

Klinische Validierung der Plaque-Kontrolle mit Handzahnbürsten und organischer Plaque-Simulation im Roboter-Test

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin

der

Universität Witten/Herdecke

vorgelegt von

Henrike Thiele

aus Remscheid

2022

Dekanin: Prof. Dr. rer. medic. Margareta Halek
Dekan: Prof. Dr. med. dent. Stefan Zimmer
Mentor: Prof. Dr. med. Dr. h.c. Peter Gängler
Tutor: Dr. med. dent. Tomas Lang

Tag der Disputation:

**Meinen Eltern
und meinem Partner und Ehemann Dr. Jens-Hendryk Thiele**

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	6
1.1	Orale Erkrankungen	8
1.2	Wesen der Mundhygiene – gesellschaftliche Aspekte	10
1.4	Geschichte der Roboter	13
1.5	Plaquesubstrate für in-vitro Studien	16
2.	Zielsetzung	19
3.	Material und Methode	20
3.1	Klinische Befunde	20
3.2	Organische Plaque	24
3.3	KaVo-Versuchszähne und Versuchsgebiss	25
3.4	Färbungs- und Trocknungsapparatur	25
3.5	Sechs-Achsen-Roboter FS 02N der Firma Kawasaki	26
3.6	Verwendete Zahnbürsten	27
3.7	Entriegelungsapparatur	29
3.8	Aufbau und Ablauf der in-vitro Untersuchung	30
3.9	Auswertung der Reinigungseffizienz	31
3.9.1	Automatisierte-Plaque-Planimetrie (APP)	32
3.10	Statistische Auswertung	35
3.10.1	Versuchsanordnung	35
3.10.2	Statistische Auswertungsverfahren	37
4.	Ergebnisse	39
4.1	Vortest auf Normalverteilung	39
4.2	Vergleich der klinischen und der Roboter-Reinigungseffizienz der Zahnbürsten	40
4.3	Bewertung der Übereinstimmung der klinischen und der Roboter - Ergebnisse	44

4.4	Verteilungsgebundene Parametertests	48
4.5	Nichtparametrischer Rangsummentest	53
4.6	Übereinstimmungsraten der klinischen und der Roboter - Verfahren unter Benutzung der Zahnbürste Dr. Best Flex Plus	55
4.7	Übereinstimmungsraten der klinischen und der Roboter - Verfahren unter Benutzung der Zahnbürste Dr. Best Interdent	57
4.8	Zusammenfassung der Ergebnisse	58
5.	Diskussion	60
5.1	Allgemeine Bedeutung der Studie	60
5.2	Material und Methode	62
5.2.1	Verwendung und Auswertung der klinischen Fotos	62
5.2.2	Laboruntersuchung	64
5.2.3	Zahnbürsten	66
5.3	Ergebnisse	69
6.	Zusammenfassung	71
7.	Summary	72
8.	Literaturverzeichnis	73
9.	Anhang	79
10.	Wissenschaftliche Beiträge	84
11.	Danksagung	86
12.	Lebenslauf	87
13.	Eidesstattliche Erklärung	88

1. Einleitung

Eine gute Mundhygiene durch Kontrolle von dentalen Biofilmen durch effektives Zähneputzen spielt eine wichtige Rolle bei der Aufrechterhaltung einer Eubiose und somit der Vorbeugung von oralen Erkrankungen.

Verschiedene Studien haben gezeigt, dass das Vorhandensein von Zahnbelag eine Ursache für die Entwicklung von oralen Erkrankungen, wie einer Gingivitis und einer Parodontitis sein kann (Löe et al. 1965; Yaacob et al. 2014).

Eine vermehrte Ablagerung von Plaque kann ebenfalls zu Karies führen, was jedoch von lebenden Mikroorganismen und deren Interaktionen abhängt. So bewiesen Orland et al. im Jahre 1954 anhand von Tierversuchen mit norwegischen Ratten (*Rattus norvegicus albinus*), welche zum Teil vollständig keimfrei und zum Teil konventionell aufgezogen und identisch ernährt wurden, jeweils mit und ohne Zugabe von 5%iger Saccharose-Lösung, dass zum einen die Präsenz von lebenden Mikroorganismen eine Kariesentwicklung überhaupt ermöglicht und zum anderen eine zuckerhaltige Ernährung die Kariesinzidenz erhöht. Bei den keimfreien gnotobiotischen Tieren wurde keine Entwicklung von kariösen Läsionen festgestellt (Orland et al. 1954).

Um die Ursachen und Wirkungen der Störung eines homöostatischen Gleichgewichtes zwischen Wirt und oralen Mikrobiota verstehen zu können, wurden in den letzten Jahrzehnten verschiedene Studien durchgeführt. Bei einer Beobachtungsdauer von 26 Jahren wurden zum Beispiel im Rahmen einer norwegischen wissenschaftlichen Arbeit 223 Männer untersucht, die regelmäßig zahnärztlichen Kontrollen unterzogen wurden und tägliche Mundhygienemaßnahmen durchführten. Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund des mangelnden Wissens, wann eine Karies entsteht, als nonkausale Maßnahme eine regelmäßige Mundhygiene das Risiko einer Gingivitis- und Parodontitisentwicklung minimieren kann und eine Dysbiose, die das orale Gleichgewicht stört, verhindert (Heitz-Mayfield et al. 2003). Eine weitere Studie, in deren Rahmen 480 Teeplantagenarbeiter in Sri Lanka, die keine Mundhygienemaßnahmen durchführten und von 1970 bis 2010 regelmäßig untersucht wurden, zeigte, dass eine höhere Phylotypenvielfalt in subgingivalen Belägen zu verzeichnen war, jedoch nicht bei jedem Probanden eine Parodontitis festgestellt wurde. Dies unterstreicht die Hypothese, dass die Zerstörung des parodontalen

Gewebes nicht primär von der Zusammensetzung der subgingivalen Mikroorganismen abhängt, sondern die Wirtsabwehr eine bedeutende Rolle spielt (Zhuang et al. 2014). Die genannte Studie wurde in den darauffolgenden Jahren fortgeführt, woraufhin im Jahre 2013 an 27 Probanden eine einmalige Zahnsteinentfernung mit subgingivaler Wurzelglättung durchgeführt wurde und eine Kontrolle des parodontalen Zustandes 6 Monate später erfolgte. Das Resultat der Untersuchungen war das Fehlen einer positiven Auswirkung in Folge einer einmaligen Zahnsteinentfernung mit Wurzelglättung. Diese Publikation unterstreicht die Relevanz der vor allem regelmäßigen Durchführung von Mundhygienemaßnahmen und zugleich die Bedeutungslosigkeit einer einmaligen kurzfristigen Verbesserung des oralen Plaque- und Zahnsteinbefalls (Duong et al. 2022).

Da wir wissen, dass eine Dysbiose in jeglicher Form die Aufrechterhaltung eines Gleichgewichtes zwischen bakterieller Besiedlung und Immunabwehr stört, ist es wichtig, zur Gewährleistung eines gesunden oralen Zustandes Mundhygienemaßnahmen zur Entfernung von maturierter pathogener Plaque durchzuführen oder die Immunabwehr zu stärken (Gaengler et al. 2007). Um die Entfernung von oralem Biofilm möglichst effektiv zu gestalten, werden hierfür Tests durchgeführt, mit Hilfe derer die Reinigungseffektivität von Zahnbürsten überprüft werden. Da auch in der heutigen Zeit nicht vollständig geklärt wurde, warum Karies und Parodontitisschübe entstehen, hilft als nonkausale Maßnahme eine gute Mundhygiene, um das Risiko zu minimieren.

1.1 Orale Erkrankungen

Bereits im Jahre 1965 konnte im Rahmen einer experimentellen in-vivo Studie nachgewiesen werden, dass dentale Plaqueansammlungen, vor allem im Bereich der marginalen Gingiva, die Aktivierung der lokalen Wirtsimmunantwort und als Folge eine plaqueinduzierte Gingivitis auslösen können (Löe et al. 1965). Innerhalb von 10 Tagen, an denen keine Zahnreinigung durchgeführt wurde, entwickelten die ersten Probanden eine milde Form der Gingivitis. Die Anzeichen einer Inflammation waren die Veränderung der Form und Farbe. Schmerzen und Blutungen auf Sondierungen traten in dem Rahmen nicht auf (Löe et al. 1965).

Nach einer Zahnreinigung regenerierte sich die betroffene Gingiva innerhalb von 7 Tagen vollständig.

Im Vergleich zum gesunden Parodontium befinden sich bei einer plaqueinduzierten Gingivitis vermehrt gramnegative Kokken und Stäbchen (Hellwig et al. 2013). Diese Pathogenese einer Gingivitis kann in mehrere Stadien unterteilt werden (Gaengler et al. 2010). Infolge einer Plaqueakkumulation kann eine **Initialläsion** entstehen, bei der die Anzahl von polymorphnukleären Granulozyten zunimmt und es zu einem Kollagenverlust mit Infiltration verschiedener Zellen kommt. In dieser Phase ist das klinische Erscheinungsbild noch nicht verändert. Die darauffolgende **Frühläsion** ist durch einen weiteren Verlust des Kollagens von bis zu 70% charakterisiert. Des Weiteren sind Lymphozyten in der betroffenen Region vermehrt vorhanden. Bei diesem Entzündungsvorgang steigt die Sulkusfluid-Fließrate durch eine Plasmadiapedese fortwährend an. Aufgrund des mechanischen Lösens des Saumepithels infolge eines oberflächlichen Zellverlustes kommt es zur Bildung des klinischen Sulkus. Sofern in dieser Phase die Ursache weiterhin nicht eliminiert wird, folgt die Entwicklung einer **manifesten Gingivitis**, welche immer akute und chronische Inflammationszeichen umfasst. Es kann abhängig von der Immunantwort des Wirtes, welche unter anderem die Aktivierung von Leukozyten sowie T- und B-Lymphozyten beinhaltet, und der Plaquezusammensetzung zu sowohl hyperplastischen, desquamativen als auch zu granulomatösen und ulzerierenden Veränderungen führen (Gaengler et al. 2010). Um plaqueinduzierte meist reversible Gingivitis zu behandeln, wird eine Kausaltherapie gegen die bakteriellen Beläge als

verursachende Faktoren präferiert (Gaengler et al. 2010). Somit kann eine solche orale Erkrankung durch eine adäquate häusliche Zahnreinigung mit der richtigen Zahnbürste und Zahnputztechnik vermieden werden.

In Folge einer fortgeschrittenen Gingivitis kann sich eine Entzündung des Zahnhalteapparates im Sinne einer Parodontitis entwickeln. Durch spezifische Mikroorganismen, welche besonders an Parodontitis erkrankten Regionen nachgewiesen werden können, wird eine immunologische Reaktion ausgelöst. Als Folge eines langen Fortbestehens von spezifischen Erregern kann eine Dysbalance zwischen Wirtsabwehr und Virulenz entstehen (Roulet et al. 2017). Ob eine parodontologische Erkrankung bei einem Patienten oder an einer spezifischen Stelle auftritt, ist jedoch von mehreren Faktoren abhängig. Der erste Faktor ist der Wirt, welcher für die Erreger empfänglich sein muss, da sonst keine Erkrankung auftreten würde. Dies ist insbesondere bei einer unzureichenden Immunreaktion des Wirtes der Fall. Der zweite Faktor ist eine ausreichende Anzahl eines oder mehrerer parodontalpathogener Erreger, welche zu den Bestandteilen des subgingivalen Biofilmes zählen. Hierbei ist zum Beispiel das gramnegative anaerobe Stäbchenbakterium *Porphyromonas gingivalis* zu erwähnen, durch dessen Anwesenheit eine Antigenpräsentation und somit Aktivierung der TH-17 Zellen ausgelöst werden kann (Campbell et al. 2016).

Wie einigen Studien und der 'Human Oral Microbiome Database' zu entnehmen ist, wurden bisher ca. 1000 Phylotypen in der Mundhöhle nachgewiesen, wobei keine pathogenen Erscheinungen auftreten, sofern eine mikrobielle Homöostase besteht (Radaic et al. 2021; Esberg et al. 2022; HOMD 2022). Sobald diese Eubiose jedoch zum Beispiel durch Beeinträchtigungen oder Veränderungen wie einer erhöhten Plaqueakkumulation mit spezifischen Mikroorganismen aus dem Gleichgewicht gerät, kann eine Verschiebung in einen pathogenen Zustand erfolgen, wodurch Krankheiten gefördert werden und ein dysbiotischer Zustand in der Mundhöhle entsteht (Radaic et al. 2021).

Zur Vorbeugung, von dadurch entstehenden parodontalen Erkrankungen, ist somit die Modulation des dysbiotischen Mikrobioms zu erzielen, um einen eubiotischen Zustand im Sinne eines ausgewogenen Verhältnisses zwischen Symbiose und Kommensalismus in der Mundhöhle wiederherzustellen oder aufrechtzuerhalten.

1.2 Wesen der Mundhygiene – gesellschaftliche Aspekte

In der Mundhöhle befinden sich über 700 nachgewiesene mikrobielle Spezies (Chen et al. 2010). Die ersten Erkenntnisse, dass sich einige in dieser Region befinden, gewann der Entwickler des ersten Mikroskops Antony van Leeuwenhoek und berichtete dies bereits im Jahre 1683 in einem Brief an die Royal Society of London (Porter 1976; Gest 2004).

Gesellschaftlich und kulturell werden in der heutigen Zeit weltweit verschiedene Mundhygienemaßnahmen präferiert. Doch warum wird eine effektive Mundhygiene benötigt, obwohl bekannt ist, dass alle Biofilme, die gut zu erreichen sind, keine kausale Bedingung für die Auslösung von Schleimhauterkrankungen, Karies oder Ähnlichem sind und die eigentliche Ursache in der individuellen Vielfältigkeit unbekannt und unbeeinflusst ist? Aus diesem Grund behelfen wir uns lediglich mit Risikominimierungen. Die Effektivste hat in der ersten Zivilisation in Ägypten und Mesopotamien durch raffinierte Mundhygienemaßnahmen begonnen und zu einer allgemeinen Hygiene geführt.

Bereits in der Antike wurde die Reinigung der Zähne als relevant erachtet. In dieser Zeit wurden unter anderem Zweige von Pflanzen mit aromatischen Eigenschaften gekaut, um einen erfrischenden Atem zu erreichen und mit Hilfe der Fasern der Zweige die Zähne zu reinigen. Vor dem Islam erkannten Araber die reinigende Wirkung der Wurzel eines Arakbaums, oder auch *Salvadora persica* genannt, dessen Fasern wie Borsten abstehen und heute noch als Kaustäbchen zur Zahnreinigung verwendet werden. Der gebräuchliche Name lautet hierfür Siwak (Khatak et al. 2010). Im siebten Jahrhundert wurden im Koran Regeln für die Mundhygiene aufgestellt, sodass diese einen Stellenwert und somit eine religiöse Pflicht im Islam einnahmen.

Einige Historiker führen die Entwicklung der ersten Zahnbürste, welche aus einem Griff mit Schweineborsten bestand, auf den Zeitraum der Tang-Dynastie in China zurück (Baruah et al. 2017). Jedoch gibt es Belege dafür, dass Chinesen bereits um 1000 v. Chr. Bürstengriffe aus Elfenbein und Borsten aus Pferdehaaren zur Zahnreinigung verwendeten (Fischman 1997).

Die Nutzung Handzahnbürste wurde im 17. Jahrhundert in Europa etabliert, wobei der Engländer William Addis als Erfinder der ersten massenproduzierten Zahnbürste gilt,

die im Jahre 1780 auf den Markt kam (Penick 2004). Hierbei bestand der Griff aus Knochen mit Löchern, in denen Schweineborsten mit einem Draht befestigt wurden. Um 1900 wurden die Griffe durch Zelluloid ersetzt. Diese Umstellung wurde später durch den Schweinemangel während des Ersten Weltkrieges beschleunigt. Während des Zweiten Weltkrieges entstand eine Blockade des Schweineborstenimportes aus China und Russland, wodurch Nylonborsten als Alternative entwickelt wurden. Diese hatten im Gegensatz zu den natürlichen Borsten den Vorteil, dass durch das Fehlen eines Hohlraumes in den Borsten keine Wasseraufnahme erfolgte. Weiterhin konnten die Nylonborsten bei der Herstellung an den Enden abgerundet werden, wodurch eine Reduzierung von Gingivadefekten, wie Rezessionen, bei der Nutzung zu verzeichnen war.

Somit beschrieb Bass bereits im Jahre 1948 acht Vorteile von Nylonborsten im Vergleich zu Schweineborsten:

1. Die Borsten haben überall den gleichen Durchschnitt.
2. Sie können in unterschiedlichen Größen hergestellt werden.
3. Eine Herstellung in unterschiedlichen Dicken ist möglich.
4. Nylonborsten weisen keine Aufspaltung auf.
5. Es gibt keine Wasseraufnahme.
6. Die Abriebfestigkeit ist erhöht.
7. Die Enden der Borsten sind glatt und abgerundet.
8. Der Gebrauch weist keine nennenswerten Beeinträchtigungen auf.

Durch die Erfindung der Nylonborsten wurde die Verwendung von Naturborsten im Rahmen der Zahnbürstenherstellung aufgrund der Möglichkeit der Massenproduktion und der beträchtlichen Verfügbarkeit weitgehend verdrängt.

Im Jahre 1939 wurde ein Prototyp der elektrischen Zahnbürste in der Schweiz entwickelt, welcher erst 1954 auf den Markt kam. Im Jahre 1960 erfolgte die Einführung einer batteriebetriebenen Zahnbürste von Broxadent auf dem US-Markt. Als große Nachteile erwiesen sich kurze Arbeitszeiten und mechanische Ausfälle, sodass 1980 eine Interplakbürste der zweiten Generation der elektrischen Zahnbürste mit Rotationsfunktion für den häuslichen Gebrauch produziert wurde (Tadinada et al. 2015).

Heute gibt es sowohl Handzahnbürsten als auch elektrisch betriebene Zahnbürsten in verschiedenen Größen und Formen, die in der Regel aus Kunststoffgriffen und

Nylonborsten mit den Härtegraden weich, mittel oder hart bestehen. Aufgrund der stetigen Weiterentwicklung und der Vielfalt der auf dem Markt befindlichen Zahnbürsten, stellt sich bisher immer noch die Frage, welche Zahnbürste die höchste Reinigungseffizienz hat.

Um evidenzbasierte Aussagen bezüglich der Reinigungsleistung einer Zahnbürste treffen zu können, wurden standardisierte Verfahren entwickelt, wodurch möglichst realitätsgetreue Zahnputzversuche unter Laborbedingungen durchgeführt werden können.

1.4 Geschichte der Roboter

Bereits in den 1970er Jahren verwendeten Nygaard-Østby et al. zur Bewertung des approximalen Zugangs von Zahnbürsten mit unterschiedlichen Borsteneigenschaften einen Putzroboter namens Jordamatic 78 (Nygaard-Østby et al. 1979). Im Rahmen der Studie wurde jeweils ein Registrierband um jeden Zahn gewickelt, auf dem infolge einer Zahnputzbewegung, die entweder aus einer horizontalen oder vertikalen Putztechnik bestand, ein Abdruck hinterlassen wurde. Für einen Putzzyklus mit der Dauer von 60 Sekunden konnte die Anpresskraft mittels eines 250 g, 500 g, 750 g oder 1000 g schweren Gewichtes variiert werden. Zur Bestimmung des approximalen Zugangs der Bürste erfolgte die Messung der Abdrucklänge. Aufgrund der klinisch unterschiedlichen Zahnformen eines Gebisses wurden zur Simulation der Reinigung im Front- und Seitenzahnbereich für diese Studie zwei unterschiedliche Oberflächenkrümmungen mit einem Radius von 2,5 mm und einer geraden Fläche von 4,5 mm für einen Frontzahn und einem Radius von 4,75 mm für einen Molaren der künstlichen Zähne präferiert. Bei dieser Art der Versuchsmethode bestand jedoch ein Nachteil darin, dass die Einführung der Klebebänder aufgrund des geringen Abstandes von 0,5 mm des untersuchten Zahnes zu dessen Nachbarzahn erschwert waren.

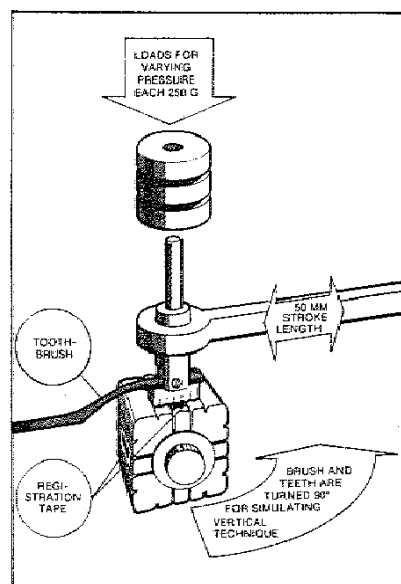


Abbildung 1: Aufbau einer Roboterputzsimulation zur Bewertung des approximalen Zuganges von Zahnbürsten; Wiederveröffentlichung mit Erlaubnis von John Wiley and Sons von [Access to interproximal tooth surfaces by different bristle designs and stiffnesses of toothbrushes, Nygaard Østby et al., 6, 86, 1995], die Erlaubnis wurde durch Copyright Clearance Center, Inc. Erteilt.

Anfang der 1990er Jahre wurde eine Studie veröffentlicht, in der mit einer Apparatur ein Oberkiefermodell in einem 45°-Winkel zu einer darunter liegenden Oberfläche fixiert wurde. Die zu verwendende Zahnbürste wurde an das Ende einer Stange geklemmt, die sich mit Hilfe von Messinggewichten vertikal bewegen sollte (Rawls et al. 1993).

