

Aus der Klinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie

(Direktor: Prof. Dr. C. Dörfer)

im Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Kiel

an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

In – vitro – Studie zur Reinigungseffektivität und

Krafteinwirkung verschiedener Hilfsmittel zur

Interdentalraumreinigung

Inauguraldissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde der Zahnmedizin

der Medizinischen Fakultät

der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Kristina Schoepke

aus Kiel

Kiel 2023

1.Berichterstatter:	Prof. Dr. Christian Graetz
2.Berichterstatter/in:	PD Dr. Karim Mohamed Fawzy El-Sayed
Tag der mündlichen Prüfung:	16.06.2025
Zum Druck genehmigt:	Kiel, den 14.04.2025
	gez.: Prof. Dr. Christian Graetz
	Vorsitzender der Prüfungskommission

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Literaturrecherche .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Anatomie des Interdentalraumes.....</b>	<b>3</b>
1.1.1 Funktion des Interdentalraumes.....	3
1.1.2 Der Kontaktpunkt.....	3
<b>1.2 Entstehung des oralen Biofilms .....</b>	<b>4</b>
1.2.1 Speichel und seine Bedeutung für die orale Erkrankungen .....	6
<b>1.3 Mundgesundheit und orale Erkrankungen .....</b>	<b>6</b>
<b>1.4 Karies.....</b>	<b>7</b>
1.4.1 Ätiologie Karies: .....	7
<b>1.5 Gingivitis und Parodontitis.....</b>	<b>8</b>
1.5.1 Zahnhalteapparat.....	8
1.5.2 Gingivitis.....	9
1.5.3 Parodontitis.....	10
<b>1.6 Häusliche Prophylaxe und Präventionsmaßnahmen.....</b>	<b>11</b>
1.6.1 Bedeutung des Biofilms, bzw. der dentalen Plaque für den Interdentalraum.....	11
1.6.2 Reinigung des Interdentalraumes – professionell und häuslich .....	12
1.6.3 Hilfsmittel zur Interdentalraumpflege .....	12
<b>2. Ziele und Fragestellung.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Ziel der In-vitro-Studie .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Primäre Hypothese .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3 Sekundäre Faktoren (weitere Fragestellungen) .....</b>	<b>15</b>
<b>3. Methoden und Material .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1 Methodik .....</b>	<b>16</b>
3.1.1 Verfahren .....	16
3.1.2 Kraftmessung .....	16
<b>3.2 Material.....</b>	<b>17</b>
3.2.1 Simulation des oralen Biofilms.....	17
3.2.2 Künstliche Zahnzwischenräume (3D-Druck) .....	18
3.2.3 Interdentale Hilfsmittel.....	20
<b>3.3 Versuchsaufbau zur Messung der Reinigungseffizienz .....</b>	<b>22</b>
3.3.1 Testläufe und Protokoll.....	24
<b>3.4 Bearbeitung, Analyse und Auswertung der Testblöcke sowie interdentalen Hilfsmitteln</b>	<b>24</b>
3.4.1 Vor der Interdentalraumpflege.....	24
3.4.2 Nach der Interdentalraumpflege .....	26
3.4.3 Bearbeitung und Analyse der Fotodokumentation.....	26
3.4.4 Bearbeitung und Analyse der Kraftdokumentation .....	28
<b>3.5 Erfassung der kompletten Datenauswertung bezüglich Kraftwerten und</b>	<b>28</b>
<b>Reinigungseffizienz.....</b>	<b>28</b>
<b>3.6 Statistische Analyse .....</b>	<b>28</b>
3.6.1 Reinigungseffektivität (ERE).....	29
3.6.2 Reinigungskraft bzw. der Kraftwiderstand (ERK) .....	29
3.6.3 Reinigungseffektivität in Bezug zum Kraftwiderstand .....	29
3.6.4 Reinigungseffektivität <sup>2</sup> (ERE <sup>2</sup> ) in Bezug zum Kraftwiderstand (ERK) .....	29

<b>4. Ergebnisse .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1 Reinigungseffektivität .....</b>	<b>31</b>
4.1.1 Untergruppenanalyse: Effizienz abhängig vom Interdentalraum .....	31
<b>4.2 Reinigungskraft (durchschnittliche Kraft aus Druck-/Zugkraft) .....</b>	<b>35</b>
<b>4.3 Verhältnis Reinigungseffektivität/Kraftwiderstand .....</b>	<b>37</b>
<b>4.4 Quotient Reinigungseffektivität<sup>2</sup>/Kraftwiderstand .....</b>	<b>38</b>
<b>5. Diskussion .....</b>	<b>41</b>
<b>5.1 Diskussion der Hypothesen .....</b>	<b>44</b>
<b>5.2 Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>45</b>
5.2.1 Reinigungseffektivität (ERE) .....	45
5.2.2 Reinigungskraft bzw. Kraftwiderstand (ERK).....	51
5.2.3 Verhältnis von experimenteller Reinigungseffektivität zu -kraft .....	54
5.3 Diskussion der Methode .....	55
<b>6. Zusammenfassung.....</b>	<b>59</b>
<b>7. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>61</b>
<b>8. Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>67</b>
<b>9. Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>70</b>
<b>10. Anhang.....</b>	<b>71</b>
10.1 Votum der Ethikkommission .....	71
10.2 Eidesstattliche Erklärung.....	72
10.3 Publikationen im Rahmen der Dissertation .....	73
10.4 Danksagung .....	74
10.5 Lebenslauf .....	75



## 1. Einleitung

Die tägliche Reinigung der Zähne mittels Zahnbürste sowie Zahnpasta wird heutzutage als obligat zur Vermeidung von oralen Erkrankungen wie Karies, Gingivitis und Parodontitis angesehen. Der zentrale Aspekt liegt hier in der Optimierung der häuslichen Zahnhygiene.

Dies ist dadurch bedingt, dass sich in den letzten Jahrzehnten der Fokus der Zahnmedizin von Intervention zu Prävention verändert hat, um den Risikofaktor für dentale, gingivale und parodontale Erkrankungen zu minimieren (Sekundo and Staehle, 2020).

Die Problematik, die sich tagtäglich zeigt, wird in vielen Studien thematisiert. Bei alleiniger Anwendung von Hand- und elektrischer Zahnbürste schaffen diese trotz korrekter Putztechnik nur ca. 60 % der Zahnoberflächen zu reinigen (Salzer et al., 2015). Der Bereich des Margo gingivae oder dem Interdentalraum werden hierbei nicht oder kaum von den Borsten erreicht (Christou et al., 1998).

Um diese schwer zu erreichenden Bereiche mechanisch zu säubern, die auch gleichzeitig Prädispositionsstellen für Karies, Gingivitis und Parodontitis sind, werden zusätzliche Hilfsmittel empfohlen (van der Weijden and Slot, 2011, Graetz et al., 2018).

Hierbei stehen dem Patienten diverse zusätzliche Hilfsmittel zur Verfügung, wie beispielsweise Zahnseide, Zahnhölzer, Interdentalraumbürsten und Interdentalraumpicks.

Am weitesten verbreitet ist die Zahnseide, wobei die Reinigungseffektivität insbesondere zur Vorbeugung und Behandlung von Zahnfleischentzündungen geringer einzustufen ist als von Interdentalraumbürsten (Salzer et al., 2015).

Die geringere Reinigungseffektivität ist zum Einen begründet durch die Form der verschiedenen Interdentalräume sowie durch die erschwerte Handhabung von Zahnseide, bei der es auf Grund von schlechterem Gleitverhalten bei straffen Zahnkontakten eher zu einer Verletzung der Interdentalpapille kommen kann (Graetz et al., 2018).

Generell besteht der Anspruch einer möglichst geringen Traumatisierung des Gewebes bei einer gleichzeitig hohen Reinigungseffektivität, wobei die Unterschiede diesbezüglich noch nicht ausreichend erforscht sind (Worthington et al., 2019). Weiterhin stellt sich generell eine unzureichende Datenlage dar für neuere Hilfsmittel wie Interdentalraumpicks (Graziani et al., 2018, Moretti et al., 2020), dies insbesondere bezüglich der Applikation und der korrekten Größe (Sekundo and Staehle, 2020). Obwohl es bereits In-vivo- und In-vitro-Studien gibt, in denen Unterschiede zwischen Interdentalraumbürsten sowie Interdentalraumpicks untersucht wurden (Hennequin-Hoenderdos et al., 2018, Votta et al., 2020), ist die evidenzbasierte Datenlage unzureichend, um aufgrund der Ergebnisse dieser Studien spezifische Empfehlungen der einzelnen Hilfsmittel gegenüber einem anderen zu geben.

Die Interdentalraumpicks sind ein relativ neues Hilfsmittel und stellen eine Alternative zu herkömmlichen Interdentalraumbürsten dar. Sie bieten eine gute Akzeptanz der Patienten (Abouassi

et al., 2014), eine hohe Benutzerfreundlichkeit sowie bedingt durch das Material ein geringeres Traumatisierungsrisiko für die Zahnhart-/ Weichgewebssubstanzen (Votta et al., 2020). Jedoch fanden experimentelle Studien eine als eher unzureichend einzuschätzende Reinigungseffektivität der Interdentalraumpicks mit teils nur 25 % simulierter Biofilmentfernung im Interdentalraum (Ince Kuka, 2018, Graetz et al., 2020, van der Weijden et al., 2021).

Um die Vorzüge beider interdentalen Hilfsmittel (Interdentalraumbürste und Interdentalraumpick) zu vereinen, wurden von der Firma Sunstar (Sunstar Suisse SA, Etoy, Schweiz) zwei neue Hilfsmittel entwickelt, die in dieser Dissertation zugrundeliegenden In-vitro-Studie getestet wurden. Hierbei handelt es sich einerseits um eine direkte Kombination aus Interdentalraumbürsten mit Interdentalraumpicks (Testprodukt 2, siehe bitte Abbildung 10), welches analog zu den Interdentalraumpicks aus einem metallfreien Interdentalraumstick mit elastomeren Noppen besteht. Zwischen diesen Noppen sind gegenüberliegende Nylonborsten angebracht, die ihren Durchmesser konisch erhöhen. Diese Neuerung soll entsprechend des entwickelnden Herstellers (Sunstar Suisse SA, Etoy, Schweiz) die Reinigungseffektivität der Interdentalraumpicks erhöhen sowie die hohe Akzeptanz und einfache Handhabung der Interdentalraumpicks adaptieren.

Eine weitere Neuentwicklung des gleichen Herstellers basiert ebenfalls auf dem regulären Aufbau eines Interdentalraumpicks, an dem zirkulär zu den elastomeren Noppen zusätzliche feinere Ausstülpungen („Pilis“) des gleichen Materials angebracht sind (Testprodukt 1, siehe bitte Abbildung 10).

Der Hersteller verspricht sich durch die höhere Elastizität ein geringeres Risiko für Gingivatraumatisierungen bei einem geminderten Frakturrisiko des Hilfsmittels selbst.

## 1.1 Literaturrecherche

### 1.1.1 Anatomie des Interdentalraumes

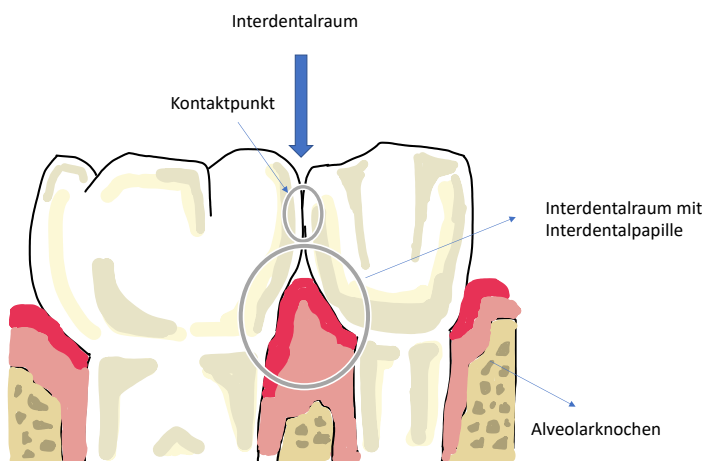


Abbildung 1: schematische Abbildung des Interdentalraumes. Gezeigt sind zwei benachbarte Zähne, zwischen denen der Interdentalraum, der Kontaktpunkt und die Interdentalpapille schematisch dargestellt wurden.

Der Interdentalraum oder Approximalraum (Abbildung 1) befindet sich zwischen zwei benachbarten Zähnen und wird durch die einzelnen Zahnbestandteile wie der Krone und den Wurzeln nach mesial und distal begrenzt. Beim gesunden Patienten ist dieser oberhalb des interdentalen Alveolarknochens mit der Interdentalpapille als schmal auslaufender Teil der Gingiva aufgefüllt.

Die interdental Gingiva besteht aus einem oralen und einem vestibulärem Papillenzipfel. Dazwischen befindet sich eine sattelförmige Einsenkung, die auch „Col“ genannt wird. Dieser besitzt eine konkave Struktur mit nichtkeratinisiertem Epithel und befindet sich apikal der Schmelz-Zement-Grenze (SZG) und ist klinisch nicht einsehbar. Sie kann sich aber bei größerem interdentalen Abstand verändern (Takei, 1980) Je nach gingivalen Morphotyp und der Stellung der Zähne zueinander, verändert die Papille ihre Form, beispielsweise relativ spitz zulaufend oder recht voluminös. Neben dem Abstand der Zähne zueinander hängt diese Ausformung noch von weiteren Faktoren ab, wie der Wurzelmorphologie und -stellung im Alveolarknochen, der Höhe und der Lage des interdentalen Alveolarknochens und der Lage des interdentalen Kontaktpunktes (Schmidlin, 2012).

### 1.1.2 Funktion des Interdentalraumes

Der Interdentalraum (IDR) bietet der interdentalen Gingiva Raum zwischen den Zähnen zur Ausbildung der Papille. Durch die erschwerte Reinigbarkeit sowie Erreichbarkeit birgt der Interdentalraum ein hohes Risiko für die Entstehung von entzündlichen Prozessen durch Mikroorganismen bedingten oralen Biofilm (Lang et al., 1973).

### 1.1.3 Der Kontaktpunkt

Der Approximalkontakt besteht zwischen zwei benachbarten Zähnen und liegt im inzisalen bzw. okklusalen Kronendrittel (Lehmann, 2005).

Der Abstand des Kontaktpunktes bestimmt maßgeblich, ob eine komplette Papille ausgeformt wird (Schmidlin, 2012). Hierbei haben Studien einen proportionalen Zusammenhang zwischen dem Limbus alveolaris und dem Margo gingivae untersucht. Im Mittel beträgt der Abstand, je nach Knochen und Phänotyp der Gingiva, zwischen dem Kontaktpunkt und dem Knochen ca. 3 mm. Tarnow und Mitarbeiter fanden, dass bis zu einem Abstand von 5 mm oder weniger die Papille zu 100 % erhalten ist, bei 6 mm bis zu 65 % und bei 7 mm aber nur noch 27 % der Papille erhalten blieben (Tarnow et al., 1992).

## 1.2 Entstehung des oralen Biofilms

Mit dem Begriff „Biofilm“ wird eine strukturierte Gemeinschaft von Mikroorganismen bezeichnet, die in einer Polymermatrix liegen und angeheftet sind an eine inerte oder lebende Oberfläche (Costerton et al., 1999).

Man nimmt an, dass Infekte des menschlichen Körpers überwiegend bakteriell bedingt sind und hierbei 60 - 70 % aller Infektionserkrankungen biofilmassoziiert sind (Persson et al., 2008).

In der Mundhöhle sowie im Rachen des Menschen siedeln über 700 verschiedene biofilmbildende Bakterien, da sie dort auf Grund des warmen und feuchten Milieus sowie häufigen Nahrungsnachschubes sehr ideale Lebensbedingungen vorfinden (Aas et al., 2005).

Die komplexe Organisation der oralen Mikroorganismen innerhalb des Biofilmes, oftmals auch als dentale Plaque bezeichnet, bildet den ätiologischen Faktor für die oralen Erkrankungen Karies, Gingivitis und Parodontitis. Sie wirkt schädlich auf Zahnhartsubstanzen sowie auf Weichgewebe und darum liegenden Strukturen (Löe et al., 1965, Theilade et al., 1966). Dies ist dadurch bedingt, dass es bei der Vermehrung bestimmter Mikroorganismen häufig zu einer gesteigerten Säure- sowie Stoffwechselproduktion kommen kann. Durch diese gesteigerten Stoffwechselprodukte fällt der orale pH-Wert ab, infolgedessen sich orale Infektionen entwickeln (Keyes, 1960, Keyes, 1968) (siehe bitte Abbildung 2).

Eine weitere orale Erkrankung, basierend auf der Besiedlung mit pathogenen Keimen, ist die Periimplantitis, die Entzündung der implantattragenden Strukturen in der Mundhöhle. Hierbei haben Studien eine Korrelation zwischen der Plaqueakkumulation und einem progressiven Knochenverlust rund um das Implantat herum gezeigt (Scarano et al., 2004, Al-Ahmad et al., 2010).

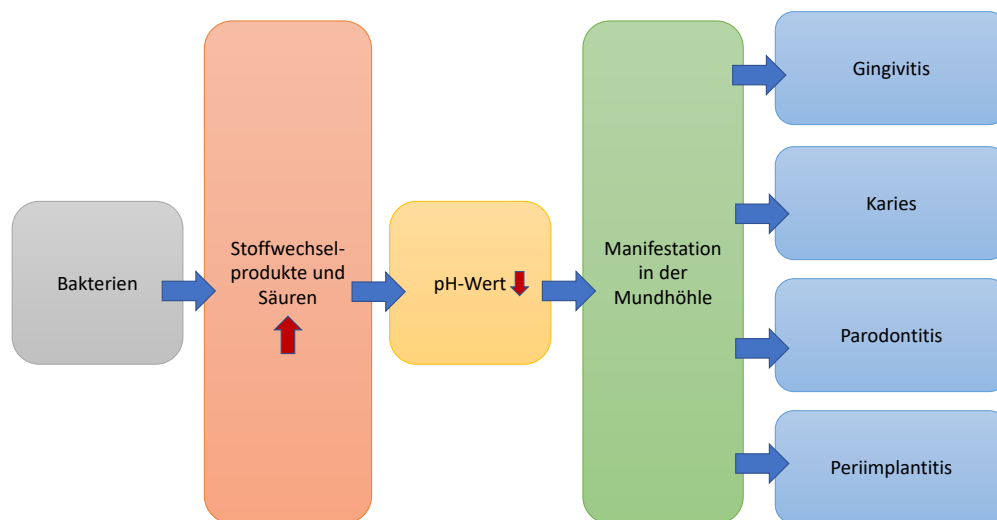


Abbildung 2: Schematisches Entwicklungsmodell oraler Erkrankungen basierend auf dem Vorhandensein von oralen Mikroorganismen (entwickelt nach (Al-Ahmad et al., 2010))

Der orale mikrobielle Biofilm und die Besiedelung der Zahnoberfläche mit Mikroorganismen verlaufen in verschiedenen, hintereinander ablaufenden Phasen, die in ihrer Pathogenität zunehmen. Die Entwicklung verläuft zunächst supragingival und später wird auch der subgingivale Bereich kolonisiert (Marsh, 2004, Hannig and Joiner, 2006, Siqueira et al., 2012, Larsen and Fiehn, 2017).

Ist die dentale Plaque komplett gebildet, zeigt sich klinisch eine gerötete sowie geschwollene Gingiva (Gängler et al., 2010).

Dabei findet zwischen den Mikroorganismen eine Art Kommunikation („Quorum sensing“) statt (Larsen and Fiehn, 2017). Das Quorum sensing dient dazu der Immunabwehr des Wirts zu entkommen und somit eine etablierte Infektion herzustellen. Es wird von gramnegativen sowie grampositiven Bakterien vollzogen. Am Beispiel des *Streptokokkus Mutans*, dem Hauptverursacher kariöser Läsionen, kann man darstellen, wie mittels des Quorum sensing durch Peptidhormone die Kommunikation koordiniert wird (Lemos et al., 2019). Hierbei kommt es zu einer veränderten Genexpression der beteiligten Bakterien. Hervorzuheben ist hierbei die Produktion der extrazellulären Matrix, die dazu führt, dass der Biofilm nur noch mechanisch entfernt werden kann (Sanderink et al., 2008) und nicht mehr durch selbstreinigende Prozesse mittels Speichels, Wange und Zunge zu lösen ist. Könnte man also das Quorum sensing unterbinden, so wäre dies eine gute Möglichkeit die Pathogenität des ausgereiften Biofilms zu verringern (Bassler, 1999). Leider gelingt dies bis heute nicht, weshalb der Biofilm im Laufe der Zeit immer pathogener wird. Die Pathogenität ist dabei gekennzeichnet durch mehr anaerobe, bewegliche und gramnegative Erreger und ist ein besonderes Problem im Bereich der Mundhöhle (Wood et al., 2000).

### 1.2.1 Speichel und seine Bedeutung für die orale Erkrankungen

Der Speichel spielt eine Rolle in vielen lebenswichtigen physiologischen Prozessen im Körper. Beispiele sind hier die anfängliche Verdauung in der Mundhöhle, das Kauen, das Schlucken sowie auch der Geschmacksinn oder die Lautbildung (Villa et al., 2015).

Die Zusammensetzung des Speichels hängt von verschiedenen Faktoren ab, die Sekretionsrate der Drüsen, dem Stimulationsgrad sowie -art und -dauer (Hellwig, 2006).

Der Speichel spielt durch das Herabsetzen der bakteriellen Adhärenz eine führende Position in der protektiven Rolle des Wirtes im Kampf gegen orale Erkrankungen. Insbesondere bei der Kariesentstehung oder der Kariesprävention spielt der Speichel eine wichtige Rolle (Gängler, 2012).

Viele Studien haben sich schon mit dem Problem beschäftigt, dass bei vermindertem Speichelfluss dessen reinigende, antimikrobielle und remineralisierende Funktionen herabgesetzt ist. Die Folge ist eine schnellere Manifestation oraler Erkrankungen wie Karies, Säureerosionen oder eine Candidasis (Navazesh et al., 1995, Nauntofte, 2003, Hara and Zero, 2014).

Zusätzlich zur Pufferfunktion und somit zur Remineralisation beinhaltet der Speichel Enzyme wie beispielsweise Lysozym, welches in der Lage ist Bakterienwände zu zerstören und aufzulösen (Hellwig, 2006).

Somit ist der Speichel eine orale Barriere gegenüber chemischen, mechanischen und infektiösen Angriffen.

Begründet durch interne oder externe Stimuli, wie beispielsweise Medikamenten, kann es zur Reduktion der Fließrate des Speichels kommen (Ying Joanna and Thomson, 2015).

Dies führt zwangsläufig zu einem schnelleren Voranschreiten kariöser Defekte (Nauntofte, 2003).

### 1.3 Mundgesundheit und orale Erkrankungen

„Die Mundgesundheit ist wichtig. Zähne und Mund sind ein integraler Bestandteil des Körpers, unterstützen und ermöglichen wesentliche menschliche Funktionen und der Mund ist ein grundlegendes Merkmal der persönlichen Identität“ (Peres et al., 2019).

Die internationale Forschergruppe um Peres et al. (2019) stellte dar, wie eng verknüpft die Mundgesundheit mit emotionalen, sozialen sowie auch epidemiologischen und wirtschaftlichen Aspekte sind. Neben der Beeinträchtigung alltäglicher und lebensnotwendiger Tätigkeiten wie der Nahrungsaufnahme und dem Sprechen, leiden die Patienten in allen Lebensbereichen unter oralen Krankheiten.

Weltweit sind ca. 3,5 Milliarden Menschen betroffen. Die häufigsten oralen Erkrankungen sind Karies, Parodontitis sowie orale Krebserkrankungen, wobei Karies die höchste globale Prävalenz zeigt (Peres et al., 2019).

## 1.4 Karies

Karies ist ein multifaktorieller entzündlicher Prozess, der sich im Mundraum entwickelt. Aus dem Lateinischen übersetzt bedeutet das Wort „caries“ „Morschheit“ bzw. „Fraß“. Die Zahnkaries zählt zu den häufigsten Erkrankungen der Zahnhartgewebe und kann wie auch andere Krankheitsbilder in verschiedene Phasen der Stagnation, Remission und Progression unterteilt sein (Hellwig, 2006).

Hierbei kommt es zu einem dynamischen Prozess der Demineralisation der Zahnhartsubstanzen, also dem Schmelz und dem Dentin, der letztendlich zu einem irreversiblen Zahnhartsubstanzverlust führt (Arends, 1969). Dieser ist lokalisiert und basiert auf dem Zusammenwirken von potenziell pathologischen Mikroorganismen sowie potenziell pathogener ökologischer Faktoren (Hellwig, 2006).

### 1.4.1 Ätiologie Karies

Die seit heute anerkannte Grundlage der verschiedenen Ätiologien der Zahnkaries bildet die „chemisch-parasitäre“ Theorie nach Miller (Miller, 1889).

Man geht heutzutage davon aus, dass kariogene Mikroorganismen der Mundhöhle (nach der Bildung eines Biofilms, s. bitte 1.2) bei Zufuhr von niedermolekularen Kohlenhydraten als Stoffwechselprodukte organische Säuren produzieren. Diese führen zu einem Abfall des pH-Wertes im Mund und wirken auf die Zahnhartoberfläche ein und führen schließlich zur Demineralisation. Dementsprechend wurde ein Ätiologie-Modell entwickelt, dass das Zusammenspiel des Wirtes, des Substrates sowie der kariogenen Mikroorganismen darstellt (Keyes, 1960, Keyes, 1968, Nolden, 1994). Dieses Modell wurde durch König (König, 1987) mit dem Faktor der Zeit ergänzt, da die Demineralisation der Zahnhartsubstanzen maßgeblich von dem Verbleib der Plaque sowie der Dauer eines Säureangriffes abhängt.

An den Zähnen befinden sich Bereiche, an denen es eine vermehrte Plaqueakkumulation geben kann und das Risiko einer Karieserkrankung erhöht ist. Diese Stellen werden Prädilektionsstellen genannt und sind in Abbildung 3 schematisch dargestellt.

Die Prädilektionsstelle, auf die in dieser Dissertation das höchste Augenmerk gelegt wird, ist der Interdentalraum, genauer gesagt die Approximalflächen unterhalb des Kontaktpunktes. Im Interdentalraum kommt es häufig zu einer vermehrten Biofilmakkumulation, die ohne eine Interdentalreinigung nicht entfernt werden kann (Theilade et al., 1966, Plagmann et al., 1973).

Wie auch schon in anderen Studien erforscht, finden sich neben den Okklusalfächen der Molaren die höchsten Kariesraten im interdentalen Bereich (Demirci et al., 2010).

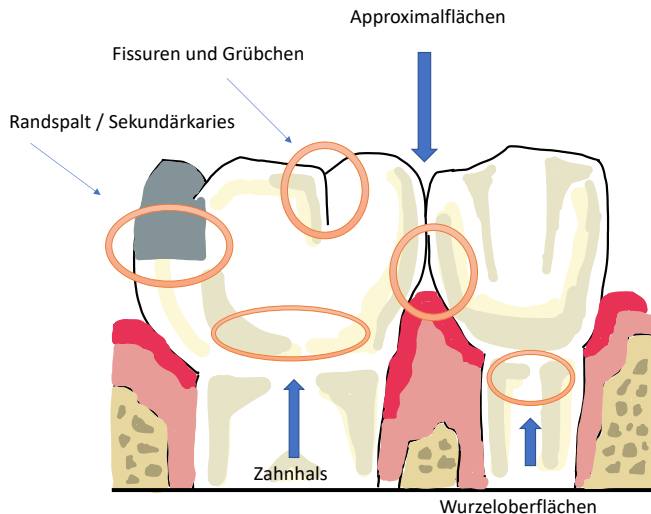


Abbildung 3: schematische Darstellung der Prädispositionsstellen der Zahnhartsubstanzen.

## 1.5 Gingivitis und Parodontitis

Gingivitis und Parodontitis sind beides multifaktorielle entzündliche Erkrankungen, deren entscheidender Faktor die pathogenen Mikroorganismen sind, die sich in einem sub- und supragingivalen dentalen Biofilm organisieren (Page and Kornman, 1997, Sanz et al., 2020). Hierbei liegt das Hauptproblem in ihrer fehlenden Beseitigung und der darauf folgenden Interaktion mit dem Parodont, dem Immunsystem und Umgebungsfaktoren (Hajishengallis and Korostoff, 2017).

Zuerst zeigt sich bei Nichtentfernung der Plaque nach etwa zehn bis 21 Tagen eine plaqueinduzierte Gingivitis, die bei Nichtbehandlung als eine inflammatorische Entzündungsreaktion in eine Parodontitis übergehen kann (Löe et al., 1965, Listgarten, 1986).

Für das in dieser Dissertation behandelte Thema ist von großer Bedeutung, dass Gingividen und Parodontitiden häufig stärker im Interdentalraum ausgeprägt sind (Loe, 1979) und zumeist auch dort ihren Ursprung haben.

In den folgenden Abschnitten wird detaillierter auf die Ätiologie, Pathogenese und Folgen der beiden Erkrankungen eingegangen.

### 1.5.1 Zahnhalteapparat

Der Zahnhalteapparat, auch Parodontium genannt, besteht aus einem komplexen System mit verschiedenen Strukturen; der Gingiva, dem Wurzelzement, dem Alveolarknochen und dem Desmodont. Sie bilden gemeinsam mit dem Zahn eine funktionelle Einheit. (Plagmann, 1998)

Seine Hauptaufgaben sind die Verankerung des Zahnes im Knochen, die Dämpfung der Kaukräfte, die Abwehr äußerer Noxen sowie die Trennung zwischen Mundhöhlenmilieu und Zahnwurzel (Hellwig, 2006). Entzündliche Erkrankungen dieses Systems wie bei einer Parodontitis führen unbehandelt



zwangsläufig zu erhöhter Zahnbeweglichkeit, Zahnwanderung und schließlich zum Zahnverlust (Kebschull et al., 2020).

Die physiologische Zahnbeweglichkeit beträgt horizontal 50-200 µm, vertikal 30-50 µm. Eine erhöhte Zahnbeweglichkeit kann ihren Ursprung in akuten Entzündungen des Zahnhalteapparates haben, aber auch ein parodontales Trauma durch okklusale Belastungen (Lindhe and Nyman, 1977) sowie ein Höhenverlust an alveolärem Knochen (beispielsweise infolge einer Parodontitis, Krebserkrankung oder iatrogen verursacht) können die Beweglichkeit des Zahnes beeinflussen (Lindhe and Nyman, 1977).

### 1.5.2 Gingivitis

Die orale Gingiva ist Teil des Parodontiums sowie Teil der Mundschleimhaut. Sie umschließt den Zahnhalteapparat und stellt somit eine schützende Barriere zur Außenwelt dar. Sie wird in die freie Gingiva (unterteilt in das orale Epithel, das Sulkusepithel und das Saumepithel) und die befestigte Gingiva (unverschieblich verwachsen mit dem Alveolarknochen) unterteilt und geht dann bei der mukogingivalen Grenze in die Alveolarmukosa über (Rateitschak, 2004). Die befestigte Gingiva hat eine hohe Zellumsatzrate sowie eine geringe Durchlässigkeit und wirkt so Infektionen wirksam entgegen. Die Stabilisierung des Zahnes in der Alveole erfolgt über die Sharpey'schen Fasern (Kollagenfasern) mit Ursprung im Periost. Hier entsteht die feste Verwachsung der befestigten Gingiva durch das komplexe Fasersystem des gingivalen Bindegewebes. (Hellwig, 2006, Müller, 2021)

Die freie Gingiva umfasst den Zahn kragenförmig und teilt sich in das orale Epithel, welches in das Sulkusepithel übergeht und im Saumepithel endet.

