

# **Zahnpasten und Abrasion/Erosion am Zahnschmelz**

Interaktion von Wirk- und Abrasivstoffen in vitro

Inauguraldissertation  
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin  
des Fachbereichs Medizin  
der Justus-Liebig-Universität Gießen

Vorgelegt von Marten, Jan  
aus Bremerhaven

Gießen 2018

Aus dem Medizinischen Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
Poliklinik für Zahnerhaltungskunde und Präventive Zahnheilkunde,  
Komm. Leitung: Prof. Dr. Bernd Wöstmann,  
des Fachbereichs Medizin der Justus-Liebig-Universität Gießen

1. Gutachter: Prof. Dr. Carolina Ganß

2. Gutachter: Prof. Dr. Roland Frankenberger

Tag der Disputation: 03.04.2019

Für meine Familie

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Einleitung und Ziel .....</b>	<b>1</b>
1.1 Kariesrückgang und Zunahme nicht kariesbedingter Zahnhartsubstanzverluste ....	2
1.2 Abrasivstoffe und Abrasivitätsbestimmung .....	5
1.3 Ätiologie und Therapie von Erosionen .....	7
1.4 Wirkeffekte und Zusammenspiel der Wirkstoffe in Zahnpasten .....	9
1.5 Ziel der Studie .....	11
<b>2 Material und Methoden.....</b>	<b>13</b>
2.1 Probenherstellung.....	13
2.2 Lösungen .....	15
2.3 Untersuchte Produkte .....	16
2.3.1 Deklarierte Inhaltsstoffe .....	16
2.3.2 Abkürzungsverzeichnis der untersuchten Produkte .....	19
2.3.3 Fluoridmessung .....	20
2.3.4 Bestimmung des pH-Werts .....	20
2.3.5 Putzkörperanteil in den Zahnpasten .....	21
2.3.6 Bestimmung von RDA und REA .....	21
2.4 Experimenteller Ablauf.....	22
2.4.1 Experiment I.....	23
2.4.2 Experiment II.....	24
2.4.3 Kontrollgruppen .....	24
2.5 Profilometrie.....	26
2.6 Rasterelektronenmikroskopie .....	27
2.6.1 Extraktion der Putzkörper .....	27
2.6.2 Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX).....	29
2.6.3 Putzkörperaufnahmen.....	29
2.7 Statistische Auswertung .....	30
2.8 Materialien und Chemikalien .....	31
<b>3 Ergebnisse.....</b>	<b>35</b>
3.1 Wirkstoffeffekte .....	35
3.2 Wirkstoffeffekte unter Bürstabrasion.....	36
3.3 Rasterelektronenmikroskopie.....	40

3.3.1 Größen und Formen der Putzkörper .....	40
3.3.2 Putzkörperanteil in den Zahnpasten .....	45
3.3.3 Elementanalyse der Abrasiva .....	46
3.3.4 Vergleich mit vom Hersteller angegebener Siliziumverbindung und -menge .....	52
3.4 Fluorid- und pH-Werte .....	54
3.5 RDA- und REA-Werte .....	55
3.6 RDA/REA, Putzkörperanteile und Putzkörpergröße in Bezug zum Substanzverlust durch Bürstabrasion .....	57
3.6.1 Lineare Regression .....	57
3.6.2 Kurvenanpassung .....	58
<b>4 Diskussion .....</b>	<b>61</b>
4.1 Material und Methoden .....	61
4.1.1 Probenherstellung und Experimente I und II .....	61
4.1.2 Messmethoden .....	62
4.1.3 Analyse der Putzkörper .....	63
4.2 Vorgängerstudie und Produktauswahl .....	66
4.2.1 Produktauswahl, Ergebnisse und Schlussfolgerung der Vorgängerstudie .....	67
4.2.2 Produktauswahl der vorliegenden Studie .....	69
4.3 Ergebnisse Experiment I: Wirkstoffeffekte .....	70
4.4 Ergebnisse Experiment II: Wirkstoffeffekte unter Bürstabrasion .....	75
4.5 Tribologisches System .....	78
4.5.1 Putzkörpergröße, -anteil und -form .....	80
4.5.2 RDA/REA und Einfluss der erosiven Demineralisation .....	82
4.5.3 Putzkörperart .....	86
4.5.4 Flüssige Phase und Hilfsstoffe .....	88
4.5.5 Elmex Intensiv .....	91
4.6 Schlussfolgerung .....	94
<b>5 Zusammenfassung .....</b>	<b>97</b>
<b>6 Summary .....</b>	<b>99</b>
<b>7 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>101</b>
7.1 Abbildungsverzeichnis .....	101
7.2 Tabellenverzeichnis .....	102

<b>8 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>103</b>
<b>9 Publikationen .....</b>	<b>110</b>
<b>10 Anhang.....</b>	<b>112</b>
10.1 Ehrenwörtliche Erklärung .....	112
10.2 Danksagung.....	113

## 1 Einleitung und Ziel

Seit Jahrtausenden stellt Karies eine ernstzunehmende Krankheit des Mundraums dar. Bereits die Ägypter, Griechen und Römer kannten diese Problematik und verwendeten Zahnpasten und -pulver in Kombination mit mechanischen Werkzeugen zur Zahnreinigung [Ring, 1985; Lippert, 2013]. Seit der Industrialisierung sind Zahnpasten für die Bevölkerung einfach zugänglich und somit das kariesprophylaktische Hilfsmittel erster Wahl [Jardim et al., 2009].

In der Vierten Deutschen Mundgesundheitsstudie (DMS IV) gaben ca. 80% der Befragten an, sich mindestens zweimal täglich die Zähne zu putzen, mehr als 95% der Kinder, Jugendlichen und Erwachsenen und ca. 80% der Senioren taten dies mit Zahnpaste [Micheelis et al., 2006]. Die Mundhygienegewohnheiten der deutschen Bevölkerung scheinen in den letzten zehn Jahren gleich geblieben zu sein, auch 2014 putzten sich 80% der Kinder, Erwachsenen, jungen Senioren und 75% der erstmals untersuchten älteren Senioren (75–100-Jährige) mehr als zweimal täglich die Zähne [Jordan & Micheelis, 2016]. Aufgrund ihrer guten Akzeptanz beim Anwender sind Zahnpasten das effektivste und einfachste Instrument zur Applikation von Wirkstoffen. Neben dem erwiesenen kariespräventiven Effekt durch Fluorid [Walsh et al., 2010] sollen Zahnpasten durch unterschiedliche Wirkstoffe auch erfrischend, anti-inflammatorisch, reinigend, erosionsprotektiv und aufhellend wirken.

## **1.1 Kariesrückgang und Zunahme nicht kariesbedingter Zahnhartsubstanzverluste**

In den Industriestaaten Westeuropas und den Vereinigten Staaten von Amerika ist seit den 1960er Jahren ein Rückgang der Karieserkrankungen bei Kindern und Jugendlichen zu erkennen [Hargreaves et al., 1983; Burt, 1985; von der Fehr & Haugejorden, 1997; Birkeland & Haugejorden, 2001; Birkeland et al., 2002; Marthaler, 2004].

Auch die DMS I–V konnten eine Zunahme von kariesfreien Gebissen und einen Rückgang kariöser Läsionen vornehmlich bei Kindern und Jugendlichen in der Bundesrepublik Deutschland verzeichnen. Den stärksten Rückgang kariöser Läsionen zeigte die Kohorte der 12-Jährigen: 1997 waren 41,8% (DMS III), 2005 70,1% (DMS IV) und 2014 81,3% (DMS V) kariesfrei [Micheelis & Reich, 1999; Micheelis et al., 2006; Jordan & Micheelis, 2016]. In dieser Altersgruppe konnte von der DMS I zur DMS V außerdem eine Reduktion der DMFT-Werte (Kariesindex: D = decayed (zerstört), M = missing (fehlend), F = filled (gefüllt), T = tooth (Zahn)) von 4,1 (1989) auf 0,5 (2014) verzeichnet werden [Micheelis & Bauch, 1991; Jordan & Micheelis, 2016].

Dieser Trend des Kariesrückgangs ließ sich bei Erwachsenen bis zur DMS IV nicht erkennen; in der Altersgruppe der 35–44-Jährigen waren 2005 lediglich 1% kariesfrei. Auch war hier ein Anstieg der Wurzelkaries von 1997 (DMS III) mit 11,8% auf 21,5% im Jahr 2005 (DMS IV) zu verzeichnen [Micheelis & Reich, 1999; Micheelis et al., 2006]. Die gegenwärtige DMS V konnte hingegen eine nachlassende Prävalenz der Wurzelkaries in den unterschiedlichen Alterskohorten zeigen. Sowohl in der Gruppe der 35–44-Jährigen als auch der 65–74-Jährigen nahm die Prävalenz der Wurzelkaries von 2005 (21,5% bzw. 45,0%) gegenüber 2014 (11,8% bzw. 28,0%) ab [Micheelis et al., 2006; Jordan & Micheelis, 2016]. Die Daten der DMS V zeigen allerdings auch eine Manifestation der Wurzelkaries im höheren Alter. Schon Burt vermutete 1985, dass durch den längeren Erhalt der Zähne eine Zunahme von Wurzelkaries bei älteren Menschen trotz des allgemeinen Rückgangs der Karieserkrankungen möglich sei [Burt, 1985].

Außerdem zeigen die Daten aus der aktuellen DMS V erstmals eine Reduktion der DMFT-Werte auch bei Erwachsenen in der Bundesrepublik Deutschland. Bei der

Kohorte der 35–44-Jährigen reduzierten sich die DMFT-Werte von 16,1 (1997) auf 11,2 (2014) und bei den 65–74-Jährigen von 23,6 (1997) auf 17,7 (2014) [Micheelis & Reich, 1999; Jordan & Micheelis, 2016].

Man geht davon aus, dass der Rückgang der Karieserkrankungen durch die Einführung fluoridhaltiger Zahnpasten und anderer prophylaktischer Maßnahmen, wie der Fissurenversiegelung und der lokalen Fluoridapplikation, zu erklären ist [Bratthall et al., 1996]. Speziell die Effekte von fluoridhaltiger Zahnpaste mit mehr als 1000 ppm Fluorid sind in der Literatur hinreichend belegt [Walsh et al., 2010; Rasines, 2010].

Die durchaus positiven Daten der DMS lassen indessen keine globale Schlussfolgerung zu, da die Bundesrepublik Deutschland mit einem DMFT von 0,5 bei Kindern (12-Jährige) im internationalen Vergleich der CAPP-Datenbank (Country/Area Profile Project) der WHO im Jahr 2014 weltweit die niedrigste Karieserfahrung aufweist [CAPP, 2014; Jordan & Micheelis, 2016]. Überdies konnte der von vielen Autoren beschriebene Rückgang der Karieserkrankungen global nicht belegt werden. Weltweit weisen 2,41 Milliarden Menschen eine unbehandelte Karies an den bleibenden Zähnen auf. Außerdem ist kein Rückgang in der Prävalenz und Inzidenz dieser Erkrankung zu erkennen [Kassebaum et al., 2014]. Karies stellt also weiterhin eine ernst zu nehmende und nicht zurückgehende Erkrankung dar.