Einige Jahre später wurde eines der ersten computergesteuerten sechsachsigen Robotersysteme mit dem Ziel der Simulation von gebräuchlichen Zahnputzbewegungen entwickelt. Ursprünglich dienten diese vom Schweizer Technikkonzern Asea Brown Boveri (Zürich, Schweiz) hergestellten Maschinen dem industriellen Zweck im Sinne von Punktschweißvorgängen (Ernst et al. 1997).

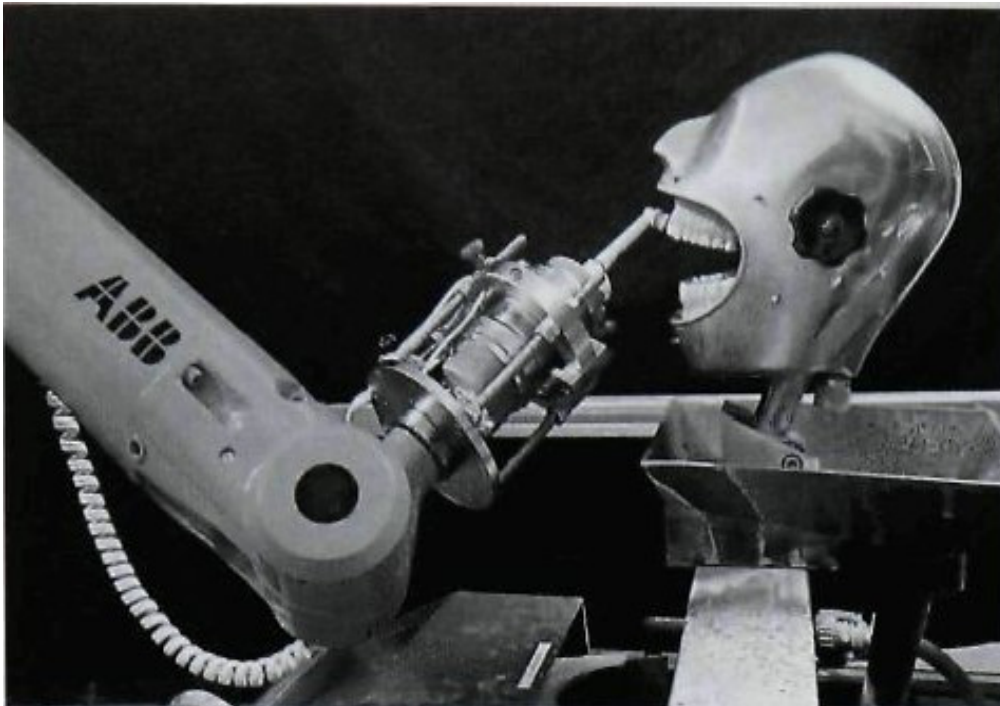


Abbildung 2: Aufbau eines Robotersystems zur Beurteilung der Reinigungseffizienz eines Zahnputzvorganges (Ernst et al. 1997); mit freundlicher Genehmigung

Im Jahre 2000 wurde eine Vergleichsstudie veröffentlicht, in der im Sinne einer Laborstudie zwei elektrisch betriebene Zahnbürsten miteinander verglichen wurden. Auch hier wurde der sechsachsige Industrieroboter der Firma Asea Brown Boveri (Zürich, Schweiz) verwendet (Danser et al. 2000). Eine Überprüfung der klinischen Übereinstimmung mit den erarbeiteten Ergebnissen ist daraufhin erfolgt.

Bereits im Jahre 2002 wurde die Vermutung aufgestellt, dass die mit Hilfe robotergeführter Putzverfahren an Zahnmodellen erreichten Resultate perspektivisch als Vorhersage klinischer Ergebnisse von Bedeutung sein können (Van der Weijden 2002).

Zwei Jahre später wurde von einer Arbeitsgruppe zur Alterung von Bürstenköpfen ein sechssachsiger Industrieroboter Kuka KR15/2 der Firma KUKA Robotics (Augsburg, Deutschland) angewandt (Kaiser et al. 2014).

Im Jahre 2015 untersuchte Arnoldi die Bewertung der Effektivität einer robotergenerierten Plaquereduktion anhand einer automatisierten Plaque-Planimetrie (APP). Hierbei wurde der gleiche sechssachsige Putzroboter der Firma Kawasaki (Kobe, Japan) eingesetzt, der auch in dieser Studie verwendet wurde. Vor dem Einsatz des Roboters wurde dieser von dem Institut ORMED (Witten, Deutschland) und der Firma M+S Schiffer (Neustadt, Deutschland) für zahnmedizinische Zwecke aufgebaut.

Um Putzversuche unter Laborbedingungen durchführen zu können, sind neben Robotern auch Substanzen notwendig, die das Vorhandensein und das Verhalten einer natürlichen organischen dentalen Plaque imitieren.

1.5 Plaquesubstrate für in-vitro Studien

Bei der Auswahl einer geeigneten künstlichen Plaque als Simulation eines natürlichen Biofilms ist entscheidend, dass diese ähnliche Haftungseigenschaften auf der Oberfläche besitzt und einen optischen Kontrast zum Zahn darstellt. Des Weiteren sollte sie standardisiert hergestellt und appliziert werden können, sodass unter Laborbedingungen eine Fehleranfälligkeit so weit wie möglich reduziert und eine Reproduzierbarkeit gewährleistet ist. Dadurch kann eine sachgerechte Aussage in Bezug auf den Plaquebefall vor und nach dem Zähneputzen getroffen werden.

Die meisten, der in Studien verwendeten Plaquesubstrate, weisen einen ausgeprägten farblichen Kontrast zu der künstlichen Zahnoberfläche auf. In den wenigsten Fällen wird eine Aussage zu den physikalischen Eigenschaften wie der Haftfestigkeit und den rheologischen Merkmalen wie der Viskosität der artifiziellen Substanz im Vergleich zu dem oralen natürlichen Biofilm getroffen.

Im Jahre 1979 wurde in bereits erwähnten Versuchen zur Plaquesimulation eine Okklusionsfolie verwendet, die beim Kontakt mit der Zahnoberfläche einen Abdruck hinterließ (Nygaard-Østby et al. 1979).

Ernst et al. (1997) und Danser et al. (2000) bearbeiteten vor den Putzversuchen die künstlichen Zähne mit Aluminiumoxidpulver mit einer Korngröße von 50 µm. Danach erfolgte die Bedeckung der Oberflächen mit der Kaseinfarbe Mali Plus (Eberhard Faber, Germany) sowie Waco Fin (Heinrich Wagner, Germany) mittels eines Pinsels. Eine andere Gruppe verwendete das Aerosol-Pulverspray Occlude (Pascal, USA). Zur Beschichtung wurde die Düse 5 mm von der Oberfläche entfernt und der entstandene Strahl 5 Sekunden senkrecht zur Zielfläche des Zahnes positioniert (Hotta et al. 2009). In den von Kaiser et al. veröffentlichten Untersuchungen wurde eine nicht biologische Mischung wasserlöslicher Farbe mit einer Viskosität von 17 Pa bei 23° auf Frasaco-Zähnen verwendet. Genauere Daten werden in der Publikation nicht erwähnt (Kaiser et al. 2014).

Im Jahre 2018 wurde im Rahmen einer in-vitro Studie zur Reinigungseffizienz einer 360°-Rundkopfbürste ein Okklusionsspray 'Arti-Spot' der Firma Bausch (Köln, Deutschland) eingesetzt (Kim et al. 2017; Jansiriwattana et al. 2018).

Ledder et al. (2019) hingegen verwendeten im Rahmen einer Visualisierung und Quantifizierung von verschiedenen Zahnreinigungsverfahren als simulierte Plaque für einen Teil der Versuchsreihen grünes Markierungsspray, für eine weitere einen Fluoreszenzmarker.

Eine zusätzliche Plaque wurde mit Hilfe einer Polykarbonat-Vakuumfiltereinheit, in der sich anfangs ein steriles Zahnmodell befand, einem künstlichen Speichelmedium, das die Zähne innerhalb von 72 Stunden tropfenweise beschichtete und einem täglich auf die Oberfläche geimpften Speichels einer gesunden erwachsenen Person, entwickelt. Das künstliche Speichelmedium bestand unter anderem aus: Muzin, Trypton, Hefeextrakt, Natriumchlorid, Kaliumchlorid, Calciumchlorid, Cysteinhydrochlorid und Vitamin K1. Die kultivierte Plaque wurde in eine mit destilliertem Wasser vermischte Plaquelösung getaucht, um eine Färbung der beschichteten Zähne zu erhalten.

Hihara et al. publizierten im Jahre 2021 eine in-vitro-Untersuchung, die der klinischen Zulassung eines Gerätes mit dem Namen 'Micro Scale Mist UNIT (MSM)' dienen soll, das mit Hilfe eines Mikronebel-Sprays eine effektive Biofilmentfernung von dem Zahn wie auch der Mundschleimhaut bewirken soll. Für diesen Zweck wurde als simulierte Zahnoberfläche ein Glasobjektträger verwendet, dessen Außenseite zunächst mit dem Speichel von gesunden Probanden beschichtet wurde. Für eine solche Applikation erfolgte eine Zentrifugation der Substanz mit 10.000 Umdrehungen / min für eine Dauer von 7 min. Das dadurch entstandene Übermaß an Speichel wurde mittels Sterifilter mit einer Porengröße von 0,22 µm auf die Glasplatte appliziert, um eine Pellikelbildung, welche sich unter natürlichen klinischen Bedingungen zuerst auf dem Zahn mit Hilfe von Speichelproteinen entwickelt, wie es bereits in den 1970er Jahren bewiesen wurde, zu imitieren (Sonju et al. 1974; Hihara et al. 2021). Daraufhin wurde die Glasplatte sanft mit physiologischer Kochsalzlösung gereinigt, um eine 1-3 µm dünne Pellikelschicht zu erhalten, die dann in einen Glasbehälter getaucht wurde. Dieser Behälter war mit einem Medium aus Trypton, Hefeextrakt, Natriumchlorid, Kaliumphosphatpuffer und Saccharose, kurz Trypton-Hefeextrakt-Saccharose, gefüllt, das eine Ähnlichkeit mit der von Ledder et al. aufweist. Mit Hilfe der Zugabe von vorkultivierten *Streptococcus mutans* wurde die Biofilmbildung eingeleitet. Nach einer Woche unter aeroben Bedingungen bei 37 °C wurde die Glasplatte aus dem Behälter genommen und wiederholt mit physiologischer Kochsalzlösung abgewaschen.

Anschließend folgte die Plaqueentfernung mittels MSM-UNIT und als Vergleich an einer anderen Probe mit einem `Airflow®` der Firma EMS (München, Deutschland) (Hihara et al. 2021).

Da jedoch die Überprüfung der Reinigungseffizienz unter Laborbedingungen nicht nur von der zu verwendeten Zahnbürste und der Plaque abhängt, sondern auch von der Fläche, die die Zahnoberfläche nachahmen soll, ist entscheidend, diese in Bezug auf die Simulationsfähigkeit zu überprüfen und vorher von potentiell irritierenden Störfaktoren zu befreien. Um dies zu ermöglichen, wird bei der Verwendung von Kunststoffzähnen jeglichen Polymertyps, wie auch in dieser Studie, zur Reinigung Isopropanol, nach der IUPAC Nomenklatur als Propan-2-ol bekannt, verwendet (Lake 2016).

2. Zielsetzung

Das Ziel dieser Studie war es zu überprüfen, ob klinische Untersuchungen zur Beurteilung der Reinigungseffektivität von Zahnbürsten ebenfalls unter Verwendung eines Roboters und einer organischen Plaque als Biofilmsimulator reproduziert werden können und sich somit gleiche Resultate abbilden lassen. Das Institute for Oral Medicine an der Universität Witten / Herdecke (ORMED) verwendet bisher für eine Plaquesimulation synthetische (ORMED Standard) und organische (ORMED Flad) Substanzen. Mit der Entwicklung der Automatisierten Plaqueplanimetrie (APP) entstand das Interesse, eine organische Plaquesimulation, die standardisiert im Tauchverfahren eingesetzt werden kann und den biophysikalischen Eigenschaften einer klinischen Plaque entsprechen soll, zu schaffen.

Im ORMED-Archiv befinden sich Ergebnisse einer klinischen video- und kraftkalibrierten Studie mit hoch-kalibrierten Probanden für das bleibende Gebiss (Staufer 2011) sowie Ergebnisse für das Milchgebiss (Fleuter 2015).

Nach der Erfassung der genannten Daten bestand das Ziel darin, realitätsgetreue Verhältnisse unter Laborbedingungen zu schaffen, die eine Vergleichbarkeit mit den klinischen Werten ermöglichen. Hierfür sollte zum einen eine neue organische Plaque verwendet werden, die ähnliche Eigenschaften wie die natürliche aufweist, und zum anderen im Rahmen von Zahnputzsimulationen die gleichen Standardputztechniken und Zahnbürsten unter Einstellung einer bestimmten Anpresskraft in den Untersuchungen berücksichtigt werden. Mit Hilfe von Wiederholungen sollte der Erfolg einer Standardisierung der Zahnreinigungsprozesse unter Laborbedingungen überprüft werden. Anhand der Übersetzung der klinisch- und roboter-ermittelten Daten in einen planimetrischen Plaqueindex (PPI) bestand das Ziel in der finalen Überprüfung der klinischen Reproduzierbarkeit von robotergestützten Methoden unter Verwendung einer neuartigen organischen Plaque.

Zur Überprüfung der Signifikanz dieser Studie sollten statistische Auswertungsverfahren angewendet werden, die alle relevanten Parameter berücksichtigen und die Übereinstimmungsraten zwischen den klinischen und roboter-erfassten Ergebnissen beurteilen.

3. Material und Methode

Es wird auf die verwendeten Materialien und Methoden für die Herstellung der organischen Plaque sowie die Durchführung und Auswertung der robotergestützten Putzmethoden eingegangen. Des Weiteren erfolgt die Darstellung der Auswertungsverfahren der klinischen Bilder aus dem wissenschaftlichen ORMED-Archiv, die zum Teil in die Bearbeitung von Staufer (2011) eingingen.

Im Rahmen der in-vitro Verfahren wurden 18 Putzversuche mit 2 unterschiedlichen Zahnbürsten und 3 verschiedenen Putztechniken an einem Testgebiss der Firma KaVo (Biberach an der Riß, Deutschland) mit jeweils 11 Zähnen (Zahn 33 bis 48) durchgeführt. Nach diesem Vorgang folgte die planimetrische Auswertung der Putzergebnisse mit Hilfe eines Computers.

Zur klinischen Vergleichbarkeit erfolgte daraufhin die Überprüfung der Übereinstimmung der ermittelten Werte mit den klinisch erhobenen Fotostatus, die im Rahmen von Untersuchungen zur Beurteilung der klinischen Reinigungseffizienz von Handzahnbürsten von Staufer (2011) erstellt wurden.

3.1 Klinische Befunde

Für die Erhebung der Fotodentalstatus, die ausschließlich von einem Untersucher durchgeführt wurden, erfolgte die Herstellung einer formgetreuen Maske für jeden einzelnen Zahn. Diese wurde auf den zu bewertenden Zahn gelegt, um sicherzustellen, dass die Felder exakt nach dem modifizierten Navy-Plaque-Index nach Lang et al. (2011) bewertet werden können (siehe Abb. 3).

Daraufhin erfolgte die Beurteilung der Felder A bis I (Feld D mesial und Feld F distal).

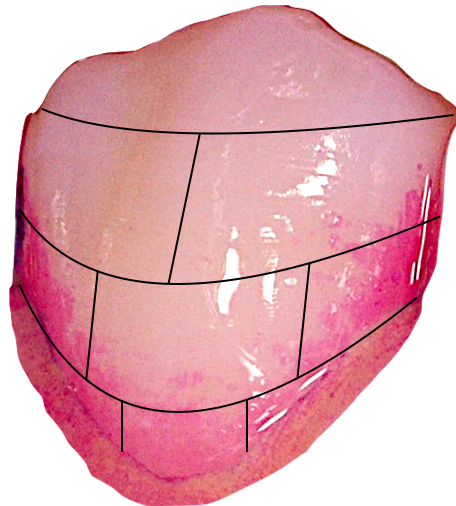


Abbildung 3: Erstellen einer individuellen Maske an Zahn 45

Für die Erstellung einer Maske dienten folgende anatomische Bezugspunkte:

- Gingivaler Sulkus
- Approximaler Kontaktpunkt
- Vertikale Mittellinie
- Anatomischer Äquator

Da die meisten der 30 Probanden keinen dritten Molaren (hier 48) besaßen, wurden die Werte für die Zähne 32 bis 47 und nicht bis 48 ermittelt.

Die Auswertung wurde in einer speziellen Formatvorlage in einer Excel-Datei in die dafür vorgesehenen Bereiche eingetragen (siehe Abb. 4). Jede Zahnfläche (bukkal oder lingual), die ein nicht einzusehendes Feld besaß, z.B. weil sich auf dem Foto an dieser Stelle ein Schatten befand, wurde bei der Auswertung als `NE` (nicht erkennbar) gekennzeichnet (siehe Abb. 5).

47				46				45				44				43				42				41				31				32			
I				I				I				I				I				I				I				I							
H		G		H		G		H		G		H		G		H		G		H		G		G		H		G		H					
F	E	D	F	E	D	F	E	D	F	E	D	F	E	D	F	E	D	F	E	D	F	E	D	D	E	F	D	E	F						
C	B	A	C	B	A	C	B	A	C	B	A	C	B	A	C	B	A	C	B	A	C	B	A	A	B	C	A	B	C						
0			0			0			0			0			0			0			0			0			0								

Abbildung 4: Excel-Datei zur Auswertung der klinischen Bilder; die Auswertung erfolgt mit Hilfe des mod. Navy-Plaques-Index nach Lang et al., wobei die Felder A bis I jeder Zahnfläche (bukkal und lingual) jeweils mit den Werten 0,1 oder 2 ermittelt werden. Im dritten Quadranten (31 und 32) befinden sich somit die distalen Felder (HFC) auf der rechten Seite, welche sich im vierten Quadranten (41 bis 47) auf der linken Seite befinden.

Lingual pre Putzen																																													
X																																													
47				46				45				44				43				42				41				31				32													
2				1				1				1				NE				1				1				1				1													
2		2		1		2		2		2		1		2		NE		NE		2		1		1		1		1		1		1		2											
2		2		2		2		2		2		2		2		NE		NE		NE		2		1		1		2		0		2		2		1		2		2		1		2	
2		2		2		2		2		2		2		2		NE		NE		NE		2		1		2		2		2		2		2		2		2		2		2			
18				16				17				16				0				13				13				14				15													
Lingual post Putzen																																													
X																																													
47				46				45				44				43				42				41				31				32													
1				1				1				1				1				1				1				1				1													
1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1			
2		2		2		2		2		1		2		2		2		1		0		1		1		0		1		1		0		1		1		0		1		1		2	
2		2		2		2		2		2		2		2		2		1		1		1		1		2		1		2		2		2		2		2		2		1			
15				15				14				15				9				9				10				11				12													

Abbildung 5: Ausschnitt der Excel-Datei zur Auswertung der klinischen Bilder; jede Fläche, die nicht vollständig erkennbar ist, wird mit 'NE' (nicht erkennbar) gekennzeichnet. Jeder Zahn, der auf den Bildern nicht vollständig zu bewerten ist, wird mit einem X markiert und in der Statistik nicht beachtet.

Die Beurteilung der Fotos mit Hilfe von Masken und Eintragungen in die dafür vorgesehenen Tabellen erfolgte ausnahmslos an einem Arbeitsplatz mit einem MacBook Pro BigSur Version 11.1 unter gleichen Lichtverhältnissen.

Durchlauf: 3																	
Putztechnik: 1																	
FOTOS UNVOLLSTÄNDIG																	
Vestibulär pre Putzen																	
X			X				X				X				X		X
47			46				45				44				43		42
NE			NE				NE				NE				NE		NE
NE	NE		NE	NE		NE	NE		NE	NE	NE	NE		NE	NE	NE	NE
NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
0			0				0				0				0		0

Durchlauf: 3																	
Putztechnik: 1																	
NICHT AUFFINDBAR																	
Vestibulär pre Putzen																	
X			X				X				X				X		X
47			46				45				44				43		42
NE			NE				NE				NE				NE		NE
NE	NE		NE	NE		NE	NE		NE	NE	NE	NE		NE	NE	NE	NE
NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
0			0				0				0				0		0

Abbildung 6: Ausschnitt der Excel-Auswertungstabelle für die Indexierung der klinischen Bilder. Hier handelt es sich um Proband 11 und 14.

X						X						X					X						
45						44						45					44						
0						1						1					1						
2	2		2	1	2	NE	NE		2	1		1	1		1	1	1	1		1	1		
2	2	2	2	2	2	NE	NE	NE	2	1	1	2	2	1	2	2	2	1	0	1	1	0	1
2	2	2	2	2	2	NE	NE	NE	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2
16			16			0			13			14			15		9			9			

Abbildung 7: Jedes nicht plausible Auswertungsergebnis sowie jeder nicht zu 100 % auswertbare Zahn (NE) wird mit einem X gekennzeichnet und in der Statistik nicht weiter beachtet. Hier handelt es sich um Proband 5.

Da 7 Probanden, die einen Retainer besaßen, wodurch an den Frontzähnen die Gefahr bestand, dass die Reinigungsergebnisse aufgrund der lingual mit Komposit befestigten Metallschiene verfälscht werden konnten, wurden vollständig aus der Auswertung entfernt.