Das Saumepithel sitzt am Boden des Sulkus und ist ein spezialisiertes Epithelgewebe, das sich durch eine hohe Zellproliferation sowie hemidesmosomale Verbindungen auszeichnet (Yuan et al., 2021).

Bei einer Gingivitis handelt es sich um eine reversible Entzündung des Zahnfleisches, die bei Wiederaufnahme der Mundhygiene vollständig ausheilen kann (Löe et al., 1965). Es zeigt sich ein fließender Übergang zwischen einer physiologischen zu einer pathologischen Entzündung, die meist klinisch nicht klar abzugrenzen ist (Page and Schroeder, 1976). Die entzündliche Läsion resultiert aus einer Wechselwirkung zwischen Biofilm und immuninflammatorischer Wirtsreaktion und begrenzt sich auf die Gingiva. Dies bedeutet, dass es zu keinem Attachmentverlust kommt und nach erfolgreicher Behandlung anders als bei der Parodontitis wieder eine gingivale Gesundheit hergestellt werden kann (Chapple et al., 2015).

Klinische Zeichen einer Gingivitis zeigen sich in einer Schwellung (Ödem), dem *bleeding on probing* (BOP), Rötungen, meist Biofilm am Gingivarand, Gingivaexsudat mit erhöhter Fließrate, histologische Veränderungen der Gingiva sowie das Auftreten von Halitosis, Zahnfleischbluten und Schmerzen (Löe et al., 1965).

### 1.5.3 Parodontitis

Wie auch die Karies ist die Parodontitis eine Erkrankung, die große Anteile der weltweiten Bevölkerung betrifft. Die Parodontitis folgt in ihrer Gesamtprävalenz der Karies und ist die sechsthäufigste chronische Entzündungserkrankung auf der Welt (Kassebaum et al., 2014, Peres et al., 2019). Die Abbildung 4 zeigt, wie auch hier die pathogenen Mikroorganismen der entscheidende Faktor der Erkrankung sind (Page and Schroeder, 1976, Page and Kornman, 1997). Die Parodontitis ist eine destruktive entzündliche Erkrankung des Zahnhalteapparates, die zusätzlich durch Umweltfaktoren (beispielsweise Rauchen (Bergstrom, 1989)) und genetische Faktoren (beispielsweise Diabetes mellitus und hormonelle Schwankungen) beeinflusst wird (Nagata, 2009) und meist in Verbindung mit einer Gingivitis über den infraalveolären Knochenabbau unbehandelt zum Zahnverlust führt (Sanz et al., 2020).

Die mikrobielle Zusammensetzung der dentalen Plaque mit parodontalpathogenen Keimen ist einer der Hauptrisikofaktoren der Entwicklung und Progression der Parodontitis.

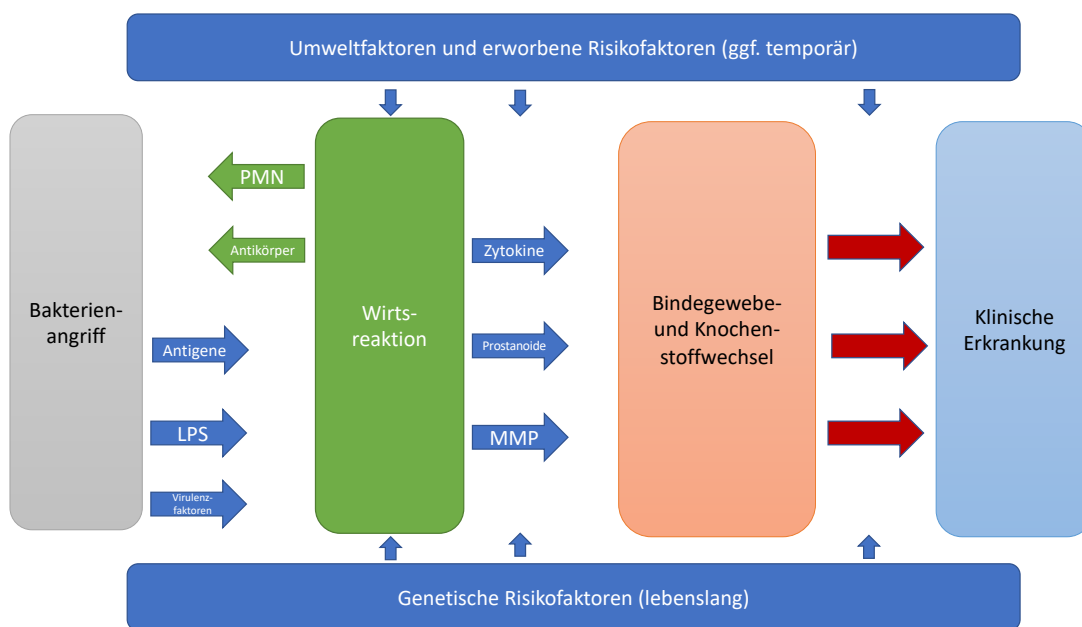


Abbildung 4: Entwicklung der Parodontitis (Schemata nach Page & Kornman (1997)) abhängig von Umweltfaktoren sowie genetischen Faktoren. Dargestellt ist die Wirtsreaktion auf den Bakterienangriff sowie dessen Folgen auf den Bindegewebe- und Knochenstoffwechsel.

Bei Anhäufung und steigender Komplexität des Biofilms unterscheidet man histologisch vier verschiedene Läsionen (Rateitschak, 2004).

Bis zur etablierten Läsion sind die Entzündungsreaktionen reversibel und stellen sich als eine reversible Gingivitis dar. Ab der fortgeschrittenen Läsion ist die Destruktion irreversibel (Hellwig, 2006). Dies bedeutet, dass sich aus der reversiblen Gingivitis eine irreversible Parodontitis entwickelt hat, die mit Attachmentverlust und Knochenabbau einhergeht (Marsh and Zaura, 2017). Der Ablauf ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

Im gesunden Parodont schafft das Saumepithel mit antimikrobiellen Abwehrmaßnahmen ein orales Gleichgewicht (Bosshardt and Lang, 2005). Beim Besiedeln der Wurzeloberfläche mit parodontalpathogene Keime kommen Lipopolysaccharide und andere Virulenzfaktoren sowie Antigene in Kontakt mit dem gingivalen Gewebe und induzieren eine Entzündung. Dies hat eine Reaktion des Wirtes zur Folge: Polymorphkernige neutrophile Granulozyten und Antikörper, die gegen die Bakterien wirken sollen, aber auch proinflammatorische Zytokine, die zur Produktion von Matrixmetalloproteinasen führen. Diese Matrixmetalloproteinasen tragen dazu bei, dass das gingivale Bindegewebe sowie das parodontale Ligament zerstört wird. Weiterhin kommt es zur Sezernierung von Prostaglandinen, die ebenfalls den Alveolarknochenabbau vermitteln (Page, 2002, Hamack, 2006).

## 1.6 Häusliche Prophylaxe und Präventionsmaßnahmen

Um den Nährboden der Mikroorganismen, den Biofilm, zu beeinflussen, gibt es für die häusliche und klinische Prophylaxe verschiedene Hilfsmittel.

Eine Studie von Firestone and Muhlemann (1985) hat dargestellt, dass man regelmäßig den Biofilm auf den Zahnoberflächen entfernen muss, um die Entstehung der Karies zu reduzieren, bzw. die Stadien der Karies zu arretieren. Der pH – Abfall ist nach der Entfernung des interdentalen Biofilms zwar gemindert, wird aber nicht komplett verhindert (Firestone and Muhlemann, 1985).

Grundsätzlich gibt es für die häusliche sowie klinische Routine verschiedene Hilfsmittel, die mechanisch oder chemisch wirken können.

Eine mechanische Reinigung der Zahnoberflächen erreicht man mit der Zahnbürste (elektrisch oder Handzahnbürste), der Zahnzwischenraumhygiene (mehr ausgeführt s. bitte 1.6.2) und der professionellen Zahnreinigung im Praxisalltag. Chemische Hilfsmitteln sind beispielsweise antimikrobielle Therapeutika wie Chlorhexidin.

Einen großen Anteil bei der Verhinderung einer Kariesprogression werden den Fluoriden zugesprochen, die regelmäßig zugeführt werden sollen.

Somit wird heutzutage dem Patienten laut Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Zahn-Mund-Kiefer-Heilkunde (DGZMK) eine obligate Basispflege angeraten: Die mindestens zweimal tägliche Nutzung einer Zahnbürste zur Reinigung ihrer Zähne mit einer fluoridhaltigen Zahnpasta und die Reinigung der Zahnzwischenräume mit zusätzlichen Hilfsmitteln. Darüber hinaus muss der Patient über die Mundhygiene aufgeklärt und instruiert werden sowie eine Ernährungsberatung bezüglich der täglichen Zuckeraufnahme und der Anzahl zuckerhaltiger Mahlzeiten erhalten (Geurtsen, 2016, Graetz et al., 2018).

### 1.6.1 Bedeutung des Biofilms, bzw. der dentalen Plaque für den Interdentalraum

Auf Grund ihrer anatomischen Position in der Mundhöhle, haben Zähne sowie auch dentale Implantate ein höheres Risiko an oralen Infektionen zu erkranken.

Betrachtet man den Interdentalraum, zeigt sich hier ein erhöhtes Risiko durch die nichtkeratinisierten Oberflächen, insbesondere der interdentalen Col-Region (Sanderink et al., 2008).

### 1.6.2 Reinigung des Interdentalraumes – professionell und häuslich

Das komplexe orale System verfügt über selbstreinigende Wirkung durch die Zunge, die Wange, vor allem in Kombination mit dem Speichel. Wenn auch die selbstreinigende Wirkung für die vorgenannten Zahnflächen teils erwiesen ist, im Interdentalraum ist sie jedoch reduziert und bei offenen Interdentalräumen sogar völlig unmöglich und lässt sich nur mechanisch erreichen (Hellwig, 2006).

Um der damit verbundenen Ursache im supra-/subgingivalen Biofilm entgegen zu wirken, richtet man heutzutage ein hohes Augenmerk auf die Reinigung des Interdentalraumes.

Diese Reinigung ist im Vergleich zu den übrigen Zahnarealen als sehr herausfordernd anzusehen.

In diesem Bereich liegen die verbleibenden 40 %, die ohne zusätzliche Hilfsmittel nicht von der Zahnbürste erreicht werden (Salzer et al., 2015). In verschiedenen Studien wurde dargelegt, wie sehr die Reinigung des Interdentalraums zu einer Reduzierung der Plaqueansammlung sowie der Entzündungszeichen wie dem *bleeding on probing* (BOP) führt (Slot et al., 2008, Hennequin-Hoenderdos et al., 2018, Graziani et al., 2018).

Dies bedeutet, dass die regelmäßige Reinigung des Interdentalraumes und somit die Entfernung des Biofilmes als wichtigster ätiologischer Faktor parodontaler Pathologien zu einer Verringerung des Risikos für Karies sowie der Gingivitis und Parodontitis führt.

Verschiedene Studien stellten jedoch dar, dass die tägliche Zahnzwischenraumpflege noch nicht fester Bestandteil der täglichen Mundhygiene ist (Schuz et al., 2006). Es zeigte sich aber eine Assoziation zwischen der Frequenz der Interdentalraumpflege und dem Alter, Geschlecht, Einkommen und dem höchsten Berufsabschluss (Crocombe et al., 2012).

### 1.6.3 Hilfsmittel zur Interdentalraumpflege

Der Patient hat eine große Auswahl an verschiedenen Hilfsmitteln, mit denen er seinen Interdentalraum reinigen kann. Die Abbildung 5 zeigt die exemplarische Interdentalraumreinigung anhand der Interdentalbürste sowie der Zahnseide. Die Zahnseide ist das am weitesten verbreitete dentale Hilfsmittel zur Interdentalraumreinigung (Salzer et al., 2015). Ihre Reinigungseffektivität ist hierbei aber geringer einzustufen als bei Interdentalbürsten. Dies ist vor allem durch die individuellen Morphologien der Zwischenräume bedingt, beispielsweise eines konkaven Interdentalraumes (siehe bitte ebenfalls Abbildung 5).

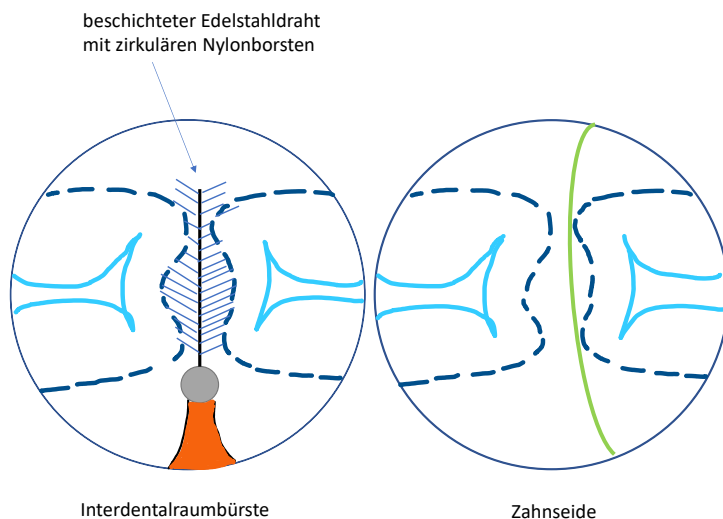


Abbildung 5: schematische Darstellung der exemplarischen Interdentalraumreinigung: Links anhand der Interdentalraumbürste, rechts anhand der Zahnseide

Die Zahnseide kann gewachst, ungewachst oder imprägniert/nicht imprägniert genutzt werden, aber laut der Leitlinie der DGZMK findet sich keine Evidenz bezüglich der Unterschiede der Reinigungsleistung bei den verschiedenen Arten. Einzig das Gleitverhalten ist unterschiedlich und wirkt sich auf den Druck aus, mit der die Zahnseide durch den Approximalkontakt geführt wird. Bei einem geringeren Druck könnte sich somit die Papillentraumatisierung verringern (Graetz et al., 2018), weshalb von der DGZMK klargestellt wird, dass die Basis der Interdentalraumpflege durch die korrekte Auswahl durch das Fachpersonal erfolgen sollte. Neben diesen beiden häufigen Hilfsmittel, sind schon seit vielen Jahren sogenannte Zahnhölzer beschrieben, welche im Querschnitt dreieckig aufgebaut sind und aus Holz bestehen. Das Ausmaß der approximalen Biofilmentfernung ist geringer einzuschätzen als bei den Interdentalraumbürsten (Salzer et al., 2015). Sie haben aber einen positiven Effekt bei interdentalen Entzündungszeichen, da sie durch ein leichtes Verdrängen der Interdentalpapille mit der breiten Unterseite leicht subgingival zu reinigen vermögen. Ihre Anwendung ist aber aufgrund der Bauart nahezu nur im Frontzahnbereich und von vestibulär möglich.

Laut Studienlage reduzieren die Interdentalraumbürsten am effektivsten orale Biofilme und Gingivitis im Interdentalraum (Salzer et al., 2015). Hierbei sind zylindrische Formen den konischen Interdentalraumbürsten überlegen (Larsen et al., 2017), da diese insbesondere bei den häufig vorkommenden Einziehungen der Wurzeloberfläche unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze (Dörfer, 2000) in beiden Bewegungsrichtungen (nach oral und nach vestibulär) reinigend wirken und nicht verklemmen.

Auf den genauen Aufbau der Interdentalraumbürsten sowie der Interdentalraumpicks wird in Abschnitt 3.2.3 eingegangen und ist hier nur kurz dargestellt.

Interdentalraumbürsten bestehen zumeist aus Nylonborsten, die um einen Metallkern angebracht sind. Der Metallkern birgt jedoch das Risiko der Verletzung von Hart-/Weichgeweben und wird oftmals auch vom Anwender bei Kontakt mit der Zahnoberfläche als unangenehm empfunden (Abouassi et al., 2014).

Die relativ neu entwickelten metallfreien Interdentalraumpicks („wireless“ Interdentalraumbürste) für sehr schmale Interdentalräume sollen nach Vorstellung der Entwickler eine vergleichbar gute Reinigung der Zahnoberfläche ohne Traumatisierung der Gingiva bei verbesserter Akzeptanz im Vergleich zu den herkömmlichen Interdentalraumbürsten erreichen.

## 2. Ziele und Fragestellung

### 2.1 Ziel der In-vitro-Studie

Ziel der dieser Dissertation zugrunde liegenden In-vitro-Studie ist es, neu entwickelte häusliche Hilfsmittel (Testprodukt 1 und 2) zur Interdentalraumreinigung auf ihre Reinigungseffektivität und dem damit verbundenen Kraftaufwand während der Anwendung in verschiedenen großen sowie in der Morphologie unterschiedlichen Interdentalräumen zu untersuchen und diese mit vorhandenen dentalen Hilfsmitteln zu vergleichen.

### 2.2 Primäre Hypothese

Als primäre Hypothese wird angenommen, dass in einem direkten Vergleich die Testprodukte mit erhöhter Anzahl von elastomeren Noppen bzw. mit zusätzlichen Nylonborsten den größenadaptierten Interdentalraumbürsten in der Reinigungsleistung überlegen sind.

Weiterhin wird hypothetisiert, dass die Anwendung der Testprodukte gegenüber den konventionellen Interdentalraumbürsten mit Nylonborsten mit einem geringeren Kraftaufwand verbunden ist.

### 2.3 Sekundäre Faktoren (weitere Fragestellungen)

Die beiden Hypothesen basieren auf den Annahmen, dass die Morphologie des Interdentalraumes, die Größe des Interdentalraumes sowie die Adaptation der konischen Testprodukte entscheidend für die Wirkung der Hilfsmittel (Reinigungsleistung und Kraftaufwand) sind. Deshalb soll überprüft werden, wie sich die beiden Prüfparameter für die Hilfsmittel jeweils verändern, wenn die Hilfsmittel individuell an den Interdentalraum angepasst oder nicht angepasst angewendet werden.

## 3. Methoden und Material

### 3.1 Methodik

#### 3.1.1 Verfahren

Im Rahmen eines vorhergehenden Promotionsvorhaben (J. Rabe) im Funktionsbereichs Parodontologie wurde ein experimentelles Verfahren entwickelt, um standardisiert, kontrolliert sowie reproduzierbar häusliche Hilfsmittel zur Interdentalraumpflege zu untersuchen. Hierbei war die Entwicklung und Validierung dieses Verfahrens zur Herstellung von gleichschenkligen, konvexen und konkaven Interdentalräumen in verschiedenen Größen und Breiten Inhalt einer vorherigen Forschungsarbeit (Graetz et al., 2020). Die von Frau Rabe mitentwickelte und ausführlich beschriebene Methode zur Messung der Reinigungseffektivität und des Kraftaufwandes bei Anwendung von häuslichen Hilfsmitteln in Replikat humaner Interdentalräume fand signifikante Unterschiede bei Anwendung verschiedener Interdentalraumpicks. Sie definierte für die Kraftmessung (s.u.) eine Einführungskraft sowie eine Kraft während der Vor- und Zurückbewegung im Interdentalraum. Was es gilt hervorzuheben war die erstmalig beschriebene Anwendung von 3D-gedruckten humanen Interdentalräumen (paarweise) in einer dafür selbstentwickelten Vorrichtung (s. bitte Abbildung 12), welche mit einer Kraftmesszelle gekoppelt war, um die Kraftwerte während der Bewegung simultan zu messen/speichern. Die interdentalen Hilfsmittel wurden ebenfalls in separat angefertigte Halter eingespannt und mechanisch in einer horizontalen Bewegung unter kontrollierter Geschwindigkeit 10x in den Interdentalraum gefahren. Die „Vorher/Nachher“-Situation der Reinigungsleistung (Entfernung des simulierten Biofilmes) wurde im Anschluss fotografisch festgehalten und digital ausgewertet. Die von Frau Rabe beschriebene Methode wurde mit einigen Modifikationen für die vorliegende Untersuchung übernommen:

In der vorgestellten Arbeit wurde die mittlere Größe (medium) zwei neu entwickelter metallfreier Interdentalraumpicks (Testprodukt 1/ Testprodukt 2: ISO 2) sowie eines bereits vermarkten Produktes (Softpicks Advanced ISO 2, Sunstar Deutschland GmbH, Schönau, Deutschland) in vier morphologisch unterschiedlichen Interdentalräumen (gleichschenklige, konvex, konkav in zwei verschiedenen Höhen (3,0 mm und 5,0 mm Höhe)) verschiedener Größen (1,0 mm; 1,1 mm; 1,3 mm) getestet und mit der Reinigungseffektivität sowie der aufgetragenen Kraft von konventionellen Interdentalraumbürsten (Größe ISO 1,2,3,4) verglichen.

#### 3.1.2 Kraftmessung

Für die Kraftmessung wurde eine digitale Messzelle für die minimalen sowie maximalen Druck- und Zugwerte genutzt (KD34s, ME-Messsysteme GmbH Henningsdorf, Deutschland). Die Messzelle ist strombetrieben über einen USB-Anschluss. Der Messbereich liegt nach Herstellerangabe bei +/- 500 mN mit einer Präzision von 0,1 %. Für die Versuchsreihe wurde ein Maximalwert von 5 N bestimmt, da darüber hinaus eine Traumatisierungsgefahr der Gingiva als sehr hoch einzuschätzen ist.



Die Aufzeichnung der Messdaten erfolgte via Excel (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA), die automatische Speicherung der Daten erfolgte zeitgleich. Nach jedem Versuch konnte die Vollständigkeit der Versuche (10 Durchläufe) sowie der Grenzwert von 5 N ausgeschlossen werden, was anhand der Abbildung 6 exemplarisch dargestellt wurde. Hier zeigt sich die Darstellung eines einzelnen Versuches als Liniendiagramm, um die Anzahl der Durchläufe zu kontrollieren und somit die Höchstwerte erkennen zu können.

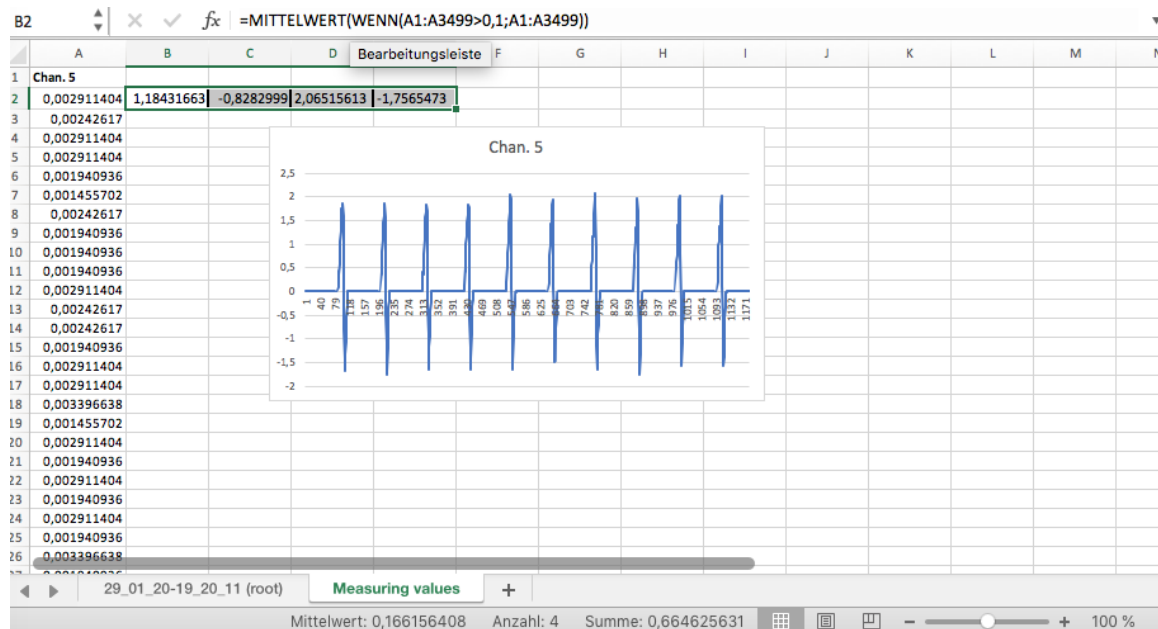


Abbildung 6: Beispielbild: Aufzeichnung der Kraftdaten via Excel und Darstellung als Diagramm. Hier zeigt sich die Darstellung eines einzelnen Versuches als Liniendiagramm, um die Anzahl der Durchläufe zu kontrollieren und somit die Höchstwerte erkennen zu können. Auf der X-Achse werden die Kraftwerte in N dargestellt, auf der Y-Achse die Anzahl der durchgeführten Versuche.

## 3.2 Material

### 3.2.1 Simulation des oralen Biofilms

Um den Biofilm, bzw. die Plaque zu imitieren, wurden die Interdentalraumblöcke mittels Okklusions-Spray-Verfahren benetzt (Hager&Werke, Duisburg, Germany). Die Interdentalraumblöcke wurden in einem standardisierten Verfahren sowie in einer vorgegebenen Zeit für drei Sekunden besprüht, ein Beispielbild der aufgesprühten „Plaque“ als Biofilmsimulation zeigt Abbildung 7 (Oberfläche der Interdentalraumreplikas). Die Schichtdicke des simulierten Biofilms wurde regelmäßig alle 100 Versuche mittels Elektronenmikroskops kontrolliert, ein tabellarisches Beispiel zeigt die Tabelle 1. Die geringste Pulverschicht lag bei 12,11  $\mu\text{m}$ , die dickste Schicht bei 26,9  $\mu\text{m}$ . Insgesamt wurde der Mittelwert von 18,9  $\mu\text{m}$  festgelegt.

Gleichschenkelig	Probennummer	Pulverschicht in $\mu\text{m}$
1x3,0	1	17,6
1,1x3,0	2	16,1
1,3x3,0	3	
<b>Konvex</b>		
1x3,0	4	25,5
1,1x3,0	5	14,7
1,3x3,0	6	26,9
<b>Konkav</b>		
1x3,0	7	17
1,1x3,0	8	17,4
1,3x3,0	9	12,11
<b>Konkav</b>		
1x5,0	10	24,7
1,1x5,0	11	18,4
1,3x5,0	12	17,9
<b>Mittelwert Pulverschicht</b>		<b>18,9</b>

Tabelle 1: tabellarisches Beispiel einer Excel-Tabelle zur Kontrolle der Pulverbreite via Elektronenmikroskop. Auf der linken Seite sind die verschiedenen Morphologien untereinander dargestellt, mittig die Probennummern von 1-12 und rechts die Pulverschicht in  $\mu\text{m}$ .



Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung einer Oberfläche der verwendeten Interdentalraumreplikas. Links die Oberfläche vor der Reinigung des Interdentalraumes, rechts die photographische Dokumentation nach der Reinigung.

### 3.2.2 Künstliche Zahnzwischenräume (3D-Druck)

Mittels einer digitalen Software (Autodesk Fusion, Autodesk Direct Limited, Hampshire, Großbritannien) sowie In-vivo-Daten von humanen Eckzähnen wurden die Replikas der humanen Interdentalräume (Abbildung 8) durch ein 3D-Druckverfahren hergestellt (Abbildung 9), wie von Graetz et al. (2020) beschrieben.

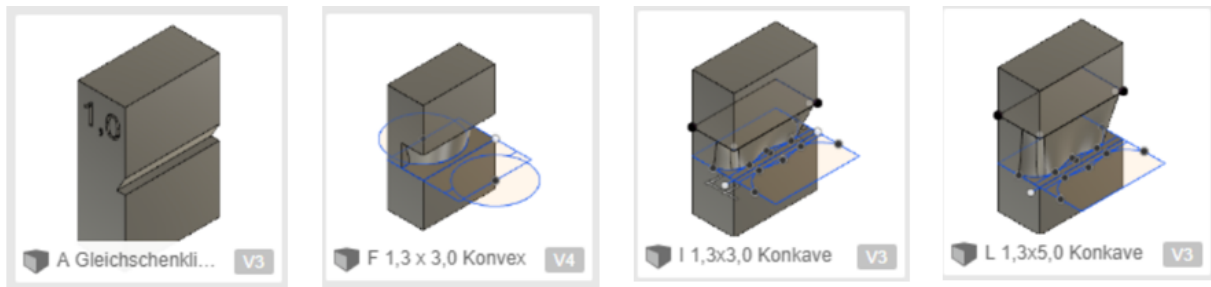


Abbildung 8: graphische Darstellung der Konstruktion der verschiedenen Interdentalraummorphologien von links nach rechts: Interdentalraum A: gleichschenkl., 1,0mm Durchmesser; Interdentalraum F: konvex, 1,3mm Durchmesser x 3,0 mm Höhe; Interdentalraum I: konkav, 1,3 mm Durchmesser x 3,0 mm; Interdentalraum L: konkav, 1,3mm Durchmesser x 5mm Höhe (mittels Autodesk Fusion erstellt)

Anhand der digital berechneten Konstruktion wurden die Interdentalraumreplikas gedruckt.

Die 3D-Kompositreplikate hatten eine Oberflächenrauigkeit von 25 µm (Form 2 und Weißes Resin V04, Formlabs GmbH, Berlin, Deutschland) (siehe auch Abbildung 9).

Das Weiße Resin ist ein Photopolymer-Harz, welches für den 3D-Druck der Replikas verwendet wurde.

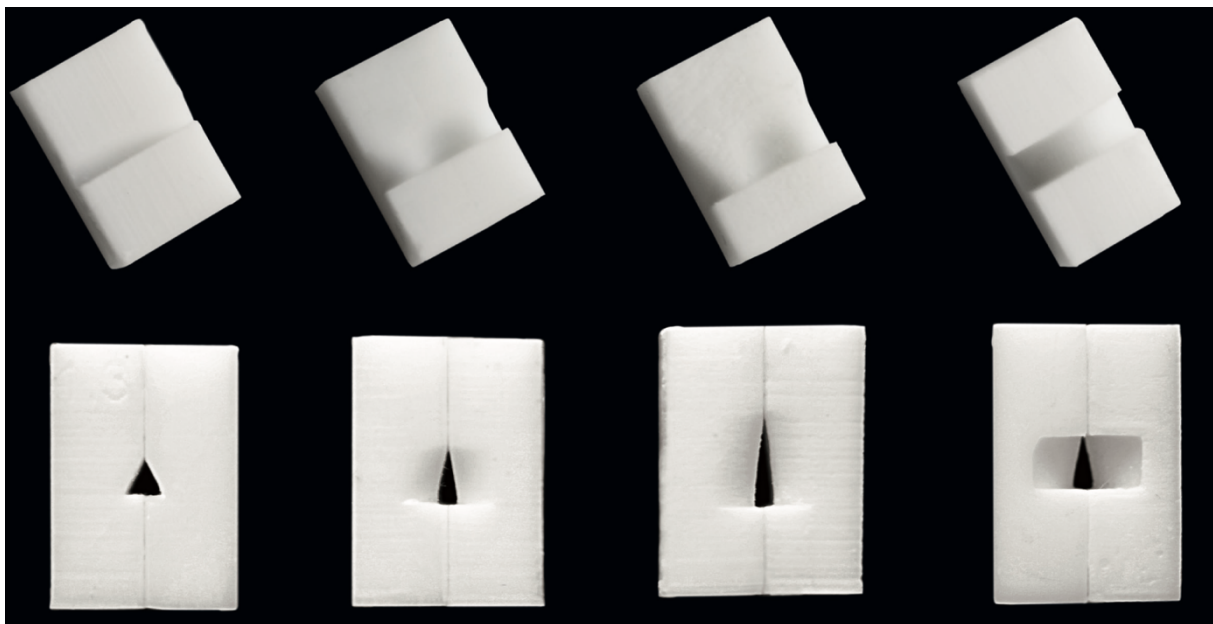


Abbildung 9: Darstellung der vier unterschiedlichen Morphologien der 3D-gedruckten Zwischenräume von links nach rechts: gleichschenkl., konkav 3,0mm Höhe; konkav 5,0mm Höhe und konvex, hier alle in der Morphologiegröße 1,3mm

Durch die humanen Echtzähne wurden verschiedene Morphologien und Größen der Zahnzwischenräume festgelegt, um die Daten so detailgetreu wie möglich zu gestalten. Insgesamt wurden 12 verschiedene Ausführungen entwickelt, die in der folgenden Tabelle 1 dargestellt sind.