Aufgrund der steigenden Lebenserwartung und den Möglichkeiten der modernen Zahnmedizin ist ein Erhalt der Zähne bis ins hohe Alter in vielen Fällen möglich. Deshalb rücken nicht kariesbedingte Zahnhartsubstanzverluste wie Erosionen, keilförmige Defekte und Abrasion durch Zahnpaste immer mehr in den Vordergrund der zahnmedizinischen Versorgung.

Dies wurde auch in der DMS IV berücksichtigt, indem Daten zu entsprechenden Zahnhartsubstanzdefekten erhoben wurden. Bei Kindern und Jugendlichen konnte die DMS IV keine Erosionen und keilförmige Defekte nachweisen. Bei den 35–44-Jährigen waren hingegen 16,9% betroffen, bei den 45–54-Jährigen 17,9% und bei den 65–74-Jährigen sogar 29,3% [Micheelis et al., 2006].

Die DMS V untersuchte 2014 ausschließlich das Auftreten von Erosionen und konnte eine steigende Prävalenz der Erosionen in allen Altersgruppen verzeichnen. Erstmals war auch die Gruppe der 12-Jährigen betroffen (17,9%), bei den 35–44-Jährigen wiesen 44,8% mindestens eine Erosion auf und bei den 65–74-Jährigen waren 58,5% der

Bezahnten betroffen. Auch in der Kohorte der ehemals 65–74-Jährigen aus dem Jahr 2005 (29,3%) konnte aktuell eine Verdopplung der Prävalenz auf 60,9% bei den 75–84-Jährigen Bezahnten festgestellt werden [Micheelis et al., 2006; Jordan & Micheelis, 2016].

Interessant ist, dass nicht kariesbedingte Zahnhartsubstanzverluste, wie keilförmige Defekte und Zahnpastenabrasion, häufig das Resultat einer gedacht guten, aber falsch ausgeführten Mundhygiene sind. Auch scheinen diese drei Defektarten sich gegenseitig zu beeinflussen. Treten Erosionen und eine inkorrekte Mundhygiene zusammen auf, beispielsweise die Verwendung hoch abrasiver Zahnpasten und harter Zahnbürsten, ist es möglich, dass Zahnhartsubstanzverluste erhöht werden [Wiegand & Schlueter, 2014]. Auch bei Menschen mit gesunden Zähnen spielt die Abrasivität der verwendeten Zahnpaste eine wesentliche Rolle, da die Zahnhartsubstanz zeitlebens regelmäßig mechanischen und chemischen Reizen ausgesetzt ist. Aus diesem Grund ist auch die Abrasion durch Zahnpaste, sofern sie in einem normalen Rahmen auftritt, als physiologisch anzusehen [Wiegand & Schlueter, 2014].

## 1.2 Abrasivstoffe und Abrasivitätsbestimmung

Historisch gesehen waren Abrasivstoffe schon immer ein fester Bestandteil der verwendeten Mundhygienehilfsmittel. Sie kamen in Form von Pasten oder Pulvern zum Einsatz. Bereits in der Antike nutzten Ägypter und Perser stark abrasive Putzkörper wie Bimsstein oder Muschelschalen [Ring, 1985; Jardim et al., 2009; Lippert, 2013], diese mögen damals aufgrund der geringeren Lebenserwartung ein effektiver Abrasivstoff gewesen sein, heute hingegen wären in der täglichen Anwendung solch hoch abrasive Putzkörper undenkbar.

Allerdings stellen Abrasivstoffsysteme auch heutzutage einen essenziellen Bestandteil von Zahnpasten dar. Beispielsweise ist eine gewisse Abrasivität notwendig, damit eine Zahnpaste überhaupt extrinsische Verfärbungen entfernen kann [Stookey et al., 1982]. Die Plaqueentfernung, also die eigentliche Reinigung der Zähne, erfolgt hingegen rein mechanisch mit der Zahnbürste, auch der Anteil der Putzkörper in der Zahnpaste ist nicht ausschlaggebend [Paraskevas et al., 2006].

Heute gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Putzkörper, deren Menge und Art die Fließeigenschaften und Konsistenz der Zahnpasten beeinflussen. Häufig werden Silika, Kalziumkarbonat, Natriumbikarbonat, Kalziumhydrogenphosphat, Kalziumpyrophosphat, Alumina, Perlite, Natriummetaphosphat und Nanohydroxyapatit als Abrasiva eingesetzt [Zero, 2006; Joiner, 2010; Lippert, 2013]. In neueren Zahnpasten werden außerdem Polyethylenputzkörper verwendet. Silika und Kalziumkarbonat sind mit 8–20 Gew.% in Zahnpasten vertreten und stellen die am häufigsten verwendeten Putzkörper dar. Das weniger abrasive Natriumbikarbonat kann in Konzentrationen von bis zu 50 Gew.% vorkommen. Stark abrasive Polierstoffe wie Alumina und Perlite werden lediglich in sehr geringen Mengen von 1–2 Gew.% und zusammen mit anderen Abrasiva eingesetzt [Lippert, 2013].

Um die reine Abrasivität der Zahnpasten oder einzelner Putzkörpertypen zu bewerten, sind labortechnische Verfahren notwendig. Die gewonnenen Ergebnisse sollen Aufschluss über die Qualität der Produkte geben und als unterstützende Information für Verbraucher dienen.

Grabenstetter et al. entwickelten 1958 das Verfahren der Radioaktiven bzw. Relativen Dentin Abrasion (RDA) [Grabenstetter et al., 1958], 1976 folgte das entsprechende

Verfahren für den Zahnschmelz, Radioaktive bzw. Relative Enamel Abrasion (REA) [Hefferren, 1976]. Beiden liegt dieselbe Technik zugrunde. Die Dentin- bzw. Schmelzproben werden durch ein Isotop radioaktiv markiert, anschließend werden die Proben mit einer Aufschlämmung der zu untersuchenden Zahnpaste gebürstet. Im nächsten Schritt wird die Radioaktivität der Aufschlämmung bestimmt und mit einem Standard, meist Kalziumdiphosphat, verglichen. Der RDA-Wert wird ins Verhältnis zu dem Standardabrasivstoff gesetzt, dessen Wert mit 100 definiert ist. Das Verfahren der Relativen Dentin Abrasion stellt für viele Untersucher den Goldstandard für die Abrasivitätsbestimmung einer Zahnpaste dar. Nach ISO 11609 kann zur Bestimmung der Abrasivität einer Zahnpaste neben der Relative Dentin Abrasion auch die Erstellung eines Oberflächenprofils verwendet werden, welches auch ohne die Nutzung von Isotopen möglich ist [González-Cabezas et al., 2013].

Allerdings ist bei beiden Verfahren zu bedenken, dass individuelle patientenbezogene Aspekte wie die Zahnstellung, der Speichelfluss, die Zahnputztechnik, ein erhöhtes Erosionsrisiko und viele weitere Faktoren hierbei nicht mit einbezogen werden. Die in vitro gemessene Abrasivität von Zahnpasten kann nicht als alleiniger Maßstab für deren Sicherheit bzw. deren Risiko in der klinischen Anwendung dienen, da der Zahnhartsubstanzverlust durch Zahnpastenabrasion eine multifaktorielle Ätiologie aufweist [Dörfer et al., 2010]. Vielmehr dienen sie als eine Art Richtwert, zumal das Zusammenspiel der Zahnpaste mit Speichel und anderen oralen Faktoren durchaus die Abrasion beeinflussen kann. Beispielsweise konnte gezeigt werden, dass die Putzkörper sich in Suspension zu den Borstenspitzen der Zahnbürste orientieren und dort verbleiben [Lewis et al., 2004]. Ihre Wirkweise hängt also zusätzlich von der jeweils verwendeten Zahnbürste und Putztechnik ab.

Des Weiteren unterscheiden sich die Wirkeffekte der Putzkörper, je nachdem ob sie auf Dentin oder Zahnschmelz wirken. Auf gesundem Zahnschmelz zeigt sich beispielsweise bei einer Erhöhung der Putzkörperkonzentration kein signifikanter Anstieg des Substanzverlustes. Im Gegensatz dazu steht der signifikante Anstieg des Substanzverlustes am Dentin bei einer Steigerung der Putzkörperkonzentration [Franzò et al., 2010]. Dies hängt unter anderem mit der geringeren Härte, dem niedrigeren Mineralgehalt und dem höheren Wasseranteil des Dentins gegenüber dem Schmelz zusammen. Kommt es neben der Zahnpastenabrasion zusätzlich zu einer Erosion, kann dies zu einer Zunahme des Substanzverlustes führen [Ferreira et al., 2013].

### 1.3 Ätiologie und Therapie von Erosionen

Unter dem Begriff „Erosion“ versteht man eine säurebedingte Lösung von Mineralien aus der Zahnhartsubstanz. Prinzipiell treten Erosionen auf, wenn die Zahnhartsubstanz über einen längeren Zeitraum immer wieder in Kontakt mit extrinsischen oder intrinsischen Säuren kommt. Eine Risikogruppe für erosive Zahnhartsubstanzdefekte stellen Personen mit Essstörungen und Refluxkrankheit dar [Schlueter & Tveit, 2014], bei denen die Erosion durch den sauren Mageninhalt verursacht wird. Auf der anderen Seite stehen Patienten, bei denen Erosionen durch extrinsische Säuren ausgelöst werden, beispielsweise durch den häufigen Konsum von sauren Softgetränken.

Durch die Säureexposition kommt es unter der Bedingung, dass eine Untersättigung an Zahnmineralien besteht, zu einer Demineralisation der oberflächlichen Schicht des Schmelzes, die in direktem Kontakt zur Säure steht. In der unterhalb liegenden teilweise demineralisierten Schicht erfolgt die sogenannte „near surface demineralization“ [Shellis et al., 2013]. Shellis et al. gehen davon aus, dass dies aufgrund der in den Schmelzporen befindlichen Säure erfolgt. Es kommt hier im Gegensatz zu Karies primär zu einer Demineralisation des oberflächlichen Zahnschmelzes, sekundär zu einem schichtweisen Zahnschmelzverlust. Dies führt zu einem Zahnhartsubstanzverlust, unter dem eine demineralisierte Zahnschmelzschicht erhalten bleibt [Lussi et al., 2011]. Klinisch sichtbar ist zuerst der Zahnschmelz betroffen. In Bereichen der Zahnkronen mit geringer Schmelzdicke liegt nach der beschriebenen schichtweisen Demineralisation sehr schnell auch das Dentin frei.

Im Gegensatz zu gesundem Schmelz kann erodierter Schmelz aufgrund der Abnahme der Mikrohärtigkeit durch physikalische Einwirkungen abgetragen werden [Attin et al., 1997]. Im Vordergrund steht hier die Abrasion durch Zahnpaste bei der täglichen Mundhygiene.

Wie bereits erwähnt, treten Erosionen an der Oberfläche bzw. in nah angrenzenden Schichten auf und sind aufgrund ihrer Pathogenese klar von einem kariesbedingten Zahnhartsubstanzverlust abzugrenzen. Bei Karies kommt es zu einer Demineralisation durch bakteriell produzierte Säuren unterhalb des oberflächlichen Zahnschmelzes, dieser wird erst durch ein Fortschreiten der Karies sekundär zerstört. Aufgrund ihrer

Struktur und Lokalisation sind kariöse Läsionen in der Regel weniger physikalischen Reizen ausgesetzt. Die Abrasivität der Zahnpaste ist daher aus kariologischer Sicht weniger bedeutsam. Da Erosionen wie erwähnt Oberflächenphänomene darstellen und die Glattflächen betreffen, stellen Abrasionen durch Zahnpasten dagegen wahrscheinlich einen Kofaktor für den Zahnhartsubstanzverlust dar.