3.2 Organische Plaque

Um die In-vitro-Versuche realitätsgetreu zu gestalten, folgte die Entwicklung einer organischen Plaque, die auf der Rezeptur von Flad (2019) basierte, jedoch so modifiziert wurde, dass ihre Herstellung und der Verbund auf die Versuchszähne standardisiert werden konnte.

Neben der Normierung bestand das Ziel bei der Erarbeitung der neuen Formulierung darin, den Einsatz der Plaque in einer AOC (artificial oral cavity) mit Zahnpasta und Slurry zu ermöglichen und eine multiple Wiederverwendung der Testzahnbürsten zu garantieren.

Die Zusammensetzung des artifiziellen Biofilms besteht aus Kohlenhydraten, Polysacchariden, verschiedenen Proteinen, Wasser und einem Farbstoff zur Relevation der Plaqueerkennung.

Alle Inhaltsstoffe wurden mit Hilfe eines Handrührgerätes vermengt und daraufhin als homogene Masse in das Tauchbecken einer Färbungs- und Trocknungsapparatur gefüllt.

3.3 KaVo-Versuchszähne und Versuchsgebiss

Die Modellzähne der Firma KaVo (Biberach an der Riß, Deutschland) sind in ihrer Härte und Zusammensetzung dem menschlichen Schmelz angenähert und können daher als Studienmodell verwendet werden. Ihre Form und Aufstellung ist ein eugnathes Gebiss, wodurch eine menschliche Dentition repliziert wird. Der Zahnträger besteht aus einem weißen Kunststoff und besitzt speziell angefertigte Einsparungen, in denen die Kunststoffzähne eingebracht und per Schnapphalterung fixiert werden können. In die Trägerplatte wurden folgende Zähne eingespannt: 33, 32, 31, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48.

3.4 Färbungs- und Trocknungsapparatur

Die bereits erwähnte Apparatur dient der gleichmäßigen Beschichtung und Trocknung der Plaque auf den Versuchszähnen unter standardisierten Bedingungen. Sie besteht aus einer Wanne, in die die artifizielle Plaque gefüllt wurde, einem beweglichen Arm, an dessen Ende das KaVo-Studienmodell zu fixieren war, und einer Trocknungsapparatur, durch die unter gleichbleibenden Temperaturverhältnissen mit Hilfe eines Wärmereglers und Ventilators im Laufe einer bestimmten Zeit die kontrollierte partielle Dehydrierung des simulierten Biofilmes auf den künstlichen Zähnen gewährleistet werden konnte. Durch die ausführbaren Bewegungen des Armes wurde ermöglicht, das am Ende einer Schraube befestigte Studienmodell, in die Plaquesimulationssubstanz zu führen und die Zähne gleichmäßig zu beschichten. Daraufhin erfolgte ein reproduzierbarer Trocknungsvorgang durch die Rotation des Studienmodells. Folgende Zeiten waren bei dem Gebrauch der Apparatur einzuhalten:

Zeit im Bad der Färbungs- und Trocknungsapparatur:	3	sec.
Trocknung in der dafür vorgesehenen Apparatur:	60	sec.
Zeit zwischen Tauchbecken und dem Einspannen in den Roboter:	30	sec.

3.5 Sechs-Achsen-Roboter FS 02N der Firma Kawasaki

Die Zahnputzsimulationen wurden mit Hilfe eines Sechs-Achsen-Roboter FS 02N der Firma Kawasaki (Kobe, Japan) vorgenommen. Hierbei erfolgte die Fixierung der entsprechenden Zahnbürste in einer festen Halterung. Eine Anpresskraft von 3,5 N wurde mit Hilfe eines Drucksensors eingestellt, um eine Vergleichbarkeit mit der klinischen Studie, bei der ebenfalls eine Kraft von 3,5 N verwendet wurde, zu ermöglichen. Die Kraftjustierung mittels eines Sensors erfolgte über die Ausrichtung des Borstenfeldes auf einem Fadenkreuz, wobei der Anstellwinkel nach Arnoldi exakt auf $0,1^\circ$ sowie die Anstelltiefe auf 0,1 mm eingestellt werden konnte und die Borsten eine gleichmäßige Positionierung aufwiesen. Anhand eines zweiteiligen Kraftmessers wurde überprüft, ob die Anpresskraft des posterioren und anterioren Bereiches der Borsten gleich waren und in Summe einen Wert von 3,5 N mit einer Toleranzabweichung von $\pm 2,5$ g auf dem Monitor abgebildet wurde. Nach der korrekten Positionierung der Zahnbürste wurde die gewünschte Putztechnik ausgewählt und gestartet.

Folgende Putzvorgänge im Sechs-Achsen-Roboter der Firma Kawasaki (Kobe, Japan) wurden mehrmals durchgeführt:

- 3 x Horizontales Putzen
- 3 x Rotations-Putzen
- 3 x Vertikales Putzen

Ein Putzvorgang enthielt zwei Wiederholungen einer Putztechnik, sodass das Zahnmodell dreimal hintereinander geputzt wurde.

Der Roboter war in der Lage, Bewegungen mit einer Geschwindigkeit von 3,80 mm/s durchzuführen und besaß eine Wiederholungsgenauigkeit von $\pm 0,03$ mm (Arnoldi 2015).

3.6 Verwendete Zahnbürsten

Für die Kalibrierung der klinischen Reproduzierbarkeit der Putzergebnisse war ein Vergleich mit in-vivo Putzversuchen notwendig. Hierfür wurden die Daten aus dem wissenschaftlichen ORMED-Archiv verwendet. Für eine Ermöglichung einer Vergleichbarkeit der Studien handelte es sich bei der Wahl der Mundhygieneartikel um handelsübliche Zahnbürsten der Firma GlaxoSmithKline (Bühl, Deutschland).

In dieser wissenschaftlichen Arbeit wird die `Dr. Best Flex Plus medium´ als Zahnbürste A (Abbildung 1) und die `Dr. Best Interdental medium´ als Zahnbürste B (Abbildung 2) bezeichnet. Ihre Borstenstärke beträgt `mittel´.

Technische Einzelheiten der Zahnbürsten sind wie folgt dargestellt:

1. Zahnbürste A

Anzahl der Borstenbüschel:	43
Länge der Borsten:	11,5 mm
Länge des Borstenkopfes:	31 mm
Breite des Borstenkopfes:	12 mm
Borstenmaterial:	Nylon (PA 6.12 Polyamid)

2. Zahnbürsten B

Anzahl der Borstenbüschel:	42
Länge der Borsten:	10 mm, 11 mm
Länge des Borstenkopfes:	31 mm
Breite des Borstenkopfes:	12 mm
Borstenmaterial:	Nylon (PA 6.12 Polyamid)

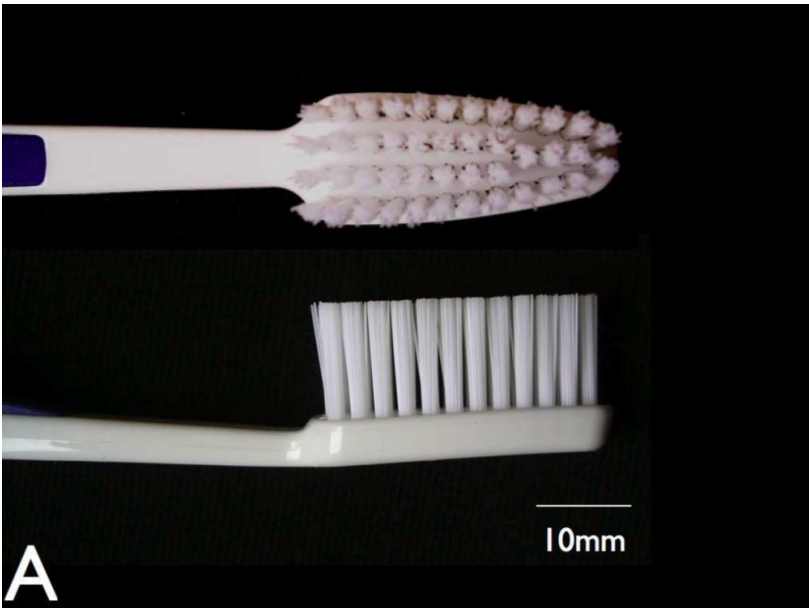


Abbildung 8: Dr. Best Flex Plus medium, Zahnbürste A

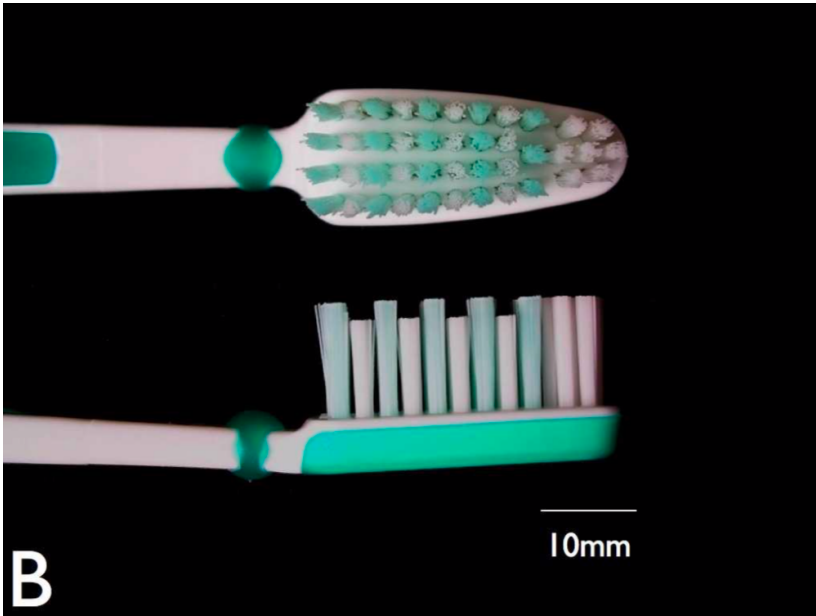


Abbildung 9: Dr. Best Interdental medium, Zahnbürste B

3.7 Entriegelungsapparatur

Nach der Durchführung des Putzvorganges dient eine spezielle Apparatur dazu, die Zähne von dem Zahnträger zu lösen. Sie besteht aus einer Metallplatte, auf der sich auf Höhe der Einsparung des Zahnträgers Löcher befinden. Mit Hilfe eines Hebelarmes werden Metallzylinder gegen das Zahnmodell gedrückt, was zum Austritt der Kunststoffzähne aus dem Modellträger führt.



Abbildung 10: Entriegelungsapparatur

3.8 Aufbau und Ablauf der in-vitro Untersuchung

Um eine Putzsimulation durchführen zu können, wird eine der Testzahnbürsten in den Sechs-Achs-Roboter standardmäßig eingespannt und die zu verwendende Reinigungskraft von 3,5 N mittels Ausrichtung des Anstellwinkels und der -tiefe eingestellt. Die Trägerplatten werden mit Kunststoffzähnen der Firma KaVo (Biberach an der Riß, Deutschland) bestückt. Folgende Zähne werden in die Unterkieferträgerplatte eingesetzt:

33, 32, 31, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47 und 48.

Eine Reinigung der Zähne vor den Versuchsdurchführungen erfolgt durch die Verwendung von in wässriger organischer Lösung verdünntes 70%iges Propan-2-ol mit einer Einwirkzeit von mindestens 10 Minuten. Daraufhin wird das Modell mit Hilfe der Färbungs- und Trocknungsapparatur innerhalb von 60 Sekunden mit der frisch vermengten organischen Plaque nach Pepin/Greune beschichtet und getrocknet.

Nach weiteren 30 Sekunden, in denen das Modell in den Sechs-Achs-Roboter der Firma Kawasaki (Kobe, Japan) einzuspannen ist, wird die erwünschte Zahnputztechnik eingestellt und gestartet.

Folgende Zahnputztechniken werden in den Versuchen verwendet:

- Putztechnik 1** - Horizontales Putzen
- Putztechnik 2** - Rotations-Putzen
- Putztechnik 3** - Vertikales Putzen

Nach den entsprechenden Putzsimulationen werden die Zähne von ihrer Trägerplatte gelöst und in der Dunkelkammer der APP an der vorgesehenen Stelle, in der die standardisierte Auswertung des Plaquebefalls der Zähne 32 bis 47 erfolgt, eingegliedert.

3.9 Auswertung der Reinigungseffizienz

Um ermitteln zu können, wie hoch die klinische Reproduzierbarkeit mit Hilfe einer robotergestützten Methode und der Verwendung der artifiziellen organischen Plaque ist, besteht die Notwendigkeit, die verfügbaren klinischen Bilder und die Ergebnisse der APP auszuwerten, um sie daraufhin miteinander vergleichen zu können.



Abbildung 11: Klinische Plaque nach dem Ablauf von 72 Stunden Plaque-Akkumulation an den Zähnen 32-42 (rechts), 43-45 (mittig) und 46-47 (links)



Abbildung 12: Klinische Plaque nach dem Zahnputzvorgang mit einer Anpresskraft von 3,5 N



Abbildung 13: Künstliche organische Plaque auf KaVo Zähnen vor dem Putzvorgang; Zahn 32-42 (rechts), Zahn 43-45 (mittig), Zahn 46-47 (links)



Abbildung 14: Künstliche organische Plaque auf KaVo Zähnen nach dem Putzvorgang mit einer Anpresskraft von 3,5 N; Zahn 32-42 (rechts), Zahn 43-45 (mittig), Zahn 46-47 (links)

3.9.1 Automatisierte-Plaques-Planimetrie (APP)

Die APP ist eine computergesteuerte Einheit des Institutes ORMED (Witten, Deutschland) und der Firma M+C Schiffer (Neustadt, Deutschland) zur Erhebung der Anteile der gereinigten Zahnoberflächen im Rahmen von in-vitro Versuchen. Sie besteht aus einer Dunkelkammer, einer Kamera mit Lichtquelle, einer Analysesoftware, die ein Bildbearbeitungssystem und eine Auswertungseinheit beinhaltet, sowie einer auf einem beweglichen Schlitten fixierten Spezialhalterung für die KaVo-Modellzähne (Abbildung 15) und einem Monitor mit einem Tuchpanel. Jeder Zahn wird durch den Schlitten nacheinander vor die Kamera geschoben. Durch die Beweglichkeit der Spezialhalterung ist die APP in der Lage vier Seiten, mesial, distal, lingual und vestibulär, jedes Zahnes zu fotografieren und danach zu bewerten. Für die Beurteilung des Plaquebefalls legt die APP virtuell die hierfür entsprechende Maske auf die Zahnoberflächen. Untersucht werden mit Hilfe der pixelgenauen Planimetrie 4 Situs je Zahn, welche in insgesamt 30 Felder (9 bukkal, 9 lingual, 3 mesial, 3 distal, 1 bukkal gingival, 1 lingual gingival, 2 mesial gingival und 2 distal gingival) unterteilt werden. Durch eine Kontrastberechnung auf dem Zahn wird anhand der Software der prozentuale Anteil der Plaque auf jeder der Zahnflächen ermittelt und für jede Seite der endgültige Prozentsatz der gereinigten Fläche angegeben. Bei der Bewertung der Zahnoberfläche ist eine Abweichung von bis zu 6% möglich (Arnoldi 2015). Um eine genaue Auswertung gewährleisten zu können, wurde eine neue Einstellung auf der APP speziell für die organische Plaque programmiert.



Abbildung 15: Dunkelkammer der APP

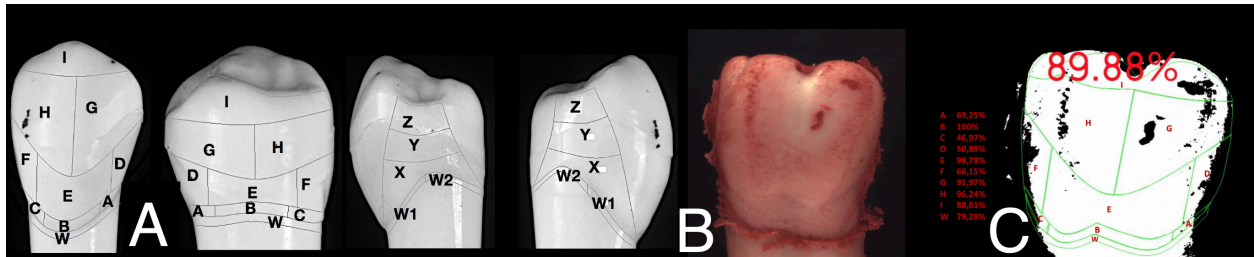


Abbildung 16: Planimetrische Felder des Zahnes 43 (A) vestibulär (erstes Foto von links), lingual (zweites Foto), mesial (drittes Foto), distal (viertes Foto von links); Beispiel einer APP Auswertung anhand eines Fotos (B) und einer darauf projizierten Maske (C), 89,88% stellt den prozentualen Anteil der gereinigten Bereiche der abgebildeten Fläche dar, der sich aus dem Durchschnitt der Werte A bis W ergibt.



Abbildung 17: Beispiel eines in der APP fotografierten Zahnes 31

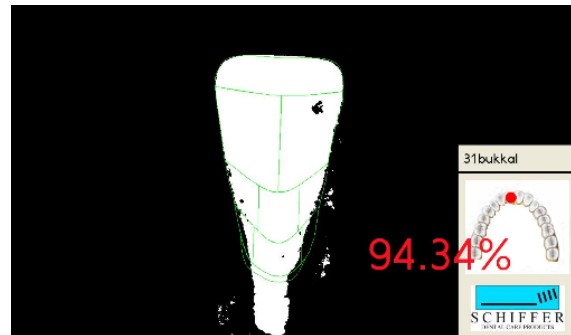


Abbildung 18: Beispiel einer APP Auswertung an Zahn 31; die Prozentzahl (94,34%) gibt den Anteil der gereinigten Bereiche der bukkalen Fläche des Zahnes an.

Nach Erfassung der einzelnen Werte sollten diese in den planimetrischen Plaque Index (PPI) umgerechnet werden (Lang et al. 2011). Bei dem erwähnten Index handelt es sich um eine Darstellung des Plaquebefalls eines Zahnes. Da in der APP die Reinigungseffizienz als Prozentanteil der entfernten Beläge ermittelt wurde und somit nicht der Plaquebefall an sich, war es notwendig diesen umzuschreiben, bevor er in den PPI übersetzt werden konnte. Hierfür wurde ein Statistiker hinzugezogen.

Der PPI beurteilt den Anteil von Belägen an 9 verschiedenen Feldern pro Zahnfläche. Diese Aufteilung der Felder basiert auf den modifizierten Navy-Plaque-Index nach Rustogi et al. (1992) und ist von A bis I gekennzeichnet, wobei sich das Feld D mesial und F distal befindet.

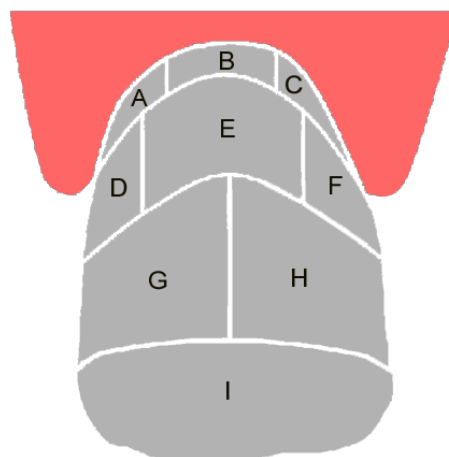


Abbildung 19: Mod. Navy-Plaque-Index nach Lang et al. (2011)

Die Beurteilung der Reinigungseffizienz mit einem solchen Indexsystem ist besonders für die Evaluierung von Mundhygieneprodukten geeignet (Bretz 2010).

Die Bewertung der Präsenz von Plaque wird in 3 Grade eingeteilt (Lang et al. 2011):

- Grad 0** - das entsprechende Zahnfeld ist frei von Plaque
- Grad 1** - sichtbare Plaque vorhanden, welche $\leq 50\%$ des Feldes überdeckt
- Grad 2** - sichtbare Plaque vorhanden, welche $> 50\%$ des Feldes überdeckt

3.10 Statistische Auswertung

3.10.1 Versuchsanordnung

Um die Auswertungsergebnisse der APP mit den klinischen Daten vergleichen zu können, wurden bei der Durchführung der in-vitro Putzversuche die gleichen Zahnbürsten, Putztechniken und die gleiche Anpresskraft von 3,5 N verwendet. Wie auch in den klinischen Untersuchungen wurden unter Laborbedingungen jeweils 3 Durchläufe pro Putztechnik und Zahnbürste veranlasst.

Folgende Zähne wurden in der Statistik berücksichtigt:

32, 31, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47

Da bei den klinischen Bildern die mesialen und distalen Flächen nicht erkennbar waren, wurden nur die bukkalen und lingualen Felder mit den APP-Werten verglichen. Somit besaß jeder Zahn 18 (9 bukkal + 9 lingual) und jedes Modell 162 (18 x 9) auszuwertende Flächen.

Der Plaquebefall der Flächen nach der Reinigung wurde sowohl bei den in-vitro Daten der APP als auch bei den in-vivo Daten der Excel-Datei mit dem klinischen planimetrischen Plaqueindex (PPI) pro Feld, Areal und insgesamt erfasst, ausgewertet und miteinander verglichen. Durch die Nutzung des besagten Index, konnte eine Zahnfläche (bukkal oder lingual) bei der Addition aller dazugehörenden Felder A bis I die Werte von mindestens 0 (= jedes Feld erhält den Wert 0) oder maximal 18 (= jedes Feld von A bis I erhält den Wert 2) erhalten.