Gleichschenklig	Konkav 3,0mm	Konkav 5,0mm	Konvex
1,0 mm	1,0 mm	1,0 mm	1,0 mm
1,1 mm	1,1 mm	1,1 mm	1,1 mm
1,3 mm	1,3 mm	1,3 mm	1,3 mm

Tabelle 2: Darstellung der einzelnen Zwischenräume, die getestet wurden: gleichschenklig, konkav und konvex in den jeweiligen Größen 1,0 mm; 1,1mm; 1,3mm.

Durch die Beschaffenheit des Resins und der Konstruktion der Versuchsvorrichtung konnte keine individuelle Zahnbeweglichkeit der Zähne (beim gesunden Patienten besteht eine Auslenkung von 0,05 bis 0,1 mm bei einer Kraft bis zu 10 N (Eickholz, 2007)) simuliert werden, da es nicht möglich war die Zwischenräume flexibel aufzuhängen, ohne dass es zu einem Einfluss auf die Kraftmessung kam.

### 3.2.3 Interdentale Hilfsmittel

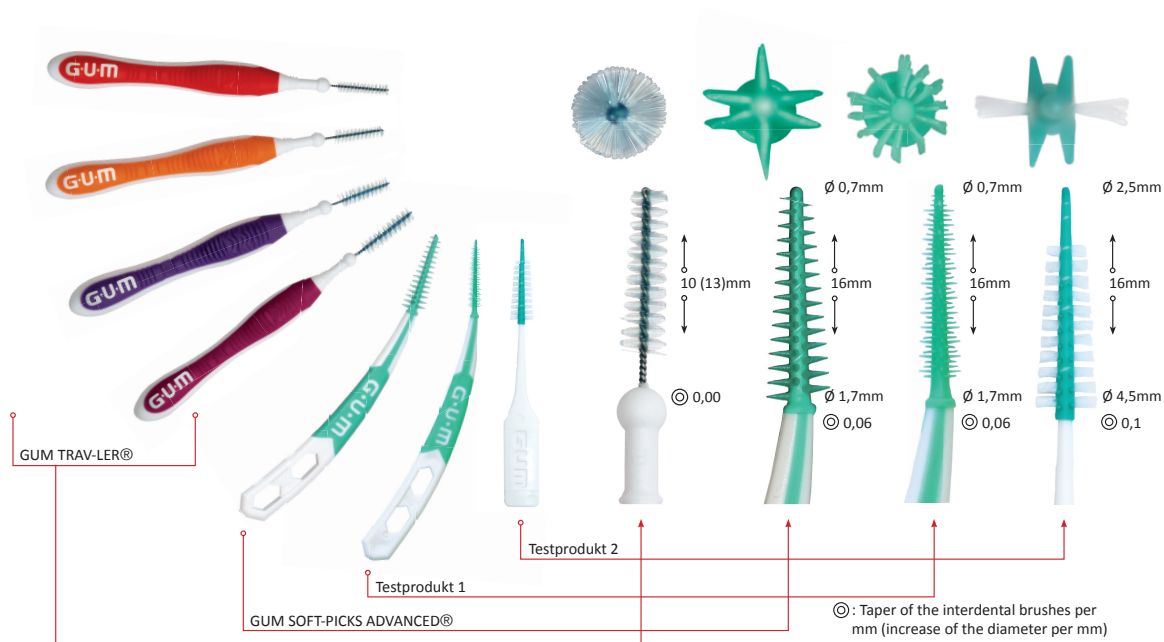


Abbildung 10: Darstellung der getesteten interdentalen Hilfsmittel von links nach rechts: GUM Trav-ler Interdentalbürsten in den Größen 0,8mm; 0,9mm; 1,2mm; 1,4mm; die GUM Soft Picks Advanced in der Größe „medium“, das Testprodukt 1 in der Größe „medium“ und das Testprodukt 2 in der Größe „medium“. Weiterhin ist der jeweilige Durchmesser/Querschnitt sowie der „Arbeitsbereich“ im Detail im rechten Bereich der Abbildung dargestellt.

Ein fotografischer Überblick über die untersuchten häuslichen Hilfsmittel zur Interdentalraumreinigung ist in Abbildung 10 gegeben. Grundsätzlich wurden die Interdentalbürsten (GUM Trav-ler) der Firma Sunstar (Sunstar Deutschland GmbH, Schönau, Deutschland, Sunstar Suisse SA, Etoy, Schweiz) in den Größen 0,8 mm, 0,9 mm, 1,2 mm und 1,4 mm getestet; die metallfreien Interdentalpicks (Testprodukt 1, Testprodukt 2 und Soft Picks Advanced) alle in der Größe „medium“. Anhand der verschiedenen Morphologien und Größen der Interdentalräume wurde zur Planung der Versuche eine Kalkulation erstellt, in denen die neu entwickelten Testprodukte 1 und 2 als

Testprodukte fungierten, die Soft Picks Advanced sowie die GUM Travel-ler als Kontrollgruppe. Jedes Produkt wurde je Interdentalraum in 25 Einzelversuchen mit 10 Zyklen getestet.

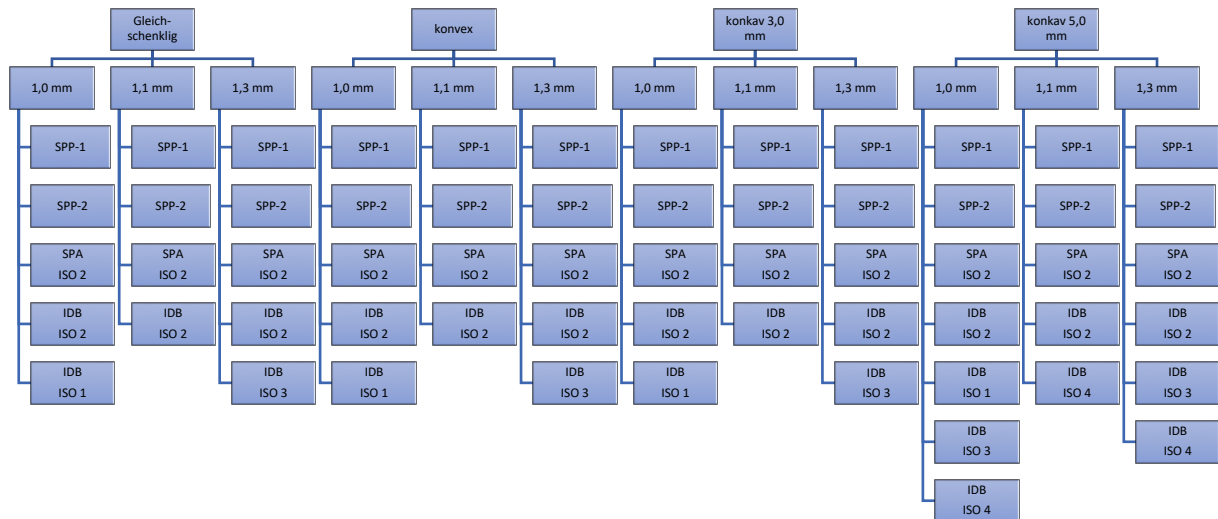


Abbildung 11: schematische Darstellung der Kalkulation der verschiedenen Hilfsmittel bezogen auf die unterschiedlichen Interdentalraummorphologien. (SPP-1 = Testprodukt 1; SPP-2 = Testprodukt 2; IDB = Interdentalraumbürsten; SPA = Soft Picks Advanced, ISO 1 = 0,8 mm Durchmesser, ISO 2 = 0,9 mm Durchmesser, ISO 3 = 1,2 mm Durchmesser, ISO 4 = 1,4 mm Durchmesser)

### 3.2.3.1 GUM Soft Pick Advanced

Die GUM Soft Pick Advanced (SPA) (Sunstar Deutschland GmbH, Schönau, Deutschland) sind metallfreie Interdentalraumpicks in drei verschiedenen Größen (small, medium, large), deren Kern aus einem thermoplastischen Elastomer besteht. Statt den bei Interdentalraumbürsten üblicherweise angebrachten Nylonborsten, handelt es sich hierbei um Ausstülpungen des thermoplastischen Elastomers in Form von Noppen zur Reinigung der Zahnoberflächen im Interdentalraum. Die genaue Anordnung dieser Noppen ist bitte der Abbildung 10 zu entnehmen. Die Anordnung ist in Reihen gegliedert, von denen sich 8 Stück an jedem Interdentalpick befinden. Insgesamt befinden sich 167 Noppen an der Basis des thermoplastischen Elastomers, 80 Stück rund und 87 Stück schraubenförmig. Vom Aufbau her teilt sich der Soft Pick Advanced in einen Griff und den eigentlichen „Arbeitsbereich“. In der vorliegenden Studie wurde nur die Größe medium (ISO 2) des Soft Pick Advanced untersucht, welche 16 mm lang sind und konisch aufgebaut mit einem Taper von 0,06 (Durchmesserzunahme pro mm). Dieser Taper bezieht sich auf die reine Basis des thermoplastischen Elastomers und bezieht die Noppen nicht mit ein, inklusive Noppen zeigt sich ein Taper von 0,1. Dieser Taper findet sich auch beim Testprodukt 2.

### *3.2.3.2 Testprodukt 1*

Bei dem Testprodukt 1 handelt es sich um neu entwickelte metallfreie Interdentalraumpicks, die an den Aufbau des Soft Pick Advanced anschließen. Auch hier teilt sich, wie in Abbildung 10 gezeigt, der Aufbau des Hilfsmittels in einen Griff, der die Gestaltung zeigt wie beim Soft Pick Advanced und in einen „Arbeitsbereich“. Beim Testprodukt 1 bildet das thermoplastische Elastomer von der Form her keine Noppen wie bei den Soft Pick Advanced, sondern eher feine Pilis, also sehr feine Ausstülpungen, die zirkulär um die Mantelbasis angebracht sind. Länge und Taper des untersuchten Testprodukt 1 in Größe „medium“ sind in der Basis des thermoplastischen Elastomers dem des Soft Pick Advanced ähnlich, inklusive der Pilis zeigt sich weiterhin ein Taper von 0,1.

### *3.2.3.3 Testprodukt 2*

Das Testprodukt 2 (Sunstar Deutschland GmbH, Schönau, Deutschland) in der Größe „medium“ wurde ebenfalls für die der Dissertation zugrunde liegenden In-vitro-Studie neu entwickelt. Hierbei handelt es sich ebenfalls um einen metallfreien Interdentalraumpick, welcher aber nun eine Kombination aus Interdentalraumbürste und Interdentalraumpick darstellt. Das Testprodukt 2 ist zwar ebenfalls aus einem thermoplastischen Elastomer mit Ausstülpungen in Form von Noppen aufgebaut, aber es sind zusätzliche sich gegenüberliegende Nylonborsten angebracht, die sich in ihrem Durchmesser konisch erhöhen (Abbildung 10). Sie sind in Länge und Taper in der Basis des thermoplastischen Elastomers wiederum wie Testprodukt 1 ähnlich den getesteten Soft Pick Advanced. Zusätzlich zeigen die gegenüberliegenden Nylonborsten einen größeren Durchmesser, welcher von der Spitze zum Ende des Arbeitsschaftes hin konisch zunimmt, dies jedoch ebenfalls mit einem Taper von 0,1.

### *3.2.3.4 GUM Trav-ler Interdentalbürsten*

Bei den GUM Trav-ler (Sunstar Deutschland GmbH, Schönau, Deutschland) handelt es sich um konventionelle Interdentalraumbürsten, bei denen Nylonborsten um einen mit Kunststoff beschichteten Metallkern (Edelstahldraht) angebracht sind. Diese Nylonborsten sind dreieckig aufgebaut. Vom Aufbau sind sie ähnlich wie die Soft Pick Advanced und die Testprodukte (1+2) mit einem Griff sowie einem „Arbeitsbereich“ gestaltet (Abbildung 10). Der Durchmesser variiert je nach verwendeter Größe, der Taper liegt bauartbedingt (zylindrisch) bei 0 und unterscheidet sich somit von allen anderen untersuchten Testprodukten sowie dem Soft Pick Advanced (konisch). In der vorliegenden Studie wurden vier Größen 0,8 mm; 0,9 mm; 1,2 mm und 1,4 mm untersucht.

## *3.3 Versuchsaufbau zur Messung der Reinigungseffizienz*

Der Versuchsaufbau wurde mit Hilfe des Institutes für Mechatronik der Fachhochschule Kiel (Leitung Prof. Dr. T. Rinder) im Rahmen des vorhergehenden Promotionsvorhabens entwickelt und getestet (Graetz et al., 2020). Hierbei wurden die Einzelteile des Versuchsaufbaus mittels Legoplatten



verbunden, sodass reproduzierbare Änderungen/ Adaptionen in der Konstruktion an neue Fragestellungen möglich sind. Die Abbildung 12 zeigt einen Überblick über den experimentellen Versuchsaufbau.

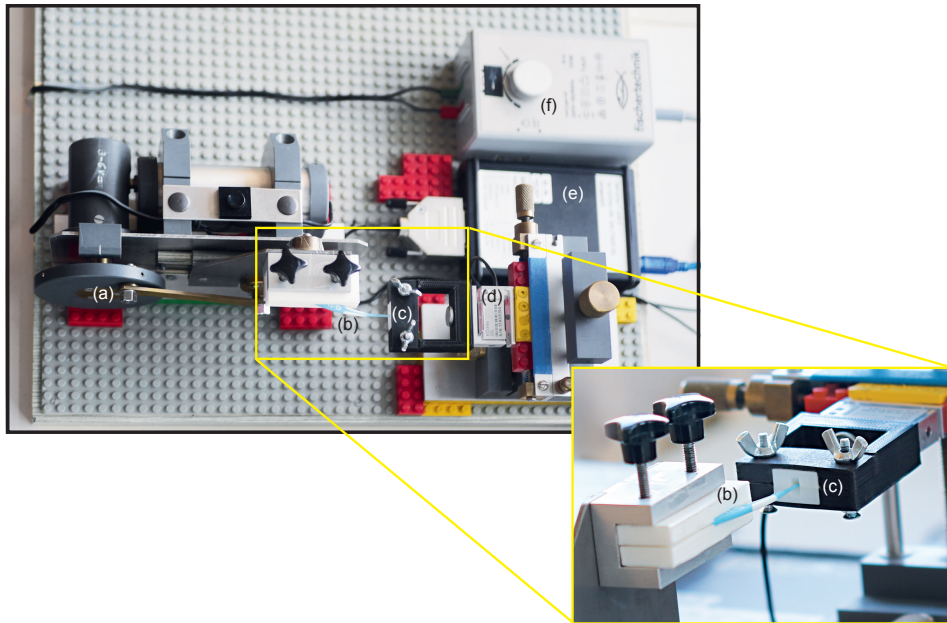


Abbildung 12: detaillierter Überblick über den experimentellen Versuchsaufbau, bei dem die Rotation in eine lineare Bewegung umgewandelt werden kann (a) und somit die häuslichen Hilfsmittel zur Interdentalraumreinigung in die hergestellten 3D-Interdentalraummorphologien (c) bewegte. Die digitale Messzelle (d) maß gleichzeitig die aufgewandte Kraft und speicherte diese tabellarisch via Excel-tabelle Für die Bewegung des interdentalen Hilfsmittels gibt es die Kontrolleinheit (f) sowie eine Ladezelle mit elektrischem Umwandler (e). Das dargestellte Hilfsmittel (b) ist hierbei ein Soft Pick Advanced (SPA).

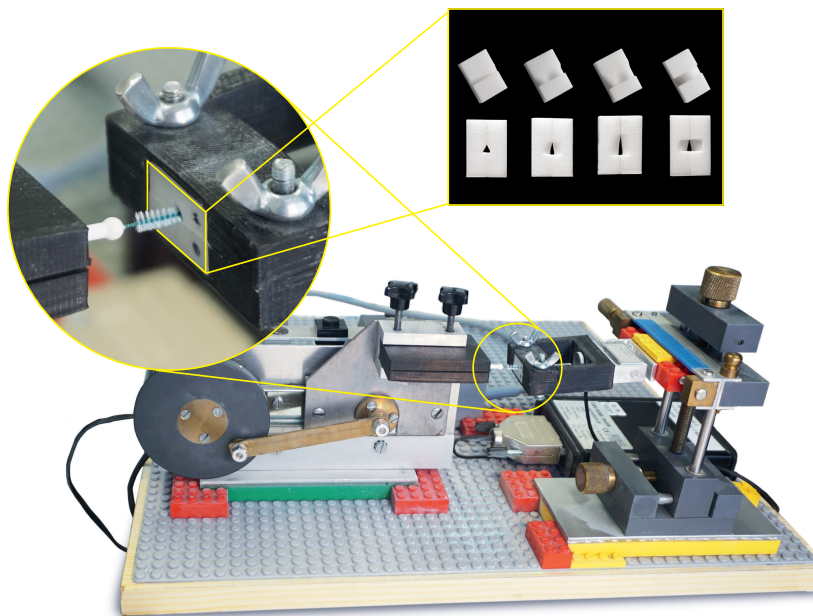


Abbildung 13: Überblick über den experimentellen Versuchsaufbau in Bezug zum künstlichen Interdentalraum aus einem anderen Winkel. Besonderes Augenmerk liegt hier auf den Sitz der Interdentalraummorphologien im Versuchsaufbau. Bei dem dargestellten Hilfsmittel handelt es sich um einen Gum Trav-ler.

### 3.3.1 Testläufe und Protokoll

Im Vorfeld der Untersuchungen wurde aufgrund der Ergebnisse der Studie zur Reinigungseffektivität von Soft Pick Advanced von Graetz et al. (2020) festgelegt, welche der zu testenden häuslichen Hilfsmittel in den verschiedenen Interdentalräumen angewendet werden sollen (Abbildung 11). Grundsätzlich sollte jeder Interdentalraum mit jeweils dem Testprodukt 1 und Testprodukt 2 sowie dem Soft Pick Advanced (medium = ca. 0,9 mm/ISO 2) und der Interdentalraumbürste in 0,9 mm, ISO 2 als Kontrollgruppen getestet werden. Weiterhin wurden die Kontrollgruppen II, IV, V (Interdentalraumbürsten in den Größen 0,8; 1,2 und 1,4 mm) in einigen Interdentalräumen angewendet, um deren Passgenauigkeit im Versuchsaufbau zu ermitteln. Basis dieser Versuchsplanung war die Limitierung der Zug-/Druckkraft auf 5 N zur Vermeidung von Verbiegungen/Frakturen aller zu testenden Produkten oder der Versuchsausrüstung (Graetz et al. 2020). Im Endeffekt ergab die Planung eine Kalkulation von 60 verschiedenen Kombinationen, die es zu untersuchen galt.

## 3.4 Bearbeitung, Analyse und Auswertung der Testblöcke sowie interdentalen Hilfsmitteln

### 3.4.1 Vor der Interdentalraumpflege

Die gedruckten Interdentalraumreplikate wurden auf Abweichungen (z.B. Fließnasen) visuell überprüft und bei Bedarf mittels Schleifpapiers (Rauigkeit bei einer Körnung von ca. 600) entfernt. Anschließend wurde mittels Sprühverfahren (Occlu Spray Plus, Hager&Werken, Duisburg, Deutschland) der simulierte Biofilm für drei Sekunden aufgetragen.

Die vorbereiteten paarweise passenden Interdentalräume wurden für die „Vorher“-Bilder in eine für die Versuche hergestellte Vorrichtung eingesetzt (siehe bitte Abbildung 14), um eine Reproduzierbarkeit der Ausrichtung zu gewährleisten.



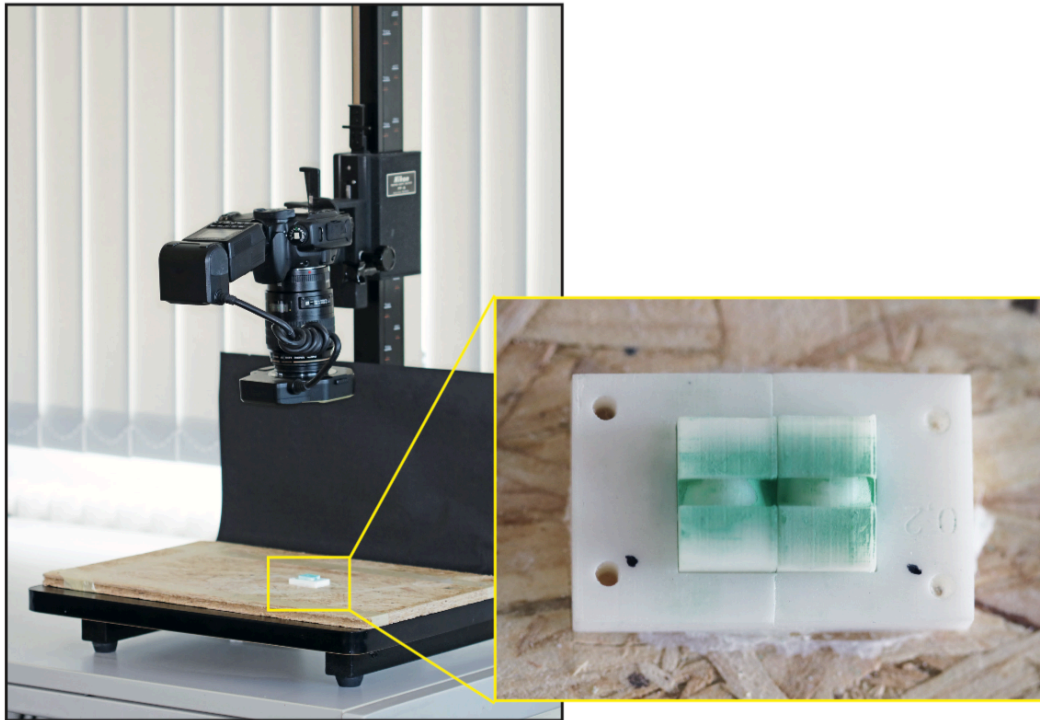


Abbildung 14: Versuchsaufbau zur fotografischen Dokumentation der „Vorher-Bilder“ sowie der „Nachher-Bilder: Es wird ein konvexer Interdentalraum im Detail gezeigt nach der Interdentalraumpflege, d.h. nach dem experimentellen Versuchsdurchlauf. Hierfür wird der artifizielle Interdentalraum (IDR) für das Foto wie ein Buch aufgeklappt. Der IDR ist um 180° gedreht dargestellt, die schwarzen Markierungspunkte auf der Unterlage sind das Äquivalent zum Kontaktpunkt des IDR. Diese wurden für eine eindeutige Positionierung angebracht. Die äußeren Bereiche zeigen in der aufgeklappten Darstellung die Einführungsseite der dentalen Hilfsmittel. Das „Vorher-Foto“ erfolgte fotografisch (Canon EOS 400 Digital, Uxbridge, Großbritannien) mit direkter Sichtkontrolle des Untersuchers.

Wurde der betreffende Interdentalraum vorbereitet und fotografisch dokumentiert, konnte er, wie in Abbildung 14 dargestellt, mit dem Kontaktpunkt nach rechts zeigend eingespannt werden. Anschließend erfolgten die Vorbereitung sowie Positionierung der Testprodukte mit Hilfe einer Markierungshilfe (Abbildung 15), die ebenfalls über die digitale Software hergestellt wurde (siehe bitte auch 3.2.2). Dadurch wurde eine reproduzierbare Einführungs-länge in die Interdentalraumreplikate von 10 mm für jedes Testprodukt ermöglicht.

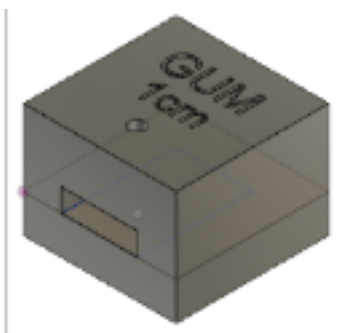


Abbildung 15: Markierungshilfe für die interdentalen Hilfsmittel

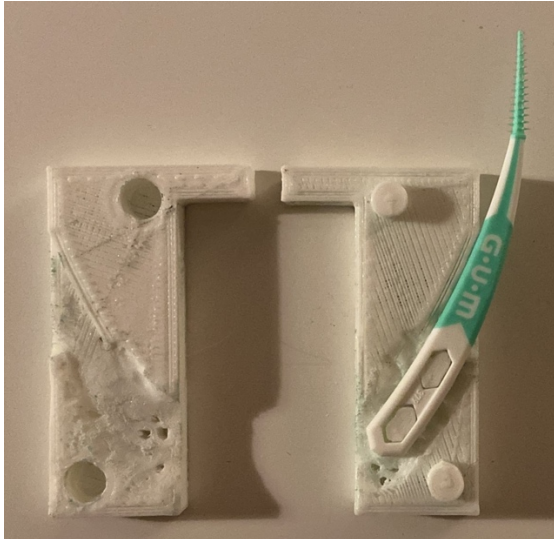


Abbildung 16: Beispiel einer Positionierungshilfe, dargestellt ist der Soft Pick Advanced medium.

Während der Simulation der Interdentalraumreinigung wurde mittels eines Elektromotors (Geobra Brandstätter Stiftung & Co. KG, Zirndorf, Deutschland) bei 6 Volt Spannung ein 10-maliger Zyklus gestartet. Die Rotation des Motors wurde mittels eines Gestänges in eine lineare umgewandelt. Aufgrund der Gestängelänge und der Größe des Triebrades ergeben sich eine lineare Geschwindigkeit von 0,0009 m/s. Hierbei simuliert diese lineare Bewegung die Anwendung der Testprodukte von vestibulär in einem Interdentalraum. Simultan wurden in Echtzeit die Kraftwerte digital gemessen und über Excel tabellarisch festgehalten (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA).

#### 3.4.2 Nach der Interdentalraumpflege

Nach Beenden der 10 Durchläufe stoppte der Motor und die interdentalen Hilfsmittel sowie das Interdentalraummodell wurden zur fotografischen Dokumentation der „Nachher-Situation“, wie in Abbildung 14 dargestellt, entnommen. Diese Fotodokumentation wurde nach einer Sichtkontrolle gespeichert und diente im Anschluss dazu die Reinigungseffektivität digital evaluieren zu können.

#### 3.4.3 Bearbeitung und Analyse der Fotodokumentation

Während der Versuche der vorhergehenden Studie (Graetz et al., 2020) ergab sich das Problem der reproduzierbaren Fotodokumentation. Gründe dafür waren beispielsweise unterschiedliche Lichtverhältnisse sowie die Morphologie des Interdentalraumes, sodass eine Weiterentwicklung des Versuchsaufbaus in der vorliegenden Untersuchung notwendig wurde.

Für die vorliegende Studie wurde deshalb ein schwarzer Hintergrund (s. Abbildung 14) genutzt und die verschiedenen Morphologien individuell mit Lichtquellen ausgeleuchtet und die wichtigen Bereiche des Interdentalraumes darzustellen.

Jedes Bild wurde digital auf den Bereich des Interdentalraumes zugeschnitten (XN View, Inh. Gougelet Pierre-Emmanuel, Frankreich), wie in der folgenden Abbildung 17 zu sehen ist.

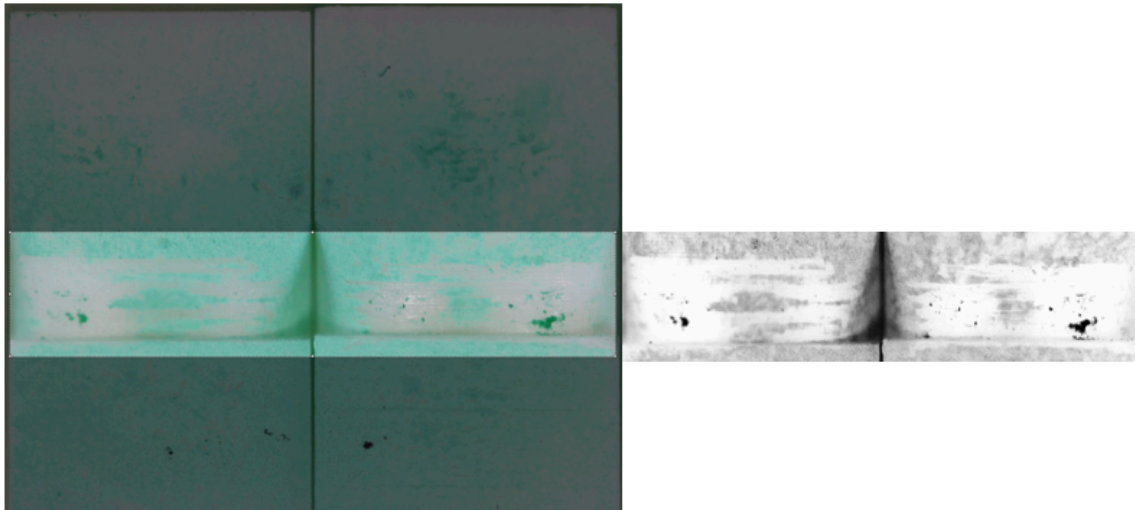


Abbildung 17: Bearbeitung der digitalen Dokumentation: Es ist der Ablauf des Zuschnittes der digitalen Dokumentation gezeigt. Auf der linken Seite ist der zu berechnende Bereich des IDR hell hervorgehoben und wird aus dem Originalbild herausgeschnitten. Der Zuschnitt wird digital bearbeitet (Adobe Photoshop) und wird auf der rechten Seite dargestellt. Beim dem Beispielbild handelt es sich um einen konkaven Interdentalraum 1,3 mm Durchmesser x 3,0 mm Höhe nach der interdentalen Reinigung mit dem Testprodukt 1.

Nach dem Zuschnitt wurden die Bilder digital (Adobe Photoshop, Dublin, Irland) bearbeitet, um Pixel digital voneinander subtrahieren zu können (Image J, NIH, Bethesda, USA). Hierbei wurden alle Bilder einheitlich verändert (Bildgröße, Kanalmixer, Gradationskurven, Helligkeit/Kontrast, Konvertieren in Graustufen). Ein Beispiel dafür sieht man ebenfalls in Abbildung 17.

Die anschließende digitale Berechnung (Image J, NIH, Bethesda, USA) erfolgte separat für jeden Interdentalraum (Beispiel in Abbildung 18).