Der entscheidende Schritt in der Behandlung von Erosionen ist die kausale Therapie. Hierbei sollte versucht werden die Säureexposition zu minimieren, da sonst ein Stillstand bzw. eine Reduktion des erosiven Zahnhartsubstanzverlustes nicht zu erreichen ist [Carvalho et al., 2015]. Sollte dies nicht möglich sein, sind symptomatische Maßnahmen angezeigt.

Die symptomatische Therapie von Karies und Erosionen unterscheidet sich maßgeblich, obwohl es sich sowohl bei Karies als auch bei Erosionen um durch Demineralisation hervorgerufene Zahnhartsubstanzdefekte handelt. In der Kariologie werden Fluoridverbindungen wie beispielsweise Aminfluorid oder Natriumfluorid eingesetzt. Diese ermöglichen eine Remineralisation der kariösen Läsionen durch den Einbau von Fluoridionen. Eine erneute Remineralisation ist bei erosiven Defekten hingegen nicht möglich. Hier steht die Verbesserung der Säureresistenz im Vordergrund, welche durch Präzipitation von Fluorid- und Zinnionen auf der Zahnoberfläche erzielt wird [Petzold, 2001; Ganss et al., 2007]. Für diesen Zweck zeigten sich Mundspüllösungen und Zahnpasten mit Zinnverbindungen wie Zinnfluorid oder Zinnchlorid als wirksam und stellen momentan die Therapie der Wahl dar [Carvalho et al., 2015].

## 1.4 Wirkeffekte und Zusammenspiel der Wirkstoffe in Zahnpasten

Prinzipiell hängt die Wirkung einer Zahnpaste von ihren Inhaltsstoffen ab, sowohl den aktiven als auch den Hilfsstoffen. Deshalb ist es auch möglich, Zahnpasten für diverse Indikationen zu entwickeln.

Neben den bereits erwähnten Abrasiva enthalten Zahnpasten eine Vielzahl an aktiven Inhaltsstoffen, wie Fluoride, Zinnverbindungen, Antiplaque- und Antigingivitis-Wirkstoffe, zahnaufhellend wirkenden Substanzen und Wirkstoffe zur Erosionstherapie sowie Hilfsstoffe, wie Tenside, Feuchthaltemittel, Geschmacksstoffe und Farbstoffe.

Zu den Wirkeffekten von Zahnpasten bei Erosionen, wie beispielsweise die Effektivität von klassischen Fluoridverbindungen (Natriumfluorid, Aminfluorid, Natriummonofluorophosphat) sowie von polyvalenten Metallkationen (Zinnionen, Titanionen), existieren bereits eine Vielzahl an Studien mit teils sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Zahnpasten mit klassischen Fluoridverbindungen zeigten bei In-vitro-Experimenten zur Erosion Effektgrößen von 18–39% am Zahnschmelz, in Kombination von Erosion und Abrasion Effektgrößen von 26–47% [Huysmans et al., 2014]. Zahnpasten, die polyvalente Metallkationen enthalten, erreichten bei In-vitro-Experimenten zur Erosion am Zahnschmelz Wirkeffekte im Bereich von 55–67%, unter zusätzlicher Abrasion traten Werte von null bis 66% auf [Huysmans et al., 2014].

Polyvalente Metallkationen, Biopolymere wie Chitosan und Phosphate zeigen vielversprechende Ergebnisse in der Erosionstherapie; ihre Wirkung oder die anderer aktiver Wirkstoffe wird allerdings häufig durch die enthaltenen Abrasiva limitiert. Diese greifen die erodierte Zahnhartsubstanz physikalisch an und beeinflussen somit den gebildeten Schutz gegenüber Säureangriffen möglicherweise negativ [Ganss et al., 2013].

Wie bereits erwähnt sind die anti-erosiven Wirkeffekte von Fluoridverbindungen durch Studien belegt, über die Interaktion der unterschiedlichen Wirk- und Inhaltsstoffe ist allerdings nur wenig bekannt [Magalhães et al., 2014]. Auch inwiefern diese Inhaltsstoffe agonistisch oder antagonistisch wirken, ist bisher wenig erforscht. Beispielsweise wurde anfangs Fluorid noch keine kariespräventive Wirkung nachgesagt, weil es in frühen Studien keine Wirkung zeigte [Bibby, 1945]. Dies lag

darán, dass die Fluoridionen des Natriumfluorids mit den Dikalziumphosphat- Putzkörpern reagierten und somit nicht in der freien ionischen Form vorlagen, in welcher Fluorid uneingeschränkt wirksam ist. Solche und vergleichbare Erkenntnisse fehlen noch im Zusammenspiel der Zinnfluoride, Abrasiva und neuerer Inhaltsstoffe wie Chitosan.

## 1.5 Ziel der Studie

Anhand der zunehmenden Menge an Publikationen seit den 1970er Jahren ist zu erkennen, dass Erosionen in der zahnmedizinischen Forschung einen immer größeren Stellenwert einnehmen. 1970 waren es noch jährlich 5 Publikationen, 1980 knapp über 10. Ab 2000 hingegen mehr als 60 jährlich und 2012 wurden bereits 100 Publikationen zu dem Suchbegriff „tooth erosion“ in der PubMed Datenbank gefunden [Lussi & Carvalho, 2014]. Im Jahr 2016 verzeichnete PubMed mehr als 150 Publikationen zu diesem Suchbegriff. Mittlerweile ist viel über den Pathomechanismus von Erosionen bekannt. Jedoch besteht erheblicher Forschungsbedarf zu der Frage, welche Faktoren und Wirkstoffe die Effektivität einer Zahnpaste beeinflussen, speziell bei der Kombination von Erosion und Bürstabrasion, wie sie häufig bei erosionsgefährdeten Patienten auftritt.

Häufig werden in Studien nur einzelne Wirkstoffe oder einzelne Zahnpasten vergleichend untersucht. Eine Vorgängerstudie untersuchte erstmals eine Vielzahl unterschiedlicher Produkte [Ganss et al., 2011]. Dabei konnte gezeigt werden, dass natriumfluoridhaltige und zinnhaltige Produkte den erosionsbedingten Substanzverlust reduzierten, die positiven Effekte allerdings bei der Kombination von Erosion und Abrasion nicht auftraten.

Die aktuelle Studie setzt hier an und betrachtet ebenfalls eine Vielzahl unterschiedlicher Zahnpasten und ein Zahngel mit verschiedenen Wirkstoffen gemeinsam, um ihre Wirkungen direkt vergleichen zu können. Aufgrund methodischer Schwächen und um die alleinige Erosion und die Kombination von Erosion und Abrasion besser gegenüberstellen zu können, wurden gegenüber der Vorgängerstudie einige Änderungen am Versuchsdesign vorgenommen. Insgesamt wurden 18 Produkte in drei Versuchsgruppen anhand der enthaltenen Wirkstoffe eingeteilt. Untersucht wurden natriumfluoridhaltige und fluoridfreie Produkte mit unterschiedlichen Reinigungseigenschaften (speziell für elektrische Zahnbürsten, Interdentalreinigung etc.), zinn- und zinnfluoridhaltige Zahnpasten und eine Positivkontrolle, außerdem Produkte mit speziellen Wirkstoffen wie Polyethylenputzkörpern, Chitosan und Hydroxylapatit und ein wirkstofffreies Placebo.

In der vorliegenden Studie wurden die erosionsprotektive Wirkung der Produkte und die Effekte nach Erosion und Bürstabrasion am Zahnschmelz untersucht. Die Nullhypothese war, dass die Produkte sich in ihrer Wirkung nicht unterscheiden.

Ziel der vorliegenden Studie war es speziell, die physikalischen und chemischen Effekte und die Interaktion der Fraktion der Putzkörper und der aktiven Inhaltsstoffe zu beleuchten, welche die erosionsprotektiven Effekte der untersuchten Produkte möglicherweise beeinflussen.

Die aus diesem In-vitro-Experiment gewonnenen Ergebnisse sollten durch die Analyse unterschiedlicher Parameter belegt werden:

- Form und Größe der enthaltenen Putzkörper
- Putzkörperanteil der Produkte
- die RDA- und REA-Werte der einzelnen Zahnpasten
- die Elementanalyse der enthaltenen Putzkörper
- die Wirkstoffe (Inhaltsstoffe) der Produkte

Die vorliegende Arbeit ist in Teilen publiziert in:

C. Ganss, J. Marten, A.T. Hara und N. Schlueter

**Toothpastes and enamel erosion/abrasion – Impact of active ingredients and the particulate fraction**

Journal of Dentistry 2016, 54; 62-67

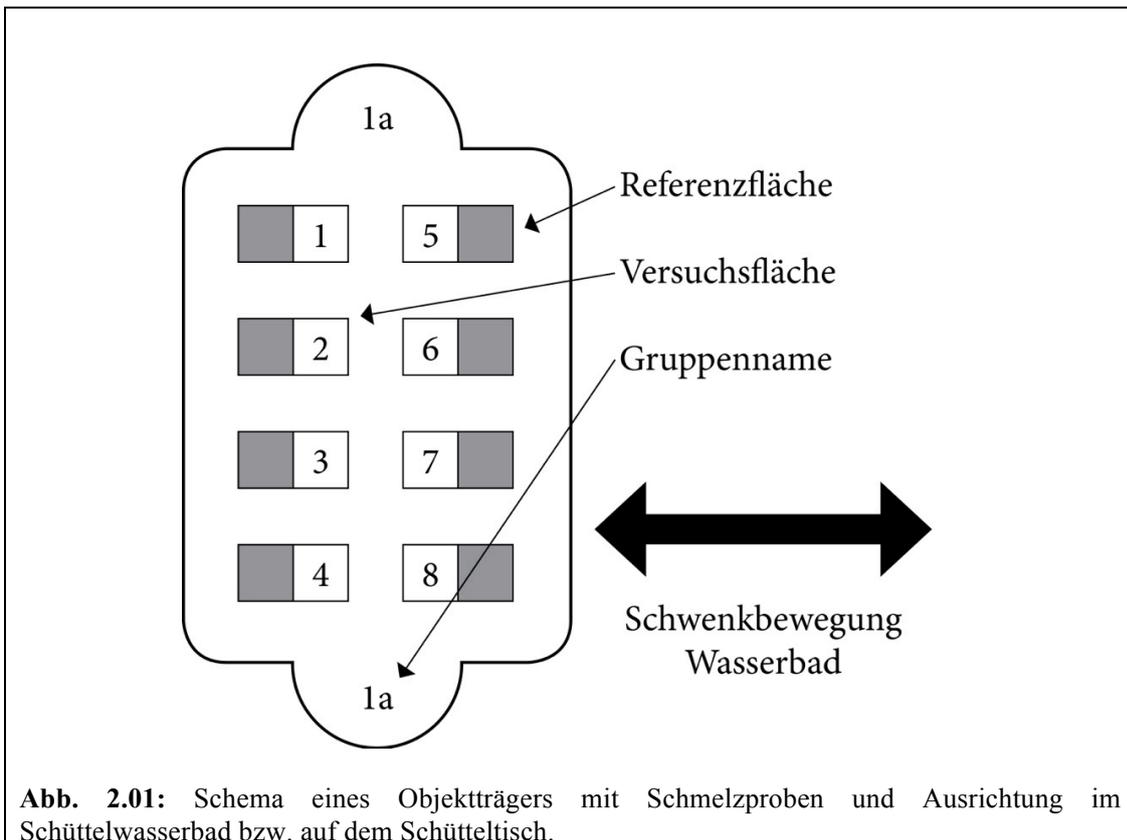
## 2 Material und Methoden

Das Experiment bestand aus zwei Versuchsreihen, in denen die erosive Demineralisation und Abrasion an Zahnschmelz untersucht wurden. Um einen erosiven Substanzverlust zu erzeugen, wurden bei beiden Versuchsreihen die Zahnschmelzproben sechsmal täglich mit Zitronensäure behandelt. In der ersten Versuchsreihe wurde die anti-erosive Wirkung verschiedener Zahnpasten getestet. In der zweiten Versuchsreihe wurden die Proben zusätzlich in einem Bürstsimulator behandelt. Am Anfang und Ende jedes Versuchstages kamen die Schmelzproben in Kontakt mit Zahnpaste bzw. Zinnfluoridgel.