32			32		
2			0		
2	2	2	0	0	0
2	2	2	0	0	0
2	2	2	0	0	0
18			0		

Abbildung 20: Zahn 32 vor (rot) und nach (grün) dem Putzvorgang; vor dem Putzvorgang wies jedes Feld (A-I) einen Plaquebefall von > 50% auf und erhielt somit für jedes Feld den Wert 2, was in Summe 18 ergibt (links); nach dem Putzen ist auf der Zahnfläche keine Plaque mehr zu erkennen, sodass jedes Feld den Wert 0 erhält und in Summe 0 ergibt (rechts).

Es wurden folgende 4 Statistiken pro Zahnbürste (A, B) und pro Putzbewegung (1, 2, 3) erstellt, wodurch insgesamt 24 Vergleiche zu verzeichnen waren:

- bukkal total
- lingual total
- bukkal Felder ABCDF
- lingual Felder ABCDF

Bei der Auswertung erhielten die Felder A, B, C, D und F eine besondere Bedeutung, da sie aufgrund ihrer Positionen als sogenannte Risikofelder eingestuft wurden.

Jede Zahnfläche, die bei den klinischen Daten als `NE` oder mit einem `X` gekennzeichnet wurde oder vor der Durchführung des Putzverfahrens höhere Plaquewerte aufwies als nach dem Putzen, wurde aus der Statistik entfernt. Einige klinische Bilder waren in der Datenbank nicht auffindbar. Diese waren in der Auswertung mit `nicht auffindbar` oder `Fotos unvollständig` gekennzeichnet. Bei 8 Probanden war jeweils ein Retainer im Unterkiefer vorhanden. Diese Probanden wurden aus der Statistik entfernt, sodass real 22 Probanden in den Untersuchungen berücksichtigt wurden.

3.10.2 Statistische Auswertungsverfahren

Alle klinischen und robotergestützten Daten wurden unter Berücksichtigung der Tatsache, dass der verwendete Plaque-Index ordinalskalierte Variablen darstellte, mittels eines t-Tests für unabhängige Stichproben, eines Kolmogorow-Smirnov-Tests sowie eines Wilcoxon-Mann-Whitney-U-Test statistisch analysiert.

Durch die mehrmalige Wiederholung der Putzvorgänge mit zwei unterschiedlichen Zahnbürsten im Labor entstand ein Datensatz von 2916 Flächen, die dem Vergleich der klinischen Werte dienten. Anhand der Beurteilung der klinischen Fotos wurden 8541 Felder ermittelt, die mit den Laborergebnissen zu vergleichen waren.

Ob Ähnlichkeiten der klinischen Parameter (μ_1) mit den APP-Parametern (μ_2) bezüglich ihrer errechneten Mittelwerte \bar{x} vorlagen, wurde mit Hilfe des t-Tests für unabhängige Stichproben als statistischen Signifikanztest ermittelt. Hierbei entsprach die Nullhypothese der Übereinstimmungshypothese (Bortz et al. 2010):

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

Ob eine Normalverteilung (F_0) der ermittelten APP-Parameter vorlag, wurde mit Hilfe des Kolmogorow-Smirnow-Testes überprüft. Hierfür erfolgte die Formulierung einer entsprechenden Nullhypothese:

$$H_0 : F(x) = F_0(x), \text{ wobei } x \text{ eine Zufallsvariable darstellte.}$$

Somit wurde die Nullhypothese beibehalten, wenn die untersuchte Zufallsvariable x eine Normalverteilung aufwies, andernfalls musste sie verworfen werden. Bezugnehmend auf die Größe des Stichprobenumfangs in der vorliegenden Arbeit war dieser Test besser geeignet als der χ^2 -Anpassungstest, der nur approximative Werte darstellt (Hartung 2009). Daher wurde der χ^2 -Test aufgrund des geringeren Informationsgehaltes nicht in der statischen Auswertung verwendet.

Im Gegensatz zu den bereits erwähnten Testverfahren stellt der Wilcoxon-Mann-Whitney-U-Test eine verteilungsfreie Methode dar. Für dessen Verwendung ist eine Ordinalskalierung, also Ranggrößenverteilung, der untersuchten Datenreihen notwendig,

wodurch ein solches Verfahren auch als Rangsummentest bezeichnet wird (Hedderich et al. 2016). Der Test diene der Überprüfung, ob hinsichtlich der zentralen Tendenz signifikante Abweichungen der beiden untersuchten Untergruppen zu verzeichnen waren. Der Wilcoxon-Mann-Whitney-U-Test ist besonders empfindlich gegenüber Medianwertunterschieden, jedoch unempfindlich gegenüber Varianzunterschieden, weshalb für die Untersuchung einer Varianz andere Testverfahren herangezogen werden sollten.

4. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Resultate der klinischen Daten dargestellt und mit den Laboruntersuchungen verglichen.

4.1 Vortest auf Normalverteilung

Bevor weitere Auswertungen erfolgten, wurde der Kolmogorov-Smirnov-Test durchgeführt. Anhand dieses Anpassungstestes wurde geprüft, ob die untersuchten Stichproben eine Normalverteilung aufwiesen (Rinne 2008). Bei einem Stichprobenumfang von $N=18$ wurde anhand des besagten Testes mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ unter Erfassung der exakten sowie der nach Lilliefors korrigierten Signifikanzwerte bestätigt, dass eine Normalverteilung vorlag.

Tabelle 1: Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest zur Beurteilung des Vorliegens einer Normalverteilung

Situs	N	Teststatistik	p (asymptotisch)	p (exakt)
bukkal APP)	18	0.190	.084 ^c	0.475
lingual (APP)	18	0.099	.200 ^c	0.987
ABCDF bukkal (APP)	18	0.133	.200 ^c	0.865
ABCDF lingual (APP)	18	0.088	.200 ^c	0.997
bukkal (klinisch)	18	0.157	.200 ^c	0.709
lingual (klinisch)	18	0.117	.200 ^c	0.941
ABCDF bukkal (klinisch)	18	0.107	.200 ^c	0.972
ABCDF lingual (klinisch)	18	0.109	.200 ^c	0.968

Erläuterung: Stichprobenumfang (N), Test-Statistik, nach Lilliefors korrigierter Signifikanzwert p (asymptotisch) und exakter Signifikanzwert p (exakt)

Alle ermittelten Werte liegen außerhalb des Signifikanzniveaus, das vor den Untersuchungen bestimmt wurde. Daher kann die Annahme, dass eine Normalverteilung vorliegt, bestätigt werden.

4.2 Vergleich der klinischen und der Roboter-Reinigungseffizienz der Zahnbürsten

In den Abbildungen 21 bis 23 ist die Reinigungseffizienz der jeweiligen Zahnbürsten rein deskriptiv statistisch und grafisch abgebildet, wobei die Daten separat für jedes Testverfahren (Klinik, Roboter), für die Glattflächen (bukkal und lingual) sowie die Risikofelder (ABCDF bukkal, ABCDF lingual) berücksichtigt wurden. Für jede Putztechnik wurde eine eigene Abbildung erstellt. Eine separate Darstellung der genannten Daten ist auf der x-Achse zu erkennen. Zum Vergleich der Ergebnisse wurde der modifizierte Plaque-Index nach Lang et al. (2011) berücksichtigt, sodass auf der y-Achse der jeweilige Index abgebildet ist. Da der höchste PPI-Wert an Glattflächen, der aufgrund der Anzahl der Felder A bis I sowie der möglichen Indexierung pro Feld von PPI 0 bis 2 zu erreichen sein kann, 18 und der geringste Wert 0 beträgt, ist der Verlauf der y-Achse von 0 bis 18 abgebildet. Dargestellt sind arithmetische Mittel sowie Konfidenzintervalle im Sinne mehrerer Fehlerbalkendiagramme, die der Verdeutlichung der Wertstreuung dienen. Diese sind besonders gering an den Risikofeldern bukkal sowie lingual unter klinischen Bedingungen wie auch unter Laborbedingungen (APP). Die Fläche mit der höchsten Streuung war bei allen drei Putztechniken die linguale Glattfläche unter klinischen Bedingungen. Insgesamt betragen die durchschnittlichen Abweichungen zwischen den klinischen Ergebnissen und den Roboter-Ergebnissen PPI 0,579.

Weitere Beschreibungen der einzelnen Ergebnisse folgen separat für jede der Putzverfahren:

1. Horizontales Putzverfahren (Abb. 21)
2. Rotierendes Putzverfahren (Abb. 22)
3. Vertikales Putzverfahren (Abb. 23)

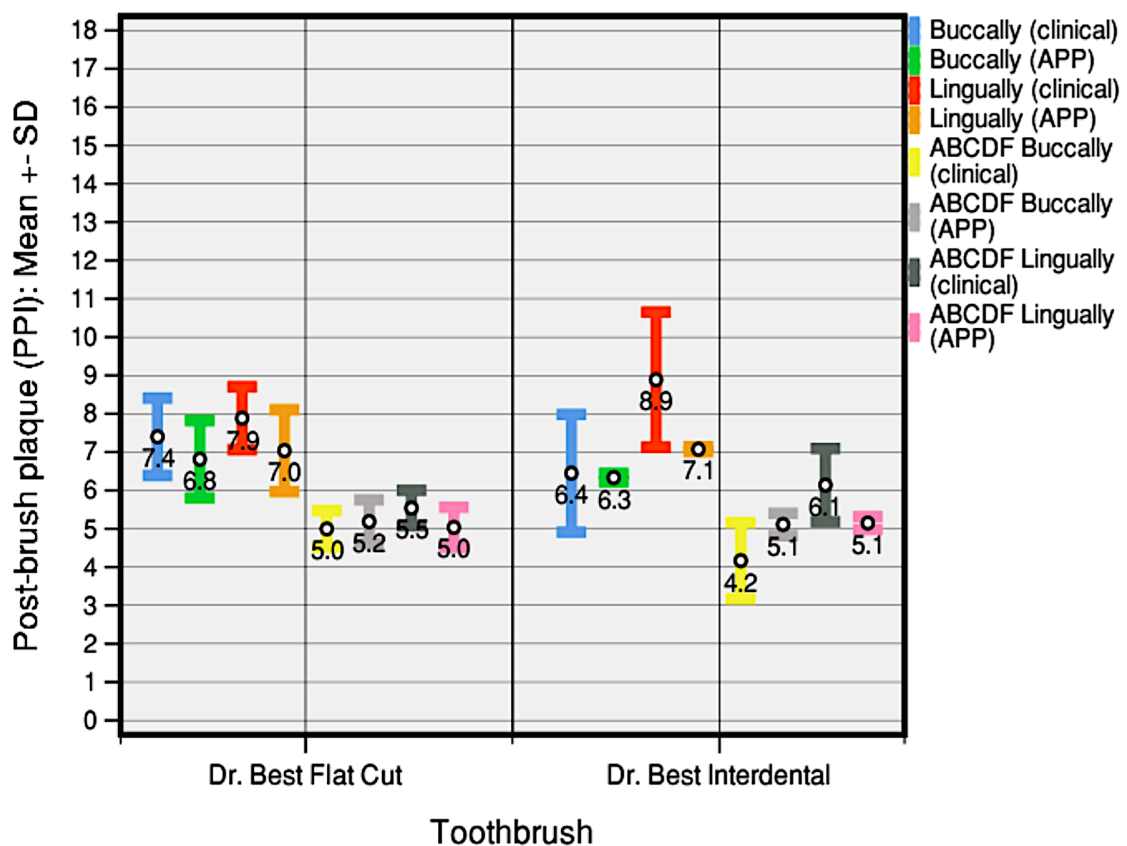


Abbildung 21: Horizontales Putzen; Plaquebefall nach dem Zahnputzvorgang bewertet mit dem modifizierten Navy-Plaque-Index nach Lang et al. 2011 (PPI = planimetrical plaque index) bei klinischen und transformierten APP-Werten; Dr. Best Flat Cut (Flex Plus, Zahnbürste A), Dr. Best Interdental (Zahnbürste B); bukkale Glattfläche (zur Wange hin, blau=klinisch, grün=APP), linguale Glattfläche (zur Zunge hin, rot=klinisch, orange=APP) und bukkale sowie linguale Risikofelder ABCDF (in der Nähe zum Gingivarand) für zwei Zahnbürsten

Bei der Ausübung der horizontalen Putztechnik wurden insgesamt 4095 Daten erfasst. Insbesondere lässt sich anhand der Abbildung 21 erkennen, dass es geringe Streuungen und ähnliche Mittelwerte bei den Ergebnissen der Risikofelder sowohl im Vergleich der klinischen mit den in-vitro Ergebnissen als auch bei den beiden Zahnbürsten untereinander gibt. Eine maximale Differenz der Mittelwerte der beiden Zahnbürsten ist bei dem Vergleich der lingualen Fläche unter klinischen Bedingungen mit einem Wert von 1 zu verzeichnen, was bedeutet, dass in diesem Untersuchungsbereich der durchschnittlich erfasste modifizierte Plaque-Index in Höhe von 1 variiert. Zu verzeichnen ist ebenfalls, dass die Streuung der klinischen und transformierten APP-Werte besonders bei der ersten Zahnbürste (Dr. Best Flat Cut) starke Ähnlichkeiten untereinander aufweisen, wo hingegen bei der zweiten Zahnbürste (Dr. Best Interdental) stärkere Unterschiede bezüglich der Streuung vorzufinden sind.



Abbildung 22: Rotations-Putzen; Plaquebefall nach dem Zahnputzvorgang bewertet mit dem modifizierten Navy-Plaque-Index nach Lang et al. 2011 (PPI = planimetrical plaque index) bei klinischen und transformierten APP-Werten; Dr. Best Flat Cut (Flex Plus, Zahnbürste A), Dr. Best Interdental (Zahnbürste B); bukkale Glattfläche (zur Wange hin, blau=klinisch, grün=APP), linguale Glattfläche (zur Zunge hin, rot=klinisch, orange=APP) und bukkale sowie linguale Risikofelder ABCDF (in der Nähe zum Gingivarand) für zwei Zahnbürsten

Nach Ausübung der rotierenden Putztechnik lassen sich anhand der Ergebnisse, die sich aus einem Datensatz von 4293 planimetrischen Feldern ergaben, zeigen, dass keine der Zahnbürsten eine Überlegenheit der anderen gegenüber besitzt. Die Putzergebnisse nach dem rotierenden Putzverfahren verdeutlichen jedoch insgesamt ein Defizit bei den klinischen Werten im lingualen Situs mit hohen Streuungen. Wohingegen die transformierten Index-Werte der APP vergleichsweise geringer und deutlich streuungsärmer ausfallen. Der durchschnittliche Plaquebefall ist an den lingualen Glattflächen am höchsten und an den Risikofeldern am geringsten.

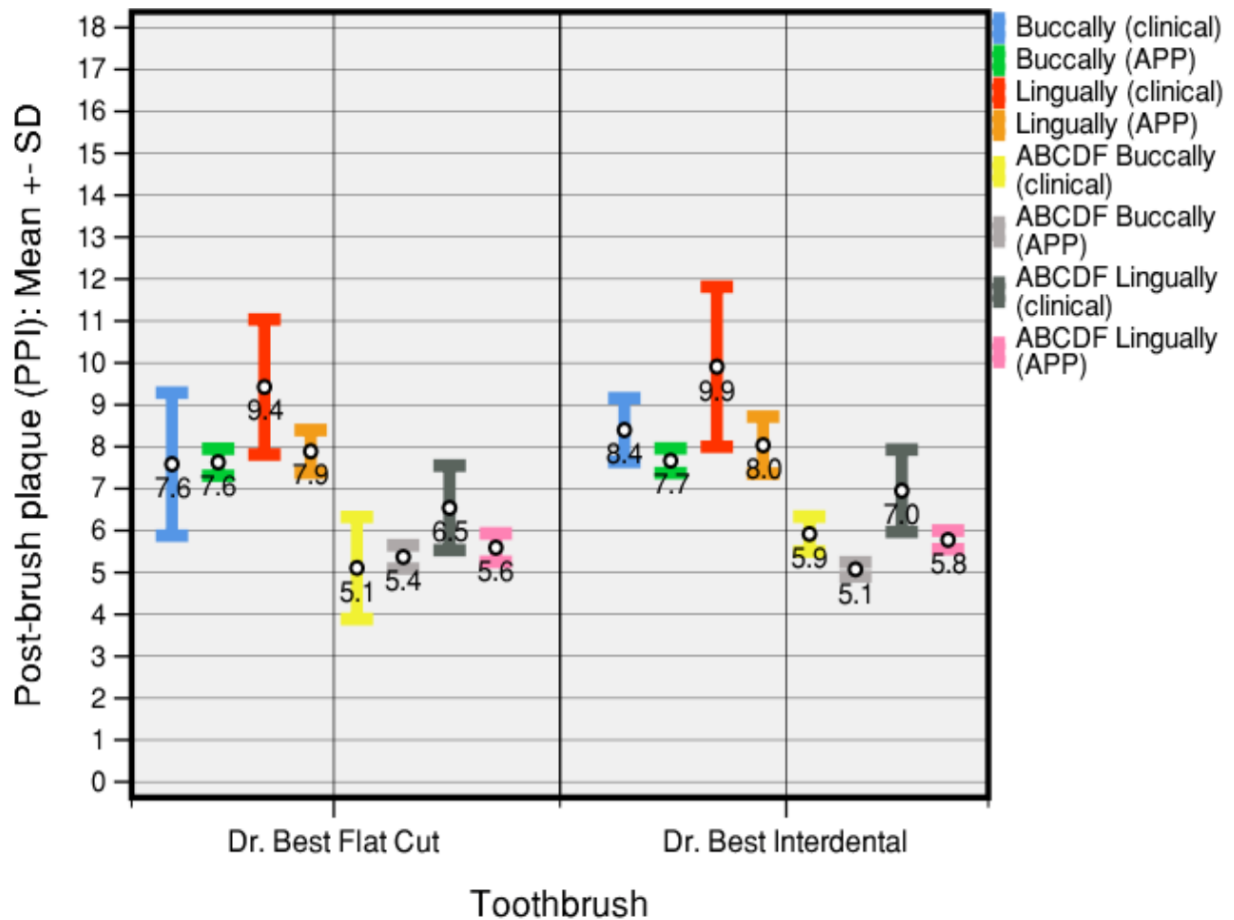


Abbildung 23: Vertikales Putzen; Plaquebefall nach dem Zahnputzvorgang bewertet mit dem modifizierten Navy-Plaque-Index nach Lang et al. 2011 (PPI = planimetric plaque index) bei klinischen und transformierten APP-Werten; Dr. Best Flat Cut (Flex Plus, Zahnbürste A), Dr. Best Interdental (Zahnbürste B); bukkale Glattfläche (zur Wange hin, blau=klinisch, grün=APP), linguale Glattfläche (zur Zunge hin, rot=klinisch, orange=APP) und bukkale sowie linguale Risikofelder ABCDF (in der Nähe zum Gingivarand) für zwei Zahnbürsten

Auch bei dem vertikalen Putzverfahren ist keine deutliche Überlegenheit einer Zahnbürste zu erkennen. Die Resultate ergeben sich aus der Berücksichtigung von insgesamt 4473 Daten. Auffällig sind jedoch multiple Streuungen der Situs bukkal (klinisch), lingual (klinisch) und ABCDF lingual (klinisch) bei beiden Zahnbürsten.

4.3 Bewertung der Übereinstimmung der klinischen und der Roboter-Ergebnisse

Mit dem Wissen, dass die maximale Differenz (Δ) von zwei planimetrischen Feldern unter Benutzung des modifizierten Navy-Plaque-Index nach Lang et al. 2011 $PPI = 2$ beträgt, und dass jede Zahnfläche (bukkal, lingual) in 9 Felder (A-I) aufgeteilt wird, kann der höchstmöglich erfasste Unterschied zwischen zwei Zahnflächen $\Delta = 18$ und die vollständige Übereinstimmung der Daten die Zahl $\Delta = 0$ betragen.

Überträgt man diese Fakten in prozentuale Übereinstimmungsraten (ÜR), so ist die Rate bei identischer Summe der Felder von zwei Zahnflächen 100% und bei einer maximalen Differenz (Differenz = 18) 0%.

$$\text{ÜR (PPI klinisch, PPI APP) in \%} = \frac{18 - \Delta}{18} \times 100$$

Für die Aufstellung der Übereinstimmungsraten unter Betrachtung der Risikofelder ABCDF ist ein höchstmöglich erfasster Unterschied nicht 18, sondern 10, sodass die zu verwendende Formel für die Umrechnung wie folgt angepasst wurde:

$$\begin{aligned} \text{ÜR (PPI klinisch ABCDF, PPI APP ABCDF) in \%} \\ = \frac{10 - \Delta}{10} \times 100 \end{aligned}$$

Anhand von Beispielen lassen sich solche Übertragungen der Mittelwertdifferenzen in Übereinstimmungsraten verdeutlichen. Dargestellt wird auf der linken Seite der planimetrische Plaque Index (PPI) mit dem entsprechenden Testverfahren (klinisch oder mittels APP), der Putztechnik (horizontal, rotierend oder vertikal), dem Situs (bukkal, lingual oder ABCDF bukkal / lingual) und der Zahnbürste (Dr. Best Flex Plus Medium, Dr. Best Interdental Medium):

PPI Testverfahren (Putztechnik, Situs, Zahnbürste) = Mittelwert (siehe Abb. 21-23)

PPI klin	(vertikal, bukkal, Flex Plus)	=	7,6	
PPI APP	(vertikal, bukkal, Flex Plus)	=	7,6	
Δ	(PPI klin vs. PPI APP)	=	7,6 – 7,6	= 0
ÜR	(PPI klin vs. PPI APP)	=	(18-0) / 18 x 100	= 100%
PPI klin	(horizontal, lingual, Dr. Best Interdent)	=	8,9	
PPI APP	(horizontal, lingual, Dr. Best Interdent)	=	7,1	
Δ	(PPI klin vs. PPI APP)	=	8,9 – 7,1	= 1,8
ÜR	(PPI klin vs. PPI APP)	=	(18-1,8) / 18 x 100	= 90%
PPI klin	(rotierend, ABCDF bukkal, Flex Plus)	=	4,4	
PPI APP	(rotierend, ABCDF bukkal, Flex Plus)	=	5,8	
Δ	(PPI klin vs. PPI APP)	=	4,4 – 5,8	= 1,4
ÜR	(PPI klin vs. PPI APP)	=	(10-1,4) / 10 x 100	= 86%

Mit Hilfe dieser Erkenntnis wurden aus den zuvor dargestellten Mittelwerten die Übereinstimmungsraten zwischen den klinischen Daten und den dazugehörigen in-vitro Daten erfasst und anhand von Tabellen sowie Säulendiagrammen veranschaulicht. Die entsprechenden Abbildungen sind dargestellt.