Summary					
Slice	Count	Total Area	Average Size	%Area	Mean
IMG_9780Edit_10_4_n.tif	529	14.203	0.027	71.294	89.143
IMG_9782Edit_10_5_n.tif	154	16.882	0.110	84.740	110.295
IMG_9782Edit_10_5_n.tif	296	14.703	0.050	73.806	109.550
IMG_9784Edit_10_6_n.tif	269	16.049	0.060	80.559	63.038
IMG_9786Edit_10_7_n.tif	529	14.815	0.028	74.368	47.475
IMG_9788Edit_10_8_n.tif	615	15.791	0.026	79.692	115.724
IMG_9790Edit_10_9_n.tif	536	15.455	0.029	78.000	48.428
IMG_9792Edit_10_10_n.tif	394	16.161	0.041	81.563	86.922
IMG_9794Edit_10_11_n.tif	414	15.609	0.038	78.774	69.952
IMG_9796Edit_10_12_n.tif	273	16.641	0.061	83.985	71.522
IMG_9798Edit_10_13_n.tif	408	14.077	0.035	71.042	72.226
IMG_9800Edit_10_14_n.tif	325	17.269	0.053	86.315	76.907
IMG_9800Edit_10_14_n.tif	564	15.269	0.027	76.318	76.767
IMG_9802Edit_10_15_n.tif	286	15.096	0.053	75.455	69.233
IMG_9804Edit_10_16_n.tif	783	14.590	0.019	72.925	54.535
IMG_9806Edit_10_17_n.tif	450	16.245	0.036	81.193	86.629
IMG_9806Edit_10_17_n.tif	612	14.682	0.024	73.383	86.679
IMG_9808Edit_10_18_n.tif	412	14.662	0.036	73.661	72.015
IMG_9810Edit_10_19_n.tif	142	15.898	0.112	79.872	77.161
IMG_9812Edit_10_20_n.tif	326	14.382	0.044	71.945	63.374
IMG_9814Edit_10_21_n.tif	189	15.478	0.082	77.428	64.933
IMG_9816Edit_10_22_n.tif	1183	14.555	0.012	73.330	60.635
IMG_9818Edit_10_23_n.tif	563	15.204	0.027	76.596	65.403
IMG_9820Edit_10_24_n.tif	325	15.624	0.048	78.714	58.497
IMG_9822Edit_10_25_n.tif	258	16.426	0.064	82.103	42.561

Abbildung 18: Beispieldarstellung der digitalen Berechnung: Diese ist anhand der Versuchskombination des gleichschenkligen Interdentalraumes 1,1 mm Durchmesser und 3,0 mm Höhe nach der Reinigung mit dem Interdentalbürsten GUM Trav-Ler in 0,9 mm Durchmesser. Das linke Bild zeigt die Zusammenfassung der Berechnungsdaten des kompletten Versuches 1-25, die hierbei weiter zur Auswertung genutzten Daten war die „%Area“. Das rechte Bild zeigt die verschiedenen Stufen der digitalen Bildbearbeitung. Die obere Zeile zeigt den Interdentalraum nach der Interdentalpflege als „Roh-Bild“ (in Grün die verbliebene „Plaque“, die zweite Zeile ist die Basis zur Berechnung nach der Photoshopbearbeitung, die dritte Zeile visualisiert die gereinigten sowie berechneten Bereiche in Weiß und wird in der linken Tabelle als „%Area“ angegeben.

#### 3.4.4 Bearbeitung und Analyse der Kraftdokumentation

Zusätzlich zu der digitalen Bildbearbeitung erfolgte die Auswertung der Reduktion der simulierten Plaque auf den Flächen der Interdentalreplikate sowie die Zusammenfassung der erfassten Kraftdaten. Wie in Abbildung 6 dargestellt, wurden die Versuchsdurchläufe direkt nach der Ausführung mittels eines Diagrammes visualisiert. Für jeden Versuch wurden anhand einer Excel Tabelle (Microsoft Excel Corporation, Redmond, WA, USA) die Mittelwerte, die Minimalwerte (Zug-Wert) und die Maximalwerte (Druck-Wert) berechnet und für die weitere statistische Auswertung genutzt.

#### 3.5 Erfassung der kompletten Datenauswertung bezüglich Kraftwerten und Reinigungseffizienz

Um die einzelnen Berechnungen in Bezug zueinander setzen zu können und eine statistische Analyse durchführen zu können, wurden die kompletten Ergebnisse in einer Excel Tabelle zusammengefasst (Microsoft Excel Corporation, Redmond, WA, USA).

Hierbei wurde jeder Versuchsreihe ein Ordner (1-72), eine numerische Durchführung (1-25) sowie ein Status (Vorher(v)/Nachher-Foto (n)) zugeordnet.

Der digitale Input aus dem Programm Image J, also der digitalen Berechnung der Reinigungseffektivität, wurde mit der Bildnummer in die Tabelle aufgenommen (Bildnummer\_Ordernummer\_Durchführungsnummer\_Status). Weitere genutzte Daten waren die „Total Area“, die „%Area“ und der ermittelte Mittelwert mittels Pivot-Auswertung in der Excel-Tabelle. Es erfolgte ein „Check“ der Datensätze als „wahr/falsch“, bevor die Werte der Kraftdaten mit Bildnummer, Mittelwert ( $>0,1$  N sowie  $<0,1$  N) sowie Maximalwerte von Zug – und Kraft – Wert eingetragen wurden.

Diese komplette tabellarische Datenerfassung wurde zur statistischen Analyse mittels SPSS (SPSS Statistics 24, IBM, Chicago, IL, USA) weiter angepasst und auf die einzelnen Untergruppen der Zwischenräume sowie der untersuchten interdentalen Hilfsmittel erweitert.

#### 3.6 Statistische Analyse

Die statistische Analyse zur Bestimmung der Stichproben basierte auf den Ergebnissen einer zuvor veröffentlichten In-vitro-Studie mit Entwicklung des Versuchsaufbaus aus dem Promotionsvorhaben von J. Rabe (Graetz et al., 2020). Hierfür wurde auch ein Ethikvotum 411/18 eingeholt, da die 3D-Daten der interdentalen Morphologien der Zwischenräume anhand DVT-Daten anonymer Patientenzähne entwickelt und gedruckt wurden. Nach vorigen Testversuchen sowie -analysen wurde die Anzahl  $N = 25$  pro Versuch wiederum als statistisch ausreichend angesehen, um einen signifikanten Unterschied zwischen den Mittelwerten der Testgruppen von 5 % mit einer Aussagekraft von 80 % bei einem Alpha von 0,05 festzustellen.

Die statistische Analyse mittels der Software SPSS Statistics analysierte die Normalverteilung der Daten mittels Kolmogorov-Smirnov / Lilliefors-Test, wobei es für alle Daten keine Normalverteilung gab ( $p \leq 0,0001$ ).

Die Mittelwerte der experimentellen Reinigungseffektivität (ERE) und Reinigungskraft (ERK) wurden für jedes getestete Produkt sowie Typ und Größe des künstlichen Interdentalbereiches separat berechnet. Die Mittelwerte wurden mittels dem nicht-parametrischen Mann-Whitney-U-Test und des Kruskal-Wallis-Tests statistisch untersucht, um Unterschiede zwischen den verschiedenen Hilfsmitteln und Morphologien der Interdentalraumreplikas zu detektieren, wobei die Bonferroni-Methode bei multiplen Vergleichen angewandt wurde.

Eine lineare Regression bewertete die Assoziation zwischen den Prädiktoren (Art / Größe des Interdentalbereiches sowie Art / Größe des interdentalen Hilfsmittels) und der Reinigungseffektivität. Regressionskoeffizienten, Standardfehler (SE), p-Werte und 95 % - Konfidenzintervalle (KI) wurden als Effektschätzungen verwendet.

Die Assoziation von Reinigungseffektivität und Kraftwiderstand wurde durch den Pearson Korrelationskoeffizienten beurteilt, die zwischen Reinigungseffektivität und Interdentalraum Typ/Größe mittels Spearman/Eta-Koeffizient.

Alle Tests waren zweiseitig. Die statistische Signifikanz wurde angenommen, wenn  $p \leq 0,05$ .

### 3.6.1 Reinigungseffektivität (ERE)

Die Reinigungseffektivität (ERE) zeigt die Differenz des simulierten Biofilms vor und nach der Reinigung des Interdentalraumes in %. Hierbei wird die gereinigte Fläche, wie schon in den Abschnitten 3.4.1, 3.4.3 und 3.5 erklärt, mittels digitaler Bildberechnung dargestellt, berechnet und analysiert.

### 3.6.2 Reinigungskraft bzw. der Kraftwiderstand (ERK)

Der Kraftwiderstand zum Reinigen des Interdentalraumes (ERK) wird in Newton (N) angegeben. Er wurde als durchschnittliche Kraft der 10 Zyklen aus Zug-, sowie Druckkraft innerhalb des konstruierten Interdentalraumes berechnet.

### 3.6.3 Reinigungseffektivität in Bezug zum Kraftwiderstand

Um die Reinigungseffektivität in Bezug zum Kraftwiderstand zu setzen, wurde in einigen Studien ein Quotient für die Auswertung der Daten verwendet und die Reinigungseffektivität durch den Kraftwiderstand geteilt (Wolff et al., 2006b). Das Verhältnis der Reinigungseffektivität zum Kraftwiderstand dient der Kontrolle der Daten. Kleine Werte zeugen hierbei von einer hohen Reinigung und einem gleichzeitig geringen Kraftaufwand, hohe Werte deuten auf eine geringe Reinigung mit einem hohen Kraftaufwand hin.

### 3.6.4 Reinigungseffektivität<sup>2</sup> (ERE<sup>2</sup>) in Bezug zum Kraftwiderstand (ERK)

Um die Unterschiede zwischen Interdentalraumbürsten und Interdentalraumpicks noch besser darstellen zu können, wurde ein neuer Quotient basierend auf der Beziehung zwischen der

Reinigungseffektivität und dem Kraftwiderstand entwickelt. Anders als der Quotient, der in Absatz 3.6.3 erläutert wurde, setzt dieser von mir entwickelte Quotient die Reinigungskraft verdoppelt ins Verhältnis, um sie höher gewichten zu können. Somit wird die Reinigungseffektivität doppelt gewichtet und durch den gesamten Kraftaufwand der Reinigung geteilt; denn das eigentliche Ziel der Nutzung von zusätzlichen Hilfsmitteln bei der häuslichen Mundhygiene wie die getesteten Produkte ist die Steigerung der Reinigungsleistung. Wünschenswert wären hierbei kleine Werte, die einer hohen Reinigung und einem gleichzeitig geringen Kraftaufwand entsprechen.



## 4. Ergebnisse

Die Ergebnisse für die Reinigungseffektivität und dem Kraftwiderstand sind tabellarisch in der Tabelle 3 für alle getesteten interdentalen Hilfsmittel zusammengefasst. Dabei ist zu beachten, dass 120 von 1890 durchgeführten Tests zur Analyse der Reinigungseffektivität statistisch nicht ausgewertet werden konnten und somit für die finale Bewertung nicht berücksichtigt wurden (der Hauptgrund lag hierbei in Fehlern bei der photographischen Dokumentation). In 79 von 1890 durchgeführten Tests zur Analyse des Kraftwiderstandes fehlten die tatsächlichen Daten durch Übertragungsfehler in die Excel Tabelle und konnten ebenfalls nicht für die Bewertung berücksichtigt werden.

Die Gegenüberstellung beider berechneten Quotienten aus den Daten der Reinigungseffektivität und des Kraftwiderstandes ist in der Tabelle 4 ebenfalls für alle getesteten Hilfsmittel zusammengefasst.

### 4.1 Reinigungseffektivität

Insgesamt war die Reinigungseffektivität (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung) für Interdentalraumbürsten ( $n = 564$ ) höher als bei den drahtlosen interdentalen Hilfsmitteln ( $n = 1206$ ) ( $58,33 \pm 14,92$ ; Spannweite 33,57- 90,20 % vs.  $24,46 \pm 15,41$  %; Spannweite 5,60-77,67 %;  $p \leq 0,001$ ).

Bei den drahtlosen interdentalen Hilfsmitteln war die Reinigungseffektivität beim Testprodukt 1 ( $n = 246$ ) am Höchsten ( $30,69 \pm 19,93$  %), gefolgt vom Testprodukt 2 ( $n = 673$ ,  $24,78 \pm 14,40$  %) und den niedrigsten Werten bei den Soft Picks Advanced ( $n = 287$ ,  $18,35 \pm 10,13$  %).

Bei allen interdentalen Hilfsmitteln fand sich die höchste Reinigungseffektivität im Replikat eines gleichschenkligen dreieckigen Interdentalraums im Vergleich zum konvexen oder konkaven Interdentalraum. Bei den Interdentalraumbürsten ( $80,03 \pm 4,83$  vs.  $47,43 \pm 5,47$  vs.  $53,99 \pm 11,17$  %; alle  $p \leq 0,001$ ) sowie auch bei den drahtlosen Hilfsmitteln gesamt im Vergleich ( $46,37 \pm 13$  vs.  $16,67 \pm 5,24$  vs.  $17,61 \pm 8,11$  %; alle  $p \leq 0,001$ ). Bei den Interdentalraumpicks hat das Testprodukt 1 höhere Reinigungseffektivitäts - Werte im gleichschenkligen dreieckigen Interdentalraum erzielt ( $65,74 \pm 5,33$  %) im Vergleich zum Testprodukt 2 ( $46,38 \pm 8,63$  %) und den Soft Pick Advanced ( $33,23 \pm 8,32$  %).

Die Ergebnisse für die Reinigungseffektivität unterschieden sich signifikant zwischen allen Interdentalraum-Morphologien ( $p \leq 0,001$ ). Die höchste Reinigungseffektivität wurde unter Verwendung der Interdentalraumbürste ISO 2 (0,9 mm) in einem gleichschenkligen 1 mm Dreieck ( $84,19 \pm 3,47$  %) erreicht (Tabelle 3).

#### 4.1.1 Untergruppenanalyse: Effizienz abhängig vom Interdentalraum

Vergleicht man die Interdentalraumbürsten gesammelt (ohne Unterscheidung in ihren ISO Größen) mit den anderen getesteten Hilfsmitteln, erreichen sie in allen Morphologien (nicht abhängig von der Größe des Interdentalraum) die höchste Reinigungseffektivität (gleichschenklig:  $80,03 \pm 4,83$  % vs. konvex:  $47,43 \pm 5,47$  % vs. Konkav:  $53,99 \pm 11,17$  %), gefolgt vom Testprodukt 1 ( $65,74 \pm 5,33$  % vs.  $20,67 \pm 5,56$  % vs.  $23,10 \pm 12,83$  %), danach das Testprodukt 2 ( $46,38 \pm 8,63$  % vs.  $16,84 \pm 4,44$  % vs.

17,20 ± 5,79 %) und die niedrigsten Werte in allen Interdentalräumen erreichten die Soft Picks Advanced (33,23 ± 8,32 % vs. 12,08 ± 2,37 % vs. 13,74 ± 3,45 %), alle Werte  $p \leq 0,001$ .

Betrachtet man unabhängig von der Morphologie die Größe des Interdentalräume, erreichen auch hier die Interdentalraumbürsten die höchsten Reinigungseffektivitäts - Werte (1,0 mm: 60,05 ± 16,8 % vs. 1,1 mm: 55,25 ± 13,32 % vs. 1,3 mm: 58,86 ± 13,84 %), wobei der höchste Wert von der Interdentalraumbürste ISO 2 (0,9 mm) im Interdentalraum 1,0 mm erreicht wird (62,87 ± 16,07 %). Der niedrigste Wert im 1,0 mm Durchmesser liegt beim Testprodukt 1 (15,12 ± 2,15 %), bei 1,1 mm sowie den 1,3 mm Durchmesser bei den Soft Picks Advanced (16,08 ± 8,65 % vs. 17,42 ± 8,01 %).

Das Testprodukt 2 weist in allen Größen signifikant geringere Reinigungseffektivitäts - Werte als die Interdentalraumbürsten auf (1,0 mm: 25,60 ± 16,84 % vs. 1,1 mm: 27,38 ± 14,16 % vs. 1,3 mm: 21,41 ± 11,0 %,  $p \leq 0,001$ ).

Die Ergebnisse zur Reinigungseffektivität sowie entsprechende signifikante Unterschiede für die Untergruppenanalyse sind in der Tabelle 3 gezeigt.

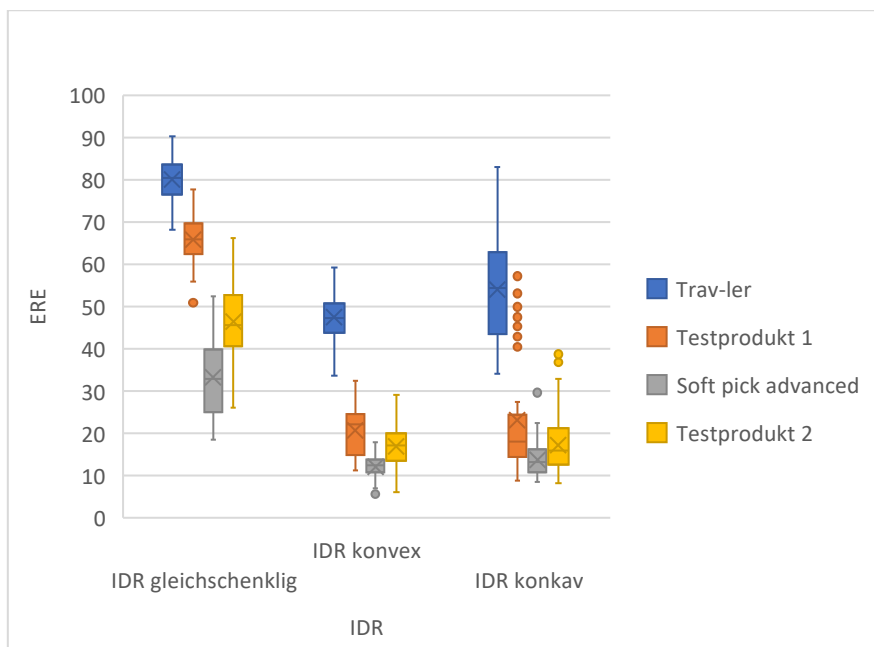


Abbildung 19: Darstellung der ERE für die verschiedenen Interdentalräume (IDR) Morphologien. Hierbei befinden sich auf der X-Achse die drei verschiedenen Interdentalräume (gleichschenkelig, konvex und konkav), auf der Y-Achse die Reinigungseffektivität (ERE). Weiterhin sind farblich die verschiedenen dentalen Hilfsmittel unterschieden: die GUM Trav-ler in blau, das Testprodukt 1 in orange, die Soft Picks Advanced in grau und das Testprodukt 2 in Gelb.



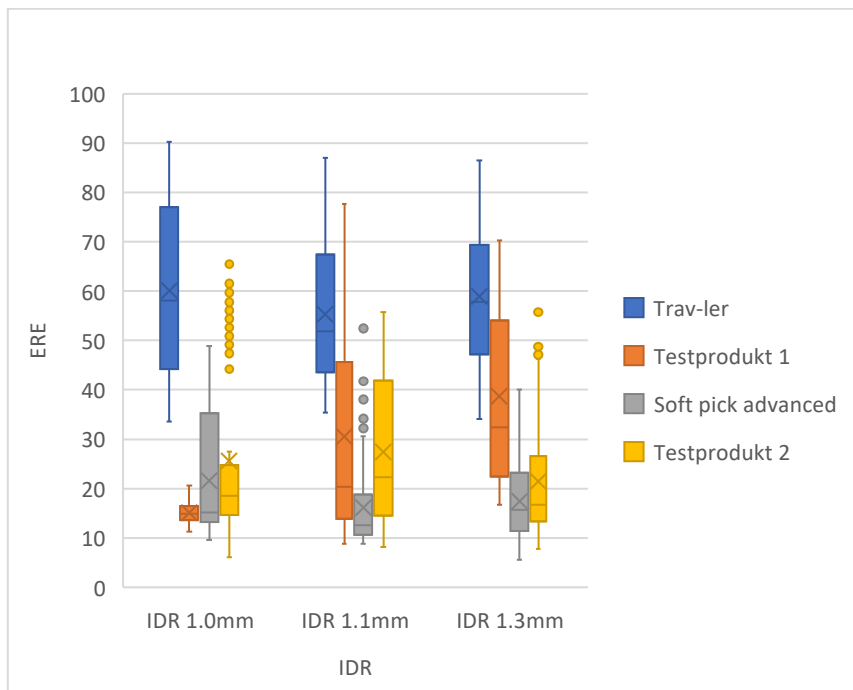


Abbildung 20: Exemplarische Darstellung der Reinigungseffektivität für verschiedene Größen des Interdentalraumes. Hierbei befinden sich auf der X-Achse die drei verschiedenen Größen der Interdentalräume IDR 1,0 mm; 1,1 mm; 1,3 mm), auf der Y-Achse die Reinigungseffektivität (ERE). Weiterhin sind farblich die verschiedenen dentalen Hilfsmittel unterschieden: die GUM Trav-ler in blau, das Testprodukt 1 in orange, die Soft Picks Advanced in grau und das Testprodukt 2 in Gelb.

Reinigungseffektivität (ERE in %)									
	IDR 1,0 mm			IDR 1,1 mm			IDR 1,3 mm		
	gleichschenklig	konvex	konkav	Gleichschenklig	konvex	konkav 3mm/5mm	gleichschenklig	konvex	konkav
IDB ISO 1 0,8 mm	81,65 ± 3,61	40,52 ± 2,78	53,33 ± 10,82	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
IDB ISO 2 0,9 mm	84,19 ± 3,47	44,94 ± 2,42	60,78 ± 10,54	76,87 ± 4,14	48,51 ± 2,78	53,83 ± 13,55	77,78 ± 5,28	47,79 ± 2,10	48,25 ± 10,34
IDB ISO 3 1,2 mm	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	43,72 ± 3,76	79,64 ± 3,70	55,34 ± 2,06	55,92 ± 11,23
IDB ISO 4 1,4 mm	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	54,34 ± 2,46	n.a.	n.a.	61,05 ± 2,83
SPA ISO 2 0,9 - 1,0 mm	41,64 ± 4,16	13,87 ± 1,50	14,81 ± 3,25	29,13 ± 7,43	12,16 ± 1,73	11,33 ± 1,66	28,72 ± 5,2	10,20 ± 2,31	15,13 ± 3,76
SPP-1 ISO 2 0,9 - 1,0 mm	n.a.	14,03 ± 1,48	16,21 ± 2,18	67,83 ± 4,70	24,91 ± 3,31	14,96 ± 3,56	63,65 ± 5,17	23,24 ± 3,23	34,52 ± 13,22
SPP-2 ISO 2 0,9 - 1,0 mm	55,94 ± 5,49	17,49 ± 4,28	16,56 ± 4,27	44,90 ± 5,18	19,16 ± 3,72	17,41 ± 7,33	39,09 ± 6,70	13,37 ± 3,25	17,53 ± 5,52
Mittlere Reinigungskraft (ERK in N)									
	IDR 1,0 mm			IDR 1,1 mm			IDR 1,3 mm		
	gleichschenklig	konvex	konkav	gleichschenklig	konvex	konkav	gleichschenklig	konvex	konkav
IDB ISO 1 0,8 mm	0,43 ± 0,05	0,20 ± 0,03	0,27 ± 0,04	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
IDB ISO 2 0,9 mm	0,72 ± 0,08	0,43 ± 0,0	0,49 ± 0,14	0,66 ± 0,06	0,37 ± 0,06	0,43 ± 0,13	0,47 ± 0,03	0,27 ± 0,02	0,35 ± 0,06
IDB ISO 3 1,2 mm	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,78 ± 0,09	1,19 ± 0,10	0,86 ± 0,09	0,82 ± 0,23
IDB ISO 4 1,4 mm	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,94 ± 0,43	n.a.	n.a.	1,45 ± 0,21
SPA ISO 2 0,9 - 1,0 mm	1,44 ± 0,21	0,69 ± 0,13	1,36 ± 0,29	0,83 ± 0,11	0,71 ± 0,16	0,84 ± 0,36	0,28 ± 0,05	0,35 ± 0,15	0,62 ± 0,42
SPP-1 ISO 2 0,9 - 1,0mm	n.a.	0,69 ± 0,13	1,53 ± 0,17	1,42 ± 0,22	1,21 ± 0,20	1,32 ± 0,33	0,28 ± 0,05	0,80 ± 0,10	0,86 ± 0,51
SPP-2 ISO 2 0,9 - 1,0mm	1,71 ± 0,26	1,1 ± 0,28	1,32 ± 0,27	1,09 ± 0,16	0,91 ± 0,20	0,94 ± 0,26	0,64 ± 0,08	0,77 ± 0,16	0,63 ± 0,19

Tabelle 3: Untergruppenanalyse (Mittelwert  $\pm$  SD) der Reinigungseffektivität (ERE in %) und dem Kraftwiderstand bei Reinigung (ERK in N) aller Testprodukte während 10 Zyklen. Hierbei ist ein Überblick gegeben über die verschiedenen Morphologien (gleichschenklig dreieckig, konvex, konkav) sowie der verschiedenen Größen (1,0 mm; 1,1 mm; 1,3 mm). Diese sind in Bezug auf die getesteten interdentalen Hilfsmittel (IDB= Interdentalraumbürste, SPA = Soft Pick Advanced, SPP-1 = Testprodukt 1, SPP-2 = Testprodukt 2). Hierbei wird  $p < 0,05$  als statistisch signifikant angesehen (Mann-Whitney-U-Test, Kruskal-Wallis-Test, zweiseitig).

## 4.2 Reinigungskraft (durchschnittliche Kraft aus Druck-/Zugkraft)

Im Durchschnitt war der Kraftwiderstand (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung) für alle gemessenen Interdentalraumbürsten ( $0,62 \pm 0,43$  N) niedriger als für die zusammengefassten Werte der Interdentalraumpicks ( $0,98 \pm 0,42$  N,  $p \leq 0,001$ ).

Bei den Interdentalraumpicks wurde der niedrigste Kraftwiderstands - Wert durch die Soft Picks Advanced erzielt ( $0,83 \pm 0,46$  N,  $n = 299$ ), gefolgt vom Testprodukt 2 ( $0,99 \pm 0,38$  N,  $n = 690$ ) und der höchste Wert lag beim Testprodukt 1 ( $1,14 \pm 0,41$  N,  $n = 249$ ), alle mit signifikantem Unterschied zueinander ( $p \leq 0,001$  mit Bonferroni-Anpassung).

Bei der Morphologie der Interdentalräume zeigt sich insgesamt bei allen Hilfsmitteln ein statistischer Unterschied zwischen konvexen und gleichschenkligen Interdentalraum ( $p \leq 0,001$ ) sowie konkaven und gleichschenkligen Interdentalraum ( $p = 0,007$ ), aber zwischen konvexen und konkaven Interdentalraum ( $p = 0,11$ , alle mit Bonferroni-Anpassung).

Die mit der Interdentalraumbürste benötigten Kräfte hingen von der Bürstengröße sowie der Beziehung zum Raumbereich ab. Der höchste Kraftwiderstand für Interdentalraumbürsten wurde im gleichschenkligen Dreieck sowie im konkaven Bereich im Vergleich zur konvexen Morphologie gemessen ( $0,69 \pm 0,28$  N gegenüber  $0,68 \pm 0,5$  N gegenüber  $0,43 \pm 0,24$  N; alle  $p \leq 0,001$  mit Bonferroni-Anpassung). Für alle drahtlosen interdentalen Hilfsmittel gemittelt wurde ein statistischer Unterschied für den Kraftwiderstand zwischen gleichschenkligem Dreieck ( $1,05 \pm 0,46$  N), konvexen Interdentalraum ( $0,91 \pm 0,33$  N) und konkaven Interdentalraum ( $0,99 \pm 0,43$  N) gemessen ( $p \leq 0,001$  mit Bonferroni-Anpassung).

Darüber hinaus unterschied sich der Kraftwiderstand signifikant zwischen den Interdentalraum - Größen 1,0 mm, 1,1 mm und 1,3 mm signifikant (1,0 mm gegenüber 1,1 mm gegenüber 1,3 mm:  $1,31 \pm 0,35$  N gegenüber  $1,02 \pm 0,31$  N gegenüber  $0,65 \pm 0,3$  N; ( $p \leq 0,001$  mit Bonferroni-Einstellung).

Bei den Interdentalraumbürsten war der Kraftwiderstand für Interdentalraum 1,1 mm ( $0,75 \pm 0,56$  N) höher als für 1,0 mm ( $0,41 \pm 0,18$  N;  $p = 0,035$  bei Bonferroni-Anpassung und 1,3 mm ( $0,73 \pm 0,41$  N;  $p = 0,039$  bei Bonferroni-Anpassung).

Der höchste mittlere Kraftwiderstand wurde bei den Interdentalraumbürsten für die Interdentalraumbürste ISO 4 (1,4 mm) in einem konkaven Interdentalraum von 1,1 mm ( $1,94 \pm 0,43$  N) registriert, der niedrigste Kraftwiderstand für die Interdentalraumbürste ISO 1 im konvexen Interdentalraum von 1,0 mm ( $0,20 \pm 0,03$  N).

Für alle Interdentalraumpicks (Soft Picks Advanced, Testprodukte 1 + 2) war der Kraftwiderstand im kleinsten Interdentalraum am Höchsten, insbesondere im gleichschenkligen Dreieck mit 1 mm Durchmesser (Testprodukt 2:  $1,71 \pm 0,26$  N), ((das Testprodukt 1 konnte hier auf Grund zu hoher Kraftwerte nicht getestet werden)) und im konkaven Bereich 1 mm (Testprodukt 1:  $1,53 \pm 0,17$  N). Der

niedrigste Kraftwiderstand wurde hier von den Soft Picks Advanced und dem Testprodukt 1 im gleichschenkligen Interdentalraum mit 1,3mm Durchmesser erreicht ( $0,28 \pm 0,05$  N).

Bezogen auf die reine Morphologie der Interdentalräume (ohne Größenzuordnung) hatten die Interdentalraumbürsten überall die geringsten Werte (gleichschenklilig:  $0,69 \pm 0,28$  N vs. konvex:  $0,43 \pm 0,24$  N vs. konkav:  $0,68 \pm 0,5$  N). Die höchsten Werte im gleichschenkligen dreieckigen Interdentalraum erreichten die Testprodukte 1 + 2 (Testprodukt 1:  $1,14 \pm 0,44$  N vs. Testprodukt 2:  $1,08 \pm 0,39$  N,  $p = 1$ ), im konvexen sowie im konkaven Interdentalraum das Testprodukt 1 (konvex:  $1,13 \pm 0,29$  N vs. konkav:  $1,17 \pm 0,48$  N,  $p = 0,03$  ).

Die Übersicht der Ergebnisse zu den Daten des Kraftaufwands bei Bewegung sowie entsprechende signifikante Unterschiede für die Untergruppenanalyse sind in der Tabelle 3 gezeigt und graphisch in Abbildung 21 bezogen auf die interdental Morphologie und in Abbildung 22 bezogen auf die Größe des Interdentalraumes dargestellt.