### 2.1 Probenherstellung

Die Schmelzproben wurden aus menschlichen Molaren (positives Votum der Ethik-Kommission der Justus-Liebig-Universität Gießen, AZ 143/09) präpariert, welche bis zum Versuch in einer wässrigen gesättigten Thymollösung (Chem. 01) gelagert wurden. Die Zähne wurden vor der Probenherstellung gereinigt, die Wurzeln wurden mit einem diamantierten Trenngerät (Mat. 01) entfernt. Aus jeder Zahnkrone wurden etwa vier Schmelzproben aus den Glattflächen abgetrennt. Um ein Versuchsfeld von 3 x 3 mm herzustellen, wurden die natürlichen Schmelzoberflächen der Proben mit Schleifpapier der Körnung P 1200 und P 4000 plan geschliffen. Anschließend wurden die Proben poliert (Mat. 02 und Mat. 03). Alle Trenn- und Schleifarbeiten wurden unter ausreichender Wasserkühlung durchgeführt. Es wurden insgesamt 585 Schmelzproben angefertigt. Für Experiment I und II wurden jeweils 270 Schmelzproben benötigt. Weitere 45 Schmelzproben wurden für drei Negativkontrollgruppen (n = 15) verwendet, da die Experimente aus organisatorischen Gründen in drei Versuchsdurchgänge geteilt wurden. Sowohl für Experiment I als auch für Experiment II wurden 15 Schmelzproben pro Zahnpaste (n = 15 pro Gruppe, insgesamt 36 Gruppen) verwendet. Diese wurden zu acht bzw. siebt auf Kunststoffobjektträger (Mat. 04, Abb. 2.01) fixiert (Mat. 05), sodass pro Zahnpaste je zwei Kunststoffobjektträger vorhanden waren. Für beide Experimente

wurden die Probenflächen mit lichthärtendem Kunststoff (Mat. 05) halbseitig abgedeckt, damit eine Versuchsfläche von einer von De- und Remineralisationsvorgängen nicht betroffenen Referenzfläche abzugrenzen war (Abb. 2.01). Die vorbereiteten Schmelzproben wurden bis zum Experiment bei 5 °C und 100% Luftfeuchtigkeit im Kühlschrank verwahrt.



**Abb. 2.01:** Schema eines Objektträgers mit Schmelzproben und Ausrichtung im Schüttelwasserbad bzw. auf dem Schütteltisch.

## 2.2 Lösungen

### **Demineralisationslösung**

Zur Herstellung einer 0,5%igen Zitronensäure mit einem pH-Wert von 2,5 wurden 5 g Zitronensäure Monohydrat (Chem. 02) in 1000 ml Aqua dest. (Chem. 03) gelöst (Mat. 06, 07 und Mat. 08).

### **Remineralisationslösung**

Zur Herstellung der Remineralisationslösung wurden 0,4 g Phosphorsäure ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) in 40 ml Aqua dest. und 1,5 g Kaliumchlorid (KCl), 1 g Natriumhydrogencarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ), 0,22 g Kalziumchlorid ( $\text{CaCl}_2$ ) je in 100 ml destilliertem Wasser gelöst. Im Anschluss wurden alle vier Lösungen vermischt und mit 600 ml Aqua dest. aufgefüllt (Chem. 04, 05, 06 und 07). Der pH-Wert war 6,7.

### **Slurry**

Die Zahnpasten wurden im Verhältnis 1:3 (nach Gewicht) mit der Remineralisationslösung vermischt. Pro Versuchstag wurden 60 ml Slurry verwendet.

## 2.3 Untersuchte Produkte

Insgesamt wurden in den beiden Experimenten 17 unterschiedliche Zahnpasten und eine Positiv- bzw. Positivbürstkontrolle (Zinnfluoridgel) untersucht. Einige Zahnpasten waren fluoridfrei, einige fluoridhaltig bzw. enthielten andere anti-erosive Wirkstoffe wie Zinn oder Chitosan. Sämtliche Produkte mit Ausnahme des wirkstofffreien Placebo-Produkts wurden im Handel erworben. Das Placebo-Produkt ist eine wirkstofffreie Formulierung der Firma GABA GmbH.

### 2.3.1 Deklarierte Inhaltsstoffe

**Tab. 2.01:** Produkt und Hersteller; Inhaltsstoffe wie vom Hersteller deklariert.

<b>Produkt (Hersteller)</b>	<b>Inhaltsstoffe</b>
Apacare®  <i>Cumdente GmbH</i>	Aqua, Hydrated Silica, Sorbitol, Propylene Glycol, Glycerin, Sodium C14-C16 Olefin Sulfonate, Hydroxyapatite, Aroma, Cellulose Gum, CI 77891, Sodium Fluoride, Allantoin, Sodium Saccharin, Tetrapotassium Pyrophosphate, Limonene. Enthält Natriumfluorid (1450 ppm F <sup>-</sup> ).
Biorepair®  <i>Dr. Kurt Wolff</i>	Aqua, Zinc Hydroxyapatite, Hydrated Silica, Glycerin, Sorbitol, Silica, Aroma, Cellulose Gum, Sodium Myristoyl Sarcosinate, Sodium Methyl Cocoyl, Taurate, Tetrapotassium Pyrophosphate, Zinc PCA, Sodium Saccharin, Sodium Benzoate, Citric Acid, Phenoxyethanol, Benzyl Alcohol, Methylparaben, Propylparaben.
Blend a med® Pro Expert Zahnschmelzschild  <i>Procter &amp; Gamble</i>	Aqua, Sorbitol, Hydrated Silica, Sodium Gluconate, Sodium Lauryl Sulfate, Cellulose Gum, Aroma, Stannous Chloride, Chondrus Crispus, CI 77891, Zinc Citrate, Hydroxyethylcellulose, Sodium Hydroxide, Sodium Saccharin, Sodium Fluoride, Phytic Acid/ Inositol Phosphate, Phosphoric Acid, Silica, Eugenol, Limonene. Enthält Natriumfluorid (1450 ppm F <sup>-</sup> ).
Chitodent®  <i>Helmuth Focken Biotechnik e. K.</i>	Aqua, Sorbitol, Hydrated Silica, Glycerin, Cocamidopropyl Betaine, Chitosan, Lactic acid, Aroma, Hydroxypropyl Guar, Sodium Saccharin, Sodium Hydroxide, CI 42051.

Tab. 2.01: Fortsetzung

<b>Produkt (Hersteller)</b>	<b>Inhaltsstoffe</b>
Elmex® Erosionsschutz <i>GABA GmbH</i>	Aqua, Glycerin, Sorbitol, Hydrated Silica, Hydroxyethylcellulose, Aroma, Cocamidopropyl Betaine, Titanium Dioxide, Olaflur, Sodium Gluconate, Stannous Chloride, Alumina, Chitosan, Sodium Saccharin, Sodium Fluoride, Potassium Hydroxide, Hydrochloric Acid. Enthält Olaflur (Aminfluorid) und Natriumfluorid. Fluoridgehalt 1400 ppm F <sup>-</sup> .
Elmex® Intensiv- reinigung <i>GABA GmbH</i>	Aqua, Hydrated Silica, Sorbitol, Alumina, Polyethylene, Olaflur, Hydroxyethylcellulose, Aroma, Titanium Dioxide, Limonene, PEG-40 Hydrogenated Castor Oil, Cocamidopropyl Betaine, Saccharin, Citric Acid, Stearic Acid. Enthält Olaflur (Aminfluorid) und Natriumfluorid. Fluoridgehalt 1400 ppm F <sup>-</sup> .
Elmex® Sensitive <i>GABA GmbH</i>	Aqua, Sorbitol, Glycerin, Polyethylene, Hydrated Silica, Hydroxyethylcellulose, Olaflur, Silica Dimethyl Silylate, Aroma, Cl 77891, Sodium Saccharin. Enthält Olaflur (Aminfluorid). Fluoridgehalt 1400 ppm F <sup>-</sup> .
Emofluor® Gel <i>Dr. Wild &amp; Co. AG</i>	Aqua, Glycerin, Propylene Glycol, PEG-40-Hydrogenated Castor Oil, Cellulose Gum, PEG-8, Phosphocolamine, Aroma, Stannous Fluoride (1000 ppm F <sup>-</sup> = 0.1% F <sup>-</sup> ), Sodium Saccharin. RDA 18.
Emofluor® Zahnpaste <i>Dr. Wild &amp; Co. AG</i>	Glycerin, Silica, Aqua, Propylene Glycol, PEG-40-Hydrogenated Castor Oil, Cocamidopropyl Betaine, PEG-8, Phosphocolamine, Hydroxyethyl Cellulose, Aroma, Sodium Chloride, Titanium Dioxide, Sodium Saccharin, Stannous Fluoride (1000 ppm F <sup>-</sup> = 0.1% F <sup>-</sup> ), Limonene. RDA 37, Re 33,3, RA 0,485.
Pearls and Dents® <i>Dr. Liebe Nachf.</i>	Aqua, Glycerin, Sodium Metaphosphate, Ethylen-Vinylacetat Copolymer, Silica, Xylitol, Propylene Glycol, Aminfluorid, Cocamidopropyl Betaine, Chamomilla Recutita Flower Extract, Alcohol denat., Panthenol, Bisabolol, Sodium Fluoride, Hydroxyethylcellulose, Titanium Dioxide, Sodium Benzoate, Saccharin, Aroma, Anethol, Citronellol, Eucalyptol, Eugenol, Menthol. Enthält Aminfluorid (Bis(hydroxyethyl)-aminopropyl-N-hydroxyethyloctadecylamin-dihydrofluorid) (800 ppm F <sup>-</sup> ) und Natriumfluorid (400 ppm F <sup>-</sup> ).