Tabelle 2: Übereinstimmungsraten Dr. Best Flex Plus PPI klin. vs. PPI APP in % (($\Delta = 0$) = (AR = 100%))

Situs \ Putzverfahren	horizontal	rotierend	vertikal
bukkal	96,7%	99,4%	100,0%
lingual	95,0%	85,0%	91,7%
ABCDF bukkal	98,0%	86,0%	97,0%
ABCDF lingual	95,0%	84,0%	91,0%

Tabelle 3: Übereinstimmungsrate Dr. Best Interdent, PPI klin. vs. PPI APP in % ($\Delta = 0$) = (ÜR = 100%)

Situs \ Putzverfahren	horizontal	rotierend	vertikal
bukkal	99,4%	96,1%	96,1%
lingual	90,0%	93,9%	89,4%
ABCDF bukkal	91%	89%	92%
ABCDF lingual	90%	94%	88%

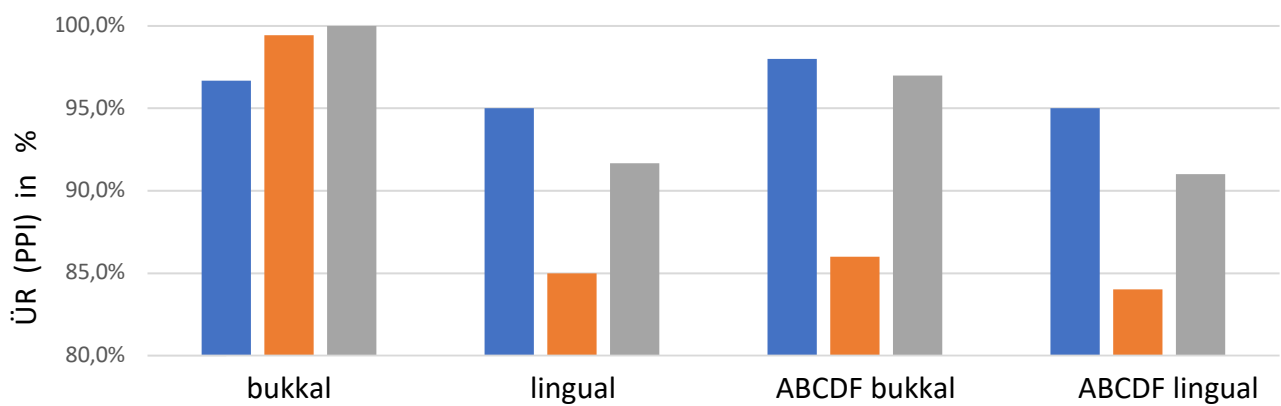


Abbildung 24: Übereinstimmungsrate (ÜR) Dr. Best Flex Plus, PPI klin. vs. PPI APP in % in Bezug nehmend auf Abbildung 21-23; $\Delta (0) = \text{ÜR} (100\%)$, Putzverfahren: horizontal (blau), rotierend (orange), vertikal (grau)

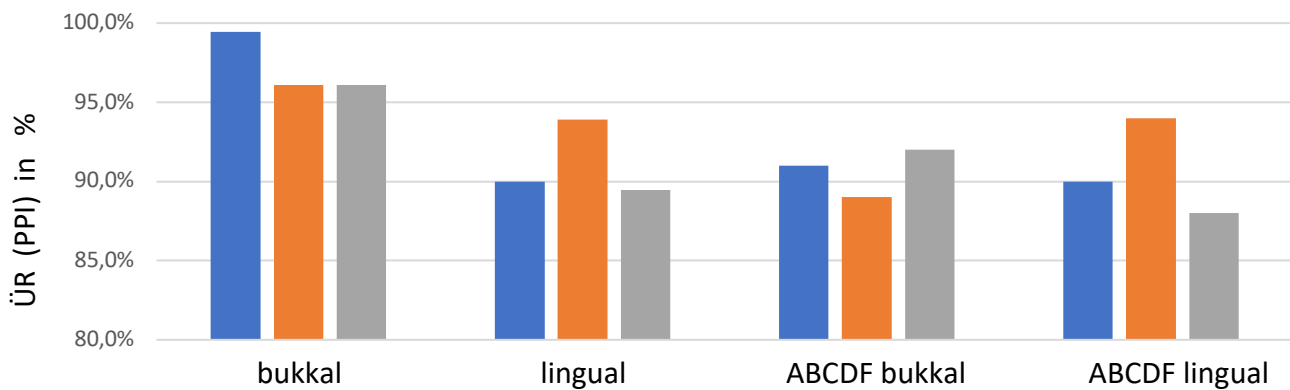


Abbildung 25: Übereinstimmungsrate (ÜR) Dr. Best Interdent, PPI klin. vs. PPI APP in % in Bezug nehmend auf Abbildung 21-23; $\Delta (0) = \text{ÜR} (100\%)$, Putzverfahren: horizontal (blau), rotierend (orange), vertikal (grau)

Anhand der Abbildungen ist ersichtlich, dass alle Daten eine Übereinstimmung von über 83% aufweisen. Besonders die bukkalen Glattflächen erreichen zu über 95% identische Werte. Eine absolute Übereinstimmung der Daten ist bei dem Vergleich der klinischen mit den APP-Werten unter Verwendung der Dr. Best Flex Plus und unter Durchführung der vertikalen Putztechnik an dem bukkalen Situs zu verzeichnen. Die errechneten Daten wurden anhand der Übereinstimmungsraten ordinalskaliert und anhand einer Tabellierung veranschaulicht:

Rang	Zahnbürste	Putztechnik	Situs	ÜR
1	Dr. Best Flex Plus	vertikal	bukkal	100%
2	Dr. Best Flex Plus	rotierend	bukkal	99,4%
2	Dr. Best Interdent	horizontal	bukkal	99,4%
3	Dr. Best Flex Plus	horizontal	ABCDF bukkal	98%
4	Dr. Best Flex Plus	vertikal	ABCDF bukkal	97%
5	Dr. Best Flex Plus	horizontal	bukkal	96,7%
6	Dr. Best Interdent	rotierend	bukkal	96,1%
6	Dr. Best Interdent	vertikal	bukkal	96,1%
7	Dr. Best Flex Plus	horizontal	lingual	95%
7	Dr. Best Flex Plus	horizontal	ABCDF lingual	95%
8	Dr. Best Interdent	rotierend	ABCDF lingual	94%
9	Dr. Best Interdent	rotierend	lingual	93,9%
10	Dr. Best Interdent	vertikal	ABCDF bukkal	92%
11	Dr. Best Flex Plus	vertikal	lingual	91,7%
12	Dr. Best Flex Plus	vertikal	ABCDF lingual	91%
12	Dr. Best Interdent	horizontal	ABCDF bukkal	91%
13	Dr. Best Interdent	horizontal	lingual	90%
13	Dr. Best Interdent	horizontal	ABCDF lingual	90%
14	Dr. Best Interdent	vertikal	lingual	89,4%
15	Dr. Best Interdent	rotierend	ABCDF bukkal	89%
16	Dr. Best Interdent	vertikal	ABCDF lingual	88%
17	Dr. Best Flex Plus	rotierend	ABCDF bukkal	86%
18	Dr. Best Flex Plus	rotierend	lingual	85%
19	Dr. Best Flex Plus	rotierend	ABCDF lingual	84%

4.4 Verteilungsgebundene Parametertests

Um die Gleichheit der Mittelwerte der Plaqueentfernung zwischen dem klinischen Verfahren und Roboterputzverfahren beurteilen zu können, wurde die Durchführung eines unabhängigen t-Test veranlasst. Da bereits vor der Benutzung des genannten Verfahrens das Vorhandensein einer Normalverteilung bestätigt wurde, konnte dieses angewendet werden.

Bei der Durchführung eines unabhängigen t-Tests wurden nach Festlegung des Signifikanzniveaus $\alpha = 0,05$ zur weiteren Überprüfung der empirischen Daten die entsprechenden p-Werte berechnet. Um zu beweisen, dass die entsprechende Nullhypothese $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ betätigt werden kann, erfolgte ein Vergleich der Signifikanzwerte p mit α . Sofern p in diesem Fall 0,05 überstieg, galt H_0 als bestätigt. Andernfalls wurde die Übereinstimmungshypothese verworfen (Rinne 2008).

Nach Erfassung der jeweiligen Mittelwertdifferenzen ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2$) und deren Standardfehler (se) war t als Prüfgröße wie folgt zu berechnen (Bortz et al. 2010):

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{se}$$

Da t-Verteilungen immer mit Freiheitsgraden (df), deren Anzahl die Form der Verteilung festlegen, verbunden sind, wurden ebenfalls df berechnet. In der Regel wurden für jeden Situs jeder Zahnbürste und Putztechnik jeweils 6 Werte miteinander verglichen, wodurch die meisten Daten den Freiheitsgrad 4 erhielten ($df = n_1 + n_2 - 2$). Aufgrund vereinzelter Diskrepanzen wurden die Freiheitsgrade durch verringerte Beobachtungen auf 2 bis 3 reduziert. Dennoch ist mit Hilfe der Testvariablen t und der Signifikanzwerte p zu erkennen, dass trotz der Anzahl der erfassten Daten die Signifikanz und somit die Beurteilung der aufgestellten Hypothese gewährleistet war.

Ergebnisse

Tabelle 4: Unabhängiger t-Test zur Beurteilung der Mittelwertübereinstimmung der klinischen Parameter sowie des Roboter Verfahrens gemessen mit dem modifizierten Plaque-Index nach Lang et al. (2011) getrennt nach Zahnbürsten und Putzbewegung

Zahnbürste / Putztechnik	Situs	t	df	p	$\bar{x}_1 - \bar{x}_2$	se
Flex Plus / horizontal	bukkal	-0.710	4	0.517	-0.585	0.824
	lingual	-1.089	4	0.337	-0.846	0.777
	ABCDF bukkal	0.438	4	0.684	0.188	0.430
	ABCDF lingual	-1.241	4	0.282	-0.502	0.405
Flex Plus / rotierend	bukkal	-0.057	4	0.957	-0.041	0.710
	lingual	-3.217	2.056	0.082	-2.686	0.835
	ABCDF bukkal	1.745	4	0.156	0.856	0.491
	ABCDF lingual	-3.586	2.221	0.060	-1.532	0.427
Flex Plus / vertikal	bukkal	0.047	4	0.965	0.047	1.002
	lingual	-1.574	2.395	0.236	-1.537	0.976
	ABCDF bukkal	0.365	4	0.734	0.263	0.721
	ABCDF lingual	-1.542	2.447	0.240	-0.948	0.614
Interdental / horizontal	bukkal	-0.129	2.021	0.909	-0.115	0.889
	lingual	-1.781	2.005	0.217	-1.815	1.019
	ABCDF bukkal	1.579	4	0.189	0.944	0.598
	ABCDF lingual	-1.768	2.126	0.212	-0.991	0.560
Interdental / rotierend	bukkal	1.096	4	0.335	0.710	0.648
	lingual	-0.733	2.150	0.535	-1.114	1.521
	ABCDF bukkal	1.701	2.100	0.225	1.065	0.626
	ABCDF lingual	-0.571	2.050	0.624	-0.657	1.151
Interdental / vertikal	bukkal	-1.553	4	0.195	-0.731	0.471
	lingual	-1.599	4	0.185	-1.870	1.169
	ABCDF bukkal	-3.244	2.646	0.057	-0.843	0.260
	ABCDF lingual	-2.021	2.205	0.169	-1.173	0.580

Erläuterung: Teststatistik des planimetrischen t-Test (t), Freiheitsgrade (df), beobachtetes Signifikanzniveau (p), Differenz der Mittelwerte der klinischen und der Roboter Daten ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2$), Standardfehler der Mittelwertdifferenz (se)

Anhand der Testergebnisse können verschiedene Ordinalskalierungen aufgestellt werden, die bestimmte Aussagen unterstreichen. Somit kann mit Hilfe der Aufstellung einer Rangordnung der Mittelwertdifferenzen die Höhe der Übereinstimmung zweier arithmetischer Mittel verdeutlicht werden. Je kleiner die Differenz, desto höher ist die Übereinstimmung der Mittelwerte. In der folgenden Tabelle sind 10 Parameter mit den geringsten Unterschieden dargestellt:

Rang	Zahnbürste	Putztechnik	Situs	Mittelwertdifferenz ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2$)
1	Flex Plus	rotierend	bukkal	-0.041
2	Flex Plus	vertikal	bukkal	0.047
3	Interdental	horizontal	bukkal	-0.115
4	Flex Plus	horizontal	ABCDF bukkal	0.188
5	Flex Plus	vertikal	ABCDF bukkal	0.263
6	Flex Plus	horizontal	ABCDF bukkal	-0.502
7	Flex Plus	horizontal	bukkal	-0.585
8	Interdental	rotierend	ABCDF Lingual	-0.657
9	Interdental	rotierend	bukkal	0.710
10	Interdental	vertikal	bukkal	-0.731

Analog zu den bereits abgebildeten Fehlerbalkendiagrammen wird auch hier ersichtlich, dass vorwiegend bukkale Situs geringe Mittelwertdifferenzen und somit hohe Übereinstimmungsraten (ÜR) der bukkalen Situs aufweisen. 60% der explizit dargestellten Ränge werden von der Zahnbürste `Dr. Best Flex Plus` eingenommen, was darauf hindeutet, dass die klinischen- und in-vitro-Ergebnisse, die durch die Verwendung dieser entstehen, hohe Übereinstimmungsraten aufweisen. Jedoch ist bei dem unabhängigen t-Test darauf hinzuweisen, dass lediglich die erfassten Daten der Versuchsmethoden (in-vivo, in-vitro) miteinander verglichen wurden und nicht die Reinigungsleistung der verschiedenen Zahnbürsten.

Tabelle 5: Ordinalskalierte Darstellung des Standardfehlers der Mittelwertdifferenz (se) in Bezug zu der Zahnbürste, Putztechnik und dem Situs

Rang	Zahnbürste	Putztechnik	Situs	se
1	Interdental	vertikal	ABCDF bukkal	0.260
2	Flex Plus	horizontal	ABCDF lingual	0.405
3	Flex Plus	rotierend	ABCDF lingual	0.427
4	Flex Plus	horizontal	ABCDF bukkal	0.430
5	Interdental	vertikal	bukkal	0.471
6	Flex Plus	rotierend	ABCDF lingual	0.491
7	Interdental	horizontal	ABCDF lingual	0.560
8	Interdental	vertikal	ABCDF lingual	0.580
9	Interdental	horizontal	ABCDF bukkal	0.598
10	Flex Plus	vertikal	ABCDF lingual	0.614

Bei der separaten Darstellung der Standardfehler der Mittelwertdifferenz (se) wird ersichtlich, dass insbesondere die Risikofelder ABCDF geringe Unterschiede der Mittelwertabweichungstichproben von tatsächlichen Differenzen aufweisen. Die Ergebnisse zeigen eine besonders hohe Übereinstimmung der klinischen Resultate mit den Roboterresultaten, wenn ein geringer Standardfehler und eine niedrige Mittelwertdifferenz zu verzeichnen sind. Eine Folge dessen ist ein geringer t-Wert.

Neben den genannten Parametern hat die Darstellung des p-Wertes eine besondere Bedeutung. Anhand der folgenden Tabelle ist erkennbar, dass alle Ergebnisse das Signifikanzniveau von 0,05 übersteigen, wodurch ausnahmslos bei allen Werten die Übereinstimmungshypothese H_0 als bestätigt gilt.

Die geringste Differenz zu α weist das Versuchsergebnis mit der Zahnbürste `Interdental`, dem Putzverfahren `vertikal` und dem Situs `ABCDF bukkal` auf. Die höchste Differenz hingegen ist bei `Flex Plus, vertikal, bukkal` erkennbar:

Rang	Zahnbürste	Putztechnik	Situs	p
1	Interdental	vertikal	ABCDF bukkal	0.057
2	Flex Plus	rotierend	ABCDF lingual	0.060
3	Flex Plus	rotierend	lingual	0.082
4	Flex Plus	rotierend	ABCDF bukkal	0.156
5	Interdental	vertikal	ABCDF lingual	0.169
6	Interdental	vertikal	lingual	0.185
7	Interdental	horizontal	ABCDF bukkal	0.189
8	Interdental	vertikal	bukkal	0.195
9	Interdental	horizontal	ABCDF lingual	0.212
10	Interdental	horizontal	lingual	0.217
...
14	Flex Plus	horizontal	ABCDF lingual	0.282
15	Interdental	rotierend	bukkal	0.335
16	Flex Plus	horizontal	lingual	0.337
17	Flex Plus	horizontal	bukkal	0.517
18	Interdental	rotierend	lingual	0.535
19	Interdental	rotierend	ABCDF lingual	0.624
20	Flex Plus	horizontal	ABCDF bukkal	0.684
21	Flex Plus	vertikal	ABCDF bukkal	0.734
22	Interdental	horizontal	bukkal	0.909
23	Flex Plus	rotierend	bukkal	0.957
24	Flex Plus	vertikal	bukkal	0.965

4.5 Nichtparametrischer Rangsummentest

Als Alternative zum t-Test für unabhängige Stichproben dient der Wilcoxon-Mann-Whitney-U-Test. Hier wird überprüft, ob bei Betrachtung des klinischen Verfahrens sowie des Roboterputzverfahrens die Wahrscheinlichkeit gleich ist, dass eine zufällig gewählte Stichprobe aus der einen Vorgehensweise größer oder kleiner ist als aus der anderen. Folgende Nullhypothese gilt es zu überprüfen:

$$H_0: P(X > Y) = P(X < Y)$$

Falls die Wahrscheinlichkeit nicht identisch ist, dass ein zufällig aus dem einen Verfahren entnommener Wert X größer oder kleiner ist als ein zufällig ausgewählter Wert Y aus dem anderen Verfahren, so gilt die Nullhypothese als verworfen und die Alternativhypothese H_1 (hier $H_1: P(X > Y) \neq P(X < Y)$) wird betätigt.

Im Rahmen des nicht-parametrischen Testverfahrens wurden jeweils die Prüfgröße U bestimmt und mit Hilfe derer der z-Wert wie folgt berechnet (Bortz et al. 2010):

$$z = \frac{U - \mu_U}{\sigma_U}$$

Zur Überprüfung der Signifikanz der Ergebnisse wurde der exakte p-Wert ermittelt und mit dem vorher aufgestellten Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ (5%) verglichen.

Anhand der folgenden Tabelle lässt sich erkennen, dass alle p-Werte das Signifikanzniveau von 5% übersteigen, sodass die Nullhypothese bestätigt werden kann. Somit gibt es keine Rangsummenunterschiede zwischen dem Roboterputzverfahren und den klinischen Ergebnissen.

Tabelle 6: Wilcoxon-Mann-Whitney-U-Test als Rangsummentest zur Überprüfung der Gleichheit der Mediane/Rangsummen des PPI zwischen Roboterprogramm und klinischem Programm (in modifiziertem Navy-Plaque-Index nach Lang et al. (2011); getrennt nach Zahnbürsten und Putztechnik)

Zahnbürste / Putztechnik	Situs	U	Z	exaktes p
Flex Plus / horizontal	bukkal	2.000	-1.091	0.400
	lingual	2.000	-1.091	0.400
	ABCDF bukkal	3.000	-0.655	0.700
	ABCDF lingual	2.500	-0.886	0.500
Flex Plus / rotierend	bukkal	4.000	-0.218	1.000
	lingual	0.000	-1.964	0.100
	ABCDF bukkal	1.000	-1.528	0.200
	ABCDF lingual	0.000	-1.964	0.100
Flex Plus / vertikal	bukkal	4.000	-0.221	1.000
	lingual	0.500	-1.771	0.200
	ABCDF bukkal	4.000	-0.218	1.000
	ABCDF lingual	0.500	-1.664	0.200
Interdental / horizontal	bukkal	3.000	-0.655	0.700
	lingual	1.000	-1.593	0.200
	ABCDF bukkal	2.000	-1.091	0.400
	ABCDF lingual	0.500	-1.764	0.200
Interdental / rotierend	bukkal	3.000	-0.655	0.700
	lingual	3.000	-0.655	0.700
	ABCDF bukkal	2.000	-1.091	0.400
	ABCDF lingual	3.000	-0.655	0.700
Interdental / vertikal	bukkal	1.000	-1.528	0.200
	lingual	2.000	-1.091	0.400
	ABCDF bukkal	0.000	-1.964	0.100
	ABCDF lingual	0.500	-1.764	0.200

Erläuterung: Prüfgröße (U), empirischer z-Wert (Z), exakter Signifikanzwert (exaktes p)

4.6 Übereinstimmungsrate der klinischen und der Roboter - Verfahren unter Benutzung der Zahnbürste Dr. Best Flex Plus

Anhand der Untersuchung jedes einzelnen Zahnes bezüglich des Plaquebefalles vor und nach den Zahnputzversuchen mit Hilfe der Verwendung des modifizierten Navy-Plaques-Index nach Lang et al. 2011 kann ein detaillierter Vergleich der klinischen Daten und der aus dem Robotertest entstandenen Daten erfolgen.

