Dies liegt wahrscheinlich in der hohen Flexibilität der Borsten und der Viskosität der organischen Plaquesimulation. Diese Faktoren begünstigten die Akkumulation der Plaque an den sogenannten „tapered filaments“ der Zahnbürste und erschwerten so die Reinigung der Zahnoberfläche. Bei der anorganischen Plaqueformulierung erzielte die Testzahnbürste Dontodent ähnlich hohe Werte wie die Referenzzahnbürste. Dennoch zeigte die Referenzzahnbürste auf den bukkalen und lingualen Zahnflächen in Verbindung mit der organischen Plaquesimulation vergleichbar gute Reinigungsleistungen wie mit der anorganischen Plaquesimulation. Das macht sehr deutlich, dass die verwendete mittelharte Flachschnittzahnbürste ungeachtet der unterschiedlichen Programme und Simulationen fortwährend gute Putzergebnisse erzielte. Im Folgenden soll diskutiert werden, inwiefern mittelharte Borsten zu einer besseren Reinigungsleistung führen können.

2000 veröffentlichten Imfeld et. al die Ergebnisse ihrer in-vitro-Studie, die den Vergleich 22 unterschiedlicher Zahnbürsten umfasst. Die hier verwendete Plaquesimulation besteht aus einem Titandioxyd-Pulver-Ethanol-Gemisch. Ebenfalls kam ein Zahnputzroboter zum Einsatz, der vertikale, kreisende und horizontale Putzbewegungen nachahmte. Der Testsitus umfasste drei Molaren, zwei Prämolaren und einen Eckzahn, wobei die Reinigungsleistung der endständigen Zähne nicht ausgewertet wurden. Die Putzdauer betrug 60 Sekunden. In den Versuchsreihen wurde immer nur ein Bewegungsmuster und Zahnmodell verwendet, was möglich machte, die unterschiedlichen Reinigungsergebnisse in Bezug auf die ausgeführte Bewegung zu beurteilen. Die Reinigungsleistungen lassen sich mit den Ergebnissen dieser Arbeit vergleichen. Beispielsweise erreichte die weiche Flachschnittzahnbürste Candida sensitiv supersoft beim kreisenden Muster ihre höchste Reinigungsleistung,

die bei 66,1 % angesiedelt ist. Die in dieser Studie verwendete weiche Flachschnitt-zahnbürste erzielte in Kombination mit der anorganischen Plaquesimulation mit 59,7 % einen vergleichbaren Wert. Die makroskopisch der mittelharten Zahnbürste in dieser Studie ähnelnden Elmex Oeco Click medium aus der Studie von Imfeld et al. bewirkt eine Reinigung bei kreisendem Bewegungsmuster von 62,2 %. Die Referenz-zahnbürste von Ormed erbrachte mit 57,5 % in Verbindung mit dem Kurzprogramm eine ähnliche Reinigungsleistung. Aus der Studie von Imfeld et al. geht hervor, dass also nicht allein härtere Borsten eine bessere Reinigung gewährleisten. So siedelten sich mehrere weiche Modelle auf den oberen Rängen an und erreichten eine höhere Effizienz als die mittelharten und harten Zahnbürsten (Imfeld et al., 2000). Wenn man die Ergebnisse der Flachschnittzahnbürsten gesammelt betrachtet, ist auffällig, dass diese eher die hinteren Ränge belegen. Dennoch kommen die Verfasser zum Ergebnis, dass man von der Verwendung von Flachschnittzahnbürsten nicht pauschal abraten sollte, da zum Beispiel die Candida sensitive supersoft bei der Zwischenraum-reinigung gute Ergebnisse erzielte (siehe Tab. 21) (Imfeld et al., 2000).

Tab. 21 Übersicht der verwendeten Zahnbürsten in der Studie von Imfeld et al. (2000) und deren Zahnflächenkontaktvermögen. Imfeld, T., Sener, B. & Simonovic, I. 2000. In-Vitro-Untersuchung der mechanischen Wirkung von handelsüblichen Handzahnbürsten. Swiss Dent. J., 110, 37-47. Nachdruck mit freundlicher Genehmigung des Swiss Dental Journal SSO.

Zahnflächenkontaktvermögen in % der approximalen Zahnflächen (mesial, distal), die von den Borsten bei horizontaler, vertikaler und kreisender Bürstbewegung bestichen wurden. Gesamtrangliste mit doppelter Gewichtung der horizontalen Bewegung.

	Horizontal: mes. & dist. %	Vertikal: mes. & dist. %	Kreisend: mes. & dist. %	Rang: Horizontal	Rang: Vertikal	Rang: Kreisend	Gesamt-rang
Candida Parodin soft	4.2	31.0	45.8	6	2	1	1
Mentadent C Contact soft	4.5	36.4	36.3	5	1	4	1
Candida Sensitive super soft	4.6	24.0	29.2	3	5	5	3
Candida Flex-Professional medium	4.5	21.5	41.4	4	6	3	4
Oral B Advantage 40 mittel/weich	7.3	25.8	19.3	1	2	16	5
Trisa flex-Active soft-medium	5.9	12.5	29.3	2	11	6	6
Dentalux Flexible soft-medium	4.0	16.6	29.2	7	8	7	7
Benefit Clinic soft-medium	2.7	16.2	44.7	11	9	2	8
Benefit Clinic medium-hard	1.8	17.6	27.4	13	7	8	9
Colgate Sensation soft Compact	2.9	10.4	20.9	10	12	15	10
Dr. Best Interdent Flex medium	1.8	24.5	12.5	13	4	19	11
Mentadent C Antiplaque medium	1.4	13.2	22.4	15	10	11	12
Colgate Sensation medium Standard	3.2	3.6	12.6	8	20	18	13
Elmex Oeco-Clic medium	0.7	6.7	23.4	17	18	9	14
Oral B Advantage Control Grip 35 mittel	2.2	7.3	8.7	12	17	20	14
Trisa eco-logic medium	3.1	1.6	3.6	9	21	22	14
Beldent Antiplaque	0.5	8.7	21.0	29	13	14	17
Candida Duro hard	0.3	6.7	21.9	21	14	12	18
Oral B Advantage Control Grip 40 mittel	1.4	5.0	13.1	16	19	17	18
Candida M-Budget	0.2	8.4	22.6	22	15	10	20
Purodent	0.5	8.2	21.7	20	16	13	20
Oral B plus indicator 40 mittel/weich	0.6	1.2	6.9	18	22	21	22

Andere Studien konnten keinen signifikanten Unterschied in Bezug auf die Reinigungsleistung unterschiedlicher Bürstenkopfkonfigurationen aufzeigen (Sripriya et al., 2007; Bergenholtz et al., 1984).

Zimmer et al. nahmen 2011 eine klinische Studie vor, um den Zusammenhang zwischen der Borstenhärte, Verletzungspotenzial und Reinigungseffizienz zu verdeutlichen. Insgesamt 120 Probanden wurden über einen Zeitraum von acht Wochen beobachtet. Die Ergebnisse decken sich mit denen dieser Studie. Dabei fiel auf, dass härtere Borsten zwar quantitativ mehr Plaque entfernten, aber auch in Relation zu einem erhöhten Gingivaverletzungspotenzial stehen (Zimmer et al., 2011). Interessant war hierbei auch, dass nach acht Wochen der mAPI in der Gruppe der harten Zahnbürsten gesunken war (Zimmer et al., 2011). Dies deckt sich auch mit den vorliegenden

Studienergebnissen: die mittelharte Referenzzahnbürste lieferte approximal durchweg eine bessere Putzleistung.

Laut einer anderen in-vitro-Studie, die sich mit der Reinigung der Zwischenräume durch handelsübliche Zahnbürsten befasst, gibt es drei Faktoren, die die approximale Zugänglichkeit einer Zahnbürste statistisch signifikant beeinflusst haben: die Borstensteifigkeit, die Anzahl der Büschel und die Gesamtlänge der Zahnbürste (Otsuka et al., 2020).

Der Testsitus bestand aus 26 unterschiedlichen, manuellen Zahnbürsten, die miteinander verglichen werden sollten, um Rückschlüsse auf nützliche Eigenschaften einer Zahnbürste ziehen zu können. Es kamen Typodonten zum Einsatz, die mit artifizieller Plaque beschichtet waren. Ein Prüfarzt putzte den ersten Molaren des Modells, jeweils 15 Sekunden von lingual und von bukkal. Die Anpresskraft lag zwischen 1,3 N und 1,9 N. Die Modellzähne wurden nachgehend entfernt und die approximale Fläche fotografiert (siehe Abb. 28). Mit Hilfe einer Pixelzählfunktion konnten die prozentuale Reinigungsleistung der Fläche ermittelt werden.