Tab. 2.01: Fortsetzung

<b>Produkt (Hersteller)</b>	<b>Inhaltsstoffe</b>
Perlodent® Actischmelz  <i>Dirk Rossmann GmbH</i>	Aqua, Hydroxyapatite, Sorbitol, Hydrated Silica, Propylene Glycol, Tetrapotassium Pyrophosphate, Sodium C14-16 Olefin Sulfonate, Aroma, Cellulose Gum, Disodium Pyrophosphate, Sodium Fluoride, Sodium Cocoyl Isethionate, Sodium Saccharin, Sodium Methylparaben, Limonene, CI 77891. Enthält Natriumfluorid.
Sensodyne® Multicare  <i>GlaxoSmithKline Consumer Healthcare GmbH &amp; Co. KG</i>	Aqua, Sorbitol, Hydrated Silica, Glycerin, Potassium Nitrate, Cocamidopropyl Betaine, Aroma, Zinc Citrate, Xanthan Gum, Titanium Dioxide, Sodium Fluoride, Sodium Hydroxide, Sodium Saccharin, Sucralose, Limonene, Cinnamal, Eugenol. Enthält Natriumfluorid (1450 ppm F <sup>-</sup> ).
Sensodyne® Proschmelz  <i>GlaxoSmithKline Consumer Healthcare GmbH &amp; Co. KG</i>	Aqua, Sorbitol, Hydrated Silica, Glycerin, Potassium Nitrate, PEG-6, Cocamidopropyl Betaine, Aroma, Xanthan Gum, Sodium Saccharin, Sodium Fluoride, Titanium Dioxide, Sodium Hydroxide, Limonene, Anise Alcohol. Enthält Natriumfluorid (1450 ppm F <sup>-</sup> ).
Theramed® Interdental  <i>Schwarzkopf &amp; Henkel</i>	Aqua, Sorbitol, Hydrated Silica, PEG-32, Sodium Lauryl Sulfate, Aroma, Alumina, Disodium Azacycloheptane Diphosphonate, Alcohol, Zinc Sulfate, Sodium Benzoate, Xanthan Gum, PEG-30 Glyceryl Stearate, Sodium Fluoride, Disodium Phosphate, Sodium Saccharin, Cocamidopropyl Betaine, Trisodium Phosphate, Sodium Chloride, Sodium Sulfate, Limonene, CI 74260, CI 77891. Enthält Natriumfluorid (1450 ppm F <sup>-</sup> ).
Theramed® Naturweiß  <i>Schwarzkopf &amp; Henkel</i>	Aqua, Sorbitol, Hydrated Silica, PEG-32, Sodium Lauryl Sulfate, Cellulose Gum, Aroma, Sodium Fluoride, Disodium Phosphate, Glycerin, Sodium Saccharin, Calcium Glycerophosphate, Trisodium Phosphate, Sodium Sulfate, Chamomilla Recutita Flower Extract, Salvia Officinalis Leaf Extract, Sodium Benzoate, Limonene, CI 77891. Enthält Natriumfluorid (1450ppm F <sup>-</sup> ).
Theramed® Original 2 in 1  <i>Schwarzkopf &amp; Henkel</i>	Aqua, Sorbitol, Hydrated Silica, PEG-32, Sodium Lauryl Sulfate, Aroma, Alcohol, Zinc Sulfate, Xanthan Gum, PEG-30 Glyceryl Stearate, Sodium Fluoride, Disodium Phosphate, Sodium Saccharin, Cocamidopropyl Betaine, Trisodium Phosphate, Sodium Chloride, Sodium Sulfate, Limonene, CI 42090. Enthält Natriumfluorid (1450 ppm F <sup>-</sup> ).

**Tab. 2.01: Fortsetzung**

<b>Produkt (Hersteller)</b>	<b>Inhaltsstoffe</b>
Theramed® ProElectric  <i>Schwarzkopf &amp; Henkel</i>	Aqua, Glycerin, Hydrated Silica, Sorbitol, Sodium Lauryl Sulfate, Aroma, Xanthan Gum, Silica, Sodium Fluoride, Trisodium Phosphate, Sodium Saccharin, Disodium Phosphate, Cocamidopropyl Betaine, Zinc Sulfate, Sodium Chloride, Sodium Sulfate, Limonene, Eugenol, CI 42090, CI 74160, CI 77891. Enthält Natriumfluorid (1450 ppm F <sup>-</sup> ).

### 2.3.2 Abkürzungsverzeichnis der untersuchten Produkte

Um den Lesefluss nicht durch lange Produktnamen zu erschweren, werden die Produkte im folgenden Text, in den Abbildungen, Grafiken und Tabellen entsprechend ihrer hier angegebenen Abkürzung benannt. Das verwendete Placebo-Produkt wird als Placebo bezeichnet.

**Tab. 2.02:** Produkte und Hersteller; im folgenden Text, in den Abbildungen, Grafiken und Tabellen verwendete Abkürzung der Produkte.

<b>Produkt (Hersteller)</b>	<b>Abkürzung des Produkts</b>
Apacare® <i>Cumdente GmbH</i>	Apacare
Biorepair® <i>Dr. Kurt Wolff</i>	Biorepair
Blend a med® Pro Expert Zahnschmelzschild <i>Procter &amp; Gamble</i>	ProExpert Zahnschmelzschild
Chitodent® <i>Helmuth Focken Biotechnik e. K.</i>	Chitodent
Elmex® Erosionsschutz <i>GABA GmbH</i>	Elmex Erosionsschutz
Elmex® Intensivreinigung <i>GABA GmbH</i>	Elmex Intensiv
Elmex® Sensitive <i>GABA GmbH</i>	Elmex Sensitiv
Emofluor® Gel <i>Dr. Wild &amp; Co. AG</i>	Emofluor Gel
Emofluor® Zahnpaste <i>Dr. Wild &amp; Co. AG</i>	Emofluor Zahnpaste
Pearls and Dents® <i>Dr. Liebe Nachf.</i>	Pearls and Dents

**Tab. 2.02: Fortsetzung**

<b>Produkt (Hersteller)</b>	<b>Abkürzung des Produkts</b>
Perlodent® Actischmelz <i>Dirk Rossmann GmbH</i>	Actischmelz
Sensodyne® Multicare <i>GlaxoSmithKline Consumer Healthcare GmbH &amp; Co. KG</i>	Sensodyne Multicare
Sensodyne® Proschmelz <i>GlaxoSmithKline Consumer Healthcare GmbH &amp; Co. KG</i>	Sensodyne Proschmelz
Theramed® Interdental <i>Schwarzkopf &amp; Henkel</i>	Theramed Interdental
Theramed® Naturweiß <i>Schwarzkopf &amp; Henkel</i>	Theramed Naturweiß
Theramed® Original 2 in 1 <i>Schwarzkopf &amp; Henkel</i>	Theramed Original
Theramed® ProElectric <i>Schwarzkopf &amp; Henkel</i>	Theramed ProElectric

### 2.3.3 Fluoridmessung

Zur Messung des Fluoridgehalts der Produkte wurde das Standardverfahren der ADA (American Dental Association, Council of Scientific Affairs 2005 (Fluoride Containing Dentifrices)) angewendet.

Es wurde eine Fluoridionen-selektive Elektrode (Mat. 09) und die dazugehörige Messeinheit (Mat. 10) eingesetzt. Zur Bestimmung der Fluoridmenge wurden 0,5 g Zahnpaste bzw. Zinnfluoridgel in 49,5 g Aqua dest. suspendiert und anschließend je 5 ml in Zentrifugenröhrchen (Mat. 11) für 10 min bei  $10.000 \text{ min}^{-1}$  zentrifugiert (Mat. 12). Pro Produkt wurden drei Proben hergestellt. Der Überstand wurde dann im Verhältnis 1:1 mit TISAB II (Chem. 09) versetzt (Mat. 13). Die Elektrode (Mat. 09) wurde vor jeder Messung sorgfältig mit Aqua dest. abgespült und mit einem Papiertuch (Mat. 14) abgetrocknet.

### 2.3.4 Bestimmung des pH-Werts

Der pH-Wert der Slurries wurde am jeweils ersten Tag des Versuchs gemessen, außerdem wurde jeden Tag der pH-Wert der Demineralisationslösung bestimmt. Die Messung wurde mit dem Knick pH-Meter 761 (Mat. 15) durchgeführt.

### 2.3.5 Putzkörperanteil in den Zahnpasten

Zur Bestimmung des Anteils der Putzkörper in der jeweiligen Zahnpaste wurden 30 g in 90 g Aqua dest. suspendiert. Pro Zahnpaste wurden je zwei Zentrifugenröhrchen (Mat. 11) mit jeweils 45 g Slurry befüllt und für 10 min bei  $10.000 \text{ min}^{-1}$  zentrifugiert (Mat. 12), wobei für jedes befüllte Zentrifugenröhrchen einzeln das genaue Gewicht notiert wurde. Der wässrige Überstand wurde abgegossen und die Zentrifugenröhrchen (Mat. 11) mit dem Putzkörperbodensatz für vier Tage bei  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  im Trockenschrank (Mat. 16) getrocknet.

Elmex Sensitiv und Pearls and Dents enthielten feste Bestandteile im Überstand, diese wurden separat auf einem Filterpapier (Mat. 17) aufgefangen und ebenfalls im Trockenschrank getrocknet. Die Zentrifugenröhrchen mit getrocknetem Bodensatz wurden nach vier Tagen im Trockenschrank gewogen (Mat. 08). Durch die Bestimmung des Leergewichts der jeweiligen Zentrifugenröhrchen ließen sich das Gewicht der Putzkörper und die Gewichtsprozentage der Zahnpasteneinwaage berechnen. Bei den Produkten, die zusätzlich auf dem Filterpapier getrocknet wurden, wurde das getrocknete Sediment und der getrocknete Überstand addiert.

### 2.3.6 Bestimmung von RDA und REA

RDA und REA wurden nach Standardverfahren (ISO:11609: Dentistry – dentifrices – requirements, test methods and marking. 2010), im Oral Health Research Institute der Indiana University School of Dentistry (415 Lansing Street, Indianapolis, Indiana 46202-2876; Prof. Anderson Hara) bestimmt. An dieser Stelle soll nur eine kurze Übersicht der angewandten Methodik gegeben werden, welche ausführlich in der Studie „Toothpastes and enamel erosion/abrasion – Impact of active ingredients and the particulate fraction“ [Ganss et al., 2016] beschrieben ist.

Die Dentin- und Schmelzproben wurden mit Neutronen radioaktiv markiert. Um nun die Abrasion der einzelnen Zahnpasten zu ermitteln, wurden die Dentin- und Schmelzproben mit den Slurries (25 g in 40 ml Wasser) der zu untersuchenden Zahnpasten gebürstet (Dentin: 1500 Striche, Schmelz: 5000 Striche; mit je 150 g Auflagegewicht). Des Weiteren wurde gegenüber dem Referenzstoff Kalziumpyrophosphat ( $10 \text{ g Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$  in 50 ml 0,5% Carboxymethylcellulose und 10% Glycerin; RDA nach Definition 100; REA nach Definition 10) die Zählrate der untersuchten Slurries quantifiziert.

## 2.4 Experimenteller Ablauf

Am Anfang jedes Versuchstages wurden alle drei Lösungen (Remineralisations-, Demineralisationslösung und Slurry) frisch angesetzt. Jeder der unterschiedlichen Zahnpasten wurden zwei beschriftete Glasgefäße (Mat. 18) für Remineralisations- und Demineralisationslösung zugeordnet. Die Glasgefäße mit der Remineralisationslösung befanden sich in einem Schüttelwasserbad (Mat. 19; Schwenkfrequenz  $35 \text{ min}^{-1}$ , Raumtemperatur), die der Demineralisationslösung auf einem Schütteltisch (Mat. 20; Schwenkfrequenz  $35 \text{ min}^{-1}$ , Raumtemperatur). Der pH-Wert der Demineralisationslösung wurde täglich vor Versuchsbeginn gemessen und kontrolliert.