In der vorliegenden Abbildung sind die Übereinstimmungsrate des Plaquebefalles der Versuche getrennt nach den Zähnen und Putztechniken dargestellt:

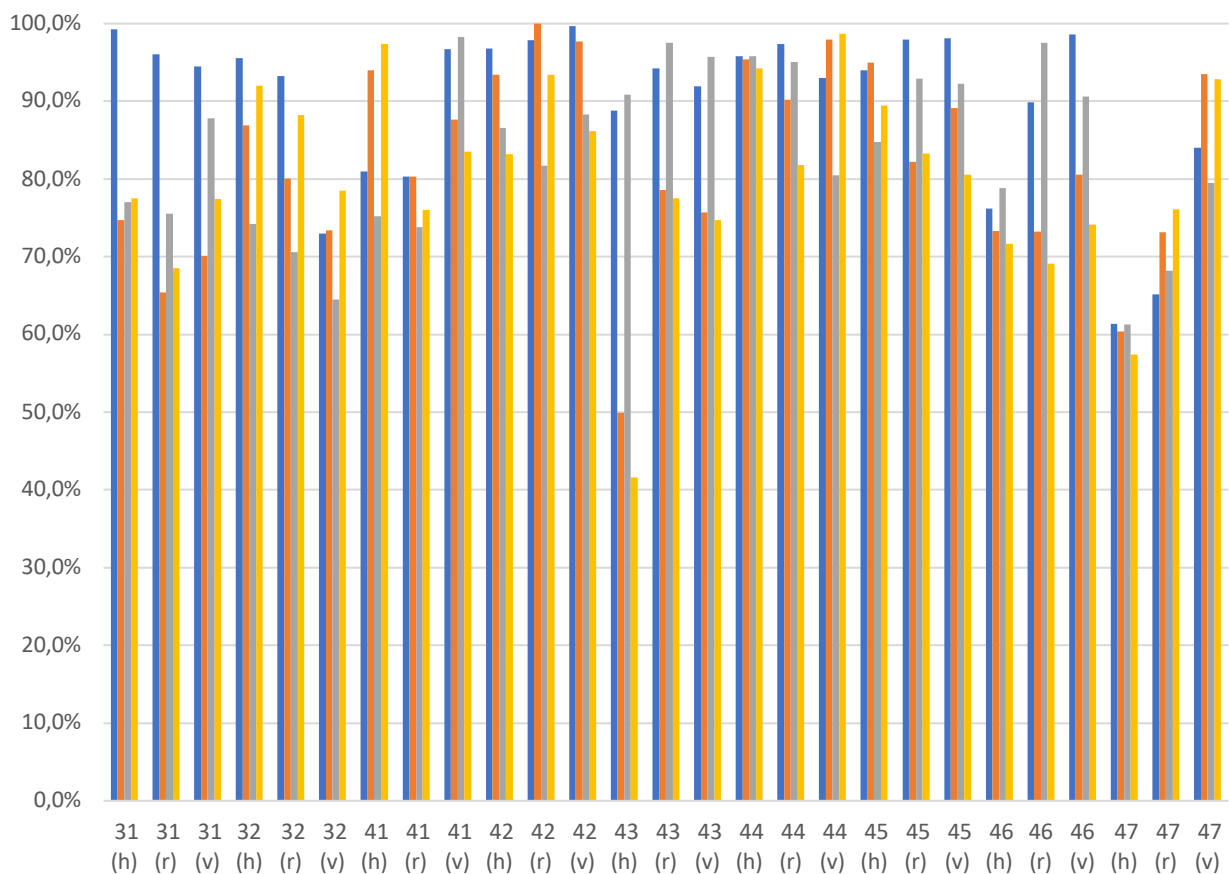


Abbildung 26: Übereinstimmungsrate (ÜR) der klinischen mit den Roboterverfahren nach Verwendung der Zahnbürste `Dr. Best Flex Plus`, getrennt nach Zahn, Putztechnik und Situs

Erläuterung: Putztechnik (h-horizontal, r-rotierend, v-vertikal), Situs (bukkal (blau), lingual (orange), ABCDF bukkal (grau), ABCDF lingual (gelb))

Unter Betrachtung des Säulendiagrammes wird ersichtlich, dass nahezu alle Ergebnisse Übereinstimmungen der Daten von über 70% aufweisen. Besonders auffällig ist in diesem Fall die Ähnlichkeit der Daten in den bukkalen Situs.

4.7 Übereinstimmungsraten der klinischen und Roboter – Verfahren unter Benutzung der Zahnbürste Dr. Best Interdent

Analog zu den Untersuchungen bezüglich der Vergleichbarkeit der Verfahren unter Verwendung der klinischen Ergebnisse von Stauer und der APP wurden die Übereinstimmungsraten getrennt nach dem Zahn, der Putztechnik und den Situs erfasst und anhand eines Säulendiagrammes dargestellt.

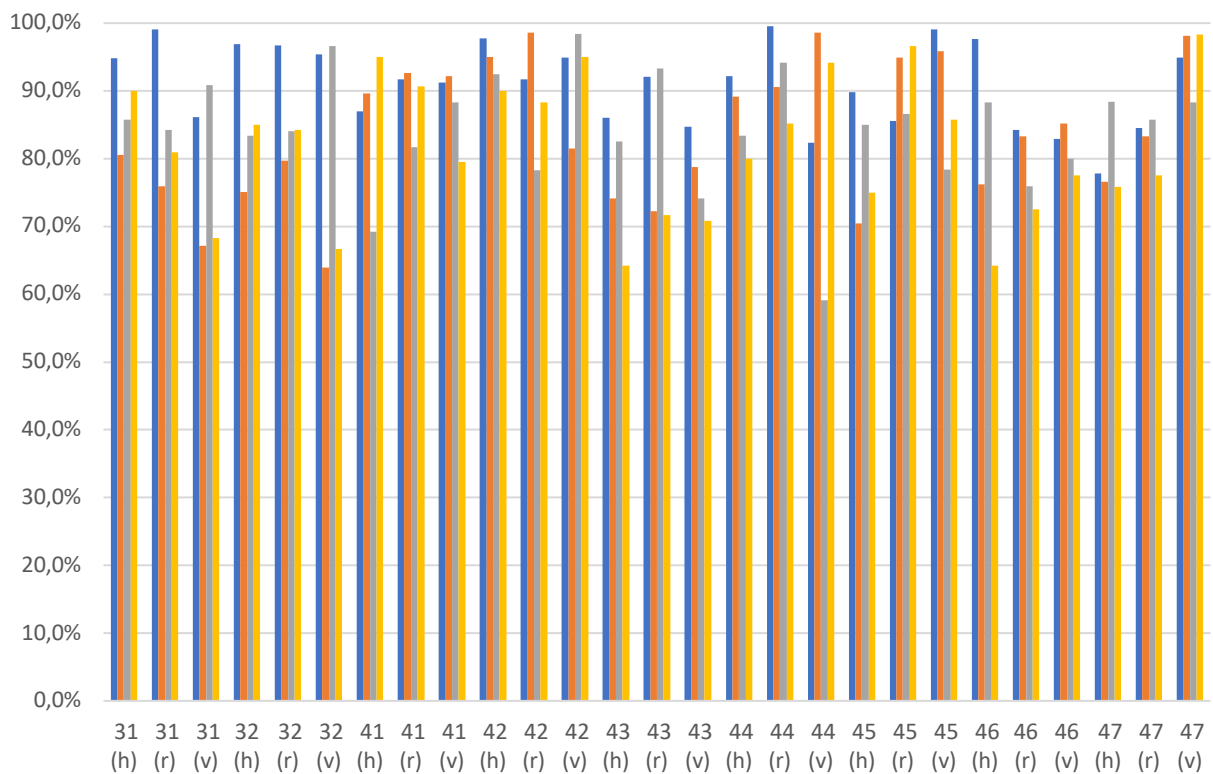


Abbildung 27: Übereinstimmungsraten (ÜR) der klinischen mit den Roboterverfahren nach Verwendung der Zahnbürste 'Dr. Best Interdent', getrennt nach Zahn, Putztechnik und Situs

Erläuterung: Putztechnik (h-horizontal, r-rotierend, v-vertikal), Situs (bukkal (blau), lingual (orange), ABCDF bukkal (grau), ABCDF lingual (gelb))

4.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die klinische Validierung der organischen-Plaquesimulation basierte auf dem klinischen Test mit zwei Handzahnbürsten und drei verschiedenen Zahnputzbewegungen mit 22 videogestützten Probanden, der von Staufer durchgeführt wurde (Staufer 2011), im Vergleich zu dem Robotertest, bei dem jedes Putzverfahren und jede Zahnbürste dreimal getestet wurde. Die Statistik basierte auf dem modifizierten Navy-Plaques-Index nach Lang et al. 2011, der jede Zahnfläche bukkal wie lingual in jeweils 9 planimetrische Felder aufteilt. Nach akribischer Übertragung aller Putzergebnisse in den besagten planimetrischen Index erfolgte der Vergleich der Reinigungseffizienz untereinander.

Mit Hilfe der unterschiedlichen statistischen Auswertungsverfahren konnte bestätigt werden, dass an allen getesteten Situs bei allen Bürstenbewegungen und Zahnbürsten unter Verwendung eines Signifikanzniveaus von $\alpha = 0,05$ (5%) zwischen den klinischen und in-vitro Putzversuchen keine signifikanten Unterschiede bestanden. Lediglich unter Verwendung eines Signifikanzniveaus von $\alpha = 0,1$ (10%) wurden die Ergebnisse aus den folgenden 3 Reinigungsdurchführungen als nicht übereinstimmend gewertet:

- Zahnbürste Flex Plus / Putztechnik rotierend / Situs lingual
- Zahnbürste Flex Plus / Putztechnik rotierend / Situs ABCDF lingual
- Zahnbürste Interdental / Putztechnik vertikal / Situs ABCDF bukkal

Die Übereinstimmungsraten der Restplaque durch getrennte Putzbewegungen betrug an den glatten Oberflächen für die Zahnbürste Dr. Best Flex Plus 85 - 100 % und für die Zahnbürste Dr. Best Interdent 89 - 99 %. In den Risikobereichen am Gingivarand, zu denen die planimetrischen Felder ABCDF zählen, betrug die Übereinstimmungsraten für die Zahnbürste Dr. Best Flex Plus 84 – 98 % und für die Zahnbürste Dr. Best Interdent 88 - 94 %. Die Einzelzahnanalysen ergaben die höchsten Deckungsgleichheiten der Reinigungswerte an Zahn 42 unter Verwendung der Zahnbürste Dr. Best Flex Plus mit 83 - 99% und Dr. Best Interdent mit 81 - 98% sowie an Zahn 47 mit der Zahnbürste Dr. Best Interdent mit 75 - 89%. Die geringste Übereinstimmungsrate von 41% wies der Zahn 43 auf.

Aufgrund der hohen Deckungsgleichheiten der klinischen Ergebnisse mit den in-vitro Ergebnissen und den Ergebnissen des t-Tests mit unabhängigen Stichproben sowie des Wilcoxon-Mann-Whitney-U-Tests ist anzunehmen, dass das Robotertestverfahren bei allen drei Putztechniken klinisch validiert ist.

5. Diskussion

5.1 Allgemeine Bedeutung der Studie

Das Vorhandensein von mikrobiellen Biofilmen in Mundregionen kann eine Rolle für die Entstehung dentaler Erkrankungen wie Karies, Gingivitis und Parodontitis spielen, wenn aufgrund der mikrobiellen Präsenz eine Dysbiose zwischen Wirt und potentiell pathogenen Bakterien besteht (Löe et al. 1965; Von der Fehr 1970). Es ist allgemein bekannt, dass durch Einhaltung von Mundhygienemaßnahmen mit Hilfe der Verwendung von Zahnbürsten die Inzidenz von Karies und Parodontalerkrankungen reduziert werden kann (Axelsson et al. 2004). So waren bereits Lang et al. in der Lage zu beweisen, dass durch die regelmäßige Entfernung von dentaler Plaque die Entwicklungswahrscheinlichkeit einer Gingivitis reduziert werden kann (Lang et al. 1990).

Die derzeitige Strategie für die Prävention und Therapie der genannten oralen Erkrankungen beinhaltet daher die tägliche mechanische Reduktion des mikrobiellen Biofilmes (Graetz et al. 2018). Eine der bekanntesten Möglichkeiten der häuslichen Biofilmkontrolle bietet die Verwendung von Zahnbürsten. Diese gelten als benutzerfreundliche und einfach anzuwendende Produkte, wodurch sie von den meisten Individuen weltweit verwendet werden (Löe 2000). Eine Vielzahl von Herstellern bieten diese in unterschiedlichen Größen, Längen und Anordnungen der Borsten an. Daher gilt es zu prüfen, welche Zahnbürste die höchste Reinigungseffektivität aufweist und somit verwendet werden sollte. Im Rahmen eines umfassenden systematischen Cochrane-Reviews, in dem Vergleiche von insgesamt 56 Studien aus den Jahren 1964 bis 2011 erfolgten, wurden verschiedene Zahnbürsten miteinander verglichen. Trotz der hohen Anzahl der berücksichtigten Studien entstand die Schlussfolgerung, dass weitere notwendig seien, um damit signifikante Unterschiede zwischen der Reinigungseffizienz von elektrischen Zahnbürsten im Vergleich zu Handzahnbürsten feststellen zu können, um die klinische Relevanz der jeweiligen Produkte zu untermauern (Yaacob et al. 2014).

Für die Beurteilung des PPI ist es notwendig, quasi-klinische Bedingungen zu schaffen, in denen unter standardisierten Verhältnissen Zahnputzversuche durchgeführt werden können. Diese Bedingungen konnten bereits mittels robotergestützter Verfahren entwickelt werden, die eine hohe Reproduzierbarkeit der Putzverfahren gewährleisten. Jedoch existieren kaum Studien, in denen eine artifizielle Plaque als Biofilmsimulator für Roboter-Putzversuche verwendet wird, die hauptsächlich aus organischen Bestandteilen zusammengesetzt ist. Daher dient die vorliegende Studie der Validierung und gleichzeitigen Kalibrierung der klinischen Reproduzierbarkeit mit Hilfe eines robotergestützten Verfahrens unter Verwendung einer organischen Plaque-Simulation. Um hohe Reproduzierbarkeiten des angewendeten robotergestützten Verfahrens gewährleisten zu können, ist besonders die Sicherstellung von standardisierten Bedingungen notwendig.

Mit einer erfolgreichen Validierung und Kalibrierung des Roboterverfahrens unter Verwendung des erwähnten Biofilmsimulators können Untersuchungen der Reinigungseffektivität von Zahnbürsten schneller und effektiver erfolgen und in Zukunft aufwändige klinische Studien ersetzen.

5.2 Material und Methode

Anhand der kritischen Auseinandersetzung mit den Ergebnissen der durchgeführten Versuche unter Verwendung der angegebenen Materialien wird im Folgenden diskutiert, inwieweit die Verwendung der organischen Plaque für in-vitro Verfahren standardisiert ist und in zukünftigen Untersuchungen zur Beurteilung der Reinigungseffizienz von verschiedenen Zahnbürsten wie auch Putzbewegungen eingesetzt werden kann.

5.2.1 Verwendung und Auswertung der klinischen Fotos

Mit Hilfe der klinischen Studie mit 22 Probanden konnte das angewandte Roboter-Putzverfahren mit der klinischen Reproduzierbarkeit der Reinigungseffektivität verglichen werden. In der genannten Studie wurden die Handzahnbürsten Dr. Best Flex Plus und Dr. Best Interdental verwendet. Nach einer professionellen Zahnreinigung erfolgte eine 72-stündige Karenz jeglicher Mundhygienemaßnahmen mit anschließender Durchführung einer häuslichen Zahnreinigung unter Verwendung von einer der zwei genannten Zahnbürsten (Dr. Best Flex Plus, Dr. Best Interdental) und einer bestimmten Putztechnik (horizontal, rotierend oder vertikal) mit einer Anpresskraft von 3,5 N. Vor sowie nach dem Zähneputzen wurden die Zähne mittels des Plaquerelevators Mira-Tone-2® der Firma Hager und Werken (Duisburg, Deutschland) angefärbt und fotografisch dokumentiert.

Die entsprechenden Aufnahmen wurden bei der vorliegenden Studie zur Auswertung der klinischen Reinigungseffizienz verwendet. Für jeden Zahn wurde eine individuelle Maske erstellt, mit Hilfe derer von einem verblindeten Untersucher die jeweiligen Auswertungen des Plaquebefalls unter Verwendung des modifizierten Plaque-Index nach Lang et al. 2011 erfolgten. Da die Qualität und die Perspektiven aller Aufnahmen fast identisch waren und jede der relevanten Zahnflächen abgebildet wurde, erfolgte die Verwertung nahezu aller klinischen Bilder. Lediglich sieben Probanden trugen einen Retainer, wodurch die Auswertung des Plaquebefalls auf den lingualen Situs aufgrund des Vorhandenseins von Composite als Befestigungsmaterial verfälscht werden könnte. Aus diesem Grund wurden die entsprechenden Fälle in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

Bei der Auswahl des Plaque-Index stellte sich derjenige als geeignet heraus, dessen planimetrische Aufteilung der Zahnoberfläche in 9 Felder (A bis I) erfolgt und eine Beurteilung jedes einzelnen Feldes in Abhängigkeit des Plaquebefalls in drei Grade (0,1,2) ermöglicht. Er basiert auf dem modifizierten Plaque-Index nach Rustogi et al. (1992), ist jedoch in der Lage, feinere Unterschiede in der Reinigungswirkung darzustellen (Bretz 2010). Aufgrund der ausgeprägten Gradeinteilung ist zu erwähnen, dass die Beurteilungen der planimetrischen Felder deutlich zeitaufwändiger sind. Da die Präzision der Ergebnisse entscheidender als der Auswertungsaufwand ist, eignet sich der modifizierte planimetrische Plaqueindex PPI nach Lang et al. insbesondere für eine Evaluierung von Mundhygieneprodukten (Claydon et al. 1995).

5.2.2 Laboruntersuchung

Die Laboruntersuchungen beinhalten zum einen die Herstellung der organischen Plaque, Desinfektion der Modelle, Beschichtung und Trocknung der Zähne mit dem künstlichen Biofilm und zum anderen die Einstellung des Putzroboters sowie die Durchführung des Putzverfahrens.

Bei allen Versuchen wurde für die Herstellung der organischen Plaque derselbe Behälter und dieselbe geeichte Waage verwendet. Im Rahmen der Vermengung der einzelnen Bestandteile wurde ein Handrührgerät benutzt. Ein Risiko hierbei bestand darin, dass die Vermischung nicht standardisiert abläuft und somit die entwickelte Plaque teilweise nicht vollständig homogenisiert ist. Daher wurde nach dem Einfügen aller Bestandteile in den Behälter unter gleichen Bedingungen (gleicher Behälter, Waage, Handrührgerät und Untersucher) an derselben Stelle der Durchführung die Vermischung der Inhaltstoffe standardisiert, indem der Bewegungsvorgang des Handrührgerätes vor jeder eigentlichen Durchführung in Bezug zu der Zeit und Position zu dem Behälter kalibriert wurde.

Die artifizielle Plaque sollte einen dentalen Biofilm nachahmen, der sich über 72 Stunden entwickelt hat.

Unter natürlichen Bedingungen bildet sich innerhalb von wenigen Sekunden eine dünne Schicht als Pellicel aus. In den darauffolgenden Tagen werden die Zahnoberflächen zunächst mit kokkoiden Bakterien bedeckt. Sobald die Oberfläche vollständig bedeckt ist, erfolgt das Wachstum des Biofilmes durch die Ansammlung von säulenförmigen Kolonien. Am dritten Tag beginnen kokkoide Bakterien mit fadenförmigen Mikroorganismen zu aggregieren und „Maiskolben“-artige Strukturen zu entwickeln. Mit Hilfe verschiedener Mechanismen erhöht sich in der Zeit das Attachment der Plaque auf der entsprechenden Oberfläche. Hierfür dient unter anderem das Vorhandensein von Proteoglykanen sowie bestimmter Proteine, wie Fimbrien, Pili und Flagellen, die als sogenannte Adhäsine dienen (Listgarten 1994; Jakubovics et al. 2021). Weitere unspezifische Wechselwirkungen, die der Anhaftung dienen, sind van der Waals Kräfte, elektrostatische Kräfte und Wasserstoffbrückenbindungen.

Somit dienen zum einen organische Mechanismen dem Attachment an der Zahnoberfläche und zum anderen physiko-chemische Wechselwirkungen zwischen dem oralen Biofilm und der Zahnoberfläche (Holban et al. 2021). Daher wurden zur Zahnputzsimulation Modelle der Firma KaVo (Biberach an der Riß, Deutschland) verwendet, um eine möglichst realitätsgetreue Verbindung zwischen der artifiziellen Plaque und der Oberfläche zu gewährleisten.