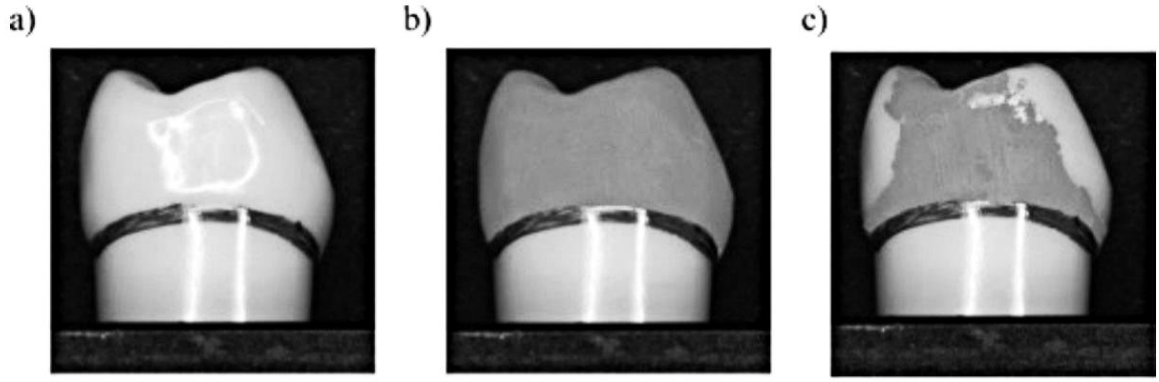

Abb. 28 Approximale Fläche des ersten unteren Molars - fotografische Dokumentation
a) vor der Beschickung mit der artifiziellen Plaque
b) nach der Beschickung mit der artifiziellen Plaque
c) nach dem Putzvorgang von Otsuka et al. 2020.
Otsuka, R., Nomura, Y., Okada, A., Uematsu, H., Nakano, M., Hikiji, K., Hanada, N. & Momoi, Y. 2020. Properties of manual toothbrush that influence on plaque removal of interproximal surface in vitro. J Dent Sci, 15, 14-21. Nachdruck mit freundlicher Genehmigung von Elsevier.

In der Arbeit schnitt eine mittelharte Flachschnittzahnbürste am besten ab und erreichte eine Plaque-Entfernungsrate von 48,4 % (vgl. Tab. 22).

Tab. 22 Übersicht über die Eigenschaften der getesteten Zahnbürsten A-J aus der Studie von Otsuka et al. (2020) (PPR = Plaqueentfernungsrate). Otsuka, R., Nomura, Y., Okada, A., Uematsu, H., Nakano, M., Hikiji, K., Hanada, N. & Momoi, Y. 2020. *Properties of manual toothbrush that influence on plaque removal of interproximal surface in vitro*. J Dent Sci, 15, 14-21. Nachdruck mit freundlicher Genehmigung von Elsevier.

Product	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
PRR (%)	48.4	47.6	47.4	44.4	44.3	44.0	42.5	42.3	40.6	39.5
Mean ± SD	± 8.2	± 7.3	± 7.5	± 16.2	± 7.5	± 4.7	± 1.5	± 8.3	± 7.6	± 8.8
Bristle stiffness	Normal	Normal	Soft	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Soft
Lenght of bristle (mm)	9.0	9.5	10.5	11.5	12.0	8.5	9.5	9.0	10.0	9.0
Head area (mm^2)	270.0	208.0	200.0	364.6	178.5	270.0	210.0	270.0	181.7	230.0
Bristle area (mm^2)	140.0	120.0	120.0	243.8	105.6	140.0	144,5	140.0	134.0	150.0
Number of tufts	24	23	24	34	17	24	24	24	22	30
Diameter of bristle (mm)	0.17	0.20	0.14	0.13	0.17	0.19	0.14	0.19	0.17	0.15
Form of brush	Flat	Flat	Dome	Sharp	Sharp	Flat	Flat	Flat	Flat	Flat
Bristling step	Without	Without	Without	With	Without	Without	With	Without	With	Without
Total length (mm)	169.0	179.0	180.0	195.0	170.0	169.0	168.0	169.0	181.0	178.0

Die Autoren beobachteten außerdem, dass kürzere Filamente und mittelharte Borsten besseren Zugang zum Approximalbereich erreichen und machten darauf aufmerksam, dass es bei ihren Ergebnissen einen Zusammenhang zwischen Anzahl der Büschel und Gesamtlänge der Zahnbürste gab. Generell besser schnitten Zahnbürsten ab, die bei einer erhöhten Anzahl der Büschel auch eine höhere Gesamtlänge aufwiesen (Otsuka et al., 2020).

4.3 Ausblick

Während bei der anorganischen Methode dieser Studie die Putzleistungen in den Zwischenräumen und das insbesondere mit der Referenzzahnbürste durchgängig mehr als 50 % erreichten, war dies bei der organischen Methode nie der Fall.

Die organische Plaquesimulation könnte aufgrund ihrer Eigenschaften sehr gut zur Beurteilung von approximaler Belagsentfernung herangezogen werden. Mit ihrer hochviskösen und klebrigen Struktur ähnelt sie der einer maturierten Plaque. Gerade im Hinblick auf große Interdentalräume durch die fehlende Ausbildung einer Interdentalpapille, wäre die Verwendung der organischen Plaquesimulation eine gute Lösung, da ihre Eigenschaften das Ausfüllen der Interdentalräume möglich machen. Thevissen et al. (1987) fanden heraus, dass eine 98 Stunden lang gereifte Plaque nach einmaligem Zähneputzen noch nicht einmal von instruierten und supervidierten Zahnmedizinstudenten nach einmaligem Zähneputzen zu weniger als 50 % entfernt werden konnte. Gerade bei parodontal vorgeschädigten Patienten mit weiten Zahnzwischenräumen sammelte sich laut einer Studie von Bergenholtz et al. (1984) signifikant mehr Plaque als bei Patienten ohne parodontale Vorgeschichte. Denkbar wäre es also, die organische Plaque als Simulationsmethode im Bereich der Testung von Produkten, die für die Zwischenraumpflege gedacht sind, einzusetzen. In der robotergenerierten Methode konnte beobachtet werden, dass die Reinigungsergebnisse beider Zahnbürsten bei der organischen Plaquesimulation Streuungen unterlagen. Bei der Testzahnbürste Dontodent fielen diese deutlich höher aus als bei der Referenzzahnbürste, da ihre weichen, sehr flexiblen Filamente zum Teil nicht in der Lage waren, die Oberfläche von der viskösen Plaque zu befreien. In der Studie von Flad et al., in der das erste Mal die organische Plaque Anwendung fand, sind keine so hohen Streuungen beobachtet worden wie in dieser vorliegenden, robotergenerierten Testreihe. Ein Grund dafür könnte sein, dass in der Studie von Flad et al. Bürstmedien oder mit Wasser angefeuchtete Zahnbürsten verwendet wurden, die das Entfernen der hochviskösen Plaque auf der Zahnoberfläche wahrscheinlich erleichterte. Des Weiteren wurden in der Versuchsreihe nach Flad die KaVo-Modelle nach dem Reinigungsvorgang für 10 Sekunden in ein Wasserbecken getaucht, um gelöste Plaque-Anteile von der Zahnoberfläche zu lösen, bevor die Zähne von der APP ausgelesen wurden. Denkbar wäre es demnach, dieses Vorgehen in die robotergestützte Verfahren zu integrieren. Schlussendlich wird deutlich, dass die organische

Plaquesimulation nach Flad nicht problemlos in die robotergestützte Testmethode übertragen werden kann.

Pepin et. al (2020) entwickelten die organische Plaquesimulation hinsichtlich ihrer Zusammensetzung weiter. Diese modifizierte organische Plaquesimulation konnte in das standardisierte Testverfahren von ORMED integriert und in einer klinischen Studie validiert werden.

Mit Hinblick auf die Roboterprogramme dieser Studie, ist kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Reinigungsleistung zwischen dem konventionellem Langprogramm, welches 180 Sekunden misst und dem modifizierten Kurzprogramm, das auf 80 Sekunden kommt, festzustellen. Demnach kann für zukünftige Studien das kurze Programm problemlos zum Einsatz kommen.

5 Zusammenfassung

Diese Studie wurde mit dem Ziel durchgeführt, unterschiedliche Methoden des standardisierten, robotergestützten Testverfahren zur Beurteilung der Reinigungseffizienz von Zahnbürsten miteinander zu vergleichen. Hierfür wurden im Rahmen der Testreihe jeweils zwei unterschiedliche Plaquesimulationen, Zahnbürsten und Roboterprogramme verwendet.

Beide Plaquesimulationen wurden im Institute for Oral Medicine in Witten entwickelt. Während die anorganische Simulationsmethode im Rahmen einer klinischen Validierung der robotergestützten Testmethode von ORMED Verwendung fand, wurde die organische Plaquesimulation in der vorliegenden Studie erstmalig in das robotergenerierte Testverfahren integriert und sollte mit der konventionellen Plaquesimulation verglichen werden.

Bei den beiden untersuchten Zahnbürsten handelte es sich zum einen um die weiche Zahnbürste „3324 Adult Brush Sensitive“ von M+C Schiffer, Neustadt (Wied) und zum anderen um die mittelharte Referenzzahnbürste von ORMED (Institute for Oral Medicine, Witten, Deutschland). Des Weiteren wurden die Putzzyklen entweder mit dem konventionellen Roboterprogramm Putzzyklus "lang" oder mit dem verkürzten Programm Putzzyklus "kurz" durchgeführt.