Experiment I und Experiment II wurden über einen Zeitraum von je 10 Tagen durchgeführt.

Der Bürstsimulator (Mat. 21) konnte nur acht Probenräger gleichzeitig bearbeiten, aus diesem Grund war eine gleichzeitige Untersuchung aller 18 Produkte nicht möglich. Deshalb wurden die 17 Zahnpasten und die Positivkontrolle (Zinnfluoridgel) in drei Versuchsdurchläufe (s. Tab. 2.03) eingeteilt, in denen jeweils sechs Zahnpasten untersucht wurden. Hierdurch konnte bei allen drei Durchläufen der gleiche systematische Versuchshergang umgesetzt und der zeitliche Ablauf eingehalten werden. Die Sechsergruppen wurden nach Wirkstoffen eingeteilt. In Versuchsgruppe 1 befanden sich die natriumfluoridhaltigen Zahnpasten und das fluoridfreie Placebo. Versuchsgruppe 2 enthielt die zinn- und zinnfluoridhaltigen Zahnpasten und das Zinnfluoridgel, außerdem Chitodent mit dem Wirkstoff Chitosan und Pearls and Dents mit Polyethylenputzkörpern. Für Versuchsgruppe 3 wurden die drei hydroxylapatithaltigen und die drei verbliebenen Zahnpasten, die keine speziellen Wirkstoffe enthielten, gewählt.

Nach Abschluss der Experimente wurden die Referenzflächen vorsichtig ohne Berühren der Referenz- und Versuchsfläche freigelegt. Bis zur Profilometrie wurden die Schmelzproben bei 100% Luftfeuchtigkeit im Kühlschrank gelagert.

**Tab. 2.03:** Einteilung der Produkte in die jeweiligen Versuchsdurchläufe.

Versuchsdurchlauf 1 Zahnpasten mit NaF	Versuchsdurchlauf 2 Zinnfluoridhaltige etc.	Versuchsdurchlauf 3 Hydroxylapatithaltige etc.
Theramed Naturweiß	Elmex Erosionsschutz	Biorepair
Theramed Original	Chitodent	Apacare
Sensodyne Multicare	Pearls and Dents	Actischmelz
Theramed Interdental	Emofluor Gel	Sensodyne Proschmelz
Theramed ProElectric	Emofluor Zahnpaste	Elmex Sensitiv
Placebo	ProExpert Zahnschmelzschild	Elmex Intensiv

### 2.4.1 Experiment I

In Experiment I wurden die Erosionsbedingungen mithilfe der Proben der Negativkontrolle bestimmt, als Positivkontrolle diente das abrasivstofffreie Emofluor Gel (s. Kap. 2.4.3).

Die Kunststoffobjektträger (Mat. 04) mit den Schmelzproben wurden in Halterungen (Eigenherstellung) gegeben, mit denen alle Proben gleichzeitig in die jeweiligen Lösungen eingetaucht werden konnten. Die Objektträger wurden so in den Lösungen platziert, dass sich die Grenze zwischen Referenz- und Versuchsfläche im rechten Winkel zur Bewegungsrichtung von Wasserbad bzw. Schütteltisch befand (Abb. 2.01).

Bei Experiment I wurden die Schmelzproben für 1 min mit Leitungswasser gespült. Anschließend wurden sie für 2 min in die Demineralisationslösung gegeben, danach für 1 min unter Leitungswasser gespült. Dieser Vorgang wurde in stündlichen Intervallen sechsmal am Tag durchgeführt. Nach Intervall eins und sechs wurden die Proben für 2 min in 10 ml des jeweiligen Slurries gelegt. Diese befanden sich in voneinander abgetrennten Probenkammern. Danach wurden sie für 1 min mit Leitungswasser gespült und für 1 h in der Remineralisationslösung geschwenkt. Bei den Intervallen zwei bis fünf wurden die Proben nach der Demineralisation für 1 min mit Leitungswasser abgespült und direkt, ohne vorherigen Slurrykontakt, in die Remineralisationslösung zurückgelegt (Abb. 2.02).

### 2.4.2 Experiment II

In Experiment II wurde als Negativkontrolle das wirkstofffreie Placebo verwendet, als Positivbürstkontrolle diente das abrasivstofffreie Emofluor Gel (s. Kap. 2.4.3).

Der Ablauf in Experiment II entsprach dem Ablauf in Experiment I (Abb. 2.02). Zusätzlich wurden die Schmelzproben im ersten und sechsten Intervall mit einem Bürstsimulator (Mat. 21) gebürstet. Mit Referenzzahnbürsten (Mat. 22) führte der Bürstsimulator programmierbare Bewegungen aus. Das Auflagegewicht von 200 g blieb durch Gewichte an den Bürstenköpfen einheitlich. Bei allen Versuchsabläufen wurden die Bewegungen der Bürstenköpfe durch eine Steuerelektronik konstant gehalten (Zick-Zack-Modus, Verfahrensweg 6 mm, Verfahrensgeschwindigkeit 60 mm/s). Für die Bürstabrasion wurden die Schmelzproben in voneinander abgetrennte Probenkammern gelegt, in denen sich je 10 ml Slurry befanden. Die Referenzzahnbürsten wurden auf die Proben gesetzt und es wurde für 15 s gebürstet. Anschließend wurden die Bürsten angehoben und die Proben für 1:45 min im Slurry belassen, sodass insgesamt 2 min Slurrykontakt bestand. Nachfolgend wurden die Proben wie in Experiment I für 1 min mit Leitungswasser gespült und dann für 1 h in der Remineralisationslösung geschwenkt. In den Intervallen zwei bis fünf erfolgte kein Slurrykontakt und kein Bürsten der Proben, nur der Kontakt mit Re- und Demineralisationslösung.

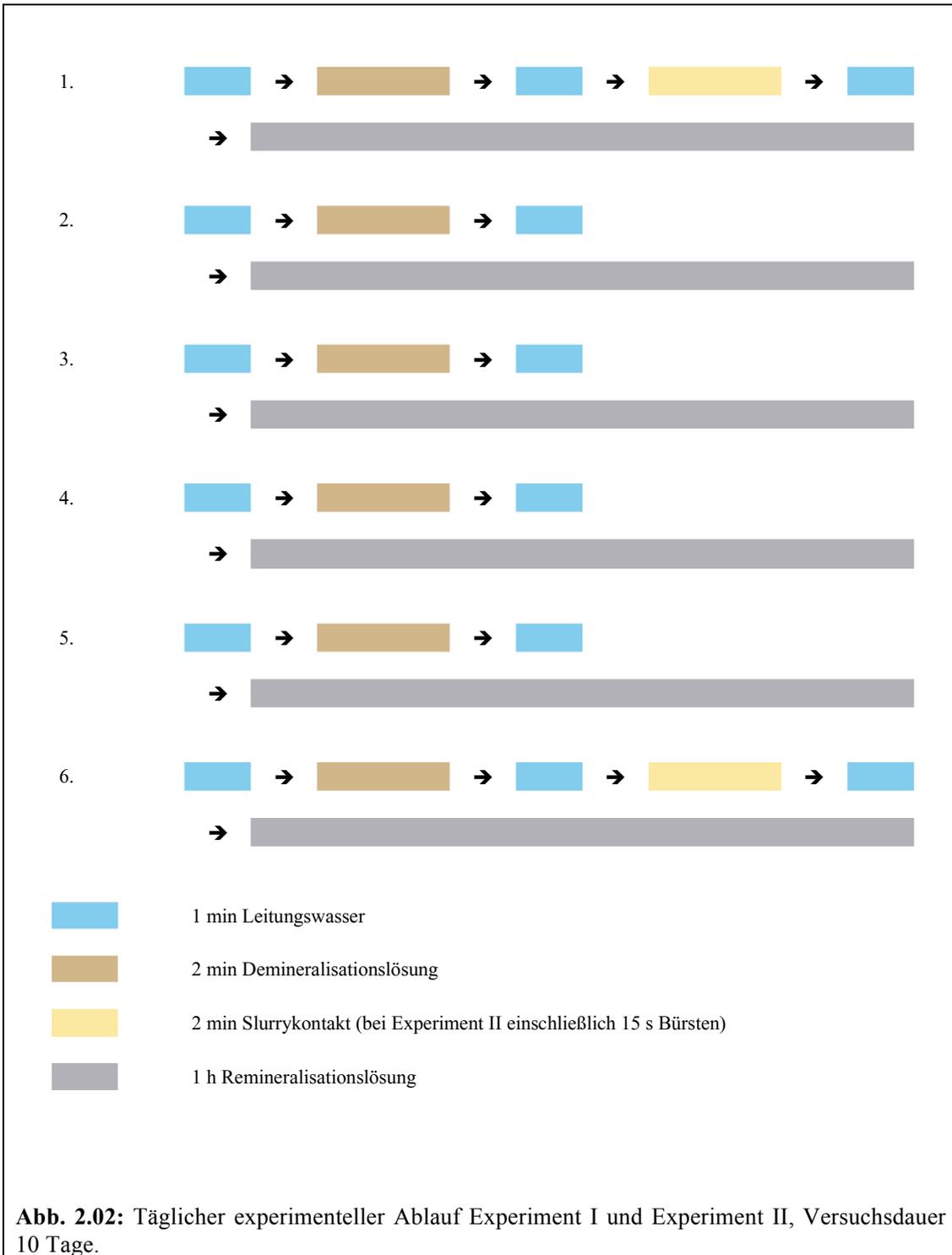
### 2.4.3 Kontrollgruppen

Die Proben der Negativkontrolle (3 Versuchsdurchläufe, n = 15) wurden nach dem Erodieren in der Demineralisationslösung unter Leitungswasser für 1 min abgespült und sofort für 1 h in der Remineralisationslösung geschwenkt. Sie hatte in allen sechs Intervallen keinen Kontakt mit Zahnpasten-Slurry und wurde nicht gebürstet.

Mit der Positivkontrolle (n = 15) wurde wie mit den Proben in Experiment I verfahren und sie wurde mit dem Slurry des abrasivstofffreien Emofluor Gels behandelt.

Die Negativbürstkontrolle (n = 15) wurde analog zu den Proben in Experiment II behandelt, allerdings mit dem wirkstofffreien Placebo gebürstet.