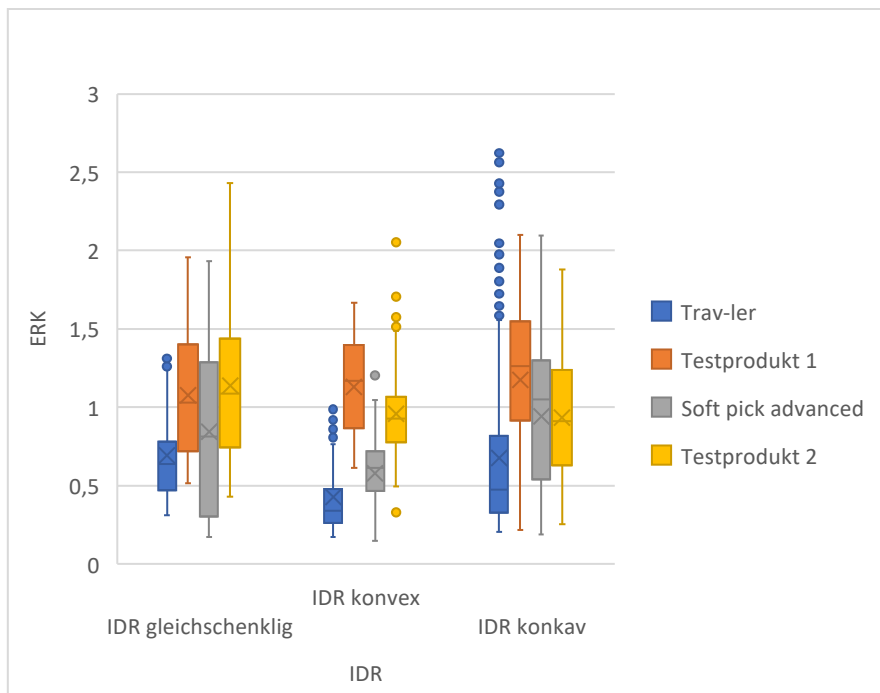


Abbildung 21: Exemplarische Darstellung der mittleren aufgewandten Kraft bezogen auf die verschiedenen IDR Morphologie. Hierbei befinden sich auf der X-Achse die drei verschiedenen Interdentalräume (gleichschenklilig, konvex und konkav), auf der Y-Achse die Reinigungskraft (ERK). Weiterhin sind farblich die verschiedenen dentalen Hilfsmittel unterschieden: die GUM Trav-ler in blau, das Testprodukt 1 in orange, die Soft Picks Advanced in grau und das Testprodukt 2 in Gelb

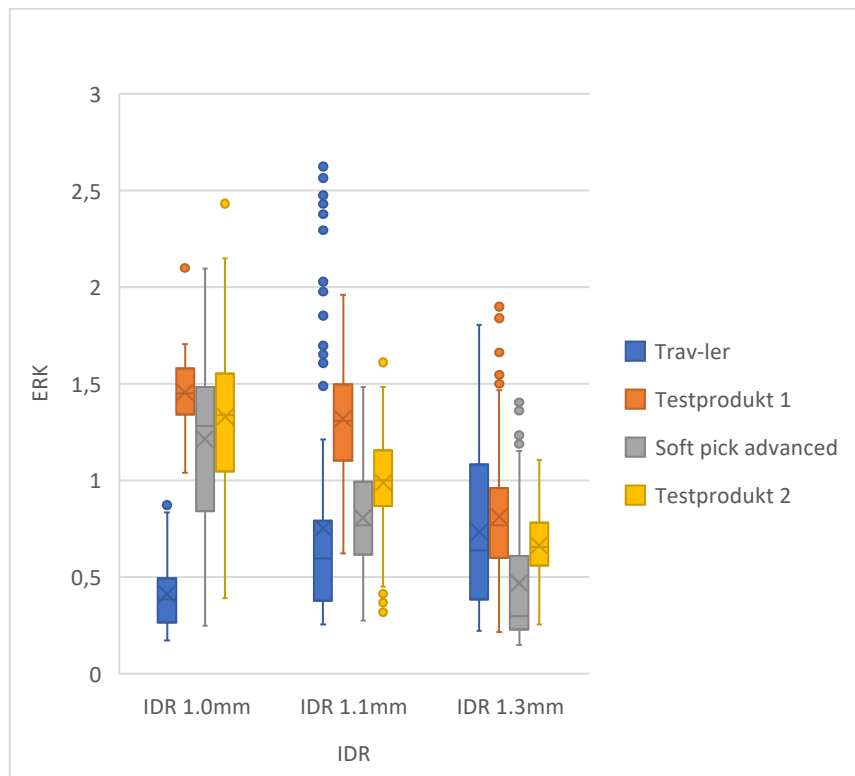


Abbildung 22: Exemplarische Darstellung der aufgewandten Kraft bezogen auf die Größe des Interdentalraumes. Hierbei befinden sich auf der X-Achse die drei verschiedenen Größen der Interdentalräume IDR 1,0 mm; 1,1 mm; 1,3 mm), auf der Y-Achse die Reinigungskraft (ERK). Weiterhin sind farblich die verschiedenen dentalen Hilfsmittel unterschieden: die GUM Trav-ler in blau, das Testprodukt 1 in orange, die Soft Picks Advanced in grau und das Testprodukt 2 in Gelb.

#### 4.3 Verhältnis Reinigungseffektivität/Kraftwiderstand

Im Durchschnitt war der Reinigungseffektivität/Kraftwiderstand - Quotient für die Interdentalraumbürsten am Höchsten ( $1,23 \pm 0,54$ ,  $n = 562$ ), hierbei wurde der höchste Wert im konvexen Interdentalraum ( $1,38 \pm 0,53 \text{ %/N}$ ) erreicht.

Bezogen auf die reine Morphologie der Interdentalräume zeigte sich eine statistische Signifikanz zwischen konvexen und gleichschenkligen Interdentalraum sowie konkaven und gleichschenkligen Interdentalraum ( $p \leq 0,001$ ), aber keine zwischen konvexen und konkaven Interdentalraum ( $p = 1,000$  mit Bonferroni-Anpassung).

Wie auch bei dem der Dissertation zugrunde liegendem Quotienten in 4.4, stellte sich die Reinigungseffektivität im Verhältnis zur durchschnittlichen Kraft so dar, dass es mit der Verwendung von kleineren Interdentalraumbürsten weiter anstieg. Der höchste Wert lag, anders als beim Quotienten der in der Studie genutzt wurde, nicht im gleichschenkligen Interdentalraum, sondern im konvexen Interdentalraum.

Bei den drahtlosen Interdentalraumpicks fand sich analog zum Studien - Quotienten bei allen getesteten Produkten der das höchste Verhältnis im gleichschenkligen dreieckigen Interdentalraum und war zusammengefasst für alle Interdentalraumpicks signifikant höher zu konvexen und konkaven Interdentalräumen ( $0,52 \pm 0,25$  vs.  $0,2 \pm 0,08$  vs.  $0,23 \pm 0,16 \text{ %/N}$ ), ( $p \leq 0,001$  mit Bonferroni-Anpassung).

Analog zum Studien - Quotienten fand man auch hier bei der Aufteilung der Interdentalraumpicks in die getesteten Hilfsmittel hoch signifikante Unterschiede bezogen auf ihre Morphologie mit einzelnen Ausnahmen. In allen Interdentalräumen bestand kein signifikanter Unterschied zwischen Soft Picks Advanced und Testprodukt 2 (gleichschenklige:  $p = 1,000$ ; konvex:  $p = 0,13$ ; konkav:  $p = 0,495$ ), wobei der gleichschenklige Interdentalraum ansonsten hoch signifikant unterschiedlich war.

Im konvexen und konkaven Interdentalraum fanden sich ebenfalls nicht-signifikante Unterschiede zwischen Testprodukt 1 und Testprodukt 2 (konvex:  $p = 1,000$ ; konkav:  $p = 1,000$ ) und Testprodukt 1 und Soft Picks Advanced (konvex:  $p = 0,539$ , konkav:  $p = 1,000$ ), alle anderen Werte waren zueinander statistisch signifikant.

Bezogen auf die Größe des Interdentalraums gab es auch hier zwischen Interdentalraumbürsten und jedem einzelnen Interdentalraumpick hoch signifikante statistische Unterschiede ( $p \leq 0,001$ , alle mit Bonferroni-Anpassung). Bewertet man die Interdentalraumpicks getrennt voneinander, fand man im Interdentalraum 1,0 mm ebenfalls überall signifikante statistische Unterschiede, außer zwischen Soft Picks Advanced und Testprodukt 2 ( $p = 1,000$ ). Im Interdentalraum 1,1 mm sind alle Ergebnisse signifikant unterschiedlich, außer zwischen dem Soft Pick Advanced und Testprodukt 1 ( $p = 1,000$ ). Der größte Interdentalraum (1,3 mm) zeigte ebenfalls überall hoch signifikante Unterschiede außer zwischen Soft Picks Advanced und Testprodukt 1 ( $p = 1,000$ ).

Die Ergebnisse zum Quotienten sowie entsprechende signifikante Unterschiede für die Untergruppenanalyse sind in der Tabelle 4 gezeigt.

#### 4.4 Quotient Reinigungseffektivität<sup>2</sup>/Kraftwiderstand

Im Durchschnitt war der Reinigungseffektivität<sup>2</sup>/Kraftwiderstand - Quotient für die Interdentalraumbürsten am Höchsten ( $0,72 \pm 0,39 \text{ } \%^2/\text{N}$ ,  $n = 562$ ), hierbei wurde der höchste Wert im gleichschenkligen dreieckigen Interdentalraum ( $1,01 \pm 0,39 \text{ } \%^2/\text{N}$ ) erreicht.

Bezogen auf die reine Morphologie der Interdentalräume zeigte sich eine statistische Signifikanz zwischen konvexen und gleichschenkligen Interdentalraum sowie konkaven und gleichschenkligen Interdentalraum ( $p \leq 0,001$ ), aber keine zwischen konvexen und konkaven Interdentalraum ( $p = 0,410$  mit Bonferroni-Anpassung)

Bei den drahtlosen Interdentalraumpicks fand sich ebenfalls bei allen getesteten Produkten der höchste Reinigungseffektivität<sup>2</sup>/Kraftwiderstand - Quotient im gleichschenkligen dreieckigen Interdentalraum. Zusammengefasst war er für alle Interdentalraumpicks signifikant höher im Vergleich zu konvexen, aber nicht zu konkaven Interdentalräumen ( $0,24 \pm 0,13$  vs.  $0,03 \pm 0,02$  vs.  $0,05 \pm 0,05 \text{ } \%^2/\text{N}$ ).

Beurteilt man die Interdentalraumpicks anhand des Quotienten, findet sich bezogen auf die Morphologie im gleichschenkligen Interdentalraum signifikante statistische Unterschiede außer zwischen Soft Picks Advanced und Testprodukt 2. Hier ist kein signifikanter Unterschied in allen

Interdentalräumen berechnet worden (gleichschenkl.:  $p = 0,130$ ; konvex:  $p = 1,000$ ; konkav:  $p = 0,056$ , alle mit Bonferroni-Anpassung). Im konvexen und konkaven Interdentalraum fanden sich dazu auch nicht signifikante Unterschiede zwischen Testprodukt 1 und Testprodukt 2 (konvex:  $p = 0,292$ ; konkav:  $p = 1,000$ ) und Testprodukt 1 und Soft Picks Advanced (konvex:  $p = 0,051$ ), alle anderen Werte sind zueinander statistisch signifikant.

Bezogen auf die Größe des Interdentalraums gab es zwischen Interdentalraumbürsten und jedem verschiedenen Modell der Interdentalraumpicks hoch signifikant statistische Unterschiede. Betrachtet man die Interdentalraumpicks getrennt voneinander, fand man im Interdentalraum 1,0 mm ebenfalls überall signifikant statistische Unterschiede, außer zwischen Soft Picks Advanced und Testprodukt 2 ( $p = 1,000$ ). Im Interdentalraum 1,1 mm sind alle Ergebnisse signifikant unterschiedlich, außer zwischen Testprodukt 1 und Testprodukt 2 ( $p = 0,89$ ) und Soft Picks Advanced und Testprodukt 1 ( $p = 0,052$ ). Der größte Interdentalraum (1,3 mm) zeigte ebenfalls überall hoch signifikante Unterschiede außer zwischen Soft Picks Advanced und Testprodukt 2 ( $p = 1,000$ ).

Die weiteren Ergebnisse zum Quotienten sowie entsprechende signifikante Unterschiede für die Untergruppenanalyse sind in der Tabelle 4 gezeigt.

Tabelle 4: Untergruppenanalyse (Mittelwert+-SD) der Reinigungseffektivität<sup>2</sup> (ERE in %) in Bezug zum Kraftwiderstand bei Reinigung (ERK in N) aller Testprodukte

	ERE <sup>2</sup> /ERK								
	IDR 1,0 mm			IDR 1,1 mm			IDR 1,3 mm		
	gleichschenklig	konvex	konkav	gleichschenklig	konvex	konkav	gleichschenklig	konvex	konkav
IDB ISO 1 0,8 mm	1,58 ± 0,03	0,82 ± 0,14	1,09 ± 0,35	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
IDB ISO 2 0,9 mm	1,00 ± 0,18	0,48 ± 0,11	0,78 ± 0,17	0,91 ± 0,13	0,66 ± 0,14	0,70 ± 0,24	1,30 ± 0,17	0,85 ± 0,09	0,67 ± 0,21
IDB ISO 3 1,2 mm	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,25 ± 0,05	0,54 ± 0,07	0,36 ± 0,05	0,39 ± 0,10
IDB ISO 4 1,4 mm	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,16 ± 0,05	n.a.	n.a.	0,27 ± 0,06
SPA ISO 2 0,9 - 1,0 mm	0,12 ± 0,03	0,03 ± 0,01	0,02 ± 0,01	0,11 ± 0,06	0,02 ± 0,01	0,02 ± 0,1	0,32 ± 0,12	0,03 ± 0,01	0,06 ± 0,04
SPP-1 ISO 2 0,9 - 1,0 mm	n.a.	0,01 ± 0	0,02 ± 0,01	0,34 ± 0,07	0,05 ± 0,02	0,02 ± 0,01	0,57 ± 0,10	0,07 ± 0,02	0,15 ± 0,06
SPP-2 ISO2 0,9 - 1,0 mm	0,19 ± 0,04	0,03 ± 0,01	0,02 ± 0,01	0,19 ± 0,05	0,05 ± 0,02	0,04 ± 0,03	0,25 ± 0,07	0,02 ± 0,01	0,06 ± 0,04
	ERE/ERK								
	IDR 1,0 mm			IDR 1,1 mm			IDR 1,3 mm		
	gleichschenklig	konvex	konkav	gleichschenklig	convex	konkav	gleichschenklig	konvex	konkav
IDB ISO 1 0,8 mm	1,93 ± 0,28	2,03 ± 0,28	2,01 ± 0,3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
IDB ISO 2 0,9 mm	1,18 ± 0,18	1,07 ± 0,22	1,29 ± 0,21	1,18 ± 0,12	1,36 ± 0,25	1,28 ± 0,22	1,67 ± 0,13	1,77 ± 0,14	1,37 ± 0,17
IDB ISO 3 1,2 mm	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,57 ± 0,08	0,67 ± 0,06	0,65 ± 0,08	0,70 ± 0,12
IDB ISO 4 1,4 mm	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,30 ± 0,08	n.a.	n.a.	0,43 ± 0,08
SPA ISO 2 0,9 – 1,0 mm	0,29 ± 0,05	0,03 ± 0,01	0,11 ± 0,04	0,35 ± 0,09	0,18 ± 0,03	0,16 ± 0,73	1,08 ± 0,23	0,32 ± 0,12	0,38 ± 0,25
SPP-1 ISO 2 0,9 – 1,0 mm	n.a.	0,10 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,49 ± 0,09	0,21 ± 0,06	0,12 ± 0,04	0,89 ± 0,13	0,29 ± 0,05	0,48 ± 0,18
SPP-2 ISO2 0,9- 1,0 mm	0,33 ± 0,05	0,16 ± 0,04	0,13 ± 0,05	0,42 ± 0,07	0,23 ± 0,09	0,19 ± 0,09	0,62 ± 0,09	0,17 ± 0,04	0,30 ± 0,12



## 5. Diskussion

Die größten Schwachstellen, die sich während des Putzens der Zähne beim Patienten zeigen, sind die Interdentalräume und gleichzeitig wird hier das höchste Risiko zur Kariesentwicklung beschrieben (Demirci et al., 2010). Weitere Erkrankungen, wie die Gingivitis und die Parodontitis, haben ebenfalls im Interdentalraum häufig ihren Ursprung (van der Weijden and Slot, 2011, Crocombe et al., 2012, Loe, 1979). Die selbstreinigende Wirkung durch die Zunge, die Wange und auch den Speichel sind im Interdentalraum reduziert und bei offenen Interdentalräumen sogar völlig unmöglich. Dies ist dadurch bedingt, dass es kein „Durchfließen“ des Speichels gibt und der enge Raum die Ansammlung von Plaque noch begünstigt (Vogel et al., 2014). Dadurch rückt der Interdentalraum neben dem marginalen Bereich der Gingiva bei der häuslichen Pflege in den Vordergrund und es lässt sich folgern, dass die Integration der regelmäßigen Interdentalraumpflege als klare Indikation und Notwendigkeit anzusehen ist, um die genannten Erkrankungen zu minimieren (Marchesan et al., 2018),(Poklepovic et al., 2013).

Trotz korrekter Putztechnik kann bei alleiniger Anwendung einer Hand- oder elektrischen Zahnbürste dieser nicht adäquat gereinigt werden (Salzer et al., 2015). Daher sollte Patienten mit zugänglichen Interdentalräumen empfohlen werden die angrenzenden Zahnflächen mit häuslichen Hilfsmitteln mechanisch zu reinigen. Wie bereits ausgeführt, ist die Auswahl und Vielfalt der Hilfsmittel sehr groß und reicht von der einfachen Zahnseide über Interdentalraumbürsten zu neueren Entwicklungen wie den Interdentalraumpicks. Jedoch birgt nicht nur diese umfangreiche Auswahl ein Problem für die Patienten. Selbst wenn sie sich für ein Produkt entschieden haben, kann immer noch eine fehlende Motivation zur zusätzlichen Nutzung der häuslichen Hilfsmittel beobachtet werden, weshalb diese bis heute kaum größere Verbreitung finden (Widstrom, 2004). Klinische Studien vergleichen daher bis jetzt immer wieder neue vermarktete häusliche Hilfsmittel bezüglich ihrer Effektivität und Akzeptanz (Votta et al., 2020, Hennequin-Hoenderdos et al., 2018, van der Weijden et al., 2021). Man hofft dadurch neue Entwicklungen für eine verbesserte Patientencompliance bzw. -akzeptanz zu finden. Eine dieser Neuerungen stellen die Interdentalraumpicks dar. Sie waren als technologische Weiterentwicklung der Interdentalraumbürsten gedacht und besitzen statt einem Metallkern oder Nylonfäden kleine Finger oder Noppen aus einem thermoplastischen Elastomer. Sie stehen senkrecht vom Kunststoffkern ab und führen ohne den Metallkern zu weniger Gingivatraumatisierung (van der Weijden et al., 2021).

Eine der frühesten klinischen Studie von Abouassi et al. (2014) zeigte, dass sie eine deutlich bessere Patientenakzeptanz erfahren als die herkömmlichen Interdentalraumbürsten. Aktuell bestätigte eine Studie erneut die höhere Akzeptanz der Interdentalraumpicks im Vergleich mit dem Gebrauch von Zahnseide (Moretti et al., 2020). Die dieser Dissertation zugrunde liegenden In-vitro-Studie kann

derartige Aspekte methodenimmanent nicht untersuchen, jedoch können Hypothesen hinterfragt werden, warum diese Hilfsmittel eine höhere Akzeptanz aufweisen. Ein Grund für die hohe Akzeptanz könnte sein, dass herkömmliche Interdentalraumbürsten verbiegen können. In der vorliegenden In-vitro-Studie trat durchweg ein geringeres Fraktur- / Verbiegerisiko durch das thermoplastische Elastomer ( $n = 0$ ) gegenüber herkömmlichen Interdentalraumbürsten mit einem Metallkern ( $n = 15$ ) auf. Es kann hypothetisiert werden, dass diese vergleichsweise geringe Anzahl vermutlich In-vivo deutlich höher liegen wird, da hier erschwerte Bedingungen durch den Winkel beim Einführen der Hilfsmittel sowie auch die Anatomie des Weichgewebes eine Rolle spielen. Diese Problematiken sollten durch den Aufbau der Interdentalraumpicks verringert werden (van der Weijden et al., 2021) und wird von den Anwendern sicherlich höher bewertet werden als die verringerte Reinigungsleistung der Interdentalraumpicks im Vergleich zu konventionellen Interdentalraumbürsten (Votta et al., 2020, Ince Kuka, 2018), wie auch in der vorliegenden In-vitro-Studie bestätigt. Anwender können die Reinigungsleistung nur schätzen, die Beurteilung ist aber auch in klinischen Studien nur eingeschränkt möglich (z.B. keine direkte Sicht) und könnte die in-vitro vorgefundene konträre Ergebnislage zu den In-vivo-Studien erklären (Abouassi et al., 2014, Ustaoglu et al., 2020). Ein aktuelles systematisches Review von van der Weijden et al. (2021) analysierte anhand von sechs klinisch-kontrollierten randomisierten Studien mögliche Unterschiede zwischen Interdentalraumpicks, Interdentalraumbürsten, Zahnseide und alleiniger Zahnbürstennutzung bezüglich ihrer klinischen Wirkung. Bezüglich der Reinigungseffektivität, ausschließlich indirekt mittels eines Plaquescores bestimmt, fanden sich bei fünf Studien keine Unterschiede zwischen der Nutzung von Interdentalraumpicks vs. Interdentalraumbürsten vs. Zahnseide. Nur in einer Studie (Abouassi et al., 2014) wiesen konventionelle Interdentalraumbürsten bei einmaliger Auswertung eine höhere Effektivität auf als Interdentalraumpicks, diese Ergebnisse konnten in den anderen Studien mit einem „follow-up“ nicht bestätigt werden. Weiterhin zeigte die Analyse, dass Interdentalraumpicks zu weniger Abrasion von Zahnhartsubstanzen (Interdentalraumbürsten GA (Gingival Abrasion): 18,81 vs. Interdentalraumpicks GA: 11,50 (Hennequin-Hoenderdos et al., 2018)) führen. Es darf hypothetisiert werden, dass in der täglichen Routine eine höhere Akzeptanz die Regelmäßigkeit und Nutzungsdauer der Interdentalraumpicks gegenüber den konventionellen Interdentalraumbürsten verbessert und somit indirekt auch die vergleichbar guten Plaque- und Gingivitisparameter der klinischen Studien erklärbar werden.

#### *In-vitro- versus In-vivo-Messmethoden zur Wirkung von interdentalen Reinigungshilfsmitteln*

Zum einen muss beachtet werden, dass man nur eingeschränkt, bzw. indirekt in-vivo die Reinigungsleistung (also die Entfernung von Plaque) messen kann, jedoch in-vitro eine genaue und reproduzierbare Methode möglich ist. Die Interdentalraummorphologie lässt eine direkte in-vivo-

Messung des angefärbten Biofilms auf den interdentalen Zahnflächen nicht zu. In-vitro lässt sich dagegen der Interdentalraum nach Anwendung der Hilfsmittel zur Messung zerlegen und beispielsweise planmetrisch die Entfernung von simuliertem Biofilm genau erfassen. Dagegen kann in-vivo die klinische Wirksamkeit mittels verschiedener Indizes, beispielsweise der entzündlichen Veränderung der Gingiva bestimmt werden, welches in-vitro nicht möglich ist. Diese Problematik wurde auch von anderen Autoren erkannt (van der Weijden et al., 2021) und soll in den folgenden Absätzen noch detailliert hinsichtlich der Interpretation von Ergebnissen diskutiert werden.

Neben den möglichen Ursachen durch methodische Unterschiede, muss aber gerade für die klinischen Messungen angenommen werden, dass falsch gewählte Größen der Interdentalraumbürsten signifikant das Ergebnis der Reinigungsleistung beeinflussen können (Ng and Lim, 2019). Diese müssen immer passend zur Defektmorphologie gewählt werden (Salzer et al., 2015). Auch können die Patienten während der Anwendung nicht gegenüber dem Hilfsmittel „verblindet“ werden, wodurch studienbedingt sich ihr Putzverhalten im Allgemeinen verändern kann - man spricht dann auch vom sogenannten „Hawthorne-Effekt“ (Colbjørnsen, 2003, McCarney et al., 2007). Hierbei kann es zu einer, ausschließlich von den Probanden beeinflussten, Steigerung der Putzaktivität kommen (Feil et al., 2002). Dies würde auch den Unterschied in der klinischen Studie von Abouassi (Abouassi et al., 2014) erklären, bei der nach einmaliger Anwendung von Interdentalraumbürsten diese eine höhere Reinigungseffektivität im Vergleich zu Interdentalraumpicks aufwiesen.

Auch ein „Novelty-effect“ muss in klinischen Studien angenommen werden, welcher auf einer erhöhten Motivation neue Produkte auszuprobieren und zu nutzen beruht (McCarney et al., 2007, Fernald et al., 2012). Dies bedeutet, dass die Ergebnisse der In-vivo-Studien abhängig sind von der Mitarbeit der Probanden und somit auch zeitlich individuellen Einflüssen unterliegen. Ebenso muss, wenn auch kaum in klinischen Studien untersucht, der Einfluss der Speichelzusammensetzung, den Ernährungsgewohnheiten oder dem Kaudruck auf einzelne Parameter bei Anwendung der Testprodukte bedacht werden. Werden diese Individualitäten nicht bei Studienplanung und Rekrutierung mit einbezogen, sind kontroverse Studienergebnisse denkbar und mögen einen Teil der Heterogenität der klinischen Studiendaten erklären (van der Weijden et al., 2021).

Experimentelle Studien können immer nur einen spezifischen Teil der klinischen Anwendung simulieren, weshalb die Ergebnisse nie 1:1 mit Ergebnissen von In-vivo-Studien verglichen noch die Ergebnisse verallgemeinert werden dürfen. Basierend auf den Erkenntnissen zur hohen Patientenakzeptanz (Abouassi et al., 2014) und den unbefriedigenden In-vitro-Reinigungsergebnissen von Interdentalraumpicks (Graetz et al., 2020), entwickelte die Firma Sunstar (Sunstar Deutschland GmbH, Schönau, Deutschland, Sunstar Suisse SA, Etoy, Schweiz) zwei neue dentale Hilfsmittel (Testprodukt 1 und 2). Diese sollten die jeweils positiven Eigenschaften der Interdentalraumbürste

sowie der -picks in einem neuen Produkt vereinigen und wurden in der dieser Dissertation zugrunde liegenden experimentellen Studie untersucht.

## 5.1 Diskussion der Hypothesen

Die Primärhypothese kann nicht bestätigt werden, da die getesteten neuen Produkte nicht die Reinigungseffektivität der konventionellen Interdentalraumbürsten erreichen, wie es auch eine vergleichbare experimentelle Studie um Votta (2020) mit konischen, zylindrischen und “waist-shaped” Interdentalraumbürsten gegenüber konischen Interdentalraumpicks belegte. Es zeigte sich bei der planmetrischen Auswertung, dass die hohe Anzahl an elastischen Nylonborsten der konventionellen Interdentalraumbürsten sich möglicherweise besser an die Zahnoberfläche anpassen (deutlich mehr/dichtere Schleifspuren) als die weniger elastischen Noppen der getesteten Interdentalraumpicks bzw. der Testprodukte. Dies wird schematisch in der folgenden Abbildung dargestellt.

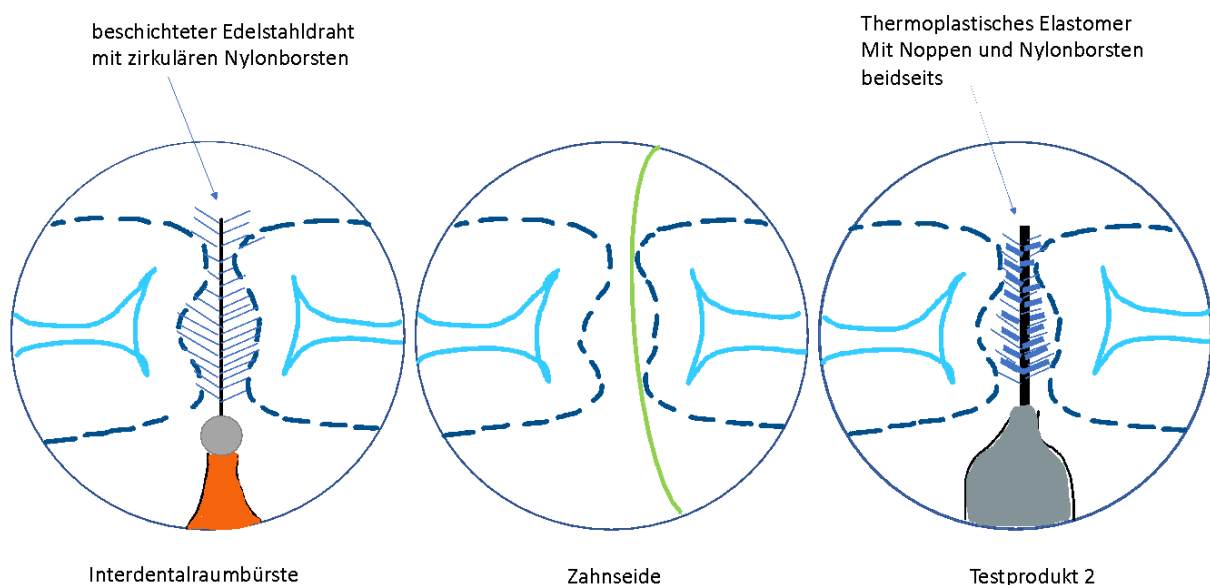


Abbildung 1: von links nach rechts: Die Verwendung verschiedener Hilfsmittel bei konkaven Interdentalräumen und deren Anpassung an deren Oberfläche mit der Interdentalraumbürste, der Zahnseide und beispielhaft dem Testprodukt 2.

Ein weiterer Grund ist durch die Testprodukte an sich bedingt. In der vorliegenden Studie wurden vier verschieden große Interdentalraumbürsten gegenüber einer Größe der Interdentalraumpicks bzw. der Testprodukte (mittlere Größe) in den verschiedenen Morphologien getestet. Graetz et al. (2020) fand mit demselben Set-Up, aber verschieden großen Interdentalraumpicks, dass erst korrekt in den größeren Interdentalräumen angepasste Interdentalraumpicks eine höhere experimentelle Reinigungsleistung erreichten. Dies trifft jedoch nur auf den direkten Vergleich der Soft-Picks Advanced zu.

Ein weiterer Unterschied zur vorliegenden Studie lag darin, dass keine „non-fitted“ Interdentalraumpicks getestet wurden und somit das Gesamtergebnis zur Reinigungseffektivität hier

bezogen auf die Soft-Picks Advanced ein geringfügig besseres ist (Studie von Graetz et al:  $20,3 \pm 9,9 \%$  vs. vorliegende Studie  $18,35 \pm 10,13 \%$ ). Bezieht man hier jedoch alle getesteten drahtlosen Produkte mit ein, ist das Gesamtergebnis in der vorliegenden Studie trotz „non-fitted“ Interdentalraumpicks ein besseres Ergebnis (Studie von Graetz et al:  $20,3 \pm 9,9 \%$  vs. vorliegende Studie  $24,46 \pm 15,41 \%$ ).

In einer zweiten Hypothese wurde angenommen, dass die Testprodukte zusätzlich zur höheren Reinigungseffektivität gegenüber den konventionellen Bürsten und den älteren Interdentalraumpicks in ihrer Anwendung mit einem geringeren Kraftaufwand verbunden sind. Diese Hypothese wurde ebenfalls widerlegt. Das Testprodukt 1 zeigte in den kleinen Interdentalräumen teilweise sogar mehr als doppelt so hohe Kräfte. Dies führte, wie schon beschrieben, dazu, dass in manchen Interdentalraummorphologien aufgrund des extrem hohen Kraftaufwandes ( $>5 \text{ N}$ ) gar keine Anwendung mehr stattfinden konnte, da die Versuchsvorrichtung automatisiert den Vorgang stoppte, um Schäden an der Meßzelle zu vermeiden.