Simulationsmodelle der Firma KaVo (Biberach, Deutschland) wurden mit den Kunststoffzähnen bestückt und je nach Methode entweder mit der organischen oder anorganischen Plaquesimulation bestrichen. Durch den 6-achsigen Zahnputzroboter der Firma Kawasaki, Japan wurden die Kunststoffzähne nachfolgend mit einer Anpresskraft von 3 N mit horizontalen, vertikalen und rotierenden Bewegungsmustern gereinigt. Insgesamt durchliefen jeweils 20 Zahnbürsten das konventionelle Langprogramm (180 Sekunden) des Roboters, weitere 20 das Kurzprogramm (80 Sekunden). Insgesamt durchliefen 20 Putzzyklen in Kombination mit der organischen Methode und 20 Zyklen mit der anorganischen Plaquesimulation. Die Plaqueentfernung wurde prozentual mit Hilfe der APP (Automatisierte Plaque-Planimetrie) ermittelt und statistisch verglichen (Mann-Whitney Test, deskriptive Statistiken).

Unter Anwendung der organischen Plaquesimulation wurden durchweg niedrigere Reinigungsleistungen erreicht. Der Median lag hierbei auf allen Flächen bei 28,8 %, während in der anorganischen Methode 61,58 % erreicht wurden. Auch zeigten die Ergebnisse der organischen Methode Streuungen, die in der anorganischen Methode in diesem Ausmaß nicht vorkamen. Die Dontodent-Zahnbürste war insbesondere in Kombination mit der organischen Plaquesimulation, aber auch in der anorganischen

Versuchsreihe der Referenzzahnbürste auf allen Zahnfeldern unterlegen. Im Median erreichte sie ungeachtet der Plaquesimulationsmethode 43,1 %, die Referenzzahnbürste erreichte hingegen einen Wert von 57,5 %. Hinsichtlich der Roboterprogramme konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die Reinigungswerte lagen hierbei ungeachtet der verwendeten Zahnbürste und Plaquesimulation bei 55,3 % bei dem kürzeren Programm Putzzyklus "kurz" und 55,7 % bei dem konventionellen Langprogramm Putzzyklus "lang".

Die deskriptiv-statistischen Auswertungen zeigten, dass insbesondere die Kombination aus Dontodent-Zahnbürste und der organischen Plaquesimulation einen negativen Einfluss auf die Reinigungsleistung ausübten. Diese ungünstige Kombination wird in der Wechselwirkung deutlich, die auf den bukkalen Zahnfeldern festgestellt wurde: Während die Reinigungseffizienz der Dontodent-Zahnbürste unter der organischen Methode nur auf 10,4 % kam, erreichte die gleiche Zahnbürste mit der anorganischen Plaquesimulation 85,8 %. Es ist davon auszugehen, dass die hohe Flexibilität der Dontodent Zahnbürste noch einmal durch die „tapered“ Filamente, also zum Ende hin konisch auslaufende Enden, verstärkt wurde und sich das in Hinblick auf die klebrige, einer 3-day-plaque-regrowth nachempfundenen Plaque als ungünstige Eigenschaft herausgestellt hat. Nach den Ergebnissen dieser Arbeit kann die organische Plaquesimulation die anorganische Simulation in der robotergestützten Testmethode nicht ersetzen. Hierzu sollte die Konsistenz der organischen Plaquesimulation dahingehend verändert werden, dass eine gleichmäßige Beschichtung der Modelle durch die Tauchapparatur möglich wird.

Außerdem unterstützen die Ergebnisse dieser Arbeit die These, dass ein weiches Borstenfeld weniger Plaque entfernt als ein mittelhartes Borstenfeld. Diese Beobachtung wurde sowohl mit der anorganischen als auch mit der organischen Plaque gemacht. Nach den Ergebnissen dieser Arbeit sind die beiden Roboterprogramme als gleichwertig zu erachten. Das konventionelle Langprogramm ist dem Kurzprogramm zwar auf fast allen Flächen minimal überlegen, dieser Unterschied wurde jedoch als nicht signifikant errechnet. Demnach kann das modifizierte Programm 01/2016 problemlos das Programm 10/2012 ersetzen und die hochstandardisierte, robotergenerierte Testmethode von Zahnbürsten mit einer verkürzten Putzzeit noch realistischer gestalten, ohne dabei auf die häufigsten Bewegungsmuster beim Zähneputzen verzichten zu müssen.

6 Summary

This study was carried out with the aim of comparing different methods of the standardized, robot-assisted test procedure for assessing the cleaning efficiency of toothbrushes. For this purpose, two different plaque simulations, toothbrushes and robot programs were used as part of the test series.

Both plaque simulations were developped at the Institute for Oral Medicine in Witten. While the inorganic simulation method was used as part of a clinical validation of ORMED's robot-assisted test method, the organic plaque simulation was integrated into the robot-generated test procedure for the first time in the present study in order to be compared with conventional plaque simulation.

The two toothbrushes examined were the soft toothbrush "3324 Adult Brush Sensitive" from M+C Schiffer, Neustadt (Wied) and the medium-hard reference toothbrush from ORMED (Institute for Oral Medicine, Witten, Germany). Furthermore, the cleaning cycles were carried out either with the conventional robot program Brushing cycle "long" or with the shortened program Brushing cycle "short".

Teeth were coated with either the organic or inorganic artificial plaque and then cleaned with a contact force of 3 N with horizontal, vertical and rotating movement patterns using the 6-axis tooth cleaning robot from Kawasaki, Japan. A total of 20 toothbrushes went through the robot's conventional long program (180 seconds) and another 20 the short program (80 seconds). A total of 20 cleaning cycles were carried out in combination with the organic method and 20 cycles with the inorganic plaque simulation. The percentage of plaque removal was determined using APP (automated plaque planimetry) and compared statistically (Mann-Whitney test, descriptive statistics).

Consistently lower cleaning efficiencies were achieved using organic plaque simulation. The median was 28.8 % on all surfaces, while 61.58 % was achieved with the inorganic method. The results of the organic method also showed deviations that did not occur to this extent in the inorganic method. The Dontodent toothbrush was inferior to the reference toothbrush on all tooth fields, especially in combination with the organic plaque simulation, but also in the inorganic test series. It reached a median of 43.1 %, regardless of the plaque simulation method, while the reference toothbrush

reached a value of 57.5 %. With regard to the robot programs, no significant differences could be determined. Regardless of the toothbrush and plaque simulation used, the cleaning values were 55.3 % with the shorter program "Putzzyklus kurz" and 55.7 % with the conventional long program "Putzzyklus lang".

The descriptive-statistical evaluations showed, that the combination of the Dontodent toothbrush and the organic plaque simulation in particular had a negative impact on the cleaning performance. This unfavorable combination is evident in the interaction observed on the buccal tooth field: while the cleaning efficiency of the Dontodent toothbrush under the organic method only came to 10.4 %, the same toothbrush with the inorganic plaque simulation reached 85.8 %. It can be assumed, that the high flexibility of the Dontodent toothbrush was further reinforced by the "tapered" filaments, i.e. ends tapered towards the end, and that this turned out to be unfavorable with regard to the sticky plaque, which is based on a 3-days-plaque-regrowth property. According to the results of this work, the organic plaque simulation cannot replace the inorganic simulation in the robotic test method. For this purpose, the consistency of the organic plaque simulation should be changed in such a way that the models can be evenly coated by the immersion apparatus.

In addition, the results of this work support the thesis that a soft bristle field removes less plaque than a medium-hard bristle field. This observation was made with both inorganic and organic plaque. According to the results of this work, the two robot programs can be considered equivalent. Although the conventional long program is slightly superior to the short program in almost all areas, this difference was not calculated as significant. Accordingly, the modified 01/2016 program can easily replace the 10/2012 program and make the highly standardized, robot-generated test method for toothbrushes even more realistic with a shorter brushing time.