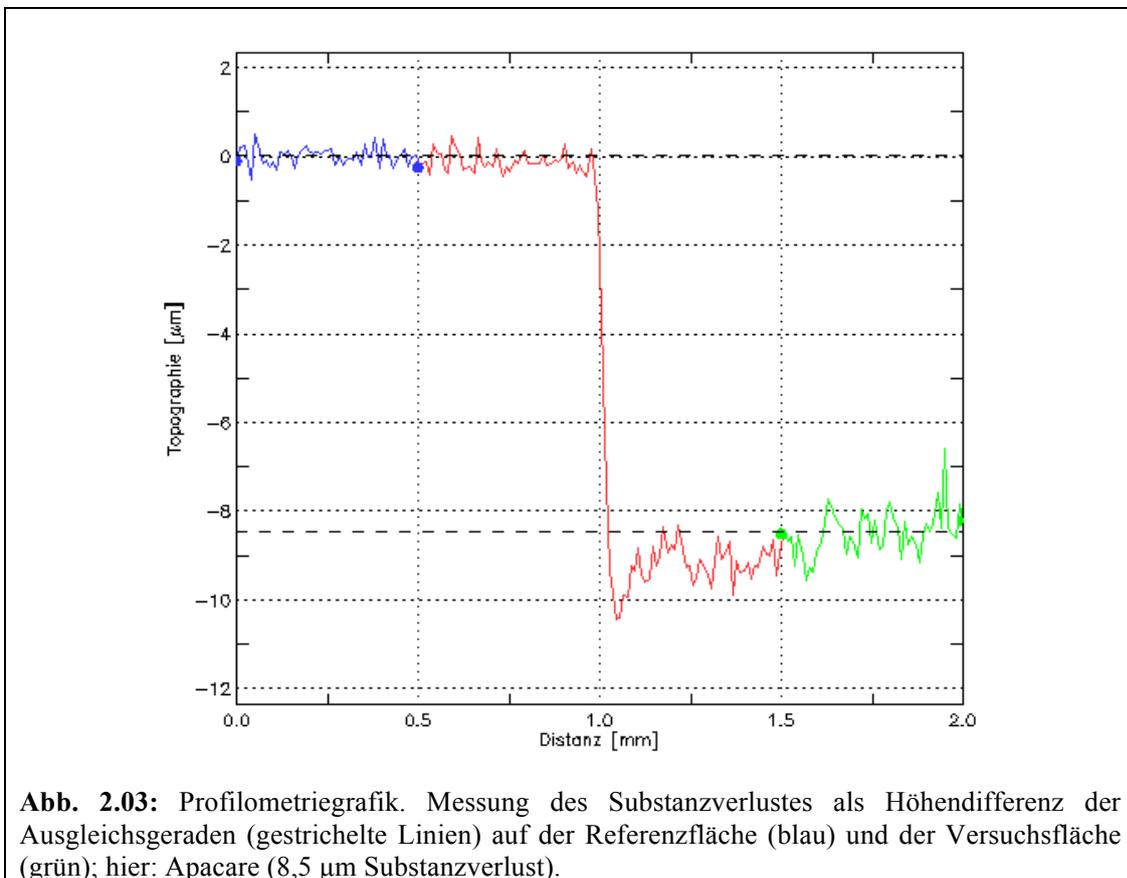
Die Positivbürstkontrolle (n = 15) wurde analog zu den Proben in Experiment II behandelt, allerdings mit dem abrasivstofffreien Emofluor Gel gebürstet.



## 2.5 Profilometrie

Der Zahnhartsubstanzverlust wurde berührungslos mit einem optischen Profilometer (Mat. 23) quantifiziert. Hierzu wurden die Objektträger mit handelsüblicher Knetmasse auf dem Messtisch befestigt. Zur profilometrischen Analyse wurde mit dem geräteigenen chromatischen Weißlicht-Sensor (Mat. 24) gemessen.

Pro Schmelzprobe wurden drei parallele Profilschriebe im Abstand von 0,2 mm mit einer Länge von je 2 mm gefahren. Die Schriebe befanden sich im rechten Winkel zu Referenz- und Versuchsfläche und erfassten je 1 mm der beiden Flächen. Die Messung erfolgte mit einer speziellen Software (Mat. 25). Die Auswertung der Profilschriebe erfolgte mit einer Auswertungssoftware (Mat. 26). Hierbei wurde der Profilschrieb im Koordinatensystem der Software dargestellt und ausgerichtet. Auf der Referenz- und Versuchsfläche wurden 0,5 mm lange Ausgleichsgeraden berechnet, die jeweils 0,5 mm von der Grenze zwischen Referenz- und Versuchsfläche entfernt waren. Der Zahnhartsubstanzverlust wurde durch die Höhendifferenz (in  $\mu\text{m}$ ) der beiden Ausgleichsgeraden bestimmt (Abb. 2.03).



## 2.6 Rasterelektronenmikroskopie

Die Form, Größe und Elementzusammensetzung der Abrasiva der 17 Zahnpasten wurden elektronenmikroskopisch sowie mit der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) untersucht. Das zinnfluoridhaltige Emofluor Gel wurde nicht untersucht, da es keine Putzkörper enthielt.

### 2.6.1 Extraktion der Putzkörper

Von jeder der 17 Zahnpasten wurden 15 g mit 45 g Aqua dest. in einem Becherglas suspendiert. Vom entstandenen Slurry wurden 50 g in Zentrifugenröhrchen (Mat. 11) für 10 min bei  $10.000 \text{ min}^{-1}$  zentrifugiert (Mat. 12). Der Überstand wurde abgegossen und die festen Bestandteile des Zentrifugats bei  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  für vier Tage im Trockenschrank (Mat. 16) getrocknet. Einige der Slurries enthielten feste Partikel im Überstand, diese wurden separat auf einem Filterpapier (Mat. 17) ebenfalls für vier Tage getrocknet.

Dann wurde aus dem gesamten Sediment Material entnommen und mit einer Einmalzahnbürste (Mat. 27) im Porzellanmörser (Mat. 28) grob zerkleinert (Abb. 2.04). Das getrocknete Material aus dem Überstand wurde ebenfalls auf diese Weise zerkleinert.

Vorversuche der Zerkleinerung ergaben, dass durch die Zahnbürste die Putzkörper noch intakt blieben, mit Stößel und Kunststoffspateln hingegen zerstört wurden (s. Kap. 4.1.3).

Der Probenteller (Mat. 29) wurde drucklos auf das zerkleinerte Sediment gebracht, sodass eine gleichmäßig dünne Schicht auf der Klebung des Leit Tabs (Mat. 30) haftete (Abb. 2.05 u. Abb. 2.06).

Von jeder verwendeten Zahnpaste wurden jeweils drei Probenteller angefertigt. Für die anschließende Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop und die EDX-Analyse wurden die Probenteller für 90 s mit Gold gesputtert (Mat. 31 u. Mat. 32).



**Abb. 2.04:** Zerkleinerung des getrockneten Sediments bzw. des Überstandes der Zahnpastenslurries.



**Abb. 2.05:** Druckloses Auftragen des zerkleinerten Sediments.



**Abb. 2.06:** Gleichmäßige Bedeckung der Probesteller.

### 2.6.2 Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX)

Mittels EDX wurde die Elementzusammensetzung der aus den Zahnpasten extrahierten Putzkörper untersucht. Pro Produkt wurden je sechs große und sechs kleine Partikel untersucht. Gemessen wurde mit dem Rasterelektronenmikroskop (Mat. 33) mit einkristalliner Lanthanhexaborid-Kathode (LAB6) (Mat. 34) und einem Silicon-Drift-Droplet-Detector (Mat. 35). Die Proben wurden bei 2000facher Vergrößerung, 15 kV Spannung und 15 mm Abstand aufgenommen (Mat. 36). Pro Probenteller wurden je zwei kleine und zwei große Partikel analysiert. Die Messung erfolgte bei einer Zählrate von 1,0 kcps und einer Spotsize zwischen 50 und 55. Die Totzeit betrug ca. 5% bei einer Messung von 120 s (Mat. 37). Für die Auswertung der Messung wurden folgende Elemente bestimmt: Kohlenstoff, Sauerstoff, Natrium, Aluminium, Silizium, Phosphor, Chlor, Kalium, Kalzium, Titan, Zinn und Gold. Gold wurde nicht quantifiziert, sondern nur entfaltet.

Es zeigte sich, dass die Putzkörper von Biorepair viel Kalzium aufwiesen. Deswegen wurde erneut ein Slurry wie bereits beschrieben hergestellt und getrocknet. Dessen Sediment wurde nun dreimal in 20 ml 0,5 molarer HCl (pH 2,0) (Chem. 10) gewaschen und für 10 min bei  $10.000 \text{ min}^{-1}$  zentrifugiert (Mat. 12). Auf jede HCl-Waschung erfolgte alternierend eine Waschung mit Aqua dest. und anschließendes Zentrifugieren, wobei die letzte Waschung mit Aqua dest. erfolgte. Das Sediment wurde danach erneut für vier Tage im Trockenschrank (Mat. 16) bei  $40^\circ\text{C}$  getrocknet und wie bereits beschrieben auf die Probenteller aufgetragen und untersucht.

### 2.6.3 Putzkörperaufnahmen

Von jedem der hergestellten Probenteller wurden zwei Aufnahmen angefertigt, jeweils eine Übersichtsaufnahme mit 50facher Vergrößerung und eine Nahaufnahme mit 300facher Vergrößerung. Der Arbeitsabstand betrug 8 mm, die Spotsize 25 und die Spannung 10 kV. Für die Nahaufnahme gab es folgende Richtlinien: homogene Bedeckung, nur eine Schicht, unterschiedliche Putzkörpergrößen (wenn vorhanden), keine Konglomerate.

Zur Auswertung wurden die entstandenen Bilddateien mit dem Bildbearbeitungsprogramm Photoshop (Mat. 38) mit Rastern von 10, 20, 30, 40 und  $50 \mu\text{m}$  überlagert (Abb. 4.02). Anhand dieser Raster war es möglich, die Größe der Putzkörper mit einer Ja/Nein Aussage zu bestimmen.

## 2.7 Statistische Auswertung

Die Ergebnisse der Studie wurden mit Statistical Package for Social Sciences (SPSS 21) (Mat. 39) ausgewertet. Die Messwerte des Substanzverlustes (Experiment I und Experiment II) wurden jeweils als Mittelwerte aus den drei Profilschrieben pro Probe angegeben. Mithilfe des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests wurden die Ergebnisse bezüglich einer signifikanten Abweichung gegenüber der Normalverteilung überprüft.

Mit der ANOVA-Varianzanalyse und dem Anschlussstest nach Tamhane (signifikante Abweichung der Varianzhomogenität) wurden die unterschiedlichen Produkte innerhalb der beiden Experimente verglichen.

Durch den t-Test für unabhängige Stichproben wurden die Substanzverluste der Proben nach Slurrykontakt und hinzukommender Behandlung im Bürstsimulator gegenübergestellt.

Unter Zuhilfenahme einer linearen Korrelation und einer Kurvenanpassung (Least Square Fit, ANOVA) wurde die Beziehung von RDA und REA zueinander bestimmt. Außerdem wurde mittels Kurvenanpassung der Zusammenhang von REA, RDA und dem Putzkörperanteil gegenüber dem Substanzverlust durch Bürstabrasion ermittelt.

Das Signifikanzniveau wurde bei 0,05 definiert.