Nach der Beschichtung und Trocknung des Biofilmes auf den künstlichen Zahnoberflächen erfolgte die Ausrichtung der entsprechenden Zahnbürste sowie die Einstellung der Anpresskraft. Um eine Vergleichbarkeit mit den klinischen Untersuchungen zu ermöglichen, wurde dieselbe Anpresskraft von 3,5 N verwendet (Staufer 2011). Eine solche Einstellung eignet sich allgemein für die Durchführung von Roboterputzverfahren, da sich bei der Verwendung einer solchen Anpresskraft eine Reinigungseffektivität zeigt, ohne Schäden auf der Zahnhartsubstanz zu verursachen. Anhand verschiedener Studien lässt sich erkennen, dass bei einer Bürstenkraft von 4,0 N ein statistisch signifikanter Abrieb der Oberfläche entsteht und die Wahl der Anpresskraft unterhalb liegen sollte (Westerfeld 2002; Hamza et al. 2021).

Zur Ermöglichung einer Vergleichbarkeit mit den klinischen Ergebnissen wurden ebenfalls die gleichen Zahnbürsten Dr. Best Flex Plus und Dr. Best Interdent der Firma GlaxoSmithKline (Bühl, Deutschland) mit der Borstenstärke `Medium´ verwendet.

5.2.3 Zahnbürsten

Eine zuverlässige aktuelle Evidenz bezüglich der Vergleichbarkeit von Handzahnbürsten und elektrischen Zahnbürsten für den täglichen Gebrauch bietet der von Yaacob et al. (2014) erarbeitete Cochrane Review. Ausschließlich randomisierte-kontrollierte Studien mit einer Untersuchungslaufzeit von mindestens 4 Wochen wurden in dem Review berücksichtigt. Dadurch wurde die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Störfaktoren und Bias reduziert. Trotzdem war bei 82% der Studien (42 Studien) ein unklares Verzerrungsrisiko zu verzeichnen. Die umfassenden Ergebnisse zeigten mäßig maturierte Biofilme, wodurch die Plaqueentfernung durch die kurz- und auch langfristige Verwendung einer elektrischen Zahnbürste gegenüber einer Handzahnbürste einen statistischen Vorteil aufwies. Die klinische Bedeutung der Schlussfolgerungen bleibt jedoch unklar. Die Autoren suggerieren dem Leser, dass weitere langfristige Untersuchungen notwendig sind, um signifikante Aussagen bezüglich der Reinigungseffektivität von elektrischen Zahnbürsten treffen zu können.

Im Rahmen einer Netzwerk-Metaanalyse, deren Publikationserschaffungen und Vergleiche auf einem Transitivitätsprinzip beruhen, wurde die Reinigungseffektivität von elektrischen und manuellen Zahnbürsten unter Berücksichtigung von 28 Studien verglichen. Anhand der Untersuchungen der verschiedenen Studien konnte die Aussage getroffen werden, dass elektrische Zahnbürsten eine leicht höhere Reinigungseffektivität gegenüber manuellen Zahnbürsten aufweisen. Jedoch ist für die Verwendung einer solchen auch die Kosten- und Nutzen-Frage bedeutend, wodurch viele Menschen weltweit auch heute noch nicht in der Lage sind, eine elektrisch betriebene Zahnbürste zu erwerben. Aus diesem Grund werden auch in Zukunft die Untersuchungen und Weiterentwicklungen von Handzahnbürsten eine entscheidende Rolle spielen (Thomassen et al. 2022).

Im Jahr 2021 erfolgte die Durchführung einer 6-monatigen randomisierten klinischen Studie, bei der elektrische Zahnbürsten mit manuellen Zahnbürsten verglichen wurden und die Entwicklung einer zuvor diagnostizierten Gingivitis anhand eines Bleeding-on-Probing-Scores ermittelt wurde. Die Arbeitsgruppe kam zu dem Ergebnis, dass beide

Arten von Zahnbürsten eine Reduktion der Entzündungszeichen sowie eine zufriedenstellende Kontrolle des Plaque-niveaus erreichten (Mensi et al. 2021).

Im Rahmen einer klinischen Studie, in der die Reinigungseffektivität der Zahnoberflächen von 85 Probanden mittels der Durchführung bestimmter Putzbewegungen (rotierend, horizontal, vertikal) und der Benutzung von elektrischen oder Handzahnbürsten untersucht wurde, kamen die Autoren auch hier zu dem Ergebnis, dass sich die Fähigkeit zur Aufrechterhaltung der Mundgesundheit durch Nutzung der entsprechenden Zahnbürsten nicht unterscheiden. Eindeutig war jedoch, dass nach der Putzbewegung mittels einer manuellen und elektrischen Zahnbürste insgesamt eine geringere Reinigungsleistung auf den lingualen als auf den vestibulären Flächen zu verzeichnen war (Petker-Jung et al. 2022).

Eine weitere Gruppe untersuchte im Rahmen eines Reviews, ob es einen Unterschied bei der Reduzierung von Parodontalerkrankungen durch Verwendung von elektrischen Zahnbürsten und Handzahnbürsten gibt. Die Untersuchungen erfolgten unter Betrachtung von Plaque- und Gingivitis-Indizes. Unter Berücksichtigung von deskriptiven Analysen und Netzwerk-Metaanalysen konnte keine Diskrepanz zwischen den Zahnbürsten erfasst werden (Slot et al. 2020).

Im Dezember 2021 wurde von einer Arbeitsgruppe eine prospektive, nicht-randomisierte Studie veröffentlicht, in der die Reinigungseffektivität von elektrisch und manuell betriebenen Zahnbürsten verglichen wurde. Die Untersuchungen erfolgten an 30 Probanden. Nach einer professionellen Zahnreinigung haben die Teilnehmer 4 Tage keine Mundhygienemaßnahmen durchgeführt. Daraufhin erfolgte die Reinigung der Zähne zum Teil mit einer eingeschalteten und einer nicht eingeschalteten Schallzahnbürste, die wie eine Handzahnbürste verwendet wurde. Beide Putzverfahren wurden mit und ohne vorherige Instruktionen durchgeführt. Die Ergebnisse der explorativen Untersuchungen ergaben, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen der Reinigungsleistung einer Schall- und einer Handzahnbürste zu verzeichnen waren (Schlueter et al. 2021).

Somit wird resümiert, dass zwar die elektrische Zahnbürste an gesellschaftlicher Bedeutung zugenommen hat, die manuelle Zahnbürste jedoch immer noch ein Bestandteil von Untersuchungen sein sollte und höchstwahrscheinlich auch in Zukunft in der häuslichen Mundhygiene Verwendung findet.

5.3 Ergebnisse

In allen Versuchen war eine ähnliche Reinigungseffizienz zwischen dem Roboter und den Probanden zu verzeichnen. Eine klare Dominanz bezüglich der Plaqueentfernung war von der Verwendung bestimmter Zahnpflichtechniken oder Zahnbürsten nicht erkennbar. Die Anzahl der Probanden von $N = 22$, deren Fotoaufnahmen zur planimetrischen Auswertung berücksichtigt wurden, und den in-vitro Stichproben von $N = 18$ bieten trotz der geringen Datenlage jedoch durch mehrmalige Wiederholungen eine ausreichende Stichprobengröße. Aufgrund der Tatsache, dass die Auswertungen der Fotoaufnahmen mit Hilfe individuell entwickelter Masken verblindet und zeitlich vor den Roboterversuchen durchgeführt wurden, ist davon auszugehen, dass keine Beeinflussung der ermittelten Plaquewerte zugunsten einer erwünschten Ergebnisentwicklung, wie zum Beispiel einer hohen Übereinstimmung der klinischen Ergebnisse mit den in-vitro Resultaten, erfolgte.

Die Streuung der erfassten Parameter ist bei den klinischen Ergebnissen geringfügig höher als bei den Roboterversuchen. Die Standardabweichungen der klinischen Daten ergeben $SD = 1,17$ PPI, die der robotergestützten Ergebnisse $SD = 0,4$ PPI. Dies ist dadurch begründet, dass die klinischen Studiendurchführungen deutlich mehr Variablen aufweisen als die Laborverfahren. Mögliche Verzerrungen könnten durch die Einbeziehung der Probanden erfolgt sein. Zwar können mittels einer Kalibrierung der Anpresskraft bestimmte Putzbewegungen nahezu standardisiert durchgeführt werden. Jedoch sind eine konkrete motorische Geschicklichkeit und Umsetzung der angeforderten Maßnahmen seitens der Probanden notwendig. Je höher die Anzahl der Faktoren ist, die keine eindeutige Einstellung und Standardisierung ermöglichen, desto fehleranfälliger werden die Untersuchungen. Eine solche Tatsache verdeutlicht die Relevanz dieser Studie, damit auch in Zukunft mehr Putzversuche unter Laborbedingungen durchgeführt und dezidierte Aussagen bezüglich dessen Reinigungsfähigkeit getroffen werden können.

Unter Betrachtung des Plaquebefalles nach den Putzbewegungen wird ersichtlich, dass in beiden Verfahren der linguale Situs die geringste Reinigungseffizienz aufweist. Das Ergebnis unterstreicht ebenfalls die Feststellung einer Studie aus dem Jahre 2022, in der wie auch hier die Durchführung der Putzbewegungen horizontal, rotierend oder vertikal aber mittels einer Zahnbürste erfolgte. Auch in dem Fall wurde eine signifikant geringere Reinigungsleistung an den Innenflächen erfasst (Petker-Jung et al. 2022).

Selbst in diesem Fall war der Plaquebefall in beiden Verfahren im Vergleich zu den anderen Situs erhöht.

Durch die Beurteilung der Ergebnisse mittels verschiedener statistischer Auswertungsverfahren mit Hilfe derer unter anderem die Verteilung der erfassten Daten sowie die Darstellung der Mittelwerte verdeutlicht wurden, konnte gezeigt werden, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen den klinischen Verfahren und den Roboterverfahren gab.

6. Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Studie bestand in der Überprüfung und Einstellung einer klinischen Reproduzierbarkeit von Putzversuchen mit Hilfe von robotergestützten in-vitro-Verfahren. Die Validierung beinhaltete die Verwendung einer neuwertigen organischen Plaque, die einen natürlichen über 72 Stunden maturierten dentalen Biofilm simulieren sollte. Dieses artifizielle Medium wurde im Rahmen der Studie von Flad 2019 entwickelt und für die vorliegende Studie modifiziert.

Um eine valide Vergleichbarkeit der Putzverfahren herzustellen, wurden sowohl in der klinischen als auch in der robotergestützten Methode die gleichen Zahnbürsten (Dr. Best Flex medium, Dr. Best Interdent medium), Putztechniken (horizontal, rotierend, vertikal) sowie die gleiche Anpresskraft von 3,5 N verwendet. Die Putzergebnisse an den Zähnen 32 – 47 wurden klinisch durch Fotoaufnahmen und in-vitro mit Hilfe der Automatisierten Plaque Planimetrie (APP) erfasst. Daraufhin erfolgte unter Verwendung zahnbezogener individuell entwickelter planimetrischer Masken eine Umschreibung der Resultate auf den codifizierten planimetrischen Plaqueindex PPI nach Lang et al. (2011), wodurch jede Fläche in Abhängigkeit des Vorhandenseins von dentalem Biofilm einen Wert von 0 (keine Plaque), 1 ($\leq 50\%$ Plaque) oder 2 ($> 50\%$ Plaque) erhielt.

Die erfassten Daten wurden mit Hilfe von statistischen Auswertungsverfahren wie des unabhängigen t-Tests, des Kolmogorov-Smirnov-Tests und des Wilcoxon-Mann-Whitney-U-Tests, auf die Normalverteilung und Übereinstimmung der Mittelwerte untersucht. Alle untersuchten planimetrischen Felder wiesen eine Normalverteilung auf.

Alle vergleichbaren Ergebnisse sowohl der klinischen Verfahren als auch der robotergestützten Putzverfahren wiesen signifikante Übereinstimmungsraten auf, sodass die Validierung und Kalibrierung der klinischen Reproduzierbarkeit mit Hilfe von in-vitro Putzdurchführungen mittels der vorliegenden Studie als erfolgreich abgeschlossen gewertet werden kann.

7. Summary

The objective of the present study was to validate and set a clinical reproducibility of trials using robotic in-vitro procedures. Validation involved the use of an organic plaque designed to simulate a natural dental biofilm matured over 72 hours. This artificial medium was developed as part of Flad's 2019 work and modified for the present study.

To establish valid comparability of the brushing procedures, the same toothbrushes (Dr. Best Flex medium, Dr. Best Interdent medium), brushing techniques (horizontal, rotating, vertical) and the same force of 3.5 N were used in both the clinical and the robot-assisted methods. The brushing results on teeth 32 - 47 were recorded clinically by taking photographs and in-vitro using Automated Plaque Planimetry (APP). Subsequently, using planimetric masks developed individually for each tooth, the results were rewritten to the planimetric plaque index (PPI) according to Lang et al. (2011), giving each surface a value of PPI code 0 (0 % plaque), 1 (≤ 50 % plaque) or 2 (> 50 % plaque) depending on the presence of dental biofilm.

The collected data were analyzed for normal distribution and agreement of means using statistical analysis procedures, such as the independent t-test, Kolmogorov-Smirnov test, and Wilcoxon-Mann-Whitney-U-test. All planimetric fields examined showed a normal distribution.

All comparable results of both clinical and robotic tests showed significant agreement rates, so that the clinical validation can be considered successfully completed by means of the present study.

8. Literaturverzeichnis

- Arnoldi F. 2015. Automatisierte Plaque-Planimetrie zur Effektivitätsbewertung der robotergenerierten Plaquereduktion, Zahnmed. Diss. Universität Witten/Herdecke.
- Axelsson P, Nystrom B, and Lindhe N. 2004. The long-term effect of a plaque control program on tooth mortality, caries and periodontal disease in adults. Results after 30 years of maintenance, *J Clin Periodontol*, 31: 749-57.
- Baruah K, Thumpala VK, Khetani P, Baruah Q, Tiwari RV, and Dixit H. 2017. A review on toothbrushes and tooth brushing methods, *Int J Pharm Sc Inv*, 6: 29-38.
- Bass CC. 1948. The optimum characteristics of toothbrushes for personal oral hygiene, *Dent Items Interest*, 70: 696-718.
- Bortz J, and Schuster Ch. 2010. Statistik für Human-und Sozialwissenschaftler, 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin
- Bretz MJ. 2010. Vergleichende Plaque-Planimetrie am Beispiel der Reinigungswirkung eines Kauschaums. Zahnmed Diss Universität Witten/Herdecke.
- Campbell L, Millhouse E, Malcolm J, and Culshaw S. 2016. T cells, teeth and tissue destruction - what do T cells do in periodontal disease?, *Mol Oral Microbiol*, 31: 445-56.
- Chen T, Yu WH, Izard J, Baranova OV, Lakshmanan A, and Dewhirst FE. 2010. The Human Oral Microbiome Database: a web accessible resource for investigating oral microbe taxonomic and genomic information, *Database*, 2010.
- Claydon N, and 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: 670-73.
- Danser MM, Driesen GM, Timmerman MF, van der Velden, and van der Weijden GA. 2000. A laboratory and clinical investigation comparing 2 oscillating/rotating electric toothbrushes, *J Clin Periodontol*, 27: 277-83.

- Duong H Y, Schmid E, Ramseier C A, Suvan J E, Lang-Hua B H, Burkhardt R, Schatzle M, and Lang N P. 2022. Periodontal disease progression in the second half of life and following a single episode of scaling and root planing: A clinical study in the Sri Lankan tea plantation cohort with documented clinical parameters for more than 40 years, *J Periodontol*, 93: 45-56.
- Ernst CP, Willershausen B, Driesen G, Warren PR, and Hilfinger P. 1997. A robot system for evaluating plaque removal efficiency of toothbrushes in vitro, *Quintessence Int*, 28: 441-5.
- Esberg A., Eriksson L., and Johansson I. 2022. Site- and time - dependent compositional shifts in oral microbiota communities, *Frontiers Oral Health*, 3.
- Fischman SL. 1997. The history of oral hygiene products: how far have we come in 6000 years?, *Periodontology* 2000, 15: 7-14.
- Flad AK 2019. Zahnmedizinische Plaque-Simulation zur Prüfung von Mundhygiene-Produkten, *Zahnmed. Diss. Universität Witten/Herdecke*.
- Fleuter M. 2015. Klinische Validierung einer robotergestützten Methode zur Beurteilung der Reinigungseffizienz von Kinderzahnbürsten, *Zahnmed. Diss. Universität Witten/Herdecke*.
- Gaengler P, and Arnold WH. 2007. Clinical aspects of tooth diseases and their treatment, *Handbook of Biomineralization: Biological Aspects and Structure Formation*: 203-22.
- Gaengler P, Hoffmann T, Willershausen B, Schwenzer N , and Ehrenfeld M. 2010. *Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York.
- Gest H. 2004. The discovery of microorganisms by Robert Hooke and Antoni Van Leeuwenhoek, fellows of the Royal Society, *Notes Rec R Soc Lond*, 58: 187-201.
- Graetz C, El-Sayed KF, Sälzer S, and Dörfer CE. 2018. S3-Leitlinie Häusliches mechanisches Biofilmmanagement in der Prävention und Therapie der Gingivitis, In.: *DG Paro*.
- Hamza B, Tanner M, Körner P, Attin T, and Wegehaupt FJ. 2021. Effect of toothbrush bristle stiffness and toothbrushing force on the abrasive dentine wear, *Int J Dent Hyg*, 19: 355-59.

- Hartung J. 2009. Statistik Lehrbuch-und Handbuch der angewandten Statistik 15. Auflage, Oldenbourgverlag, München.
- Hedderich J, and Sachs L. 2016. Angewandte Statistik. 15. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.
- Heitz-Mayfield LJ, Schatzle M, Loe H, Burgin W, Anerud A, Boysen H, and Lang NP. 2003. Clinical course of chronic periodontitis. II. Incidence, characteristics and time of occurrence of the initial periodontal lesion, J Clin Periodontol, 30: 902-8.
- Hellwig E , Klimek J, and Attin T. 2013. Einführung in die Zahnerhaltung, Deutscher Zahnärzte Verlag, Köln.
- Hihara H, Tagaino R, Washio J, Laosuwan K, Wicaksono D, Prasetianto, Izumita K, Koide R, Takahashi N, and Sasaki K. 2021. Effectiveness and safety of a new dental plaque removal device utilizing micro mist spray for removing oral biofilm in vitro, BMC Oral Health, 21: 1-8.
- Holban AM, Farcasiu C, Andrei OC, Grumezescu AI, Mihai, and Farcasiu AT. 2021. Surface modification to modulate microbial biofilms—Applications in dental medicine, Materials, Basel, 14: 6994.
- HOMD. 2022. (Zugriff am 27.07.2022) <http://homd.org/>.
- Hotta M, Imade S, Kotake H, Sano A, and Yamamoto K. 2009. Artificial plaque removal from interproximal tooth surfaces (maxillary premolar and molar) of a jaw model, Oral Health Prev Dent, 7: 283-7.
- Jakubovics NS, Goodman SD, Mashburn-Warren L, Stafford GP, and Cieplik F. 2021. The dental plaque biofilm matrix, Periodontology 2000, 86: 32-56.
- Jansiriwattana W, and Teparat-Burana T. 2018. Laboratory investigation comparing plaque removal efficacy of two novel-design toothbrushes with different brushing techniques, Dent J, Basel.
- Kaiser E, Meyners M, Markgraf D, Stoerkel U, von Koppenfels R, Adam R, Soukup M, Wehrbein H, and Erbe C. 2014. Brush head composition, wear profile, and cleaning efficacy: an assessment of three electric brush heads using in vitro methods, J Clin Dent, 25: 19-25.
- Khatak M, Khatak S, Siddqui AA, Vasudeva N, Aggarwal A, and Aggarwal P. 2010. *Salvadora persica*, Pharmacognosy reviews, 4: 209.

- Kim J-S, Lim J-H, and Kim H-J. 2017. In vitro study of the artificial plaque removal effect by use of 360 degree round head toothbrush, *Int J Clin Prev Dent*, 13: 171-76.
- Lake M. 2016. *Oberflächentechnik in der Kunststoffverarbeitung: vorbehandeln, beschichten, bedrucken, funktionalisieren, prüfen*, Carl Hanser Verlag, München.
- Lang NP, Adler R, Joss A, and Nyman S. 1990. Absence of bleeding on probing. An indicator of periodontal stability, *J Clin Periodontol*, 17: 714-21.
- Lang T, Bretz MJ, Jennes B, and Gaengler P. 2011. Planimetric plaque assessment of in-between oral hygiene products, ORMED Institute of Oral Medicine at the University of Witten / Herdecke, Germany, *J Dent Res*, Vol. 90.
- Ledder, R. G., J. Latimer, S. Forbes, J. L. Penney, P. K. Sreenivasan, and A. J. McBain. 2019. Visualization and Quantification of the Oral Hygiene Effects of Brushing, Dentifrice Use, and Brush Wear Using a Tooth Brushing Simulator, *Frontiers Public Health*, 7: 91.
- Listgarten MA. 1994. The structure of dental plaque, *Periodontology 2000*, 5: 52-65.
- Löe H. 2000. Oral hygiene in the prevention of caries and periodontal disease, *Int Dent J*, 50: 129-39.
- Löe H, Theilade E, and Jensen SB. 1965. Experimental Gingivitis in Man, *J Periodontol*, 36: 177-87.
- Löe H, 1965. Experimental gingivitis in man, *J Periodontol*, 36: 177-87.
- Mensi M, Scotti E, Sordillo A, Brognoli V, Dominici MP, and Calza S. 2021. Efficacy of sonic versus manual toothbrushing after professional mechanical plaque removal: A 6-month randomized clinical trial, *Int J Dent Hyg*, 19: 366-75.
- Nygaard-Østby P, Edvardsen S, and Spydevold B. 1979. Access to interproximal tooth surfaces by different bristle designs and stiffnesses of toothbrushes, *Scand J Dent Res*, 87: 424-30.
- Orland FJ, Blayney JR, Harrison RW, Reyniers JA, Trexler PC, Wagner M, Gordon HA, and Luckey TD. 1954. Use of the germfree animal technic in the study of experimental dental caries. I. Basic observations on rats reared free of all microorganisms, *J Dent Res*, 33: 147-74.
- Penick A. 2004. Power toothbrushes: a critical review, *Int J Dent Hyg*, 2: 40-44.