Schlussendlich konnte aber eine zentrale Fragestellung zum Einfluss der Größe und der Morphologie des Interdentalraumes und der Adaption der konischen Testprodukte beantwortet werden. Alle getesteten Produkte wiesen einen mittleren Durchmesser (ISO 2) auf und diese Form wirkte sich entscheidend sowohl auf den Parameter experimentelle Reinigungsleistung als auch den Parameter Kraftaufwand aus. Das Verhältnis der experimentelle Reinigungsleistung zum Parameter Kraftaufwand wurde mit Hilfe eines Quotienten berechnet sowie dargestellt. Hierbei zeigte sich unabhängig von der Morphologie ein deutlicher Unterschied zwischen Interdentalraumbürsten (IDB) und Interdentalraumpicks (IDP) (IDB:  $1,23 \pm 0,54 \text{ \%/N}$  vs. IDP:  $0,29 \pm 0,22 \text{ \%/N}$ ). Daraus kann geschlossen werden, dass die konische Form der Interdentalraumpicks sich in den verschiedenen Interdentalräumen nur mit mehr Kraft einführen lassen als die parallele Form der Interdentalraumbürsten und somit häufig keine korrekte Adaption an die Wände hat.

Aufgrund dieser Ergebnisse konnte eine Einteilung der Testprodukte in „fitted“ versus „non-fitted“ erarbeitet werden. Dies sollte für nachfolgende Untersuchungen spezifischer die Untersuchungsbedingungen beschreiben können, da die bisher gültigen Einteilung entsprechend der ISO Norm (ISO16409:2016) sich in der vorliegenden Studie als unzureichend darstellte (Sekundo and Staehle, 2020).

## 5.2 Diskussion der Ergebnisse

### 5.2.1 Reinigungseffektivität (ERE)

In allen Morphologien und Größen künstlicher Interdentalräume zeigte die Analyse einen signifikanten Unterschied zwischen Interdentalraumbürste und Interdentalraumpick/ Testprodukte. Die Interdentalraumbürsten hatten signifikant bessere Werte als alle anderen getesteten Hilfsmittel, unabhängig davon, ob die verschiedenen Größen der Interdentalraumpicks gemeinsam oder getrennt

ausgewertet wurden und waren im Mittel 34 % besser (IDB:  $58,33 \pm 14,92$  % vs. IDP:  $24,46 \pm 15,41$  %). Wichtiges Kriterium war hierfür die Definition der relativen Größe der Interdentalraumbürste in Bezug auf den Interdentalraum in „fitted“ versus „non-fitted“. Je besser die Interdentalraumbürste an den Interdentalraum in der vorliegenden Studie angepasst wurde, desto höher war die experimentelle Reinigungseffektivität. Dieser Effekt kann erklärt werden durch die größere Kontaktfläche der Nylonborsten der Interdentalraumbürste und der zu reinigenden Zahnoberfläche (Dörfer, 2000), welches im vorigen Absatz illustriert wurde. Vergleichbar sind die Ergebnisse mit der experimentellen Studie von Votta et al. (2020), die ebenfalls herausfanden, dass je größer der Interdentalraum war, desto besser im Vergleich die Interdentalraumbürsten abschnitten (Interdentalraumbürsten: 50 – 87 % vs. Interdentalraumpicks: 10 %). Auf weitere Similaritäten wird im Folgenden noch weiter eingegangen.

Das Testprodukt 1, welches über eine höhere Anzahl an Noppen verfügt, folgte in der Analyse auf Platz 2 und war meist effektiver als der Soft Pick Advanced und das Testprodukt 2, bei dem zusätzliche Nylonborsten parallel angebracht sind. Das zweite Testprodukt zeigte ein deutliches Reinigungsdefizit in der Auswertung, hatte jedoch bessere Werte als die herkömmlichen, bzw. schon käuflich erhältlichen Interdentalraumpicks (Testprodukt 1:  $30,69 \pm 19,93$  vs. Testprodukt 2:  $24,78 \pm 14,4$  % vs. Soft Pick Advanced:  $18,35 \pm 10,13$  %). Die höchste experimentelle Reinigungseffektivität wurde bei allen dentalen Hilfsmitteln im gleichschenkligen Dreieck gemessen (Interdentalraumbürste  $80,03 \pm 4,83$  % vs. Testprodukt 1:  $65,74 \pm 5,33$  % vs. Testprodukt 2:  $46,38 \pm 8,63$  % vs. Soft Pick Advanced:  $33,23 \pm 8,32$  %). Daher war es diese Interdentalraummorphologie, welche von allen getesteten Interdentalräumen am effektivsten gereinigt werden konnte. Daraus lässt sich schließen, dass diese gleichschenklige Morphologie des Interdentalraumes, welche in der Simulation die noch oberhalb der Schmelzzementgrenze liegenden Bereiche nachempfinden mit nur minimalem bis gar keinem Rückgang der Interdentalpapille, am effizientesten in der häuslichen Prophylaxe zu reinigen sein werden. Sobald ein Schrumpfen der Interdentalpapille eingetreten ist, werden andere Morphologien mit konvexen und unterhalb der Schmelzzementgrenze konkaven Flächen die effiziente Plaqueentfernung deutlich erschweren (Dörfer and Staehle, 2010).

Unabhängig von der Morphologie reinigten alle getesteten Interdentalraumbürsten auch in den verschiedenen Größen der Interdentalräume im Vergleich zu Interdentalraumpicks am effizientesten. Der höchste Wert wurde mittels der Interdentalraumbürste ISO 2 (0,9 mm) im Interdentalraum der Größe 1,0 mm erreicht ( $62,87 \pm 16,07$  %). Diese Interdentalraumbürstengröße war auch gleichzeitig die Vergleichsgröße zu den Interdentalraumpicks, welche mit dem Testprodukt 2 im kleinsten Interdentalraum von 1,0 maximal  $25,60 \pm 16,84$  % reinigten. Dies ergibt eine Differenz der experimentellen Reinigungseffektivität von rund 37 %, so dass die Interdentalraumbürsten knapp 2,5fach bessere Reinigungsleistungen erzielten.

Selbst in den großen Interdentalräumen von 1,3 mm erreichten die Interdentalraumpicks mit dem Testprodukt 1 maximal  $38,73 \pm 17,85 \%$ , wohingegen die Interdentalraumbürsten mit  $58,86 \pm 13,84 \%$  knapp anderthalbmals bessere experimentelle Reinigungsleistungen erreichten. Die 1,3 mm großen Interdentalräume wurden insgesamt besser durch Interdentalraumbürsten gereinigt als die mittlere Größe (1,1 mm), übertroffen von den Resultaten bei den 1,0 mm Interdentalraumbürsten (1,0 mm:  $60,05 \pm 16,8 \%$  vs. 1,1 mm  $55,25 \pm 13,32 \%$  vs. 1,3 mm  $58,86 \pm 13,84 \%$ ,  $p \leq 0,001$ ). Auch hier führte die größere Kontaktfläche zur Erhöhung der experimentellen Reinigungseffektivität. Somit wurde für den kleinsten Interdentalraum (1,0 mm) die ideal passende Interdentalraumbürste mit ISO 2 bestimmt („fitted“ – IDB). Dies zeigte sich 2020 auch in der Studie mit demselben Set-Up von Graetz et al. (2020), wo im gleichschenkligen Interdentalraum mit der Größe von 1,1 mm der ideale Interdentalraumpick („fitted“) untersucht wurde und eine experimentelle Reinigungsleistung von  $26,63 \pm 4,84 \%$  erreicht wurde. Vergleicht man dies mit der vorliegenden Studie, erreichen die zwei Testprodukte konstant in nahezu allen Versuchen deutlich höhere Werte als die Soft-Picks Advanced (T1:  $67,83 \pm 4,70 \%$  vs. T2:  $44,91 \pm 5,18 \%$ ).

Weiterhin zeigen sich im Vergleich der beiden In-vitro-Studien im konvexen und konkaven Interdentalraum vergleichbar niedrigere Werte als im gleichschenkligen Interdentalraum (konvex:  $14,76 \pm 7,55 \%$  vs.  $16,67 \pm 5,24 \%$  sowie konkav:  $17,81 \pm 7,67 \%$  vs.  $17,61 \pm 8,11 \%$ ,  $p \leq 0,001$ ).

Die Studie um Graetz et. al (2020) zeigte eine Überlegenheit der Soft Pick Advanced mit Elastomerfingern und einem höheren Taper im Vergleich zu anderen Interdentalraumpicks mit elastischen Lamellen und einem geringeren Taper. Diese zuvor vorgefundene Überlegenheit war Hintergrund zur Entwicklung der Testprodukte und in der vorliegenden Studie zu testen.

Der niedrigste Wert der experimentellen Reinigungsleistung fand sich in den kleinsten Interdentalräumen (1,0 mm) bei Testprodukt 1. Dies zeigt eine Diskrepanz zu den weiteren Versuchen der vorliegenden Studie, wo die besten Reinigungsergebnisse bei den Interdentalraumpicks beim Testprodukt 1 mit erhöhter Anzahl an Noppen vorgefunden wurde. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass das Testprodukt 1 durch einen zu hohen Kraftaufwand (im Mittel 1,14 N) bei Anwendung im kleinsten Interdentalraum in der gleichschenkligen Morphologie nur unzureichend eindringen konnte und wie mehrfach erwähnt einzelne Versuche nicht ausgewertet werden konnten.

Interessant ist im direkten Vergleich der Studienergebnisse von Graetz et al. (2020) und der vorliegenden Studie, dass die größeren Interdentalräume mit nicht angepassten Interdentalraumpicks („non-fitted“) schlechter gereinigt wurden. Beispielsweise erreicht der angepasste Soft Pick Advanced in der vorherigen In-vitro-Studie in einem konkaven großen (1,3 mm) Interdentalraum experimentelle Reinigungsleistungen von  $26,12 \pm 6,03 \%$ , in der dargestellten Studie liegen die Werte beim Soft Pick Advanced nur bei knapp der Hälfte mit  $15,12 \pm 3,76 \%$ . Bezieht man nun jedoch die weiteren

Testprodukte mit ein, zeigen diese ebenfalls „non-fitted“ eine höhere experimentelle Reinigungsleistung ( $T1: 34,52 \pm 13,22 \%$ ;  $T2: 17,53 \pm 5,52 \%$ ).

Daraus lässt sich schließen, dass der direkte Vergleich der Soft Pick Advanced höhere Werte zeigt, wenn diese angepasst sind, die Weiterentwicklungen der Soft Pick Advanced (Testprodukt 1 + Testprodukt 2) jedoch auch „non-fitted“ bessere experimentelle Reinigungsleistung erreichen. Es kann hypothetisiert werden, dass dies durch die erhöhte Anzahl an Noppen, bzw. Pilis gelingt, die in der Summe eine größere Fläche zu erreichen scheinen.

Weiterhin eindeutig sind die Ergebnisse für das Testprodukt 2, welches zusätzliche Nylonborsten aufweist. Dieses wies in allen getesteten IDR-Größen signifikant geringere experimentelle Reinigungsleistungen auf als die Interdentalraumbürsten (siehe bitte Tabelle 3). Teilweise lässt sich dies sich durch den Einführungswinkel und den Aufbau des Testproduktes 2 erklären (siehe bitte Abbildung 23). Laut Herstellerangaben soll das Testprodukt 2 so in den Interdentalraum eingeführt werden, dass die Nylonborsten nach kranial bzw. kaudal zeigen, um genau unter dem Kontaktpunkt approximal zu reinigen. Dies basiert auf der Annahme, dass eine Approximalkaries vor allem am und unterhalb des Kontaktpunktes entsteht (Salzer et al., 2015). Jedoch zeigt die vorliegende Auswertung, dass die Reinigungswirkung der seitlichen Kontaktflächen durch die parallel dazu stehenden Nylonborsten nicht effektiv ist. Würde man diese Nylonborsten um  $90^\circ$  gedreht in den Interdentalraum einführen, kann angenommen werden, dass sich die experimentelle Reinigungsleistung eher erhöhen würde, aber leider auch der Widerstand beim Einführen deutlich steigen wird. Hier zeigt sich wiederum der große Vorteil der zirkulären Anordnung der Nylonborsten bei konventionellen Interdentalraumbürsten, die alle Flächen durch ihre hohe Elastizität und dichte Besetzung gleichmäßig erreichen können.



*Abbildung 23: Einführung des Testproduktes 2 in den Interdentalraum (Quelle: Sunstar Deutschland GmbH, Schöna, Deutschland; Sunstar Suisse SA, Etoy, Schweiz)*

Trotzdem haben die konventionellen Interdentalbürsten genau durch diese Konstruktionsweise mit einem Metalldraht und den konzentrisch angeordneten Nylonborsten den Nachteil leichter zu verbiegen und mehr Missempfindungen zu verursachen (Abouassi et al., 2014). Deshalb wird in experimentellen Studien versucht die Parameter der Plaqueentfernung im Interdentalraum zu analysieren, um bestehende Designs entweder weiter zu entwickeln oder neue Methoden zu



generieren. Votta et al. (2020) konnte beispielsweise für kleine Interdentalräume von 1,0 mm Durchmesser eine experimentelle Reinigungsleistung für konventionelle Interdentalraumbürsten von 45 bis gar 95 %, für Interdentalraumpicks immerhin noch von 30 - 67 % ermitteln. In der vorliegenden Studie erreichten die Interdentalraumbürsten vergleichbare Reinigungsleistungen mit 43 – 77 %, jedoch schnitten die getesteten Interdentalraumpicks inklusive Testprodukte mit circa 20 – 30 % deutlich schlechter ab. Die teils sehr hohe experimentelle Reinigungsleistung der Interdentalraumbürsten in der Studie von Votta et al. (2020) lässt sich mit dem dort verwendeten Versuchsaufbau erklären. Hier wurde das Prinzip von Baumgartner (Baumgartner et al., 2019) verwendet, um die Reinigungswirkung an simulierten parallelen Wänden zu messen. Diese bestanden aus Metallblöcken, die mit Titanoxid schwarz lackiert wurden. Die Plaque wurde mittels weißer Pulverlösung aus Titanoxid und Ethanol dargestellt. Dadurch unterscheidet sich der Aufbau stark von der vorliegenden Studie, da so von Votta et al. (2020) die individuelle Anatomie des Interdentalraumes nicht berücksichtigt wurde. Die vorliegende Studie berücksichtigte hingegen unterschiedliche Morphologien, welches teilweise die schlechtere experimentelle Reinigungsleistung erklärt, jedoch muss ergänzend auch der Einfluss der Haftung des jeweils simulierten Biofilms berücksichtigt werden. Trotzdem zeigen beide In-vitro-Studien erneut die Assoziation zwischen der Größe des Interdentalraumes und der Reinigungsleistung auf: mit abnehmender Größe des Interdentalraumes steigt die Reinigungsleistung von konventionellen Interdentalraumbürsten, wenn auch in der vorliegenden Studie dies nur für die konkave Interdentalraummorphologie vorgefunden wurde. Umgekehrt lassen sich grundsätzlich die Beobachtungen bestätigen, dass größere Interdentalraumbürsten zu einer höheren Reinigungseffektivität führen (Votta et al., 2020, Wolff et al., 2006). Diese Beobachtung kann nahezu komplett mittels der vorliegenden In-vitro-Untersuchung bestätigt werden mit einer Ausnahme, dass die Interdentalraumbürsten der ISO 3 Größe (1,2 mm) eine geringere experimentelle Reinigungsleistung aufwiesen als die ISO 2 Größe (0,9 mm) im konkaven 1,1 mm Interdentalraum.

Dies kann damit begründet werden, dass mit der ISO 2 großen Interdentalraumbürste (0,9 mm) im konkaven Interdentalraum von 1,1 mm die optimale Größe des Hilfsmittels zur Reinigung eingesetzt wurde, was als „fitted“ bezeichnet wurde.

Ein weiterer Unterschied in den verschiedenen Studienergebnissen, der unbedingt bei der Bewertung der Ergebnisse beachtet werden sollte, findet sich in der Häufigkeit der simulierten Putzzyklen. In der vorliegenden Untersuchung wurden alle Versuchsreihen zehnmal durchgeführt, in der Studie beispielsweise von Votta et al. (2020) wurde die experimentelle Reinigungsleistung nach einem und nach fünf Reinigungszyklen gemessen, wobei alle Testprodukte eine verbesserte Reinigungsleistung bei häufigerer Nutzung des Hilfsmittels aufwiesen (45 vs. 95 %). Auch Baumgartner et al. (2019), fand nach einem, fünf und 10 Zyklen steigende experimentelle Reinigungsleistungen vor (21 vs. 31 % vs. 35

%). Hierbei erreichten die „waist-shaped“ Interdentalraumbürsten höhere experimentelle Reinigungsleistungen als die zylindrischen Typen (im Mittel ca. 5 % bessere Werte). Diese Ergebnisse wurden in einer nachfolgenden In-vitro-Studie bestätigt (Paque et al., 2020).

Vergleicht man die Ergebnisse der „waist-shaped“ Interdentalraumbürsten der Studie um Votta ( $56 \pm 20$  %) nach 10 Reinigungszyklen im Durchschnitt mit den zylindrischen Interdentalraumbürsten der vorliegenden Untersuchung ( $58,33 \pm 14,92$  %), kann dies nicht bestätigt werden, sodass „waist-shaped“ und zylindrische Interdentalraumbürsten als gleichwertig eingestuft werden können.

In einer älteren In-vitro-Untersuchung von Wolff et al. (2006) wurden deutlich größere Interdentalraumbürsten als in nachfolgenden Studien beschrieben genutzt, die jedoch ebenfalls bezogen auf kleine, mittlere und große Interdentalräume ausgewertet wurden, wodurch ein Vergleich mit der vorliegenden Studie möglich wird. Im kleinsten Interdentalraum erreichten Wolff et al. (2006) mit der kleinsten getesteten Interdentalraumbürste eine Reinigungsleistung von  $86 \pm 3\%$ , welche mit rund 26 % deutlich höher liegt als in der vorliegenden Studie. Zu einer ähnlich hohen experimentellen Reinigungsleistung kommen Votta et al. (2020). Dabei sollte erneut beachtet werden, dass auch Wolff et al. (2006) und Ince Kuka (2018) eine individuelle Anatomie des Interdentalraumes simulierten, indem sie extrahierte humane Zähne verwendeten, was den gedruckten Replikaten von dreidimensional gescannten Zähnen der vorliegenden Studie entspricht, währenddessen Votta et al. (2020) nur an stark vereinfachten Morphologien testete.

Auch muss der Einfluss der Simulation der Plaque unbedingt bei der Interpretation beachtet werden, da Trockenlacke (Wolff et al., 2006b) oder Trockenpulver (vorliegende Studie; Ince Kuka, 2018)) das Ergebnis der Reinigungsleistung signifikant beeinflussen werden. Leider liegen keine Vergleichsdaten der verschiedenen Techniken vor, was Gegenstand zukünftiger Forschungsvorhaben sein sollte, ebenso wie die fehlende Reproduzierbarkeit der Interdentalraumreinigung eine Diskrepanz der Ergebnisse bedingen kann (z.B. per Hand geführt (Wolff et al. 2006) versus maschinell geführt (Votta et al. 2020; vorliegende Studie). Darüber hinaus stellt die hohe Vielfalt an unterschiedlichen Interdentalraummorphologien und Größen in Abhängigkeit patientenspezifischer Faktoren (z.B. Attachmentverlust, Zahnfehlstellungen, entzündliche Schwellung der Interdentalpapille) eine Vereinfachung der Methode dar, da im Gegensatz zu vorherigen experimentellen Studien mit Echtzähnen (Wolff et al., 2006, Ince Kuka, 2018) die Replikate in unbegrenzter Anzahl gedruckt werden können. Durch dieses Verfahren kann eine höhere Vielfalt an Morphologien realisiert werden, beispielsweise mittels der kleinen Zahnzwischenräume der gesunde Zustand ohne Attachmentverlust und mit einer intakten Papille, die den Interdentalraum habituell verschließen würde (Sanz et al., 2020), simuliert werden. Dieser gesunde Gingivazustand wird in den meisten In-vivo-Studien als Basis genutzt (Graziani et al., 2018, van der Weijden et al., 2021). Andererseits konnten auch Replikate größerer Interdentalräume gedruckt werden, welche einen pathologischen Zustand simulieren mit

bereits eingetretenem Attachmentverlust und Rückgang der Interdentalspapille, sodass typische „schwarze Dreiecke“ wahrnehmbar sind (Sanz et al., 2020).

Aber im Allgemeinen muss sowohl für die vorliegende Studie als auch viele andere In-vitro-Untersuchungen (Votta et al., 2020, Wolff et al., 2006, Ince Kuka, 2018) kritisch angemerkt werden, dass zwar in den Modellen der Verlust der Interdentalspapille simuliert werden kann, jedoch ist eine entzündlich bedingte Schwellung dieser, z.B. bei Gingivitis ohne Verlust an Attachment, nicht simulierbar. Bisher lagen nur klinische Studiendaten vor, die zeigen, dass neben der konventionellen Interdentalraumbürste nur Zahnhölzchen scheinbar ein Verdrängen der interdentalen Weichgewebe nach apikal ermöglichen, sodass teils subgingival die Zahnoberfläche im Zahnzwischenraum gereinigt wurde was mit einer nachfolgenden Reduktion des Blutungs-/ Gingivitisindex verbunden war (Sälzer et al., 2015). Dieser spezifischen Problematik der interdentalen Biofilmreduktion bei Parodontitispatienten mit Retraktion der Interdentalspapille hat sich eine ganz aktuelle klinische Studie von Gennai et al. (2022) angenommen. Die klinischen Ergebnisse sind kongruent des Reviews um van der Weijden et al. (2021) und zeigen einen Vorteil bei der zusätzlichen Nutzung von Interdentalraumbürsten sowie Interdentalraumpicks zur Zahnbürste gegenüber der alleinigen Nutzung der Zahnbürste mit oder ohne Verwendung von Zahnseide zur Reduktion der Biofilmmenge oder der gingivalen Entzündung (Gennai et al., 2022).

Ebenfalls fanden die Autoren erneut keine signifikanten Unterschiede zwischen konventionellen Interdentalraumbürsten und Interdentalraumpicks. Dies kann dahingehend interpretiert werden, dass für die neu- und weiterentwickelten häuslichen Hilfsmitteln zur Interdentalraumreinigung aus In-vitro-Sicht zwar signifikante Unterschiede zur Reinigungsleistung der Produkte gemessen werden können, jedoch diese klinisch zu vernachlässigen sind. Hingegen scheinen andere Parameter, die sich nur in-vivo untersuchen lassen, einen größeren Einfluss auf die Effektivität der Plaquerreduktion im Interdentalraum zu haben, um orale Erkrankungen vorzubeugen oder diese zu therapieren, weshalb aus klinischer Sicht die konventionellen Interdentalraumbürsten weiterhin den Goldstandard in der häuslichen Interdentalraumprophylaxe darstellen.

#### 5.2.2 Reinigungskraft bzw. Kraftwiderstand (ERK)

Wie auch bei der experimentellen Reinigungseffektivität zeigte in allen Morphologien und Größen künstlicher Interdentalräume die vorliegende Studie einen deutlichen Unterschied zwischen Interdentalraumbürste und Interdentalraumpick/ Testprodukte. Die Interdentalraumbürsten hatten signifikant bessere (niedrigere) Kraftwerte als die Interdentalraumpicks. Analog zur experimentellen Reinigungseffektivität hing die von den Interdentalraumbürsten benötigte Kraft von der Bürstengröße sowie der Ausfüllung des interdentalen Raumes ab. Wie schon erläutert, besteht hier der Zusammenhang zwischen der relativen Größe der Interdentalraumbürste in Bezug auf den künstlichen Zahnzwischenraum. Die höchste experimentelle Reinigungskraft wurde im gleichschenkligen Dreieck

gefunden (im Vergleich zu konvexen und konkaven Interdentalraum). Die höchste experimentelle Reinigungskraft korreliert somit mit der höchsten experimentelle Reinigungseffektivität, die ebenfalls im gleichschenkligen Dreieck zu finden ist. Wie schon beschrieben, führt die größere Kontaktfläche zu einer höheren experimentelle Reinigungseffektivität, aber im Zuge dessen eben auch zu einem erhöhten Kraftaufwand. Prüft man die Interdentalraumpicks, wurde die niedrigste experimentelle Reinigungskraft durch die Soft Picks Advanced erzielt, die auch die niedrigste experimentelle Reinigungseffektivität erreicht haben.

Betrachtet man unabhängig von der Morphologie die reinen Größen der Interdentalräume, wurde im 1,0 mm Interdentalraum die geringste experimentelle Reinigungskraft mittels der Interdentalraumbürste ISO 1 erzielt ( $0,3 \pm 0,09$  N,  $p \leq 0,001$ ). Somit könnte sich die basierend auf der experimentellen Reinigungseffektivität getätigte Aussage widersprechen, dass für diesen Interdentalraum die Interdentalraumbürste ISO 2 komplett passend ist („fitted“). Hier lag die experimentelle Reinigungskraft fast doppelt so hoch bei  $0,53 \pm 0,16$  N. Daraus lässt sich hypothetisieren, dass eine Zwischengröße vermutlich die perfekte Wahl aus Reinigungsleistung sowie Kraftwiderstand darstellen würde („fitted“), diese jedoch im Handel nicht erhältlich ist. Da die effektive Reinigung höher gewichtet wird, stellt die Interdentalraumbürste ISO 2 weiterhin die passende Größe dar („fitted“). Beim 1,1 mm großen Interdentalraum ähnelten sich die Werte für Interdentalraumbürsten und Soft Pick Advanced; im größten Interdentalraum mit 1,3 mm wurde hingegen die geringste experimentelle Reinigungskraft mittels der Soft Pick Advanced erreicht ( $0,47 \pm 0,35$  N,  $p \leq 0,001$ ). Somit sind die käuflich erhältlichen Interdentalraumpicks zwar in der Reinigungseffektivität deutlich geringer, jedoch lässt sich mit Hilfe der niedrigen Werte für die experimentelle Reinigungskraft der vorliegenden Studie die in-vivo nachgewiesene hohe Patientenakzeptanz erklären (van der Weijden et al., 2021).

Weiterhin zeigt sich, dass die Anwendung von Testprodukt 2 (Kombination Interdentalraumbürste + Interdentalraumpick) im 1,0 mm und 1,1 mm großen Interdentalraum eine teilweise signifikant größere experimentelle Reinigungskraft ausweist als die der Interdentalraumbürste. Im größten Interdentalraum fand sich jedoch kein Unterschied (IDB:  $0,73 \pm 0,41$  N vs. Testprodukt 2:  $0,66 \pm 0,18$  N,  $p = 1,000$ ).

Dies lässt sich anhand der Größenadaption erklären, denn die hier passende Größe der Interdentalraumbürste entspricht exakt der Größe der Interdentalraumpicks (ISO 2). Somit sind die Testprodukte für die kleineren Interdentalräume zu groß und können nur unter höheren experimentellen Reinigungskräften angewendet werden.

Die insgesamt höhere experimentelle Reinigungskraft, gemessen für die Interdentalraumpicks, kann wiederum erklärt werden durch die größere Kontaktfläche zwischen den Gummifingern und der Zahnoberfläche (geringerer elastischer und breiterer Durchmesser im Vergleich zu Nylonborsten von

Interdentalraumbürsten), sowie durch die erhöhte Haftreibung des thermoplastischen Elastomers im Vergleich zu Nylon auf dem Interdentalreplikate aus Kunststoff. Weiterhin muss angenommen werden, dass sich die raue Oberfläche der Interdentalraumpicks beim Kontakt mit der in der vorliegenden Studie simulierten künstlichen Zahnoberfläche stärker verformt und somit bei Verwendung einen größeren Widerstand erzeugt als die Oberfläche der glatten Nylonfilamente (Graetz et al., 2020). Dies ist als Limitation anzusehen und könnte in den Versuchsreihen eine negative Auswirkung auf die Ergebnisse der Interdentalraumpicks gehabt haben. Grundsätzlich ist festzustellen, dass die dünnen Nylonborsten der getesteten Interdentalraumbürsten sich mit einem geringeren Widerstand biegen lassen als die elastomeren Filamente der Interdentalraumpicks. Dies zeigt sich besonders deutlich in kleineren Interdentalräumen, in denen die aufzuwendende Kraft ansteigt (siehe bitte Tabelle 4).

Vergleicht man die Kraftwerte der untersuchten Studie mit anderen In-vitro-Studien, so finden sich auch hier viele Übereinstimmungen. In der Studie von Votta et al. (2020) wurde ebenfalls die größte Kraft bei den Interdentalraumpicks gemessen, wobei die Autoren ausführen, dass erwartungsgemäß die anzuwendende Kraft mit größerem Abstand innerhalb jeder getesteten Bürste abnahm (Votta et al., 2020). Diese Aussage kann in der vorliegenden Studie bei allen Testprodukten bestätigt werden. Mögliche maximale Kraftspitzen wurden weder in der vorliegenden Studie noch in der Studie von Votta et al. (2020) mittels Interdentalraumbürsten überschritten, dies ergab sich nur bei Anwendung der Interdentalraumpicks.

Bisher wurde der Kraftaufwand während der Anwendung von interdentalen Reinigungshilfsmitteln nur in wenigen Studien getestet. Neben Votta et al. (2020) zeigte auch die Studie von Wolff et al. (2006b), dass dreieckige Interdentalraumbürsten einen geringeren Kraftaufwand während der Reinigung benötigen. Wolff et al. (2006b) maßen bei dreieckigen Interdentalraumbürsten  $0,39 \pm 0,06$  N, was den Ergebnissen der vorliegenden Studie in Abhängigkeit von der Größe der Interdentalraumbürste entspricht (ISO 1:  $0,43 \pm 0,05$  N). Wurden hingegen größere Interdentalraumbürsten angewendet, fand sich eine nahezu doppelt so große experimentelle Reinigungskraft in der vorliegenden Studie (ISO 2:  $0,72 \pm 0,08$  N). Betrachtet man die Werte der experimentellen Reinigungskraft unabhängig der Morphologie unter Berücksichtigung der Größe zeigten sich erneut vergleichbare Ergebnisse von  $0,41 \pm 0,18$  N mit den Studienergebnissen von Wolff et al. (2006b).

In der Studie von Baumgartner et al. (2019), deren Aussage den Ergebnissen der vorliegenden Studie in Bezug auf die experimentelle Reinigungseffektivität widersprach, fanden die Autoren ähnliche Werte der experimentellen Reinigungskraft bei zylindrischen oder taillierten Interdentalraumbürsten vor.

Auch bei Betrachtung der Ergebnisse der experimentellen Reinigungskraft sollten Limitationen bedingt durch den Versuchsaufbau diskutiert werden. Als Beispiel muss der Unterschied in der Beschaffenheit des Kunststoffes der Interdentalraumreplikas und dem echten Zahnschmelz bedacht werden. Die 3D-

Kompositreplikate hatten eine Oberflächenrauigkeit von 25 µm und waren somit rauer als natürlicher Zahnschmelz mit ca. 10 µm (Webb et al., 2016). Somit wird die In-vitro-Reinigung mit einer erhöhten Haftreibung der Hilfsmittel auf der simulierten Zahnoberfläche einhergehen, nochmals verstärkt durch die bereits diskutierte fehlende Gleitwirkung des Speichels, die die Reinigung in den rauerer Oberflächen erschweren (Graetz et al., 2022a). Dennoch, auch in der Mundhöhle können höhere Oberflächenrauigkeiten auftreten, z.B. wenn der häusliche zu entfernende Biofilm auf bereits mineralisierten Belägen, wie z.B. Zahnstein neu entsteht oder auf Füllungsmaterialien (Tschernin, 2003). Auch muss das in vorherigen Studien mit dem Versuchsaufbau (Graetz et al. 2020) bereits dokumentierte „Hintergrundrauschen“ des Kraftsensors von <0,01 N als eine Einschränkung betrachtet werden, da alle gemessenen Kraftwerte um diesen Wert nachträglich korrigiert werden müssen. Jedoch kann angenommen werden, dass gerade bei sehr starren/ rigiden Hilfsmitteln und der methodenimmanenten fehlenden Zahnbeweglichkeit durch diese Korrektur eine Verbesserung der Vergleichbarkeit mit In-vivo-Studiendaten ermöglicht wurde.