7 Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung aller Studienparameter 41

Tab. 2 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen organischer und anorganischer Plaquesimulation bei der Reinigungsleistung. Die Ergebnisse beider Zahnbürsten und Putzzyklen werden zusammengefasst betrachtet. 47

Tab. 3 Deskriptive Statistiken der Reinigungsleistung (in %) bei organischer und anorganischer Plaquesimulation. Die Ergebnisse beider Zahnbürsten und Putzzyklen werden zusammengefasst betrachtet. 49

Tab. 4 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen **organischer** und **anorganischer Plaquesimulation** bei der **Referenzzahnbürste** auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total. Die beiden Putzzyklen werden zusammengefasst betrachtet. 52

Tab. 5 Deskriptive Statistiken der Reinigungsleistung (in %) bei organischer und anorganischer Plaquesimulation. Die Testzahnbürste Dontodent wird gesondert von der Referenzzahnbürste unter Verwendung der organischen bzw. anorganischen Plaquesimulation auf den Feldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Bukkal, W1+W2 Distal, Total, betrachtet. Die Daten beider Putzzyklen werden zusammengefasst. 53

Tab. 6 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen **organischer** und **anorganischer Plaquesimulation** bei **dem Putzzyklus „lang“** auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Bukkal, W1+W2 Distal, Total. Die Reinigungsleistung beider Zahnbürsten wird zusammengefasst. Die erzielten Werte des Putzzyklus „kurz“ werden nicht berücksichtigt. 55

Tab. 7 Deskriptive Statistiken der Reinigungsleistung (in %) bei organischer und anorganischer Plaquesimulation für die beiden Putzzyklen auf den Feldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Bukkal, W1+W2 Distal, Total. Die Reinigungsleistung unter dem Putzzyklus „lang“ und Putzzyklus „kurz“ wird gesondert betrachtet. Die beiden Zahnbürsten werden zusammengefasst betrachtet. 56

Tab. 8 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen Testzahnbürste Dontodent und Referenzzahnbürste bei der Reinigungsleistung. Die Datensätze beider Putzzyklen und Plaquesimulationen werden zusammengefasst auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal betrachtet. 59

Tab. 9 Deskriptive Statistiken der Reinigungsleistung (in %) auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total bei der Dontodent- und Referenzzahnbürste. Es werden beide Zahnbürsten gesondert betrachtet, während die Datensätze beider verwendeten Putzzyklen und Plaquesimulationen zusammengefasst werden. 60

Tab. 10 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen Dontodent- und Referenzzahnbürste bei der **organischen** Plaquesimulation auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total. Die organische Plaquesimulation wird gesondert betrachtet, während die Datensätze beider Putzzyklen zusammengefasst werden. 63

Tab. 11 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen Dontodent- und Referenzzahnbürste bei der **anorganischen** Plaquesimulation auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total. Die anorganische Plaquesimulation wird gesondert betrachtet, während die Datensätze beider Putzzyklen zusammengefasst werden. 64

Tab. 12 Deskriptive Statistiken der Reinigungsleistung (in %) der beiden Zahnbürsten auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total bei **organischer** und **anorganischer** Plaquesimulation. Die Datensätze beider Putzzyklen werden zusammengefasst betrachtet. 65

Tab. 13 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen Testzahnbürste Dontodent- und Referenzzahnbürste auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total bei dem Putzzyklus „lang“. Die Ergebnisse des Putzzyklus „kurz“ werden nicht berücksichtigt. Beide Plaquesimulationsmethoden werden zusammengefasst betrachtet. 67

Tab. 14 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen Test- und Referenzzahnbürste auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total bei dem Putzzyklus „kurz“. Die Ergebnisse des Putzzyklus „lang“ werden nicht berücksichtigt. Beide Plaquesimulationsmethoden werden zusammengefasst betrachtet. 68

Tab. 15 Deskriptive Statistiken der Reinigungsleistung (in %) der beiden Zahnbürsten auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total bei den Programmen Putzzyklus "lang" und Putzzyklus "kurz". Die Datensätze der beiden Plaquesimulationsmethoden werden zusammengefasst betrachtet. 69

Tab. 16 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen den Programmen Putzzyklus "lang" und Putzzyklus "kurz" bei der Reinigungsleistung auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total. Die Datensätze der beiden Plaquesimulationsmethoden und der Zahnbürsten werden zusammengefasst betrachtet. 72

Tab. 17 Deskriptive Statistiken der Reinigungsleistung (in %) auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total bei den Programmen Putzzyklus "lang" und Putzzyklus „kurz“. Die Datensätze der beiden Plaquesimulationsmethoden und Zahnbürsten werden zusammengefasst betrachtet. 73

Tab. 18 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen dem Putzzyklus „lang“ und Putzzyklus „kurz“ bei **organischer** Plaquesimulation auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total. Die Datensätze der organischen Plaquesimulation werden, wie die Putzzyklen auch, gesondert betrachtet, während die Ergebnisse beider Zahnbürsten zusammengefasst werden. 76

Tab. 19 Mann-Whitney-U-Test auf Unterschied zwischen dem Putzzyklus „lang“ und Putzzyklus „kurz“ bei **anorganischer** Plaquesimulation auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total. Die Datensätze der anorganischen Plaquesimulation werden, wie auch die Putzzyklen, gesondert betrachtet, während die Ergebnisse beider Zahnbürsten zusammengefasst werden. 77

Tab. 20 Deskriptive Statistiken der Reinigungsleistung (in %) der Programme Putzzyklus "lang" und Putzzyklus „kurz“ auf den Zahnfeldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total. Die Putzergebnisse unter den beiden Plaquesimulationen werden gesondert betrachtet. Die Ergebnisse beider Zahnbürsten werden zusammengefasst. 78

Tab. 21 Übersicht der verwendeten Zahnbürsten in der Studie von Imfeld et al. (2000) und deren Zahnflächenkontaktvermögen. Imfeld, T., Sener, B. & Simonovic, I. 2000. In-Vitro-Untersuchung der mechanischen Wirkung von handelsüblichen Handzahnbürsten. Swiss Dent. J., 110, 37-47. Nachdruck mit freundlicher Genehmigung des Swiss Dental Journal SSO. 96

Tab. 22 Übersicht über die Eigenschaften der getesteten Zahnbürsten A-J aus der Studie von Otsuka et al. (2020) (PPR = Plaqueentfernungsrate). Otsuka, R., Nomura, Y., Okada, A., Uematsu, H., Nakano, M., Hikiji, K., Hanada, N. & Momoi, Y. 2020*. Properties of manual toothbrush that influence on plaque removal of interproximal surface in vitro*. J Dent Sci, 15, 14-21. Nachdruck mit freundlicher Genehmigung von Elsevier. 98

8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Die Kariesentstehung durch das Zusammenspiel der vier Faktoren nach König.....11

Abb. 2 Der Zahnputzroboter mit dem fixierten Modellträger (Lang et al., 2014).....30

Abb. 3 KaVo-Modell aus unterschiedlichen Perspektiven (Biberach, Deutschland).....31

Abb. 4 Planimetrische Felder A-I, W (Gaengler et al., 2013).....32

Abb. 5 Planimetrische Felder X-Z, W1, W2 (Gaengler et al., 2013).....32

Abb. 6 Die Testzahnbürste Dontodent in 3 Ansichten.....34

Abb. 7 Die Referenzzahnbürste in 3 Ansichten.....34

Abb. 8 Beschichtete Kunststoffzähne mit der organischen Plaquesimulation nach Flad....35

Abb. 9 Anorganische Methode – Übersicht.....38

Abb. 10 Organische Methode – Übersicht.....39

Abb. 11 Planimetriefelder der Glattflächen (Egermann,2016).....40

Abb. 12 Planimetriefelder des Approximalraumes (Egermann,2016).....40

Abb. 13 Statistische Auswertung: Testung der Haupteffekte - ein Überblick.....43

Abb. 14 Übersicht der verwendeten Abkürzungen.....45

Abb. 15 Übersicht über die Auswertung der Reinigungsergebnisse beider Plaque-simulationen.....46

Abb. 16 Gegenüberstellung der Plaque-Entfernung beider Plaque-Simulationsmethoden auf den Feldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual. Die Grafik umfasst die Reinigungsleistung beider Zahnbürsten und Putzzyklen.....51

Abb. 17 Gegenüberstellung der Plaqueentfernung beider Plaque- Simulationsmethoden auf den Feldern W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal, Total. Die Grafik umfasst die Reinigungsleistung beider Zahnbürsten und Putzzyklen.....51

Abb. 18 Übersicht über die Auswertung der Reinigungsergebnisse beider Zahnbürsten.....58

Abb. 19 Plaqueentfernung Testzahnbürste Dontodent versus Referenzzahnbürste auf den Feldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual. Die Datensätze beider Putzzyklen und Plaquesimulationen werden zusammengefasst betrachtet. Auffallend sind hier die hohen Streuungen, welche Rückschlüsse auf einen inhomogenen Datensatz ermöglichen.....62

Abb. 20 Plaqueentfernung Testzahnbürste Dontodent versus Referenzzahnbürste auf den Feldern W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal,Total. Die Datensätze

beider Putzzyklen und Plaquesimulationen werden zusammengefasst betrachtet. Auffallend sind hier die hohen Streuungen, welche Rückschlüsse auf einen inhomogenen Datensatz ermöglichen. 62

Abb. 21 Übersicht über die Auswertung der Reinigungsergebnisse der Putzzyklen. 71

Abb. 22 Grafisch-statistische Darstellung der Reinigungsleistung bei Putzzyklus "lang" (ORMED 10/2012) und Putzzyklus "kurz" (ORMED 01/2016) auf den Feldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual. Die Datensätze beider Plaquesimulationsmethoden und Zahnbürsten werden zusammengefasst. Auffallend sind die Streuungen, die Hinweis auf einen inhomogenen Datensatz geben. 75