- Petker-Jung W, Weik U, Margraf-Stiksrud J, and Deinzer R. 2022. What characterizes effective tooth brushing of daily users of powered versus manual toothbrushes?, *BMC Oral Health*, 22: 1-9.
- Porter JR. 1976. Antony van Leeuwenhoek: tercentenary of his discovery of bacteria, *Bacteriol Rev*, 40: 260-9.
- Radaic A., and Kapila Y. L. 2021. The oralome and its dysbiosis: New insights into oral microbiome-host interactions, *Comput Struct Biotechnol J*, 19: 1335-60.
- Rawls HR, Casella R, and Mkwai-Tulloch NJ. 1993. An in vitro and in vivo study of toothbrush bristle splaying, *J Dent R*, 72: 947-52.
- Rinne H. 2008. Taschenbuch der Statistik. 4. Auflage, Verlag Harri Deutsch GmbH, Frankfurt am Main.
- Roulet L-F, Fath S, and Zimmer S. 2017. Zahnmedizinische Prophylaxe, 5. Auflage, Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH, München.
- Rustogi, KN, JP Curtis, AR Volpe, JH Kemp, JJ McCool, and LR Korn. 1992. 'Refinement of the Modified Navy Plaque Index to increase plaque scoring efficiency in gumline and interproximal tooth areas', *The Journal of clinical dentistry*, 3: C9-12.
- Schlueter N, Fiedler S, Mueller M, Walter C, Difloe-Geisert JC, Vach K, and Ganss C. 2021. Efficacy of a sonic toothbrush on plaque removal-A video-controlled explorative clinical trial, *PLoS One*, 16: e0261496.
- Slot DE, Valkenburg C, and Van der Weijden GA. 2020. Mechanical plaque removal of periodontal maintenance patients: A systematic review and network meta-analysis, *J Clin Periodontol*, 47: 107-24.
- Sonju T, Christensen TB, Kornstad L, and Rolla G. 1974. Electron microscopy, carbohydrate analyses and biological activities of the proteins adsorbed in two hours to tooth surfaces in vivo, *Caries Res*, 8: 113-22.
- Staufer S. 2011. Validierung einer robotergestützten Methode zur Beurteilung der klinischen Reinigungseffizienz von Handzahnbürsten, *Zahnmed. Diss. Universität Witten / Herdecke*.
- Tadinada A, Kilham J, Bysani P, and Gopalakrishna A. 2015. The evolution of a tooth brush: From antiquity to present-A mini-review, *J Dent Health Oral Disord Ther*, 2: 127-30.

- Thomassen TMJA, Van der Weijden FGA, and Slot DE. 2022. The efficacy of powered toothbrushes: A systematic review and network meta-analysis, *Int J Dent Hyg*, 20: 3-17.
- Van der Weijden GA. 2002. Models for assessing powered toothbrushes, *Adv Dent Res*, 16: 17-20; discussion 21.
- Von der Fehr FR. 1970. Experimental caries in man, *Caries Res.*, 4: 131-48.
- Westerfeld F. 2002. In vitro Untersuchung zur Prophylaxe von Bürstabrasionen erodierter Schmelzoberflächen, Med Dissertation, Universität Gießen.
- Yaacob M, Worthington H, Deacon S, Deery Ch, Walmsley A D, Robinson PG, and Glenny A-M. 2014. Powered versus manual toothbrushing for oral health, *Cochrane Database Syst Rev*: CD002281.
- Yaacob M, Worthington H, Deacon S, Deery Ch, Walmsley AD, Robinson PG, and Glenny AM. 2014. Powered versus manual toothbrushing for oral health, *Cochrane Database of Syst Reviews* (6).
- Zhuang L. F., Watt R. M., Steiner S., Lang-Hua B. H., Wang R., Ramseier C. A., and Lang N. P. 2014. Subgingival microbiota of Sri Lankan tea labourers naive to oral hygiene measures, *J Clin Periodontol*, 41: 433-41.

9. Anhang

Tabelle 9.1: Deskriptive Statistiken des Plaquebefalls für beide Zahnbürsten und drei Putztechniken

Situs	Statistik	Zahnputzbewegung					
		horizontal		rotierend		vertikal	
		Flat Cut	Interdental	Flat Cut	Interdental	Flat Cut	Interdental
bukkal (klinisch)	M	7.40	6.45	6.67	6.73	7.58	8.40
	SD	1.01	1.54	0.94	1.05	1.71	0.76
	Med	7.78	6.62	6.46	6.67	7.49	8.25
	IQR LL	6.26	4.83	5.85	5.72	5.93	7.72
	IQR UL	8.17	7.89	7.70	7.81	9.33	9.22
lingual (klinisch)	M	7.88	8.89	9.32	8.93	9.43	9.91
	SD	0.82	1.76	1.44	2.59	1.61	1.91
	Med	7.56	8.22	9.59	9.89	8.67	10.22
	IQR LL	7.28	7.56	7.76	6.00	8.33	7.86
	IQR UL	8.82	10.89	10.59	10.90	11.28	11.64
ABCDF bukkal (klinisch)	M	5.00	4.17	4.44	4.79	5.11	5.92
	SD	0.48	0.99	0.63	1.07	1.22	0.42
	Med	5.11	4.03	4.62	4.50	5.38	5.92
	IQR LL	4.47	3.25	3.74	3.89	3.78	5.50
	IQR UL	5.41	5.22	4.96	5.97	6.17	6.33
ABCDF lingual (klinisch)	M	5.54	6.14	6.57	6.21	6.54	6.95
	SD	0.46	0.96	0.72	1.98	1.01	0.98
	Med	5.44	5.78	6.89	7.09	6.00	6.61
	IQR LL	5.13	5.42	5.74	3.94	5.92	6.19
	IQR UL	6.04	7.22	7.07	7.60	7.70	8.06

Erläuterung: Beobachtungen $n = 66$, Mittelwert (M), Standardabweichung (SD), Median (M), Quartilsabstand (IQR LL, UL)

Tabelle 9.2: Deskriptive Statistiken der Plaquebefalls für beide Zahnbürsten

Situs	Statistic	Zahnputzbewegung					
		horizontal		rotierend		vertikal	
		Flat Cut	Interdental	Flat Cut	Interdental	Flat Cut	Interdental
bukkal (APP)	M	6.81	6.33	6.63	7.44	7.63	7.67
	SD	1.01	0.11	0.79	0.40	0.32	0.29
	Med	7.22	6.33	6.78	7.56	7.44	7.56
	IQR LL	5.67	6.22	5.78	7.00	7.44	7.44
	IQR UL	7.56	6.44	7.33	7.78	8.00	8.00
lingually (APP)	M	7.04	7.07	6.63	7.81	7.89	8.04
	SD	1.07	0.06	0.17	0.50	0.51	0.68
	Med	7.22	7.11	6.67	7.78	8.00	7.89
	IQR LL	5.89	7.00	6.44	7.33	7.33	7.44
	IQR UL	8.00	7.11	6.78	8.33	8.33	8.78
ABCDF bukkal (APP)	M	5.19	5.11	5.30	5.85	5.37	5.07
	SD	0.57	0.29	0.57	0.17	0.28	0.17
	Med	5.33	5.00	5.44	5.89	5.33	5.11
	IQR LL	4.56	4.89	4.67	5.67	5.11	4.89
	IQR UL	5.67	5.44	5.78	6.00	5.67	5.22
ABCDF lingually (APP)	M	5.04	5.15	5.04	5.56	5.59	5.78
	SD	0.53	0.17	0.17	0.22	0.34	0.22
	Med	5.22	5.11	5.00	5.56	5.67	5.78
	IQR LL	4.44	5.00	4.89	5.33	5.22	5.56
	IQR UL	5.44	5.33	5.22	5.78	5.89	6.00

Erläuterung: Beobachtungen n = 18, Mittelwert (M), Standardabweichung (SD), Median (M), Quartilsabstand (IQR LL, UL)

Tabelle 9.3: Einzelzahnwerte des Plaquebefalls für beide Zahnbürsten und drei Putztechniken

Zahn	Situs	Zahnputzbewegung					
		horizontal		rotierend		vertikal	
		Flat Cut	Interdental	Flat Cut	Interdental	Flat Cut	Interdental
31	bukkal (klinisch)	6.13	6.27	5.62	7.17	7.67	9.17
	lingual (klinisch)	8.55	8.17	9.89	8.67	9.71	9.92
	ABCDF bukkal (klinisch)	3.70	3.58	3.22	4.42	4.78	5.58
	ABCDF lingual (klinisch)	5.92	5.33	6.82	5.58	6.59	6.50
	bukkal (APP)	6.00	5.33	6.33	7.00	6.67	6.67
	lingual (APP)	4.00	4.67	3.67	4.33	4.33	4.00
	ABCDF bukkal (APP)	6.00	5.00	5.67	6.00	6.00	4.67
	ABCDF lingual (APP)	3.67	4.33	3.67	3.67	4.33	3.33
32	bukkal (klinisch)	5.53	5.88	4.78	6.92	4.47	7.50
	lingual (klinisch)	7.02	8.48	7.91	9.33	8.79	10.50
	ABCDF bukkal (klinisch)	3.42	3.67	2.73	4.08	3.12	4.33
	ABCDF lingual (klinisch)	4.80	5.50	5.18	6.25	5.48	7.33
	bukkal (APP)	6.33	5.33	6.00	6.33	9.33	6.67
	lingual (APP)	4.67	4.00	4.33	5.67	4.00	4.00
	ABCDF bukkal (APP)	6.00	5.33	5.67	5.67	6.67	4.67
	ABCDF lingual (APP)	4.00	4.00	4.00	4.67	3.33	4.00
41	bukkal (klinisch)	5.90	6.33	4.78	6.83	6.92	8.75
	lingual (klinisch)	6.92	8.13	9.22	8.00	8.23	9.08
	ABCDF bukkal (klinisch)	3.52	3.25	2.71	4.50	4.17	5.50
	ABCDF lingual (klinisch)	4.93	5.50	6.40	5.28	5.65	6.72
	bukkal (APP)	9.33	8.67	8.33	8.33	6.33	10.33
	lingual (APP)	8.00	10.00	5.67	9.33	6.00	7.67
	ABCDF bukkal (APP)	6.00	6.33	5.33	6.33	4.00	6.67
	ABCDF lingual (APP)	4.67	6.00	4.00	5.67	4.00	4.67

Erläuterung: Beobachtungen n = 84, Zahn 31 - 41

Tabelle 9.4: Einzelzahnwerte des Plaquebefalls für beide Zahnbürsten und drei Putztechniken

Zahn	Situs	Zahnputzbewegung					
		horizontal		rotierend		vertikal	
		Flat Cut	Interdental	Flat Cut	Interdental	Flat Cut	Interdental
42	bukkal (klinisch)	5.42	5.40	5.29	5.50	6.06	7.25
	lingual (klinisch)	6.15	7.43	7.67	8.42	7.91	9.33
	ABCDF bukkal (klinisch)	3.33	3.25	3.84	3.83	3.83	4.83
	ABCDF lingual (klinisch)	4.32	5.00	5.67	5.50	5.29	5.83
	bukkal (APP)	6.00	5.00	5.67	7.00	6.00	6.33
	lingual (APP)	7.33	8.33	7.67	8.67	8.33	6.00
	ABCDF bukkal (APP)	4.67	4.00	5.67	6.00	5.00	4.67
	ABCDF lingual (APP)	6.00	6.00	6.33	6.67	6.67	5.33
43	bukkal (klinisch)	5.69	4.15	4.64	5.25	6.22	7.08
	lingual (klinisch)	5.31	8.67	8.82	8.00	9.29	9.50
	ABCDF bukkal (klinisch)	3.42	2.92	3.42	4.00	3.90	4.92
	ABCDF lingual (klinisch)	3.49	5.75	6.42	6.17	6.47	6.08
	bukkal (APP)	7.33	6.67	5.67	6.67	7.67	4.33
	lingual (APP)	14.33	13.33	12.67	13.00	13.67	13.33
	ABCDF bukkal (APP)	4.33	4.67	3.67	4.67	4.33	2.33
	ABCDF lingual (APP)	9.33	9.33	8.67	9.00	9.00	9.00
44	bukkal (klinisch)	5.58	6.08	6.20	5.92	6.59	7.50
	lingual (klinisch)	7.17	9.63	9.44	10.03	9.96	10.08
	ABCDF bukkal (klinisch)	4.75	4.33	4.18	4.58	4.95	6.42
	ABCDF lingual (klinisch)	5.58	7.00	6.82	6.81	7.13	7.58
	bukkal (APP)	6.33	4.67	6.67	6.00	5.33	4.33
	lingual (APP)	8.00	7.67	7.67	8.33	10.33	10.33
	ABCDF bukkal (APP)	4.33	2.67	4.67	4.00	3.00	2.33
	ABCDF lingual (APP)	5.00	5.00	5.00	5.33	7.00	7.00

Erläuterung: Beobachtungen n = 84, Zahn 42 - 44

Tabelle 9.5: Einzelzahnwerte des Plaquebefalls für beide Zahnbürsten und drei Putztechniken

Zahn	Situs	Zahnputzbewegung					
		horizontal		rotierend		vertikal	
		Flat Cut	Interdental	Flat Cut	Interdental	Flat Cut	Interdental
45	bukkal (klinisch)	8.08	5.83	6.96	6.08	7.34	8.17
	lingual (klinisch)	7.57	10.32	9.53	8.92	9.96	9.42
	ABCDF bukkal (klinisch)	6.85	4.83	5.29	5.33	5.77	6.83
	ABCDF lingual (klinisch)	6.05	7.50	7.00	6.67	7.27	7.42
	bukkal (APP)	7.00	7.67	7.33	8.67	7.00	8.00
	lingual (APP)	6.67	5.00	6.33	8.00	8.00	8.67
	ABCDF bukkal (APP)	5.33	6.33	6.00	6.67	5.00	4.67
	ABCDF lingual (APP)	5.00	4.00	4.33	6.33	5.33	6.00
46	bukkal (klinisch)	10.95	7.42	9.82	6.83	10.08	8.25
	lingual (klinisch)	10.13	9.95	9.82	9.00	9.83	10.33
	ABCDF bukkal (klinisch)	7.12	4.83	6.42	4.92	6.73	6.33
	ABCDF lingual (klinisch)	6.83	7.25	7.09	6.75	7.59	7.58
	bukkal (APP)	6.67	7.00	8.00	9.67	10.33	11.33
	lingual (APP)	5.33	5.67	5.00	6.00	6.33	7.67
	ABCDF bukkal (APP)	5.00	6.00	6.67	7.33	7.67	8.33
	ABCDF lingual (APP)	4.00	3.67	4.00	4.00	4.00	5.33
47	bukkal (klinisch)	13.31	10.67	11.94	10.11	12.88	11.92
	lingual (klinisch)	12.13	9.22	11.53	10.00	11.17	11.00
	ABCDF bukkal (klinisch)	8.87	6.83	8.14	7.42	8.72	8.50
	ABCDF lingual (klinisch)	7.93	6.42	7.72	6.92	7.39	7.50
	bukkal (APP)	6.33	6.67	5.67	7.33	10.00	11.00
	lingual (APP)	5.00	5.00	6.67	7.00	10.00	10.67
	ABCDF bukkal (APP)	5.00	5.67	4.33	6.00	6.67	7.33
	ABCDF lingual (APP)	3.67	4.00	5.33	4.67	6.67	7.33

Erläuterung: Beobachtungen n = 84, Zahn 45 – 47

10. Wissenschaftliche Beiträge

Veröffentlichung

Pepin H., Lang T., Weich K.†, Gaengler P., 2020. Clinical Validation of Organic Plaque Simulation in Robot Toothbrushing Tests. J Dent Res. Vol. 99, Spec. Issue B, Abstract No. 3075

<https://iadr.abstractarchives.com/abstract/20iags-3301489/clinical-validation-of-organic-plaque-simulation-in-robot-toothbrushing-tests>

Objectives: Robot testing of simulated plaque control is important for developing toothbrushes. Therefore, the aim was (i) to test a novel formulation of organic plaque simulating viscosity and adhesion of natural plaque and (ii) to estimate a valid accuracy of robot outcome in relation to clinical results.

Methods: Clinical programme: After ethical approval (EK-UWH 552007), professional tooth cleaning and 3-day-plaque-regrowth, 22 calibrated subjects used in RCT video-supported horizontal, rotating and vertical brushing movements for 20s buccally/20s lingually at 9 teeth 32 – 47 with force 3.5N. Toothbrushes Dr. Best medium (TB1) and Interdent medium (TB2) (GlaxoSmithKline, Munich, Germany) were tested. Stained plaque was photographed and blind-coded at 18 planimetric fields and 10 risk fields using modified Navy-Plaque-Index (Lang et al. 2011) with PPI-Codes 0-1($\leq 50\%$)-2($>50\%$) per field.

Robot programme: Same brushes and techniques were tested. The cleaning outcome of simulated organic plaque in percentage per planimetric field (APP) was blind-assessed with PPI. All clinical and robot data underwent statistical analysis by K-S-test, one-sample-t-test and Agreement Rate AR of plaque removal.

Results: Individual clinical plaque control pattern at two surfaces and two risk areas per tooth were well reproduced by robot brushing movements. The Agreement rate of plaque removal by separated brushing movements at smooth surfaces was 85–100 % (TB1) and 89-99 % (TB2); at risk fields next to gum line 84-98 % (TB1) and 88-94 % (TB2). The single tooth analysis revealed best AR for teeth 42 (TB1 83-99 %), 42 (TB2 81-98 %) and 47 (TB2 75-98 %). Canines 43 exhibited the least of AR 41 % for both brushes.

Conclusions: Robot toothbrushing with formulation of organic plaque, simulating bio-physical parameters of natural plaque, is concordant with clinical plaque control at all teeth and planimetric fields. The clinically validated plaque simulation is recommended for complex dry and wet robot testing.

Posterpräsentation

Pepin H., Lang T., Weich K. †, Gaengler P., 2020. Clinical Validation of Organic Plaque Simulation in Robot Toothbrushing Tests. Presentation/Poster No. 3075

International Association for Dental Research (IADR), 98. General Session
Washington, D.C., USA, 18.03. – 21.03.2020

Data on file:

<http://www.ormed.net/publications.html>

11. Danksagung

Mein großer Dank gebührt zunächst meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. Peter Gängler. Er legte dankenswerter Weise den Grundstein für dieses Thema. Jederzeit stand er mir mit bereichernden Gesprächen, konstruktiver Kritik und kreativen Umsetzungsvorschlägen zur Seite. Für diese Zusammenarbeit möchte ich mich von ganzem Herzen bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Dr. Tomas Lang für die gemeinsamen Gespräche und die Betreuung bedanken.

Herrn Dr. Weich[†] danke ich herzlich für die schnellen und umfangreichen statistischen Auswertungen der Untersuchungsergebnisse und für die Erlaubnis, seine Abbildungen, Diagramme und Tabellen in meine Arbeit integrieren zu dürfen.

Bei der Umsetzung der Laboruntersuchungen stand mir Herr Christian Greune stets zur Seite, um mögliche offene Fragen schnell zu beantworten und die Verwendungen der entsprechenden Geräte zu erleichtern.

Meinen Eltern, meinen Schwiegereltern und meinem wundervollen Ehemann danke ich von ganzem Herzen für ihre Unterstützung.

12. Lebenslauf

Persönliche Daten

Familienname	Thiele
Geburtsname	Pepin
Vorname	Henrike
Anschrift	Waldblickweg 1 44265 Dortmund
Geboren am	22.10.1994
Geburtsort	Remscheid
Familienstand	verheiratet
Staatsangehörigkeit	deutsch

Bildungsweg

2001 - 2005	Grundschule Wittener Str., Wuppertal
2005 - 2013	Carl-Duisberg-Gymnasium, Wuppertal Abschluss: Abitur

Beruflicher Werdegang

2013 - 2014	Technische Universität München (TUM) Studium der Technik- und Managementorientierten Betriebswirtschaftslehre
2015 - 2016	Vorsemester für Medizin und Zahnmedizin, Köln
2016 - 2021	Universität Witten / Herdecke (UWH) Studium der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde Abschluss: Staatsexamen
seit 01.2022	Assistenzärztin in der Zahnarztpraxis Dr. Jens-H. Thiele, Holzwickede

13. Eidesstattliche Erklärung

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere (an Eides statt), dass ich die zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnheilkunde vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema „Klinische Validierung der Plaque-Kontrolle mit Handzahnbürsten und organischer Plaque-Simulation im Roboter-Test“ selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und die in der Arbeit verwendete Literatur vollständig zitiert habe.

Ich habe diese Dissertation weder in dieser noch in einer ähnlichen Form an einer anderen Hochschule eingereicht.

Ort, Datum

Unterschrift von
Henrike Thiele (geb. Pepin)