### 5.2.3 Verhältnis von experimenteller Reinigungseffektivität zu -kraft

Im Folgenden soll das Verhältnis beider Parameter zueinander nochmals im Detail diskutiert werden. Grundsätzlich ist es Ziel aller häuslichen Hilfsmittel zur Interdentalraumreinigung die Zahnoberflächen im Zwischenraum zu reinigen. Da es sich um einen mechanischen Vorgang handelt, ist hierfür ein entsprechender Kraftaufwand notwendig. Bereits 2006 wurde deshalb von der Heidelberger Arbeitsgruppe um Prof. Dörfer (Dörfer (2006)) vorgeschlagen einen Quotienten aus der Reinigungseffektivität und der dabei aufgewendeten Kraft zu bilden. Dörfer setzte beide Variablen in 1:1 Relation, was nachfolgend noch aufgrund eigener Beobachtungen zu diskutieren sein wird.

Dörfer (2006) konnte in seiner In-vitro-Studie zeigen, dass trotz unterschiedlicher Interdentalraummorphologie die experimentelle Reinigungskraft für alle getesteten Interdentalraumbürsten konstant blieb, was in dieser Studie bestätigt wurde (Quotient aus Reinigungseffektivität/Kraftwiderstand in %/N: gleichschenklige:  $1,33 \pm 0,47$  vs. konvex:  $1,38 \pm 0,53$  vs. konkav  $1,13 \pm 0,56$ ,  $p \leq 0,001$ ). Vergleicht man dies mit dem für die Studie entwickelten Quotienten, zeigte sich hingegen eine deutliche Diskrepanz zwischen der gleichschenkligen Morphologie und der konvexen/konkaven (Quotient aus Reinigungseffektivität/Kraftwiderstand in %/N: gleichschenklige:  $1,1 \pm 0,39$  vs. konvex:  $0,64 \pm 0,22$  vs. konkav:  $0,62 \pm 0,35$ ,  $p \leq 0,001$ ), wobei wiederum der kleinste Quotient im konkaven Interdentalraum gemessen wurde. Im gleichschenkligen Interdentalraum wurden in der Studie um Dörfer et. al (2006) der höchste Quotient mit 0,52 %/N gemessen, gefolgt von der konkaven (0,23 %/N) und konvexen Interdentalraummorphologie mit 0,2 %/N ( $p \leq 0,001$ ). Es wurde von Dörfer et. al hypothetisiert, dass dieser nahezu doppelt so hohe Quotient in der gleichschenkligen Interdentalraummorphologie durch eine besonders gute Adaption der Borsten an die Zahnflächen erklärt werden kann. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie mit dem höchsten Quotienten von 0,24

%/N zeigten sich ebenfalls im gleichschenkligen Interdentalraum (Quotient aus Reinigungseffektivität/Kraftwiderstand in %/N: konvex 0,03 %/N; konkav 0,05 %/N).

Wenn der Quotient hinsichtlich der Größen der untersuchten Interdentalraumbürsten differenziert wird, fand Dörfer (2006) eine statistisch signifikante Differenz im kleinsten Interdentalraum versus dem größten Interdentalraum (IDR) (Quotient aus Reinigungseffektivität/Kraftwiderstand in %/N: 1,0 mm IDR:  $1,60 \pm 0,47$  vs. 1,1 mm IDR:  $1,0 \pm 0,44$  vs. 1,3 mm IDR:  $1,0 \pm 0,49$  %/N,  $p \leq 0,001$ ). Die Auswertung der vorliegenden Studie bestätigen dieses Ergebnis. Da der gleichschenklige Interdentalraum auch gleichzeitig das kleinste Volumen mit eng aneinander liegenden Zahnflächen darstellt, scheint hier die höchste Adaptation der Borsten vorzuliegen, denn die Reibungskraft steht im direkten Verhältnis mit der Kontaktfläche, weshalb immer auf eine optimale Anpassung der Bürsten im Interdentalraum geachtet werden muss (Bourgeois et al., 2015, Ng and Lim, 2019). Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit Hilfe des Quotienten aus experimenteller Reinigungseffektivität und -kraft die untersuchten Interdentalraumbürsten durch ihren Aufbau mit Drahtkern und zylindrisch angeordneten Nylonborsten die besten Ergebnisse zeigen. Primär liegt natürlich der Focus in der Entwicklung der Bürsten auf der Reinigungsleistung (Zähler im Quotienten), jedoch sollte die bei Anwendung notwendige Kraft nicht vernachlässigt werden (Nenner im Quotienten), da davon ausschlaggebend die Patientenakzeptanz abhängt (Abouassi et al., 2014).

Ein hoher Quotient aus experimenteller Reinigungseffektivität und -kraft nach Dörfer (2006) ist somit ein guter Indikator für einen geringen Kraftaufwand bei der Anwendung der Interdentalraumbürsten, jedoch musste dieser für die in der vorliegenden Studie getesteten Interdentalraumpicks/Testprodukte um die geänderten Produkteigenschaften (Kunststoffkern mit Filamenten aus Gummi/Silikon) dahingehend modifiziert werden, dass nun das Quadrat der experimentellen Reinigungskraft im Zähler steht. Somit können die in der systematischen Übersichtsarbeit von van der Weijden et al. (2021) beschriebenen Produktvorteile mit geringeren Abrasionswerten, höherer Patientenakzeptanz bei gleichzeitig ähnlicher klinischer Wirksamkeit (Reduktion von Entzündungszeichen) der Interdentalraumpicks gegenüber den Interdentalraumbürsten besser berücksichtigt werden.

### 5.3 Diskussion der Methode

Die Kieler Arbeitsgruppe um Prof. Dr. Graetz der Klinik für Zahnerhaltung und Parodontologie, Funktionsbereich Parodontologie entwickelte vor ca. 3,5 Jahren in Kooperation mit dem Institut für Mechatronik der Fachhochschule Kiel (Prof. Dr.-Ing. Thomas Rinder) ein In-vitro-Verfahren zur Messung der experimentellen Reinigungseffektivität und -kraft unter Nutzung von dreidimensionalen Replika humaner Interdentalräume. Somit wurde erstmals eine standardisierte In-vitro-Methode geschaffen, um verschiedene häusliche mechanische Reinigungshilfsmittel in verschiedenen Interdentalraummorphologien in reproduzierbarer Weise untersuchen zu können. Denn um die

Reinigungswirkung von Interdentalraumbürsten zu verstehen, muss nicht nur das Material, die Länge oder der Durchmesser berücksichtigt werden, welches vielfach untersucht wurde (Wolff et al., 2006b, Votta et al., 2020, Baumgartner et al., 2019, (Jordan et al., 2014), Larsen et al., 2017, (Wolff et al., 2006a), sondern es muss auch die Morphologie des Interdentalraumes beachtet werden (Hennequin-Hoenderdos et al., 2018). In einer ersten Studie konnten methodisch bedingte Fehler identifiziert werden und im Folgenden durch Weiterentwicklungen beseitigt oder zumindest soweit minimiert werden, dass ein standardisiertes Versuchsfeld nun zur Verfügung stand, welches jederzeit auf neue Testprodukte einfach adaptiert werden kann (Graetz et al., 2020).

Neben dem einfachen Aufbau, der hohen Reproduzierbarkeit und dem kostengünstigen Betrieb der Versuchsvorrichtung besteht weiterhin ein Vorteil des Versuchsaufbaues darin, dass die zu testenden Reinigungshilfsmittel in definierter Richtung und Winkel geführt werden. Eine derartig hohe Reproduzierbarkeit ist bei händischer Führung vorhergehender Studien nicht gegeben (Dörfer 2006). Andererseits unterscheidet sich diese simulierte lineare Bewegung im Interdentalraum deutlich von der in-vivo Nutzung der Hilfsmittel durch den Anwender. Häufig muss klinisch die Einführung in den Interdentalraum leicht abgewinkelt erfolgen, um die Zahnfleischpapille minimal zu verdrängen, die habituell den Zugang erschwert. Auch sind rein lineare Bewegungen, beispielsweise im Seitenzahnbereich oder von oral in der Mundhöhle gar nicht möglich, wie es Gegenstand einer aktuellen klinischen Untersuchung war (Günay H, 2019). Ebenfalls muss bedacht werden, dass in-vivo die Eindringtiefe nicht wie in der vorliegenden Simulation reproduzierbar auf eine bestimmte Länge festgelegt werden kann (hier: 1 cm) und nur von einer Seite, weshalb die vorliegenden In-vitro-Ergebnisse gerade für den Seitenzahnbereich mit breiteren Interdentalräumen und erschwerem Zugang nicht 1:1 in der klinischen Anwendung zu erwarten sind. Gerade die beidseitige Anwendung im Interdentalraum verbessert signifikant das Reinigungsergebnis in-vivo (Günay H, 2019). Obwohl viele Menschen die Interdentalraumhilfsmittel nur von vestibulär anwenden, sollten in zukünftigen In-vitro-Studien eine beidseitige Anwendung simuliert und untersucht werden, sodass eine Instruktion der Interdentalraumhygiene noch individueller erfolgen kann.

Hingegen sind die vorgefundenen In-vitro-Ergebnisse einer individuellen Größenanpassung der Interdentalraumhilfsmittel 1:1 übertragbar auf die In-vivo Situation und bestätigen nochmals die Bedeutung der professionellen Größenanpassung im Rahmen der zahnärztlichen Prävention und Prophylaxe. Einen großen Nachteil des Versuchsaufbaus sieht die Promovendin in der Simulation des oralen Biofilmes mittels Pulver, da so weder Speichel noch Sulkusflüssigkeit als „Gleitfilm“ im Interdentalraum fungieren (Pulver führt zum Verschmieren und eine quantitative Auswertung der Reinigungseffektivität ist nicht mehr möglich). Dies wäre aber sehr wünschenswert, da angenommen werden kann, dass insbesondere die Filamente der Interdentalraumpicks aus Silikon/Gummi eine deutlich verringerte Haftreibung auf der Kunststoffoberfläche der Replikas hätten. Dies zu



untersuchen war Gegenstand eines nachfolgenden Promotionsvorhabens von Ann-Kristin Hårdter der Klinik für Zahnerhaltung und Parodontologie, da dieser Aspekt wiederholt kontrovers diskutiert wurde (Wolff et al., 2006b, Votta et al., 2020). Die Simulation eines oralen Biofilms mittels Lacken oder Pulver anstatt der Verwendung von künstlichen Biofilmen ist sicherlich kostengünstiger und einfach zu realisieren, jedoch werden viele Eigenschaften eines oralen Biofilms (strukturelle Integrität, Viskosität, Fließverhalten, mechanische Stabilität) dadurch vernachlässigt, die aber für die Wirkung auf den menschlichen Organismus von herausragender Bedeutung sind (Auschill et al., 2004, Arweiler et al., 2004, Marsh and Zaura, 2017). Der Einsatz eines artifiziellen Biofilms zusammen mit einer weiteren Verringerung der Oberflächenrauigkeit der Replikate im 3D Druckverfahren sollte helfen das natürliche Haftungsverhalten des dentalen Biofilms auf der Zahnhartsubstanz besser simulieren.

Ein letzter Einflussfaktor, den es gilt zu diskutieren, ist die fehlende Simulation der Zahnbeweglichkeit in-vitro in der vorliegenden Studie. Da beim parodontalgesunden Patienten eine Auslenkung von 0,05 bis 0,1 mm bei Kräften bis zu 10 N gemessen wurde (Eickholz, 2007), muss angenommen werden, dass die gemessenen experimentellen Kraftwerte höher sind als in in-vivo, wo durch die Resilienz eine gewisse Reduktion des Kraftaufwandes bei Anwendung auftritt. In Kombination mit der bereits erwähnten fehlenden Gleitwirkung durch Speichelbenetzung der zu reinigenden Zahnoberflächen sollten die Daten der experimentellen Reinigungskraft eher als ein Maximum, sozusagen als „worst case scenario“, betrachtet werden. Trotzdem sollten zukünftige experimentelle Studien im Versuchsaufbau eine Simulation der Zahnbeweglichkeit integrieren, beispielsweise durch ein in alle Richtungen flexibles Aufhängen der Replika.

Andererseits sollten auch die Vorteile den aufgezählten Nachteilen der In-vitro-Methode gegenübergestellt werden. Nur in-vitro ergibt sich bisher die Möglichkeit der planmetrischen Auswertung residualer (simulierter) Biofilmreste auf den interdentalen Flächen im Interdentalraum. Auch die Möglichkeit die Einführkräfte im Vorfeld genau definieren zu können oder andererseits die notwendigen Kräfte zur Anwendung der Hilfsmittel mit hoher Genauigkeit reproduzierbar messen zu können, lässt sich nur in-vitro umsetzen. Beispielsweise nehmen Anwender ein und dieselbe Kraft zur Bewegung von konventionellen Interdentalraumbürsten unterschiedlich wahr, was teils zu sich widersprüchlichen Empfindungen der mechanischen Hilfsmittel in klinischen Studien führte (Abouassi et al., 2014). Einige berichten bereits bei dem minimal notwendigen Kraftaufwand während der Einführung des Hilfsmittels in den Interdentalraum von Missempfindungen, andere hingegen empfinden erst ab Kräften von ca. 3 N Schmerzen (Dörfer and Staehle, 2010). Es ist aber anzunehmen, dass ab 5 N eine Anwendung vom überwiegenden Anteil der Bevölkerung als unangenehm empfunden wird und mit dieser größeren Kraft auch Schäden an Hart und vor allem am Weichgewebe sowie eine nachlassende Akzeptanz einhergehen wird (Graetz and Sälzer, 2020), weshalb dies auch als der maximal messbare Bereich des Sensors gewählt wurde. Es kann angenommen werden, dass bei

regelmäßiger Anwendung von Interdentalraumbürsten für die meisten Menschen das Hauptaugenmerk auf einer guten Reinigungsleistung ohne dabei auftretende Schmerzen liegt. So kann geschlussfolgert werden, dass die in der vorliegenden Studie in-vitro gemessenen Kraftwerte mit minimal 0,17 bis maximal 2,62 N gut toleriert würden, da sie auf gleicher Höhe wie bei der Anwendung von Zahnbürsten liegen (Van der Weijden et al., 1998).

Zum Abschluss sei noch ein besonderer Umstand der vorliegenden Studie hervorgehoben. Einerseits wurde die Interdentalraumbürste als „Goldstandard“ in allen Morphologien getestet und hierbei wurden nicht nur die passende ISO Norm (wie es in klinischen Studien für die Probanden ausgewählt wird) getestet („fitted-IDB“), sondern auch sogenannte „non-fitted“ Versuche durchgeführt. Dies bedeutet, dass erstmals ein direkter Vergleich von passenden Interdentalraumbürsten zu kleineren oder größeren (also „non-fitted“) Interdentalraumbürsten systematisch getestet und ausgewertet wurde. Wie in einer Studie um Bourgeois et al. (2015) dargestellt, bedingt die zu kleine Größe einer Interdentalraumbürste eine geringere Reinigungseffektivität. Andererseits wird aber eine zu große Interdentalraumbürste für den jeweiligen Interdentalraum die Gefahr einer Gingivatraumatisierung bergen und somit nachfolgend eine verringerte Patientenakzeptanz auslösen (Bourgeois et al., 2015). Derartige, oftmals subjektive Empfindungen konnten in der vorliegenden In-vitro-Studie teils hinterfragt werden, da bewusst auf eine Anpassung der getesteten Interdentalraumhilfsmittel verzichtet wurde, um die typische Situation nicht-instruierter Patienten zu simulieren. Es kann angenommen werden, dass Patienten in der häuslichen Prophylaxe maximal 2 bis 3 verschiedene Größen der Interdentalraumbürsten/-picks anwenden – noch mehr würde eher überfordern (Graetz and Sälzer, 2020). Jedoch stellt dies leider einen Kompromiss dar, da abhängig von der Anzahl unterschiedlich großer Interdentalräume trotzdem alle Interdentalräume gleich effektiv gereinigt werden sollten, um einen maximalen Effekt der Instruktion und Motivation der häuslichen Mundhygiene zu erreichen (Graetz et al., 2022b). Hier können die Ergebnisse der vorliegenden experimentellen Studie weiterhelfen, da sie ein breites Spektrum an verschiedenen dentalen Interdentalraumhilfsmitteln hinsichtlich deren Reinigungseffektivität/-kraft getestet hat und somit als Basis für einzelne klinische Empfehlungen dienen kann.

## 6. Zusammenfassung

Die tägliche Reinigung der Zähne mittels Zahnbürste und Zahnpasta wird heutzutage als obligat zur Vermeidung von oralen Erkrankungen wie Karies, Gingivitis und Parodontitis angesehen. Bei alleiniger Anwendung von Hand- und elektrischer Zahnbürste werden jedoch nur ca. 60 % der Zahnoberfläche gereinigt. Insbesondere der Interdentalraum wird hierbei kaum oder gar nicht von den Borsten erreicht und bedarf somit einer zusätzlichen Reinigung mittels spezieller Hilfsmittel. Hierfür stehen neben Zahnseide, Zahnhölzern, Interdentalraumbürsten sowie deren Weiterentwicklung in Form der Interdentalraumpicks zur Verfügung. Letztere ähneln im Aufbau den konventionellen Interdentalraumbürsten, besitzen aber keinen Metallkern und weisen anstatt Nylonborsten gummierte Noppen auf. Um einen wesentlichen Vorteil der konventionellen Interdentalraumbürsten (IDB) durch die sehr flexiblen Nylonborsten auf die gummierten Interdentalraumpicks zu übertragen, wurden von der Firma Sunstar (Sunstar Suisse SA, Etoy, Schweiz) zwei neue Produkte entwickelt. Sowohl für diese neuartigen Hilfsmittel als auch ganz im Allgemeinen zur Produktgruppe der Interdentalraumpicks liegen nur eine begrenzte wissenschaftliche Datenlage vor, insbesondere bezüglich der Applikation und der korrekten Größenauswahl im Interdentalraum.

Ziel dieser In-vitro-Studie war es deshalb, die experimentelle Reinigungseffektivität (ERE in %) und –kraft bzw. den Kraftwiderstand (ERK in N) bei der Verwendung von Interdentalraumbürsten im Vergleich zu verschiedenen Weiterentwicklungen von Interdentalraumpicks zu messen und zu vergleichen, sowohl mit als auch ohne individuelle Passung an verschiedene Interdentalraummorphologien.

In der vorliegenden Arbeit wurde die mittlere Größe (medium) zwei neu entwickelter metallfreier Interdentalraumpicks (Testprodukt 1 und 2, ISO 2) mit einem bereits im Handel verfügbaren metallfreien Interdentalraumpick (Softpicks Advanced, ISO 2) und von konventionellen Interdentalraumbürsten (ISO 1,2,3,4 (Sunstar Deutschland GmbH, Schönau, Deutschland; Sunstar Suisse Sa, Etoy, Schweiz)) hinsichtlich der ERE- und ERK-Werte verglichen.

Die Interdentalräume (IDR) wurden mit einem 3D-Drucker (Form 2, Formlabs Somerville, MA, USA) entsprechend humaner Morphologie aus DVT-Daten modelliert. Diese simulierten einen IDR-Raum in Form eines gleichschenkligen Dreieckes, konkaven oder konvexen Interdentalraum in jeweils drei verschiedenen Abstandsgrößen (1,0 mm; 1,1 mm; 1,3 mm) sowie zwei verschiedenen Höhen (3,0 mm und 5,0 mm). Die Situationen vor und nach dem Reinigen des Interdentalraumes (standardisierte, computergestützte zehn Zyklen) wurden fotografisch erfasst und durch digitale Bildsubtraktion quantifiziert, um die experimentelle Reinigungseffektivität zu berechnen. Die experimentelle Reinigungskraft wurde begleitend zur Reinigung in Echtzeit mittels Kraftsensor registriert.

Es stellte sich eine höhere experimentelle Reinigungseffektivität für Interdentalraumbürsten (n = 564) als für Interdentalraumpicks (n = 1206) dar (IDB:  $58.33 \pm 14.92$  % vs. IDP:  $24.46 \pm 15.41$  %;  $p \leq 0,001$ ),

wobei für die Interdentalraumbürsten die experimentelle Reinigungseffektivität signifikant von der Größenanpassung im Interdentalraum abhing.

Im Durchschnitt war die experimentelle Reinigungskraft für die Interdentalraumbürsten niedriger als für die Interdentalraumpicks (IDB:  $0,62 \pm 0,43$  N vs. IDP:  $0,98 \pm 0,42$  N,  $p \leq 0,001$ ), der Quotient der ERE im Verhältnis zum ERK stieg mit kleineren Durchmessern der Interdentalraumbürsten.

Innerhalb der Grenzen dieser In-vitro-Studie zeigten alle Typen von Hilfsmitteln zur Interdentalraumreinigung eine positive Korrelation der experimentelle Reinigungseffektivität sowie – kraft, allerdings ist letztere mit den getesteten Interdentalraumpicks höher bei niedrigerer Reinigungsleistung gegenüber den Interdentalraumbürsten. Deshalb verwundert es auch nicht, dass klinische Studien eine höhere Patientenakzeptanz der Interdentalraumpicks nachwiesen, obwohl diese wie vorliegend im In-vitro-Versuch bestätigt eine verringerte Reinigungsleistung zeigen. Die experimentelle Studie ergab weiterhin, dass die neu getesteten Hilfsmittel in keiner Simulation die experimentelle Reinigungseffektivität der konventionellen Interdentalraumbürsten erreichen. Die Interpretation der planmetrischen Auswertung lässt schlussfolgern, dass die hohe Anzahl an elastischen Nylonborsten der Interdentalraumbürsten sich besser an die Zahnoberfläche anpassen als die weniger elastischen Noppen der getesteten Interdentalraumpicks. Aus dem Verhältnis der ERE zur ERK kann geschlossen werden, dass sich die konische Form der Interdentalraumpicks nur mit mehr Kraft in die verschiedenen Interdentalräume einführen lässt als die parallele Form der konventionellen Interdentalraumbürsten. Je besser diese an den Interdentalraum angepasst wurden, desto höher war die ermittelte experimentelle Reinigungseffektivität und aus klinischer Sicht stellen sie weiterhin den Goldstandard in der häuslichen Interdentalraumprophylaxe dar. Mit Hilfe der vorliegenden Studienergebnisse kann aber auch geschlussfolgert werden, dass ebenso die Interdentalraumpicks an den Interdentalraum individuell angepasst werden sollten, wobei die experimentellen Ergebnisse als Grundlage für die Instruktion und Motivation der Patienten helfen die richtige Form und Größe auszuwählen.

## 7. Literaturverzeichnis

### Literaturverzeichnis

- AAS, J. A., PASTER, B. J., STOKES, L. N., OLSEN, I. & DEWHIRST, F. E. 2005. Defining the normal bacterial flora of the oral cavity. *J Clin Microbiol*, 43, 5721-32.
- ABOUASSI, T., WOELBER, J. P., HOLST, K., STAMPF, S., DOERFER, C. E., HELLWIG, E. & RATKA-KRUGER, P. 2014. Clinical efficacy and patients' acceptance of a rubber interdental bristle. A randomized controlled trial. *Clin Oral Investig*, 18, 1873-80.
- AL-AHMAD, A., WIEDMANN-AL-AHMAD, M., FAUST, J., BACHLE, M., FOLLO, M., WOLKEWITZ, M., HANNIG, C., HELLWIG, E., CARVALHO, C. & KOHAL, R. 2010. Biofilm formation and composition on different implant materials in vivo. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 95, 101-9.
- ARENDS, C. 1969. *Zahnkaries und Speichel*, Hanser, München.
- ARWEILER, N. B., HELLWIG, E., SCULEAN, A., HEIN, N. & AUSCHILL, T. M. 2004. Individual vitality pattern of in situ dental biofilms at different locations in the oral cavity. *Caries Res*, 38, 442-7.
- AUSCHILL, T. M., HELLWIG, E., SCULEAN, A., HEIN, N. & ARWEILER, N. B. 2004. Impact of the intraoral location on the rate of biofilm growth. *Clin Oral Investig*, 8, 97-101.
- BASSLER, B. L. 1999. How bacteria talk to each other: regulation of gene expression by quorum sensing. *Curr Opin Microbiol*, 2, 582-7.
- BAUMGARTNER, G., WIEDEMEIER, D. B., HOFER, D., SENER, B., ATTIN, T. & SCHMIDLIN, P. R. 2019. In vitro cleaning potential of waist-shaped interdental brushes. *Swiss Dent J*, 129, 360-367.
- BERGSTROM, J. 1989. Cigarette smoking as risk factor in chronic periodontal disease. *Community Dent Oral Epidemiol*, 17, 245-7.
- BOSSHARDT, D. D. & LANG, N. P. 2005. The junctional epithelium: from health to disease. *J Dent Res*, 84, 9-20.
- BOURGEOIS, D., CARROUEL, F., LLODRA, J. C., BRAVO, M. & VIENNOT, S. 2015. A Colorimetric Interdental Probe as a Standard Method to Evaluate Interdental Efficiency of Interdental Brush. *Open Dent J*, 9, 431-7.
- CHAPPLE, I. L., VAN DER WEIJDEN, F., DOERFER, C., HERRERA, D., SHAPIRA, L., POLAK, D., MADIANOS, P., LOUROPOULOU, A., MACHTEI, E., DONOS, N., GREENWELL, H., VAN WINKELHOFF, A. J., EREN KURU, B., ARWEILER, N., TEUGHEL, W., AIMETTI, M., MOLINA, A., MONTERO, E. & GRAZIANI, F. 2015. Primary prevention of periodontitis: managing gingivitis. *J Clin Periodontol*, 42 Suppl 16, S71-6.
- CHRISTOU, V., TIMMERMAN, M. F., VAN DER VELDEN, U. & VAN DER WEIJDEN, F. A. 1998. Comparison of different approaches of interdental oral hygiene: interdental brushes versus dental floss. *J Periodontol*, 69, 759-64.
- COLBJØRNSSEN, T. 2003. Der Hawthorne-Effekt oder die Human-Relations-Theorie: Über die experimentelle Situation und ihren Einfluss. *Theorien und Methoden in den Sozialwissenschaften*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- COSTERTON, J. W., STEWART, P. S. & GREENBERG, E. P. 1999. Bacterial biofilms: a common cause of persistent infections. *Science*, 284, 1318-22.
- CROCOMBE, L. A., BRENNAN, D. S., SLADE, G. D. & LOC, D. O. 2012. Is self interdental cleaning associated with dental plaque levels, dental calculus, gingivitis and periodontal disease? *J Periodontal Res*, 47, 188-97.

- DEMIRCI, M., TUNCER, S. & YUCEOKUR, A. A. 2010. Prevalence of caries on individual tooth surfaces and its distribution by age and gender in university clinic patients. *Eur J Dent*, 4, 270-9.
- DÖRFER, C. E. & STAEHLE, H. J. 2010. Strategien der häuslichen Plaquekontrolle Zahnmedizin. *up2date*, 3, 228-254.
- DÖRFER, C. E., STÜCKGEN, D., CHEUNG, F. 2000. Häufigkeit und Morphologie von Wurzeleinziehungen. *Dtsch Zahnärztl Z*, 257-263.
- EICKHOLZ, P. 2007. Glossar der Grundbegriffe der Praxis: Parodontologische Diagnostik Teil 2: Zahnbeweglichkeit. *Quintessence, Berlin*; 18(4):413-416.
- FEIL, P. H., GRAUER, J. S., GADBURY-AMYOT, C. C., KULA, K. & MCCUNNIFF, M. D. 2002. Intentional use of the Hawthorne effect to improve oral hygiene compliance in orthodontic patients. *J Dent Educ*, 66, 1129-35.
- FERNALD, D. H., COOMBS, L., DEALLEAUME, L., WEST, D. & PARNES, B. 2012. An assessment of the Hawthorne Effect in practice-based research. *J Am Board Fam Med*, 25, 83-6.
- FIRESTONE, A. R. & MUHLEMANN, H. R. 1985. In vivo pH of plaque-covered and plaque-free interdental surfaces in humans following a sucrose rinse. *Clin Prev Dent*, 7, 24-6.
- GÄNGLER, P., ARNOLD, W.H. 2012. Struktur und Funktion des Gebisses und der Mundhöhle. In: GÄNGLER, P., HOFFMANN, T., WILLERSHAUSEN, B., SCHWENZER, N. & EHRENFELD, M. (eds.) *Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- GÄNGLER, P., HOFFMANN, T., WILLERSHAUSEN, B., SCHWENZER, N. & EHRENFELD, M. 2010. *Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- GENNAI, S., NISI, M., PERIC, M., MARHL, U., IZZETTI, R., TONELLI, M., PETRINI, M. & GRAZIANI, F. 2022. Interdental plaque reduction after the use of different devices in patients with periodontitis and interdental recession: A randomized clinical trial. *Int J Dent Hyg*.
- GEURTSSEN, W., HELLWIG, E., KLIMEK, J., BECK, J., BENZ, C., BERTZBACH, F., BRAUN, A., GABEL, S., KANT, J., KIEFNER, P., KRÄNZLE, N., LESCHIK-BONNET, E., PETRAKAKIS, P., RICHTER, M., RUPF, S., SCHIFFNER, U., SCHMIDT, A., STARK, H., THUMEYER, A., WÖSTMANN, B., WOLF, T. 2016. S2-Leitlinie: Kariesprophylaxe bei bleibenden Zähnen - grundlegende Empfehlungen.
- GRAETZ, C., ELSAYED, K. F., SÄLZER, S. & DÖRFER, C. E. 2018. s3-Leitlinie: Häusliches mechanisches Biofilmmangement in der Prävention und Therapie der Gingivitis.
- GRAETZ, C., HARDTER, A. K., SCHORR, S., CYRIS, M., GEIKEN, A., RINDER, T., DÖRFER, C. E. & SALZER, S. 2022a. The influence of artificial saliva on the cleaning force of interdental rubber picks: an in-vitro comparison. *BMC Oral Health*, 22, 459.
- GRAETZ, C., RABE, J., SCHOEPKE, K., SCHORR, S., GEIKEN, A., CHRISTOFZIK, D., RINDER, T., DÖRFER, C. E. & SALZER, S. 2020. New experimental setup for the measurement of cleaning efficacy and force of interdental aids in 3D-reproduced interdental areas. *BMC Oral Health*, 20, 136.
- GRAETZ, C., SALEH, N., KAHL, M., CYRIS, M., MASHALY, M., ELZANATY, M., DÖRFER, C. E., SÄLZER, S. & EL SAYED, K. A. 2022b. Structured oral hygiene instruction in the treatment of periodontitis – an explorative study. *DZZ international*, 4, 70-76.
- GRAETZ, C. & SÄLZER, S. 2020. Häusliche mechanische Mundhygiene 2020 – Mythen- oder Faktenbasiert? . *Zahnmedizin up2date*, 8, 284-297.
- GRAZIANI, F., PALAZZOLO, A., GENNAI, S., KARAPETSA, D., GIUCA, M. R., CEI, S., FILICE, N., PETRINI, M. & NISI, M. 2018. Interdental plaque reduction after use of different devices in young subjects with intact papilla: A randomized clinical trial. *Int J Dent Hyg*, 16, 389-396.