Abb. 23 Grafisch-statistische Darstellung der Reinigungsleistung bei Putzzyklus "lang" und Putzzyklus "kurz" auf den Feldern W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Distal,Total. Die Datensätze beider Plaquesimulationsmethoden und Zahnbürsten werden zusammengefasst. Auffallend sind hier die Streuungen, die Hinweis auf einen inhomogenen Datensatz geben 75

Abb. 24 Grafisch-statistische Darstellung der Reinigungsleistung der **anorganischen Methode** unter dem Putzzylus „lang“ (ORMED 10/2012) gegenüber dem Putzzyklus „kurz“ (ORMED 01/2016) auf den Feldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Bukkal, Total. Die Datensätze der Zahnbürsten werden zusammengefasst dargestellt. 79

Abb. 25 Grafisch-statistische Darstellung der Reinigungsleistung der **organischen Methode** unter dem Putzzyklus „lang“ (ORMED 10/2012) gegenüber dem Putzzyklus „kurz“ (ORMED 01/2016) auf den Feldern Bukkal, Lingual, Mesial, Distal, ABCDF Bukkal, ABCDF Lingual, W Bukkal, W Lingual, W1+W2 Mesial, W1+W2 Bukkal, Total. Die Datensätze der beiden Zahnbürsten werden zusammengefasst dargestellt. Auffallend im Gegensatz zu der anorganischen Plaquesimulation sind in der organischem Methode die großen Streuungen. 80

Abb. 26 Nahaufnahme der konischen Filamente der Testzahnbürste Dontodent (linkes Bild) und der abgerundeten Borsten der Referenzzahnbürste (rechtes Bild) 83

Abb. 27 Eingebrachte Hydroxylappatit-Scheiben im Interdentalraum eines Typodonten von Hope et al. (2005). Hope CK, Petrie A, Wilson M. *Efficacy of removal of sucrose-supplemented interproximal plaque by electric toothbrushes in an in vitro model.* Appl Environ Microbiol. 2005;71(2):1114-1116. Nachdruck mit freundlicher Genehmigung von der American Society for Microbiology. 87

Abb. 28 Approximale Fläche des ersten unteren Molars - fotografische Dokumentation 97

9 Literaturverzeichnis

Arnold, M. & Trost, G. 1972. *Über die Abhängigkeit des Putzeffektes von verschieden Formen des Bürstenkopfes*. Dtsch Stomatol, 22, 46-53.

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

Association, ADA 2019*. Oral Health Topics- Toothbrushes.* Department of Scientific Information, Evidence Synthesis & Translation Research, ADA Science & Research Institute, LLC. https://www.ada.org/en/member-center/oral-health-topics/toothbrushes (aufgerufen am 10.02.2021)

Axelsson, P. & Lindhe, J. 1978. *Effect of controlled oral hygiene procedures on caries and periodontal disease in adults.* J Clin Periodontol, 5, 133-151.

Baldys, L. A. 2007. *Studie zur standardisierten Analyse der Reinigungseffektivität von elektrischen Zahnbürsten*. Zahnmed. Diss. Westfälische Wilhelms-Universität Münster.

Bartold, P. M. & Van Dyke, T. E. 2019. *An appraisal of the role of specific bacteria in the initial pathogenesis of periodontitis*. J Clin Periodontol. 2019;46(1):6-11

Bass, C. 1957. *Some important developments presently influencing dental health in America*. J Louisiana Med Soc, 109, 201.

Bergenholtz, A., Gustafsson, L. B., Segerlund, N., Hagberg, C. & Östby, P. N. 1984. *Role of brushing technique and toothbrush design in plaque removal*. Scand J Dent Res, 92, 344-351.

Bernimoulin, J. P. 2003. *Recent concepts in plaque formation*. J Clin Periodontol, 30, 7-9.

Borgström, M. K., Edwardsson, S., Sullivan, Å. & Svensäter, G. 2000*. Dental plaque mass and acid production activity of the microbiota on teeth*. Eur J Oral Sci, 108, 412-417.

Brandini, D. A., De Sousa, A., Trevisan, C., Pinelli, L., Santos, S. D. C., Pedrini, D. & Panzarini, S. 2011. *Noncarious cervical lesions and their association with toothbrushing practices: in vivo evaluation*. Oper Dent, 36, 581-589.

Breitenmoser, J., Mörmann, W. & Mühlemann, H. R. 1979. *Damaging effects of toothbrush bristle end form on gingiva*. J Periodontol, 50, 212-216.

Caporossi, L. S., Dutra, D. a. M., Martins, M. R., Prochnow, E. P., Moreira, C. H. C. & Kantorski, K. Z. 2016. *Combined effect of end-rounded versus tapered bristles and a dentifrice on plaque removal and gingival abrasion.* Braz Oral Res, 30.

Carter, K., Landini, G. & Walmsley, A. D. 2001. *Plaque removal characteristics of electric toothbrushes using an in vitro plaque model.* J Clin Periodontol, 28, 1045-1049.

Christou, V., Timmerman, M. F., Van Der Velden, U. & Van Der Weijden, F. A. 1998. *Comparison of different approaches of interdental oral hygiene: interdental brushes versus dental floss*. J Periodontol, 69, 759-764.

Claydon, N. & Addy, M. 1995. *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, 22, 670-673.

Curtis, M. A., Diaz, P. I. & Van Dyke, T. E. 2020. *The role of the microbiota in periodontal disease.* Periodontol 2000, 83, 14-25.

Danser, M., Timmerman, M., Jzerman, Y., Piscaer, M., Van Der Velden, U. & Van Der Weijden, G. 2003. *Plaque removal with a novel manual toothbrush (X-Active) and the Braun Oral-B 3D Plaque Remover.* J Clinical Periodontol, 30, 138-144.

Devine, D. A., Marsh, P. D. & Meade, J. 2015. *Modulation of host responses by oral commensal bacteria*. Oral Microbiol, 7, 26941.

Dewhirst, F. E., Chen, T., Izard, J., Paster, B. J., Tanner, A. C., Yu, W.-H., Lakshmanan, A. & Wade, W. G. 2010. *The human oral microbiome.* J Bacteriol, 192, 5002-5017.

Dumitrescu, A. L., & Kawamura, M. (2010*). Etiology of periodontal disease: dental plaque and calculus. In Etiology and pathogenesis of periodontal disease.* Springer*,* 1-38.

Dyer, D., Addy, M. & Newcombe, R. 2000. *Studies in vitro of abrasion by different manual toothbrush heads and a standard toothpaste*. J Clin Periodontol, 27, 99-103.

Dzakovich, J. J. & Oslak, R. R. 2008*. In vitro reproduction of noncarious cervical lesions.* J Prosthet Dent, 100, 1-10.

Egermann, S. 2016*. Zahnbürstenentwicklungen im vergleichenden Robotertest mit quasi-klinischer Auswertung*. Zahnmed. Dissertation, Witten/Herdecke.

Eggert, F., Drewell, L., Bigelow, J., Speck, J. & Goldner, M. 1991. *The pH of gingival crevices and periodontal pockets in children, teenagers and adults*. Arch Oral Biol, 36, 233-238.

EHOMD, *expanded Human Oral Microbiome Database*. 2023. http://homd.org/. (aufgerufen am 27.09.2023).

Ernst, C.-P., Willershausen, B., Driesen, G., Warren, P. & Hilfinger, P. 1997. *A robot system for evaluating plaque removal efficiency of toothbrushes in vitro.* Quintessence Int, 28.

Fejerskov, O. 2004. *Changing paradigms in concepts on dental caries: consequences for oral health care*. Caries Res, 38, 182-191.

Flad, A.-K. L. 2019. *Zahnmedizinische Plaque-Simulation zur Prüfung von Mund-hygiene-Produkten*. Zahnmed. Dissertation, Witten Herdecke.

Fraleigh, C. M., Mc Elhaney, J. H. & Heiser, R. A. 1967. *Toothbrushing force study.* J Dent Res, 46, 209-214.

Furuichi, Y., Lindhe, J., Ramberg, P. & Volpe, A. R. 1992. *Patterns of de novo plaque formation in the human dentition*. J Clin Periodontol, 19, 423-433.

Gallagher, A., Sowinski, J., Bowman, J., Barrett, K., Lowe, S., Patel, K., Bosma, M. L. & Creeth, J. E. 2009. *The effect of brushing time and dentifrice on dental plaque removal in vivo.* American Dental Hygienists' Association, 83, 111-116.

Gängler, P., Lang, T. & Jennes, B. 2013. Computer-assisted planimetrical plaque assessment of robot tested toothbrushing. J Dent Res, 92.

Gängler, P. & Arnold, W. H. 2007. *Clinical aspects of tooth diseases and their treatment. Handbook of Biomineralization: Biological Aspects and Structure Formation*, 203-222.

Ganss, C., Schlueter, N., Preiss, S. & Klimek, J. 2009. *Tooth brushing habits in uninstructed adults—frequency, technique, duration and force*. Clin Oral Investig,13, 203-208.

Gjermo, P. & Flötra, L. 1970. *The effect of different methods of interdental cleaning.* J Periodontal Res, 5, 230-236.

Graetz, C. 2018. *„Häusliches mechanisches Biofilmmanagement in der Prävention und Therapie der Gingivitis “.* El-Sayed, K. F., Sälzer, C. Dörfer (Hrsg.). AWMF Online: https://register.awmf.org/assets/guidelines/083-022l_S3_Haeusliches-mechanisches-Biofilmmanagement-Praevention-Therapie-Gingivitis_2021-02.pdf (aufgerufen am 02.09.2023)

Hajishengallis, G., Darveau, R. P. & Curtis, M. A. 2012. *The keystone-pathogen hypothesis.* Nat Rev Microbiol, 10, 717-725.

Hajishengallis, G., Liang, S., Payne, M. A., Hashim, A., Jotwani, R., Eskan, M. A., Mcintosh, M. L., Alsam, A., Kirkwood, K. L. & Lambris, J. D. 2011. *Low-abundance biofilm species orchestrates inflammatory periodontal disease through the commensal microbiota and complement.* Cell Host Microbe,10, 497-506.

Hajishengallis, G., & Lamont, R. J. (2012). *Beyond the red complex and into more complexity: the polymicrobial synergy and dysbiosis (PSD) model of periodontal disease etiology*. Mol. Oral Microbiol., *27*(6), 409-419.

Hannig, C., Hannig, M. & Attin, T. 2005. *Enzymes in the acquired enamel pellicle.* Eur J Oral Sci, 113, 2-13.

Hannig, M. 1999. *Ultrastructural investigation of pellicle morphogenesis at two different intraoral sites during a 24-h period*. Clin Oral Investig, 3, 88-95.

Hannig, M. & Balz, M. 1999. *Influence of in vivo formed salivary pellicle on enamel erosion*. Caries Res, 33, 372-379.

Hannig, M. & Joiner, A. 2006. *The structure, function and properties of the acquired pellicle.* Monogr Oral Sci, 19, 29.

Hara AT, Zero DT. *The caries environment: saliva, pellicle, diet, and hard tissue ultrastructure.* Dent Clin North Am. 2010;54(3):455-467.

Harris, R., Nicoll, A. D., Adair, P. M. & Pine, C. M. 2004. *Risk factors for dental caries in young children: a systematic review of the literature.* Community Dent Health, 21, 71-85.

Harnacke, D., Mitter, S., Lehner, M., Munzert, J., & Deinzer, R. (2012). *Improving oral hygiene skills by computer-based training: a randomized controlled comparison of the modified Bass and the Fones techniques.* PloS one, 7(5), e37072.

Hayes, M., Carter, E. & Griffiths, S. 1983. *The acidogenic microbial composition of dental plaque from caries-free and caries-prone people*. Arch Oral Biol, 28, 381-386.

Hellwig, E., Klimek, J. & Attin, T. 2013. *Einführung in die Zahnerhaltung,* Deutscher Ärzteverlag. 15-30

Hennequin-Hoenderdos, N., Slot, D., Van Der Sluijs, E., Adam, R., Grender, J. & Van Der Weijden, G. 2017. *The effects of different levels of brush end rounding on gingival abrasion: a double-blind randomized clinical trial*. Int J Dent Hyg, 15, 335-344.

Hojo, K., Nagaoka, S., Ohshima, T. & Maeda, N. 2009*. Bacterial interactions in dental biofilm development.* J Dent Res, 88, 982-990.

Hoogteijling, F., Hennequin-Hoenderdos, N., Van Der Weijden, G. & Slot, D. 2018. *The effect of tapered toothbrush filaments compared to end-rounded filaments on dental plaque, gingivitis and gingival abrasion: a systematic review and meta-analysis*. Int J Dent Hyg, 16, 3-12.

Hope CK, Petrie A, Wilson M. *Efficacy of removal of sucrose-supplemented interproximal plaque by electric toothbrushes in an in vitro model.* Appl Environ Microbiol. 2005;71(2):1114-1116.

Hope, C. & Wilson, M. 2003. *Effects of dynamic fluid activity from an electric toothbrush on in vitro oral biofilms.* J Clin Periodontol, 30, 624-629.

Imfeld, T., Sener, B. & Simonovic, I. 2000. *In-Vitro-Untersuchung der mechanischen Wirkung von handelsüblichen Handzahnbürsten*. Swiss Dent. J., 110, 37-47.

Jordan, A., Micheelis, W., Cholmakow-Bodechtel, C., Füßl-Grünig, E., Geyer, S., Hertrampf, K., Hoffmann, T., Holtfreter, B., Kocher, T. & Nitschke, I. 2016.

Fünfte Deutsche Mundgesundheitsstudie (DMSV). BZÄK/KZBV, Berlin, Köln, 199- 201

Kavo, Dental. 2021. *Zahn- und Studien-Modelle KaVo Dental*. https://www.kavo.com/de-de/produkte/zahnaerztliche-ausbildung/studien-und-zahnmodelle (aufgerufen am 28.07.2023).

Khocht, A., Simon, G., Person, P. & Denepitiya, J. L. 1993. *Gingival recession in relation to history of hard toothbrush use*. J Periodontol, 64, 900-905.

Kleber, C. J., Putt, M. S. & Muhler, J. C. 1981. *Duration and pattern of toothbrushing in children using a gel or paste dentifrice*. J Am Dent Assoc. (1939), 103, 723-726.

Kolenbrander, P. E. 2011. *Multispecies communities: interspecies interactions influence growth on saliva as sole nutritional source*. Int J Oral Sci, 3, 49-54.

Kolenbrander, P. E., Andersen, R. N., Kazmerzak, K. M. & Palmer, R. *Coaggregation and coadhesion in oral biofilms.* Symposia-Society for general microbiology, 2000. Cambridge; Cambridge University Press; 1999, 65-86.

König, K. G. 1971. *Karies und Kariesprophylaxe*, Goldmann.

Kreifeldt, J. G., Hill, P. H. & Calisti, L. J. 1980. *A systematic study of the plaque removal efficiency of worn toothbrushes*. J Dent Res, 59, 2047-2055.

Lang, T., Staufer, S., Jennes, B. & Gaengler, P. 2014. *Clinical validation of robot simulation of toothbrushing-comparative plaque removal efficacy*. BMC oral health, 14, 82.

Ledder, R. G., Latimer, J., Forbes, S., Penney, J. L., Sreenivasan, P. K. & Mcbain, A. J. 2019. *Visualization and Quantification of the Oral Hygiene Effects of Brushing, Dentifrice Use, and Brush Wear Using a Tooth Brushing Simulator.* Front Public Health, 7.

Lee, H. S., Jung, H. I., Kang, S. M., Kim, H. E. & Kim, B. I. 2017. *Evaluation of the bristle end-rounding patterns of children's toothbrushes using scanning electron microscopy and stereomicroscopy*. Int J Dent Hyg, 15, 120-127.

Lendenmann, U., Grogan, J. & Oppenheim, F. 2000. *Saliva and dental pellicle-a review.* Adv Dent Res, 14, 22-28.

Lie, M., Timmerman, M., Van Der Velden, U. & Van Der Weijden, G. 1998*. Evaluation of 2 methods to assess gingival bleeding in smokers and non-smokers in natural and experimental gingivitis.* J Clin Periodontol, 25, 695-700.

Löe, H. 2000. *Oral hygiene in the prevention of caries and periodontal disease*. Int Dent J, 50, 129-139.

Löe, H., Theilade, E. & Jensen, S. B. 1965. *Experimental gingivitis in man.* J Periodontol, 36, 177-187.

Loesche, W. J. 1986. *Role of Streptococcus mutans in human dental decay*. Microbiol Rev, 50, 353-380.

Ly, M., Abeles, S. R., Boehm, T. K., Robles-Sikisaka, R., Naidu, M., Santiago-Rodriguez, T. & Pride, D. T. 2014. *Altered oral viral ecology in association with periodontal disease.* MBio, 5.

Macgregor, I. & Rugg-Gunn, A. 1979. *Survey of toothbrushing duration in 85 uninstructed English schoolchildren*. Community Dent Oral Epidemiol, 7, 297-298.

Macpherson, L., Macfarlane, T. & Stephen, K. 1991. *An in situ microbiological study of the early colonisation of human enamel surfaces*. Microb. ecol. health dis, 4, 39-46.

Marinho VC, Higgins JP, Sheiham A, Logan S. *Fluoride toothpastes for preventing dental caries in children and adolescents.* Cochrane Database Syst Rev. 2003

Marsh, P. 2004*. Dental plaque as a microbial biofilm.* Caries Res, 38, 204-211.

Marsh, P. & Martin, M. V. 2003. *Orale Mikrobiologie*, Georg Thieme Verlag. 39

Marsh, P. & Zaura, E. 2017. *Dental biofilm: ecological interactions in health and disease*. J Clin Periodontol, 44, S12-S22.

Marsh, P. D. 1994. *Microbial ecology of dental plaque and its significance in health and disease*. Adv Dent Res, 8, 263-271.

Marsh, P. D. 2003. *Are dental diseases examples of ecological catastrophes?* Microbiology (Reading), 149, 279-294.