- GÜNAY H, M.-W. K. 2019. Effektivität der „KIAZZPlus-Systematik“ auf die Reinigung der Interdentalräume. *Dtsch Zahnärztl Z* 2019; 74; 112-124.
- HAJISHENGALLIS, G. & KOROSTOFF, J. M. 2017. Revisiting the Page & Schroeder model: the good, the bad and the unknowns in the periodontal host response 40 years later. *Periodontol* 2000, 75, 116-151.
- HAMACK, J., GONZALES, JOSÉ, MEYLE, J. 2006. Die parodontale Infektion und systemische Entzündungsreaktionen. *Quintessence*
- HANNIG, M. & JOINER, A. 2006. The structure, function and properties of the acquired pellicle. *Monogr Oral Sci*, 19, 29-64.
- HARA, A. T. & ZERO, D. T. 2014. The potential of saliva in protecting against dental erosion. *Monogr Oral Sci*, 25, 197-205.
- HELLWIG, E., KLIMEK, J., ATTIN, T. 2006. *Einführung in die Zahnerhaltung*, 4. Auflage, Urban und Fischer, München.
- HENNEQUIN-HOENDERDOS, N. L., VAN DER SLUIJS, E., VAN DER WEIJDEN, G. A. & SLOT, D. E. 2018. Efficacy of a rubber bristles interdental cleaner compared to an interdental brush on dental plaque, gingival bleeding and gingival abrasion: A randomized clinical trial. *Int J Dent Hyg*, 16, 380-388.
- INCE KUKA, G., TUNAR, OL., GURSORY, H., KURU, B. 2018. PR109: Evaluation of the cleaning efficacy of three different interdental cleaning devices: an in vitro study. *J Clin Periodontol*.
- JORDAN, R. A., HONG, H. M., LUCACIU, A. & ZIMMER, S. 2014. Efficacy of straight versus angled interdental brushes on interproximal tooth cleaning: a randomized controlled trial. *Int J Dent Hyg*, 12, 152-7.
- KASSEBAUM, N. J., BERNABE, E., DAHIYA, M., BHANDARI, B., MURRAY, C. J. & MARCENES, W. 2014. Global burden of severe periodontitis in 1990-2010: a systematic review and meta-regression. *J Dent Res*, 93, 1045-53.
- KEBSCHULL, M., JEPSEN, S., KOCHER, T., SÄLZER, S., ARWEILER, N., DÖRFER, C. E., EICKHOLZ, P., JENTSCH, H. & DANNEWITZ, B. 2020. Die Behandlung von Parodontitis Stadium I bis III, Die deutsche Implementierung der S3-Leitlinie "Treatment of Stufe I-III Periodontitis" der European Federation of Periodontology (EFP).
- KEYES, P. H. 1960. The infectious and transmissible nature of experimental dental caries. Findings and implications. *Arch Oral Biol*, 1, 304-20.
- KEYES, P. H. 1968. Research in dental caries. *J Am Dent Assoc*, 76, 1357-73.
- KÖNIG, K. G. 1987. *Karies und Parodontopathien. Ätiologie und Prophylaxe*, Thieme, Stuttgart, New York.
- LANG, N. P., CUMMING, B. R. & LOE, H. 1973. Toothbrushing frequency as it relates to plaque development and gingival health. *J Periodontol*, 44, 396-405.
- LARSEN, H. C., SLOT, D. E., VAN ZOELN, C., BARENDREGT, D. S. & VAN DER WEIJDEN, G. A. 2017. The effectiveness of conically shaped compared with cylindrically shaped interdental brushes - a randomized controlled clinical trial. *Int J Dent Hyg*, 15, 211-218.
- LARSEN, T. & FIEHN, N. E. 2017. Dental biofilm infections - an update. *APMIS*, 125, 376-384.
- LEHMANN, K. M., HELLWIG, E. 2005. *Zahnärztliche Propädeutik*, Elsevier GmbH, Urban & Fischer, München.
- LEMONS, J. A., PALMER, S. R., ZENG, L., WEN, Z. T., KAJFASZ, J. K., FREIRES, I. A., ABRANCHES, J. & BRADY, L. J. 2019. The Biology of Streptococcus mutans. *Microbiol Spectr*, 7.
- LINDHE, J. & NYMAN, S. 1977. The role of occlusion in periodontal disease and the biological rationale for splinting in treatment of periodontitis. *Oral Sci Rev*, 10, 11-43.
- LISTGARTEN, M. A. 1986. Pathogenesis of periodontitis. *J Clin Periodontol*, 13, 418-30.

- LOE, H. 1979. Mechanical and chemical control of dental plaque. *J Clin Periodontol*, 6, 32-6.
- LÖE, H., THEILADE, E. & JENSEN, S. B. 1965. Experimental Gingivitis in Man. *J Periodontol*, 36, 177-87.
- MARCHESAN, J. T., MORELLI, T., MOSS, K., PREISSER, J. S., ZANDONA, A. F., OFFENBACHER, S. & BECK, J. 2018. Interdental Cleaning Is Associated with Decreased Oral Disease Prevalence. *J Dent Res*, 97, 773-778.
- MARSH, P. D. 2004. Dental plaque as a microbial biofilm. *Caries Res*, 38, 204-11.
- MARSH, P. D. & ZAURA, E. 2017. Dental biofilm: ecological interactions in health and disease. *J Clin Periodontol*, 44 Suppl 18, S12-S22.
- MCCARNEY, R., WARNER, J., ILIFFE, S., VAN HASELEN, R., GRIFFIN, M. & FISHER, P. 2007. The Hawthorne Effect: a randomised, controlled trial. *BMC Med Res Methodol*, 7, 30.
- MILLER, W. D. 1889. *Die Mikroorganismen der Mundhöhle*, Thieme, Leipzig.
- MORETTI, A. J., ZHANG, S., PHILLIPS, S. T., WILLIAMS, K., MOSS, K. L. & OFFENBACHER, S. 2020. Evaluation of a Curved Design Rubber Bristle Interdental Cleaner on Patients with Gingivitis. *J Dent Hyg*, 94, 6-13.
- MÜLLER, H.-P. 2021. *Checklisten der Zahnmedizin: Parodontologie*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York.
- NAGATA, T. 2009. [Relationship between diabetes and periodontal disease]. *Clin Calcium*, 19, 1291-8.
- NAUNTOFTE, B., TENOVUO, J., LAGERLOF, F. 2003. Secretion and composition of saliva. In: FEJERSKOV, O., KIDD, E.A.M. (ed.) *Dental caries: the disease and its clinical management*. Blackwell Munksgaard, Oxford.
- NAVAZESH, M., WOOD, G. J. & BRIGHTMAN, V. J. 1995. Relationship between salivary flow rates and *Candida albicans* counts. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 80, 284-8.
- NG, E. & LIM, L. P. 2019. An Overview of Different Interdental Cleaning Aids and Their Effectiveness. *Dent J (Basel)*, 7.
- NOLDEN, R. 1994. Zahnerhaltungskunde. *Georg Thieme Verlag, Stuttgart*, 12-114, 24-32.
- PAGE, R. C. 2002. The etiology and pathogenesis of periodontitis. *Compend Contin Educ Dent*, 23, 11-4.
- PAGE, R. C. & KORNMAN, K. S. 1997. The pathogenesis of human periodontitis: an introduction. *Periodontol 2000*, 14, 9-11.
- PAGE, R. C. & SCHROEDER, H. E. 1976. Pathogenesis of inflammatory periodontal disease. A summary of current work. *Lab Invest*, 34, 235-49.
- PAQUE, P. N., ATTIN, T., ENDER, A., AL-MAJID, A., WEGEHAUPT, F., SENER, B. & SCHMIDLIN, P. R. 2020. Impact of interdental brush shape on interpapillary cleaning efficacy - a clinical trial. *Sci Rep*, 10, 7922.
- PERES, M. A., MACPHERSON, L. M. D., WEYANT, R. J., DALY, B., VENTURELLI, R., MATHUR, M. R., LISTL, S., CELESTE, R. K., GUARNIZO-HERRENO, C. C., KEARNS, C., BENZIAN, H., ALLISON, P. & WATT, R. G. 2019. Oral diseases: a global public health challenge. *Lancet*, 394, 249-260.
- PERSSON, G. R., HITTI, J., PAUL, K., HIRSCHI, R., WEIBEL, M., ROTHEN, M. & PERSSON, R. E. 2008. *Tannerella forsythia* and *Pseudomonas aeruginosa* in subgingival bacterial samples from parous women. *J Periodontol*, 79, 508-16.
- PLAGMANN, H. C. 1998. *Lehrbuch der Parodontologie*, München, Carl Hanser Verlag.
- PLAGMANN, H. C., LANGE, D. E. & DENKS, A. 1973. [The demonstration of antibacterial substances in the saliva, oral fluid and the gingiva]. *Dtsch Zahnärztl Z*, 28, 295-9.



- POKLEPOVIC, T., WORTHINGTON, H. V., JOHNSON, T. M., SAMBUNJAK, D., IMAI, P., CLARKSON, J. E. & TUGWELL, P. 2013. Interdental brushing for the prevention and control of periodontal diseases and dental caries in adults. *Cochrane Database Syst Rev*, CD009857.
- RATEITSCHAK, K., H. & E.M., WOLF, H.F. 2004. *Parodontologie*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York.
- SALZER, S., SLOT, D. E., VAN DER WEIJDEN, F. A. & DORFER, C. E. 2015. Efficacy of inter-dental mechanical plaque control in managing gingivitis--a meta-review. *J Clin Periodontol*, 42 Suppl 16, S92-105.
- SANDERINK, R., ZITZMANN, N., SAXER, U., SCHLAGENHAUF, U., PERSSON, R. & ERNE, P. 2008. Parodontitis und Periimplantitis: in den menschlichen Körper disseminierende Biofilm-Infekte. *Quintessenz*.
- SANZ, M., HERRERA, D., KEBSCHULL, M., CHAPPLE, I., JEPSEN, S., BEGLUNDH, T., SCULEAN, A., TONETTI, M. S., PARTICIPANTS, E. F. P. W. & METHODOLOGICAL, C. 2020. Treatment of stage I-III periodontitis-The EFP S3 level clinical practice guideline. *J Clin Periodontol*, 47 Suppl 22, 4-60.
- SCARANO, A., PIATTELLI, M., CAPUTI, S., FAVERO, G. A. & PIATTELLI, A. 2004. Bacterial adhesion on commercially pure titanium and zirconium oxide disks: an in vivo human study. *J Periodontol*, 75, 292-6.
- SCHMIDLIN, P. R. 2012. [Risks and side effects of periodontitis therapy. Focus on restorative possibilities for improving esthetic defects]. *Schweiz Monatsschr Zahnmed*, 122, 427-37.
- SCHUZ, B., SNIEHOTTA, F. F., WIEDEMANN, A. & SEEMANN, R. 2006. Adherence to a daily flossing regimen in university students: effects of planning when, where, how and what to do in the face of barriers. *J Clin Periodontol*, 33, 612-9.
- SEKUNDO, C. & STAEHLE, H. J. 2020. Mapping the Product Range of Interdental Brushes: Sizes, Shapes, and Forces. *Oral Health Prev Dent*, 18, 343-354.
- SIQUEIRA, W. L., CUSTODIO, W. & MCDONALD, E. E. 2012. New insights into the composition and functions of the acquired enamel pellicle. *J Dent Res*, 91, 1110-8.
- SLOT, D. E., DORFER, C. E. & VAN DER WEIJDEN, G. A. 2008. The efficacy of interdental brushes on plaque and parameters of periodontal inflammation: a systematic review. *Int J Dent Hyg*, 6, 253-64.
- TAKEI, H. H. 1980. The interdental space. *Dent Clin North Am*, 24, 169-76.
- TARNOW, D. P., MAGNER, A. W. & FLETCHER, P. 1992. The effect of the distance from the contact point to the crest of bone on the presence or absence of the interproximal dental papilla. *J Periodontol*, 63, 995-6.
- THEILADE, E., WRIGHT, W. H., JENSEN, S. B. & LOE, H. 1966. Experimental gingivitis in man. II. A longitudinal clinical and bacteriological investigation. *J Periodontol Res*, 1, 1-13.
- TSCHERNIN, M. 2003. *Oberflächeneigenschaften von Zahnrestaurationsmaterialien* LMU München.
- VAN DER WEIJDEN, F. & SLOT, D. E. 2011. Oral hygiene in the prevention of periodontal diseases: the evidence. *Periodontol 2000*, 55, 104-23.
- VAN DER WEIJDEN, F., SLOT, D. E., VAN DER SLUIJS, E. & HENNEQUIN-HOENDERDOS, N. L. 2021. The efficacy of a rubber bristles interdental cleaner on parameters of oral soft tissue health-a systematic review. *Int J Dent Hyg*.
- VAN DER WEIJDEN, G. A., TIMMERMAN, M. F., DANSER, M. M. & VAN DER VELDEN, U. 1998. Relationship between the plaque removal efficacy of a manual toothbrush and brushing force. *J Clin Periodontol*, 25, 413-6.

- VILLA, A., WOLFF, A., AFRAMIAN, D., VISSINK, A., EKSTROM, J., PROCTOR, G., MCGOWAN, R., NARAYANA, N., ALIKO, A., SIA, Y. W., JOSHI, R. K., JENSEN, S. B., KERR, A. R., DAWES, C. & PEDERSEN, A. M. 2015. World Workshop on Oral Medicine VI: a systematic review of medication-induced salivary gland dysfunction: prevalence, diagnosis, and treatment. *Clin Oral Investig*, 19, 1563-80.
- VOGEL, M., SENER, B., ROOS, M., ATTIN, T. & SCHMIDLIN, P. R. 2014. Interdental cleaning and gingival injury potential of interdental toothbrushes. *Swiss Dent J*, 124, 1290-301.
- VOTTA, I., HOFER, D., GARTENMANN, S. & SCHMIDLIN, P. R. 2020. Comparison of the cleaning efficiency between interdental brushes and sticks: a laboratory study. *Swiss Dent J*, 130, 899-905.
- WEBB, B. J., KOCH, J., HAGAN, J. L., BALLARD, R. W. & ARMBRUSTER, P. C. 2016. Enamel surface roughness of preferred debonding and polishing protocols. *J Orthod*, 43, 39-46.
- WIDSTROM, E. 2004. Prevention and dental health services. *Oral Health Prev Dent*, 2 Suppl 1, 255-8.
- WOLFF, D., JOERSS, D. & DORFER, C. E. 2006a. In vitro-cleaning efficacy of interdental brushes with different stiffness and different diameter. *Oral Health Prev Dent*, 4, 279-85.
- WOLFF, D., JOERSS, D., RAU, P. & DORFER, C. E. 2006b. In vitro cleaning efficacy and resistance to insertion test of interdental brushes. *Clin Oral Investig*, 10, 297-304.
- WOOD, S. R., KIRKHAM, J., MARSH, P. D., SHORE, R. C., NATTRESS, B. & ROBINSON, C. 2000. Architecture of intact natural human plaque biofilms studied by confocal laser scanning microscopy. *J Dent Res*, 79, 21-7.
- WORTHINGTON, H. V., MACDONALD, L., POKLEPOVIC PERICIC, T., SAMBUNJAK, D., JOHNSON, T. M., IMAI, P. & CLARKSON, J. E. 2019. Home use of interdental cleaning devices, in addition to toothbrushing, for preventing and controlling periodontal diseases and dental caries. *Cochrane Database Syst Rev*, 4, CD012018.
- YING JOANNA, N. D. & THOMSON, W. M. 2015. Dry mouth - An overview. *Singapore Dent J*, 36, 12-7.
- YUAN, X., CHEN, J., GRAUER, J. A., XU, Q., VAN BRUNT, L. A. & HELMS, J. A. 2021. The Junctional Epithelium Is Maintained by a Stem Cell Population. *J Dent Res*, 100, 209-216.

## 8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: schematische Abbildung des Interdentalraumes. Gezeigt sind zwei benachbarte Zähne, zwischen denen der Interdentalraum, der Kontaktpunkt und die Interdentalpapille schematisch dargestellt wurden.....	3
Abbildung 2: Schematisches Entwicklungsmodell oraler Erkrankungen basierend auf dem Vorhandensein von oralen Mikroorganismen (entwickelt nach (Al-Ahmad et al., 2010)).....	5
Abbildung 3: schematische Darstellung der Prädilektionsstellen der Zahnhartsubstanzen.....	8
Abbildung 4: Entwicklung der Parodontitis (Schemata nach Page & Kornman (1997)) abhängig von Umweltfaktoren sowie genetischen Faktoren. Dargestellt ist die Wirtsreaktion auf den Bakterienangriff sowie dessen Folgen auf den Bindegewebe- und Knochenstoffwechsel. ....	10
Abbildung 5: schematische Darstellung der exemplarischen Interdentalraumreinigung: Links anhand der Interdentalraumbürste, rechts anhand der Zahnseide .....	13
Abbildung 6: Beispielbild: Aufzeichnung der Kraftdaten via Excel und Darstellung als Diagramm. Hier zeigt sich die Darstellung eines einzelnen Versuches als Liniendiagramm, um die Anzahl der Durchläufe zu kontrollieren und somit die Höchstwerte erkennen zu können. Auf der X-Achse werden die Kraftwerte in N dargestellt, auf der Y-Achse die Anzahl der durchgeführten Versuche. ....	17
Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung einer Oberfläche der verwendeten Interdentalraumreplikas. Links die Oberfläche vor der Reinigung des Interdentalraumes, rechts die photographische Dokumentation nach der Reinigung. ....	18
Abbildung 8: graphische Darstellung der Konstruktion der verschiedenen Interdentalraummorphologien von links nach rechts: Interdentalraum A: gleichschenkelig, 1,0mm Durchmesser; Interdentalraum F: konvex, 1,3mm Durchmesser x 3,0 mm Höhe; Interdentalraum I: konkav, 1,3 mm Durchmesser x 3,0 mm; Interdentalraum L: konkav, 1,3mm Durchmesser x 5mm Höhe (mittels Autodesk Fusion erstellt) .....	19
Abbildung 9: Darstellung der vier unterschiedlichen Morphologien der 3D-gedruckten Zwischenräume von links nach rechts: gleichschenkelig, konkav 3,0mm Höhe; konkav 5,0mm Höhe und konvex, hier alle in der Morphologiegröße 1,3mm .....	19
Abbildung 10: Darstellung der getesteten interdentalen Hilfsmittel von links nach rechts: GUM Trav-ler Interdentalbürsten in den Größen 0,8mm; 0,9mm; 1,2mm; 1,4mm; die GUM Soft Picks Advanced in der Größe „medium“, das Testprodukt 1 in der Größe „medium“ und das Testprodukt 2 in der Größe „medium“. Weiterhin ist der jeweilige Durchmesser/Querschnitt sowie der „Arbeitsbereich“ im Detail im rechten Bereich der Abbildung dargestellt.....	20
Abbildung 11: schematische Darstellung der Kalkulation der verschiedenen Hilfsmittel bezogen auf die unterschiedlichen Interdentalraummorphologien. (SPP-1 = Testprodukt 1; SPP-2 = Testprodukt 2; IDB = Interdentalraumbürsten; SPA = Soft Picks Advanced, ISO 1 = 0,8 mm Durchmesser, ISO 2 = 0,9 mm Durchmesser, ISO 3 = 1,2 mm Durchmesser, ISO 4 = 1,4 mm Durchmesser)).....	21
Abbildung 12: detaillierter Überblick über den experimentellen Versuchsaufbau, bei dem die Rotation in eine lineare Bewegung umgewandelt werden kann (a) und somit die häuslichen Hilfsmittel zur Interdentalraumreinigung in die hergestellten 3D-Interdentalraummorphologien (c) bewegte. Die digitale Messzelle (d) maß gleichzeitig die aufgewandte Kraft und speicherte diese tabellarisch via Excel-tabelle Für die Bewegung des interdentalen Hilfsmittels gibt es die Kontrolleinheit (f) sowie eine Ladezelle mit elektrischem Umwandler (e). Das dargestellte Hilfsmittel (b) ist hierbei ein Soft Pick Advanced (SPA). ....	23

Abbildung 13: Überblick über den experimentellen Versuchsaufbau in Bezug zum artifiziellen Interdentalraum aus einem anderen Winkel. Besonderes Augenmerk liegt hier auf den Sitz der Interdentalraummorphologien im Versuchsaufbau. Bei dem dargestellten Hilfsmittel handelt es sich um einen Gum Trav-ler..... 23

Abbildung 14: Versuchsaufbau zur fotografischen Dokumentation der „Vorher-Bilder“ sowie der „Nachher-Bilder: Es wird ein konvexer Interdentalraum im Detail gezeigt nach der Interdentalraumpflege, d.h. nach dem experimentellen Versuchsdurchlauf. Hierfür wird der artifizielle Interdentalraum (IDR) für das Foto wie ein Buch aufgeklappt. Der IDR ist um 180° gedreht dargestellt, die schwarzen Markierungspunkte auf der Unterlage sind das Äquivalent zum Kontaktpunkt des IDR. Diese wurden für eine eindeutige Positionierung angebracht. Die äußeren Bereiche zeigen in der aufgeklappten Darstellung die Einführungsseite der dentalen Hilfsmittel. Das „Vorher-Foto“ erfolgte fotografisch (Canon EOS 400 Digital, Uxbridge, Großbritannien) mit direkter Sichtkontrolle des Untersuchers..... 25

Abbildung 15: Markierungshilfe für die interdentalen Hilfsmittel ..... 25

Abbildung 16: Beispiel einer Positionierungshilfe, dargestellt ist der Soft Pick Advanced medium. .... 26

Abbildung 17: Bearbeitung der digitalen Dokumentation: Es ist der Ablauf des Zuschnittes der digitalen Dokumentation gezeigt. Auf der linken Seite ist der zu berechnende Bereich des IDR hell hervorgehoben und wird aus dem Originalbild herausgeschnitten. Der Zuschnitt wird digital bearbeitet (Adobe Photoshop) und wird auf der rechten Seite dargestellt. Beim dem Beispielbild handelt es sich um einen konkaven Interdentalraum 1,3 mm Durchmesser x 3,0 mm Höhe nach der interdentalen Reinigung mit dem Testprodukt 1. .... 27

Abbildung 18: Beispieldarstellung der digitalen Berechnung: Diese ist anhand der Versuchskombination des gleichschenkligen Interdentalraumes 1,1 mm Durchmesser und 3,0 mm Höhe nach der Reinigung mit dem Interdentalbürsten GUM Trav-Ler in 0,9 mm Durchmesser. Das linke Bild zeigt die Zusammenfassung der Berechnungsdaten des kompletten Versuches 1-25, die hierbei weiter zur Auswertung genutzten Daten war die „%Area“. Das rechte Bild zeigt die verschiedenen Stufen der digitalen Bildbearbeitung. Die obere Zeile zeigt den Interdentalraum nach der Interdentalpflege als „Roh-Bild“ (in Grün die verbliebene „Plaque“, die zweite Zeile ist die Basis zur Berechnung nach der Photoshopbearbeitung, die dritte Zeile visualisiert die gereinigten sowie berechneten Bereiche in Weiß und wird in der linken Tabelle als „%Area“ angegeben. .... 27

Abbildung 19: Darstellung der ERE für die verschiedenen Interdentalräume (IDR) Morphologien. Hierbei befinden sich auf der X-Achse die drei verschiedenen Interdentalräume (gleichschenklig, konvex und konkav), auf der Y-Achse die Reinigungseffektivität (ERE). Weiterhin sind farblich die verschiedenen dentalen Hilfsmittel unterschieden: die GUM Trav-ler in blau, das Testprodukt 1 in orange, die Soft Picks Advanced in grau und das Testprodukt 2 in Gelb. .... 32

Abbildung 20: Exemplarische Darstellung der Reinigungseffektivität für verschiedene Größen des Interdentalraumes. Hierbei befinden sich auf der X-Achse die drei verschiedenen Größen der Interdentalräume IDR 1,0 mm; 1,1 mm; 1,3 mm), auf der Y-Achse die Reinigungseffektivität (ERE). Weiterhin sind farblich die verschiedenen dentalen Hilfsmittel unterschieden: die GUM Trav-ler in blau, das Testprodukt 1 in orange, die Soft Picks Advanced in grau und das Testprodukt 2 in Gelb. .... 33

Abbildung 21: Exemplarische Darstellung der mittleren aufgewandten Kraft bezogen auf die verschiedenen IDR Morphologie. Hierbei befinden sich auf der X-Achse die drei verschiedenen Interdentalräume (gleichschenklig, konvex und konkav), auf der Y-Achse die Reinigungskraft (ERK). Weiterhin sind farblich die verschiedenen dentalen Hilfsmittel unterschieden: die GUM Trav-ler in blau, das Testprodukt 1 in orange, die Soft Picks Advanced in grau und das Testprodukt 2 in Gelb ..... 36

Abbildung 22: Exemplarische Darstellung der aufgewandten Kraft bezogen auf die Größe des Interdentalraumes. Hierbei befinden sich auf der X-Achse die drei verschiedenen Größen der Interdentalräume IDR 1,0 mm; 1,1 mm; 1,3 mm), auf der Y-Achse die Reinigungskraft (ERK). Weiterhin sind farblich die verschiedenen dentalen Hilfsmittel unterschieden: die GUM Trav-ler in blau, das Testprodukt 1 in orange, die Soft Picks Advanced in grau und das Testprodukt 2 in Gelb. .... 37

<i>Abbildung 23: Einführung des Testproduktes 2 in den Interdentalraum (Quelle: Sunstar Deutschland GmbH, Schönau, Deutschland; Sunstar Suisse SA, Etoy, Schweiz) .....</i>	<i>48</i>
---	-----------

## 9. Tabellenverzeichnis

*Tabelle 1: tabellarisches Beispiel einer Excel-Tabelle zur Kontrolle der Pulverbreite via Elektronenmikroskop. Auf der linken Seite sind die verschiedenen Morphologien untereinander dargestellt, mittig die Probennummern von 1-12 und rechts die Pulverschicht in  $\mu\text{m}$ . .... 18*

*Tabelle 2: Darstellung der einzelnen Zwischenräume, die getestet wurden: gleichschenkelig, konkav und konvex in den jeweiligen Größen 1,0 mm; 1,1mm; 1,3mm. .... 20*

*Tabelle 3: Untergruppenanalyse (Mittelwert  $\pm$  SD) der Reinigungseffektivität (ERE in %) und dem Kraftwiderstand bei Reinigung (ERK in N) aller Testprodukte während 10 Zyklen. Hierbei ist ein Überblick gegeben über die verschiedenen Morphologien (gleichschenkelig dreieckig, konvex, konkav) sowie der verschiedenen Größen (1,0 mm; 1,1 mm; 1,3 mm). Diese sind in Bezug auf die getesteten interdentalen Hilfsmittel (IDB= Interdentalraumbürste, SPA = Soft Pick Advanced, SPP-1 = Testprodukt 1, SPP-2 = Testprodukt 2). Hierbei wird  $p < 0,05$  als statistisch signifikant angesehen (Mann-Whitney-U-Test, Kruskal-Wallis-Test, zweiseitig. .... 34*

*Tabelle 4: Untergruppenanalyse (Mittelwert $\pm$ SD) der Reinigungseffektivität<sup>2</sup> (ERE in %) in Bezug zum Kraftwiderstand bei Reinigung (ERK in N) aller Testprodukte..... 40*

## 10. Anhang

### 10.1 Votum der Ethikkommission

#### MEDIZINISCHE FAKULTÄT DER CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL

#### ETHIK-KOMMISSION



Universitäts-Kinderklinik · Schwaneerweg 20 · 24105 Kiel

PD Dr. Christian Graetz  
UKSH Campus Kiel  
Klinik für Zahnerhaltung und Parodontologie  
Arnold-Heller-Straße 3, Haus 26  
24105 Kiel

Postanschrift:  
Arnold-Heller-Straße 3 / Haus 9  
D-24105 Kiel

Telefon: 0431 / 500-14191  
Telefax: 0431 / 500-14195  
ethikcomm@email.uni-kiel.de

Datum: 01.02.2018

**AZ.:** D 411/18 (bitte stets angeben)  
**Studienplan:** Studie zur Reinigungseffektivität und Akzeptanz von neuentwickelten Zahnzwischenraumbürsten  
Anschreiben v. 15.01.18; Basisformular für einen Ethikantrag v. 15.01.18; Probandenaufklärung v. 15.01.18; Einwilligungserklärung; Projektbeschreibung V. 1.0 v. 15.01.18  
**Antragsteller:** PD Dr. Christian Graetz, Klinik für Zahnerhaltung und Parodontologie, UKSH Campus Kiel  
**Finanzierung:** Sunstar Global R & D Oral Care Sunstar, Degradable Solutions AG, Schlieren, Schweiz  
**Antrag vom:** 15. Januar 2018 (Eingang: 17. Januar 2018)

Sehr geehrter Herr Kollege Graetz,

wir bestätigen den Eingang des obengenannten Antrages zur Beratung gemäß § 15 Berufsordnung (BO) der Ärztekammer Schleswig-Holstein.  
Nach Durchsicht der Unterlagen durch die Geschäftsstelle und durch mich als Vorsitzenden der Ethik-Kommission bestehen gegen die Durchführung der Studie keine berufsethischen und berufsrechtlichen Bedenken.

**Die im Folgenden aufgeführten Hinweise müssen beachtet werden:**

1. Es wird darauf hingewiesen, dass künftige Änderungen der Studie der Ethik-Kommission anzuzeigen sind und gegebenenfalls eine erneute Beratung erforderlich machen.
2. Die ethische und rechtliche Verantwortung für die Durchführung dieser Studie verbleibt beim Studienleiter.
3. Die Ethik-Kommission weist darauf hin, dass für eventuell in Zukunft weitere teilnehmende Zentren eine berufsrechtliche Beratung bei der jeweils für sie zuständigen Ethik-Kommission erforderlich ist.
4. Gemäß Deklaration von Helsinki muss der Ethik-Kommission nach Studienende ein Abschlussbericht vorgelegt werden, der eine Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Studie enthält.

Wir wünschen Ihnen für die Durchführung der Studie viel Erfolg.

Mit freundlichen kollegialen Grüßen

Prof.-Dr. med. H. M. Mehdorn  
Vorsitzender der Ethik-Kommission

Dr. med. Christine Glinicke  
Geschäftsführung der Ethik-Kommission

### 10.3 Publikationen im Rahmen der Dissertation

Wesentliche Teile dieser Arbeit wurden publiziert oder vorgestellt in:

- Graetz C, **Schoepke K**, Rabe J, Schorr S, Geiken A, Christofzik D, Rinder T, Dörfer CE, Sälzer S. In vitro comparison of cleaning efficacy and force of cylindric interdental brush versus an interdental rubber pick. BMC Oral Health. 2021 Apr 14;21(1):194. doi: 10.1186/s12903-021-01558-4. PMID: 33853594; PMCID: PMC8048228.
- Graetz C, Rabe J, **Schoepke K**, Schorr S, Geiken A, Christofzik D, Rinder T, Dörfer CE, Sälzer S. New experimental setup for the measurement of cleaning efficacy and force of interdental aids in 3D-reproduced interdental areas. BMC Oral Health. 2020 May 8;20(1):136. doi: 10.1186/s12903-020-01129-z. PMID: 32384897; PMCID: PMC7206737.
- **Posterpräsentation auf der DG Paro Jahrestagung 2021 in Würzburg**  
**Kristina Schoepke**, Johanna Rabe, Susanne Schorr, Antje Geiken, David Christofzik, Christof E. Dörfer, Sonja Sälzer, Christian Graetz: "Vergleich der Reinigungseffektivität und Kraftaufwand bei Anwendung von zylindrischen Interdentalbürsten versus Interdentalpicks"
- **Vortrag im Rahmen des 2. Kieler ZMP-Tages 2021 in Kiel**  
**Kristina Schoepke**, Miriam Cyrus, Christian Graetz: „Interdentalraumbürsten & Co – passt in jede Lücke?“