Marsh, P. D., Head, D. A. & Devine, D. A. 2015. *Ecological approaches to oral biofilms: control without killing.* Caries Res, 49, 46-54.

Marsh, P. D., Moter, A. & Devine, D. A. 2011. *Dental plaque biofilms: communities, conflict and control.* Periodontol 2000, 55, 16-35.

Meyer-Lueckel, H., Paris, S. & Ekstrand, K. 2012. *Karies: Wissenschaft und Klinische Praxis.* Georg Thieme Verlag, 11-39.

Meyle, J. & Chapple, I. 2015. *Molecular aspects of the pathogenesis of periodontitis.* Periodontol 2000, 69, 7-17.

Miller, W. D. 1892*. Die Mikroorganismen der Mundhöhle: Die örtlichen und allgemeinen Erkrankungen, welche durch dieselben hervorgerufen werden*. 2. umgearb. u. stark erweiterte Aufl., Leipzig, Thieme, 196-213.

Moreno, E. & Margolis, H. 1988. *Composition of human plaque fluid.* J Dent Res, 67, 1181-1189.

Niederman, R., Naleway, C., Lu, B. Y., Buyle-Bodin, Y. & Robinson, P. 1995. *Subgingival temperature as a gingival inflammatory indicator.* J Clin Periodontol, 22, 804-809.

Noeke, T. 2016. *Zum Einfluss orthodontischer Maßnahmen auf die mechanische Plaqueentfernung im Seitenzahnbereich.* Zahnmed. Diss. Universität Münster.

Nygaard- Østby, P., Edvardsen, S. & Spydevold, B. 1979. *Access to interproximal tooth surfaces by different bristle designs and stiffnesses of toothbrushes*. Eur J Oral Sci, 87, 424-430.

Nyvad, B. & Kilian, M. 1987. *Microbiology of the early colonization of human enamel and root surfaces in vivo.* Scand J Dent Res, 95, 369-380.

Nyvad, B. & Kilian, M. 1990. *Comparison of the initial streptococcal microflora on dental enamel in caries-active and in caries-inactive individuals.* Caries Res, 24, 267-272.

Otsuka, R., Nomura, Y., Okada, A., Uematsu, H., Nakano, M., Hikiji, K., Hanada, N. & Momoi, Y. 2020*. Properties of manual toothbrush that influence on plaque removal of interproximal surface in vitro*. J Dent Sci, 15, 14-21.

Page, R. C. & Kornman, K. S. 1997. *The pathogenesis of human periodontitis: an introduction*. Periodontol 2000, 14, 9-11.

Pitts, N. B., Zero, D. T., Marsh, P. D., Ekstrand, K., Weintraub, J. A., Ramos-Gomez, F., Tagami, J., Twetman, S., Tsakos, G. & Ismail, A. 2017. *Dental caries*. Nat Rev Dis Primers, 3, 1-16.

Porter, J. 1976. *Antony van Leeuwenhoek: tercentenary of his discovery of bacteria*. Bacteriol Rev, 40, 260.

Pratten, J. 2007. *Growing oral biofilms in a constant depth film fermentor (CDFF).* Curr Protoc Microbiol, 6, 1B. 5.1-1B. 5.18.

Pratten, J. & Wilson, M. 1999. *Antimicrobial susceptibility and composition of microcosm dental plaques supplemented with sucrose*. Antimicrob Agents Chemother, 43, 1595-1599.

Radaic, A., & Kapila, Y. L. 2021. *The oralome and its dysbiosis: New insights into oral microbiome-host interactions.* Comput. Struct. Biotechnol. *J*, 19, 1335-1360.

Rajeswaran, S. A., Sankari Malaiappan, D., Jayalakshmi Somasundaram, D. & As, S. G. 2021. *A Comparative Study on the efficacy of plaque removal of three natural toothbrushes - an in-vitro study*. Nveo, 6054-6069.

Ranzan, N., Muniz, F. W. M. G. & Rösing, C. K. 2019. *Are bristle stiffness and bristle end-shape related to adverse effects on soft tissues during toothbrushing? A systematic review.* Int Dent J, 69, 171-182.

Rawls, H., Mkwayi-Tulloch, N. & Krull, M. 1990. *A mathematical model for predicting toothbrush stiffness.* Dent Mater, 6, 111-117.

Rickard, A. H., Palmer Jr, R. J., Blehert, D. S., Campagna, S. R., Semmelhack, M. F., Egland, P. G., Bassler, B. L. & Kolenbrander, P. E. 2006. *Autoinducer 2: a concentration-dependent signal for mutualistic bacterial biofilm growth*. Mol Microbiol, 60, 1446-1456.

Ritz, H. 1967. *Microbial population shifts in developing human dental plaque*. Arch Oral Biol, 12, 1561-1568.

Roberts, A. P. & Kreth, J. 2014. *The impact of horizontal gene transfer on the adaptive ability of the human oral microbiome.* Front Cell Infect Microbiol, 4, 124.

Rosan, B. & Lamont, R. J. 2000. *Dental plaque formation.* Microbes Infect, 2, 1599-1607.

Rosier, B., Marsh, P. & Mira, A. 2018. *Resilience of the oral microbiota in health: mechanisms that prevent dysbiosis.* J Dent Res, 97, 371-380.

Roulet, J.-F., Fath, S. & Zimmer, S. 2017. *Zahnmedizinische Prophylaxe: Lehrbuch und Praxisleitfaden,* München, Elsevier. 63-95

Rugg-Gunn, A. & Macgregor, I. 1978. *A survey of toothbrushing behaviour in children and young adults*. J Periodontal Res, 13, 382-389.

Rustogi, K., Curtis, J., Volpe, A., Kemp, J., Mccool, J. & Korn, L. 1992. *Refinement of the Modified Navy Plaque Index to increase plaque scoring efficiency in gumline and interproximal tooth areas.* J Clin Dent, 3, C9-12.

Sander, F. M., Sander, C., Toth, M. & Sander, F. G. 2006. *Dental care during orthodontic treatment with electric toothbrushes*. J Orofac Orthop,67, 337-345.

Schätzle, M., Imfeld, T., Sener, B. & Schmidlin, P. R. 2009. *In vitro tooth cleaning efficacy of manual toothbrushes around brackets.* Eur J Orthod, 31, 103-107.

Schätzle, M., Sener, B., Schmidlin, P. R., Imfeld, T. & Attin, T. 2010. *In vitro tooth cleaning efficacy of electric toothbrushes around brackets*. Eur J Orthod, 32, 481-489.

Schiffer, D. C. P. 2016. *Die ganze Welt der Dental Care Produkte.* Schiffer Dental Care Products. https://www.mc-schiffer.com/produktubersicht/3324-adult-brush-sensitive/ (aufgerufen am 27.05.2021).

Schlueter, N., Klimek, J., Saleschke, G. & Ganss, C. 2010. *Adoption of a toothbrushing technique: a controlled, randomised clinical trial*. Clin Oral Investig, 14, 99-106.

Schwendicke, F., Dörfer, C., Schlattmann, P., Page, L. F., Thomson, W. & Paris, S. 2015*. Socioeconomic inequality and caries: a systematic review and meta-analysis.* J Dent Res, 94, 10-18.

Setzwein, M. 2002. *Entwicklung einer Methode zur Quantifizierung der approximalen Reinigungswirkung von neuen Zahnbürstendesigns*. Zahnmed. Diss. Ludwig-Maximilians-Universität München.

Sharma, N., Qaqish, J., Walters, P., Grender, J. & Biesbrock, A. 2010. *A clinical evaluation of the plaque removal efficacy of five manual toothbrushes*. J Clin Dent, 21, 8.

Sheiham, A. & James, W. P. T. 2014. *A reappraisal of the quantitative relationship between sugar intake and dental caries: the need for new criteria for developing goals for sugar intake.* BMC Public Health, 14, 1-8.

Slot, D., Wiggelinkhuizen, L., Rosema, N. & Van Der Weijden, G. 2012. *The efficacy of manual toothbrushes following a brushing exercise: a systematic review*. Int J Dent Hyg, 10, 187-197.

Sripriya, N. & Ali, K. S. H. 2007. *A comparative study of the efficacy of four different bristle designs of toothbrushes in plaque removal*. Indian Soc Pedod Prev Dent, 25, 76.

Staudt, C. B., Kinzel, S., Haßfeld, S., Stein, W., Staehle, H. J. & Dörfer, C. E. 2001. *Computer-based intraoral image analysis of the clinical plaque removing capacity of 3 manual toothbrushes*. J Clin Periodontol, 28, 746-752.

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

Stiller, S., Bosma, M., Shi, X., Spirgel, C. & Yankell, S. 2010. *Interproximal access efficacy of three manual toothbrushes with extended, x-angled or flat multitufted bristles*. Int J Dent Hyg, 8, 244-248.

Stoodley, P., Cargo, R., Rupp, C. J., Wilson, S. & Klapper, I. 2002. *Biofilm material properties as related to shear-induced deformation and detachment phenomena.* J Ind Microbiol Biotechnol, 29, 361-367.

Stuart, L. F. 1997. *The history of oral hygiene products: how far have we come in 6000 years?* Periodontol 2000, 15, 7-14.

Sukumar, S., Roberts, A. P., Martin, F. E. & Adler, C. J. 2016*. Metagenomic insights into transferable antibiotic resistance in oral bacteria*. J Dent Res, 95, 969-976.

Takahashi, N. *Microbial ecosystem in the oral cavity: metabolic diversity in an ecological niche and its relationship with oral diseases*. International Congress Series, 2005. Elsevier, 103-112.

Takahashi, N. & Nyvad, B. 2008. *Caries ecology revisited: microbial dynamics and the caries process*. Caries Res, 42, 409-418.

Theilade, E., Wright, W., Jensen, S. B. & Löe, H. 1966. *Experimental gingivitis in man: II. A longitudinal clinical and bacteriological investigation*. J Periodontal Res 1, 1-13.

Thevissen, E., Quirynen, M. & Van Steenberghe, D. 1987. *Plaque Removing Effect of a Convex-Shaped Brush Compared with a Conventional Flat Brush*. J Periodontol, 58, 861-867.

Tuna, T., Kuhlmann, L., Bishti, S., Sirazitdinova, E., Deserno, T. & Wolfart, S. 2019. *Removal of simulated biofilm at different implant crown designs with interproximal oral hygiene aids: An in vitro study*. Clin Oral Implants Res, 30, 627-636.

Uceda, P. R., Sanzone, L. A., Phillips, C. L. & Roberts, M. W. 2013. *Fluoride Exposure, Caregiver Education, and Decayed, Missing, Filled Teeth (dmft) in 2-5 year-old English or Spanish Speaking Children*. Open Dent J, 7, 175-80.

Van Der Weijden, F. A. & Slot, D. E. 2015. *Efficacy of homecare regimens for mechanical plaque removal in managing gingivitis a meta review.* J Clin Periodontol, 42, S77-S91.

Van Der Weijden, G., Danser, M., Nijboer, A., Timmerman, M. & Van Der Velden, U. 1993a. *The plaque-removing efficacy of an oscillating/rotating toothbrush: A short-term study.* J Clin Periodontol, 20, 273-278.

Van Der Weijden, G. & Hioe, K. 2005. *A systematic review of the effectiveness of self-performed mechanical plaque removal in adults with gingivitis using a manual toothbrush.* J Clin Periodontol, 32, 214-228.

Van Der Weijden, G., Timmerman, M., Danser, M. & Van Der Velden, U. 1998. *Relationship between the plaque removal efficacy of a manual toothbrush and brushing force.* J Clin Periodontol, 25, 413-416.

Van Der Weijden, G., Timmerman, M., Nijboer, A., Lie, M. & Van Der Velden, U. 1993b. *A comparative study of electric toothbrushes for the effectiveness of plaque removal in relation to toothbrushing duration: Timerstudy.* J Clin Periodontol, 20, 476-481.

Van Der Weijden, G., Timmerman, M., Reijerse, E., Snoek, C. & Van Der Velden, U. 1996. *Toothbrushing force in relation to plaque removal.* J. Clin Periodontol, 23, 724-729.

Van Ruyven, F., Lingström, P., Van Houte, J. & Kent, R. 2000. *Relationship among mutans streptococci," low-pH" bacteria, and lodophilic polysaccharide-producing bacteria in dental plaque and early enamel caries in humans*. J Dent Res, 79, 778-784.

Verkaik, M. J., Busscher, H. J., Rustema-Abbing, M., Slomp, A. M., Abbas, F. & Van Der Mei, H. C. 2010. *Oral biofilm models for mechanical plaque removal.* Clin Oral Investig, 14, 403-409.

Versteeg, P., Piscaer, M., Rosema, N., Timmerman, M., Van Der Velden, U. & Van Der Weijden, G. 2008. *Tapered toothbrush filaments in relation to gingival abrasion, removal of plaque and treatment of gingivitis*. Int J Dent Hyg, 6, 174-182.

Voelker, M. A., Bayne, S. C., Liu, Y. & Walker, M. P. 2013. *Catalogue of toothbrush head designs.* J Am Dent Hyg Assoc, 87, 118-133.

Völker, K. 2006. *Putzeffizienz neuer Handzahnbürsten unter Verwendung eines 4-Achsen Roboters*. Zahnmed. Diss. Universität Ulm.

Volpenhein, D., Walsh, M., Dellerman, P. & Burkett, T. 1994*. A new method for in vitro evaluation of the interproximal penetration of manual toothbrushes*. J Clin Dent, 5, 27-33.

Wade, W. G. 2013. *The oral microbiome in health and disease*. Pharmacol Res, 69, 137-143.

Wang, J., Gao, Y. & Zhao, F. 2016. *Phage–bacteria interaction network in human oral microbiome.* Environ Microbiol, 18, 2143-2158.

Weiß, C. 2007. *Basiswissen Medizinische Statistik*, Springer-Verlag. 55-68

Wiegand, A., Kuhn, M., Sener, B., Roos, M. & Attin, T. 2009. *Abrasion of eroded dentin caused by toothpaste slurries of different abrasivity and toothbrushes of different filament diameter.* J Dent, 37, 480-484.

Wilson, M. 1996. *Susceptibility of oral bacterial biofilms to antimicrobial agents*. J Med Microbiol, 44, 79-87.

Wilson, M. 1999. *Use of constant depth film fermentor in studies of biofilms of oral bacteria*. Methods Enzymol, 310, 264-279.

Winterfeld, T., Schlueter, N., Harnacke, D., Illig, J., Margraf-Stiksrud, J., Deinzer, R. & Ganss, C. 2015. *Toothbrushing and flossing behaviour in young adults—a video observation*. Clin Oral Investig, 19, 851-858.

Wolf, H. F., Rateitschak, E. M. & Rateitschak, K. H. 2004. *Parodontologie*, Georg Thieme Verlag. 23-65

Wolf, H. F., Rateitschak, E. M. & Rateitschak, K. H. 2012. *Parodontologie*, Stuttgart · New York, Georg Thieme Verlag. 90-92

Zanatta FB, Bergoli AD, Werle SB, Antoniazzi RP. *Biofilm removal and gingival abrasion with medium and soft toothbrushes*. Oral Health Prev Dent. 2011;9(2):177-183.

Zimmer, S., Öztürk, M., Barthel, C. R., Bizhang, M. & Jordan, R. A. 2011. *Cleaning efficacy and soft tissue trauma after use of manual toothbrushes with different bristle stiffness.* J Periodontol, 82, 267-271.

10 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Laura Verena Civale
Geburtsdatum:	21. September 1994
Staatsangehörigkeit:	Deutsch
Familienstand:	verheiratet
Geburtsort:	Hildesheim

Berufstätigkeit

Seit 06/2021	**Angestellte Zahnärztin** in der Gemeinschaftspraxis Dr. Nils Knüppel und ZÄ Dirk Schuster, Hamburg
02/2019 – 04/2021	**Vorbereitungsassistentin** in der parodontologischen Schwerpunktpraxis Prof. Dr. Heiko Visser, Oldenburg

Ausbildung

10/ 2013 – 12/ 2018	**Studium der Zahnmedizin** Universität Witten/Herdecke, Witten
10/ 2005 – 06/ 2013	**Allgemeine Hochschulreife** Bischöfliches Gymnasium Josephinum, Hildesheim

11 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Laura Civale, an Eides statt, dass ich die Dissertation mit dem Titel:

„Die Robotersimulation der Plaquekontrolle – Einfluss von Zahnbürsten, Putzprogrammen und Plaquesimulationen“ selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe.

Andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel habe ich nicht benutzt. Die den herangezogenen Werken wörtlich oder sinngemäß entnommenen Stellen sind als solche gekennzeichnet.

Diese Dissertation wurde in dieser oder ähnlicher Form bei keiner anderen Hochschule im Rahmen eines Promotionsgesuchs eingereicht.

_____ _____

12 Danksagung

Mit dem erfolgreichen Abschluss meiner Dissertation möchte ich mich von Herzen bei allen bedanken, die mich auf diesem Weg unterstützt und begleitet haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. Peter Gängler für seine stets inspirierende und freundliche Unterstützung. Seine konstruktive Kritik und Verlässlichkeit waren für mich von unschätzbarem Wert und ermöglichten mir die Erstellung dieser Arbeit.

In ehrendem Gedenken möchte ich Herrn Dr. Karl Weich† danken, dessen Unterstützung und wertvolle Ratschläge für mich bei der statistischen Auswertung unersetzlich waren.

Für seine Hilfsbereitschaft im Labor möchte ich mich herzlich bei Christian Greune bedanken.

Einen herzlichen Dank möchte ich auch an Rolf aussprechen für das unermüdliche Korrekturlesen und die Verbesserungsvorschläge.

Nicht zuletzt gebührt mein Dank meinem Ehemann und besten Freund Steffen, meiner Familie und insbesondere meiner Mutter, deren Liebe und Unterstützung mir in allen Situationen Rückhalt gegeben haben.