## 2.8 Materialien und Chemikalien

### Materialien

- Mat. 01: Exact Trennschleifsystem  
Exact Apparatebau, Norderstedt (D)
- Mat. 02: Schleifpapier – Silizium-Karbid-Schleifpapier, Körnung P 1200 und P 4000  
Leco, St. Joseph (USA)
- Mat. 03: Exact Mikroschleifsystem – Diamantierte Polierscheiben, 30, 15 und 3  $\mu\text{m}$   
Exact Apparatebau, Norderstedt (D)
- Mat. 04: Kunststoffobjektträger für Bürstsimulator ZM-3  
SD Mechatronik GmbH, Feldkirchen-Westerham (D)
- Mat. 05: Lichthärtender Fixierungs-Kleber – Technovit 7230 VLC  
Kulzer Exact, Wehrheim (D)
- Mat. 06: Magnetrührgerät – IKAMAG RET  
IKA -Werke GmbH & Co. KG, Staufen (D)
- Mat. 07: Magnetrührstäbchen (zylindrisch)  
VWR International GmbH, Darmstadt (D)
- Mat. 08: Präzisionswaage – Mettler PJ 300  
Mettler-Toledo GmbH, Berlin (D)
- Mat. 09: Fluoridionen-selektive Elektrode – Thermo Scientific Orion fluoride ion selective electrode 9609BNWO ionplus Sure-Flow Fluoride  
Thermo Fisher Scientific, Beverly (USA)
- Mat. 10: Fluorid-Messeinheit – Thermo Scientific Orion ISE meter 720A+  
Thermo Fisher Scientific, Beverly (USA)
- Mat. 11: Zentrifugenröhrchen – Blue Max 50 ml Polypropylene Conocial Tube  
BD Medical Systems, Le Pont de Claix Cedex (F)
- Mat. 12: Zentrifuge – SIGMA 3K30  
SIGMA Laborzentrifugen GmbH, Osterode am Harz (D)

- Mat. 13: Pipette – Transferpipette S  
Eppendorf AG, Hamburg (D)
- Mat. 14: Papierserviette  
Tork SCA Hygiene Products, Wien (AT)
- Mat. 15: Knick pH-Meter 761  
Knick Elektronische Messgeräte GmbH & Co. KG, Berlin (D)
- Mat. 16: Trockenschrank – Inkubator BD 115  
Binder, Tuttlingen (D)
- Mat. 17: Filterpapier – S&S Rundfilter 125 mm  
Schleicher & Schuell, Dassel (D)
- Mat. 18: Färbekasten  
Schott, Mainz (D)
- Mat. 19: Schüttelwasserbad 1083 und 1086  
Gesellschaft für Labortechnik mbH, Burgwedel (D)
- Mat. 20: Schütteltisch – 3006  
Gesellschaft für Labortechnik mbH, Burgwedel (D)
- Mat. 21: Bürstsimulator – ZM-3  
SD Mechatronik GmbH, Feldkirchen-Westerham (D)
- Mat. 22: Zahnbürste – ADA Referenzzahnbürste soft (Bürstfeld: 27,5 x 9,5 mm,  
Borstenlänge: 10,5 mm, -anzahl: 1786 – 2068, -material: Polyamid 6.12)  
American Dental Association, Chicago (USA)
- Mat. 23: Oberflächenprofilometer – MicroProf  
Fries Research & Technology GmbH, Bergisch Gladbach (D)
- Mat. 24: Weißlicht-Sensor – FRT CWL F 300 µm  
Fries Research & Technology GmbH, Bergisch Gladbach (D)
- Mat. 25: Aufnahme-Software Profilometer – Acquire (V. 1.42)  
Fries Research & Technology GmbH, Bergisch Gladbach (D)
- Mat. 26: Auswertungs-Software Profilometer – FRT MARK III (V. 3.9.2.2)  
Fries Research & Technology GmbH, Bergisch Gladbach (D)

- Mat. 27: Einmalzahnbürste – Happy Morning  
HAGER & Werken GmbH & Co KG, Duisburg (D)
- Mat. 28: Porzellan Mörser 55  
Morgan Technical Ceramics (MTC) Haldenwanger, Waldkraiburg (D)
- Mat. 29: Probenteller – 0,5’’ Aluminium Specimen Stubs  
Agar Scientific, Essex (GB)
- Mat. 30: Leit-Tabs – 12mm G3347  
Plano GmbH, Wetzlar (D)
- Mat. 31: Sputtergerät – Jeol JFC-1200 Fine Coater  
Jeol Germany GmbH, Eching bei München (D)
- Mat. 32: Vakuumpumpe – Zweistufige Drehschieberpumpe DUO 2.5  
Pfeifer Vacuum GmbH, Asslar (D)
- Mat. 33: Rasterelektronenmikroskop – Jeol JSM-6510  
Jeol Germany GmbH, Eching bei München (D)
- Mat. 34: Lanthanhexaborid-Kathode – LAB6  
Jeol Germany GmbH, Eching bei München (D)
- Mat. 35: Energiedispersives Röntgenspektrometer – XFlash Detector 410-M mit  
Silicon-Drift-Droplet-Detector  
Bruker AXS Microanalysis GmbH, Berlin (D)
- Mat. 36: Software Rasterelektronenmikroskop – Sem Control User Interface  
(V. 3.04)  
Jeol Germany GmbH, Eching bei München (D)
- Mat. 37: Software energiedispersives Röntgenspektrometer –  
Bruker Quantax Esprit (V. 1.9)  
Bruker AXS Microanalysis GmbH, Berlin (D)
- Mat. 38: Bildbearbeitungsprogramm – Photoshop (V. 13.0, CS6)  
Adobe Systems GmbH, München (D)
- Mat. 39: Statistiksoftware – Statistical Package for Social Sciences  
(SPSS) (Version 21)  
IBM Deutschland GmbH, Ehningen (D)

### **Chemikalien**

- Chem. 01: Thymol Pulver, Art.-Nr.: 89330  
Fluka Chemie AG, Buchs (CH)
- Chem. 02: Zitronensäure Monohydrat 99,5%, Art.-Nr.: 3958.1  
Carl Roth GmbH & Co KG, Karlsruhe (D)
- Chem. 03: Aqua dest., Eigenherstellung – Bi-Destillierapparat Typ 2104  
Gesellschaft für Labortechnik mbH, Burgwedel (D)
- Chem. 04: Kaliumchlorid, Art.-Nr.: 12636 – 250G  
Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Steinheim (D)
- Chem. 05: Natriumhydrogencarbonat, Art.-Nr.: 1.06329.0500  
Merck KGaA, Darmstadt (D)
- Chem. 06: Kalziumchlorid, Art.-Nr.: 2388  
Merck KGaA, Darmstadt (D)
- Chem. 07: Phosphorsäure, Art.-Nr.: 1.00565.0500  
Merck KGaA, Darmstadt (D)
- Chem. 08: Argon 5.0 – DIN 14175:11, Reinheit  $\geq 99,999\%$   
Linde AG, Pullach (D)
- Chem. 09: TISAB II with CDTA (Total Ionic Strength Adjustor Buffer Solution)  
Thermo Fisher Scientific, Beverly (USA)
- Chem. 10: Hydrochloric Acid, Art.-Nr.: K025.1  
Carl Roth GmbH & Co. KG, Karlsruhe (D)

## 3 Ergebnisse

Bis auf sechs beschädigte Schmelzproben konnten insgesamt 579 der 585 Schmelzproben in der Ergebnisstatistik ausgewertet werden.

Abbildung 3.01 zeigt die durch Profilometrie gemessenen Substanzverluste, in Abbildung 3.02a und 3.02b werden die rasterelektronenmikroskopischen Bilder der Abrasiva der Produkte abgebildet. Eine Übersicht der Substanzverluste, RDA- und REA-Werte, Putzkörperanteile (Gewichtsprozent), Partikelgrößen und die Wirkstoffe der einzelnen Produkte sind in Tabelle 3.01 angegeben. Die Werte der EDX-Analyse sind in Tabelle 3.02 und 3.03 zu finden. Fluoridwerte und pH-Werte sind in Tabelle 3.04 aufgeführt. Der Zusammenhang von RDA und REA ist in Abbildung 3.07 dargestellt.

### 3.1 Wirkstoffeffekte

Gegenüber der Negativkontrolle zeigte die Applikation des Placebos keinen signifikanten Effekt.

Gegenüber dem Placebo zeigten zehn der achtzehn untersuchten Produkte einen signifikanten Unterschied. Unter diesen zehn befanden sich insgesamt fünf der elf Produkte mit klassischen Fluoridverbindungen. Vier dieser Produkte reduzierten den Substanzverlust signifikant gegenüber Placebo (Apacare 41%,  $p \leq 0,01$ ; Elmex Sensitiv 40%,  $p \leq 0,01$ ; Theramed Naturweiß 36%,  $p \leq 0,05$  und Sensodyne Proschmelz 43%,  $p \leq 0,001$ ). Das natriumfluoridhaltige Theramed Interdental erhöhte den Substanzverlust signifikant gegenüber Placebo um 39% ( $p \leq 0,05$ ).

Das fluoridfreie Biorepair wies keinen signifikanten Effekt auf. Das ebenfalls fluoridfreie Chitodent konnte den Substanzverlust hingegen signifikant um 51% reduzieren ( $p \leq 0,001$ ).

Alle zinnhaltigen Produkte erzielten eine signifikante Reduktion des Substanzverlustes gegenüber Placebo, mit 76% ( $p \leq 0,001$ ) Reduktion zeigte erwartungsgemäß die Positivkontrolle, gefolgt von der Emofluor Zahnpaste (62%,  $p \leq 0,001$ ), Elmex

Erosionsschutz (53%,  $p \leq 0,001$ ) und ProExpert Zahnschmelzschild (48%,  $p \leq 0,001$ ) die größten Wirkeffekte.

Gegenüber der Positivkontrolle zeigte lediglich die Emofluor Zahnpaste eine fehlende Signifikanz und war ähnlich effektiv. ProExpert Zahnschmelzschild, Chitodent, Elmex Erosionsschutz, Elmex Sensitiv und Sensodyne Proschmelz erzielten ähnliche Werte (nicht signifikante Unterschiede) wie die Emofluor Zahnpaste.

Zusammenfassend sind die niedrigsten und höchsten Substanzverluste aufgeführt. Die Positivkontrolle erzielte den geringsten Substanzverlust (2,8  $\mu\text{m}$ ). Unter den Zahnpasten wurden für die Emofluor Zahnpaste (4,5  $\mu\text{m}$ ) und Elmex Erosionsschutz (5,7  $\mu\text{m}$ ) die besten Ergebnisse gefunden. Das Placebo (12,0  $\mu\text{m}$ ) und Theramed Interdental (16,7  $\mu\text{m}$ ) erreichten die höchsten Werte.

### **3.2 Wirkstoffeffekte unter Bürstabrasion**

Durch die zusätzliche Bürstabrasion mit Placebo wurden die Substanzverluste gegenüber alleiniger Erosion um 31% erhöht. Gegenüber den Substanzverlusten im Erosionsversuch zeigten lediglich fünf der Produkte (Apacare, Elmex Intensiv, Emofluor Zahnpaste, Sensodyne Proschmelz und Sensodyne Multicare) keine signifikante Erhöhung des Substanzverlustes infolge der Bürstabrasion, die anderen dreizehn Produkte zeigten eine signifikante Zunahme des Substanzverlustes. Die geringste Erhöhung zeigte Apacare (0,5  $\mu\text{m}$ ). Den höchsten Anstieg zeigten Pearls and Dents (6,1  $\mu\text{m}$ ), Theramed Naturweiß (6,0  $\mu\text{m}$ ) und Theramed Interdental (5,8  $\mu\text{m}$ ).

Gegenüber dem Placebo verringerten neun Produkte den Substanzverlust signifikant, unter diesen befanden sich auch die fünf, die keine signifikante Zunahme des Substanzverlustes aufwiesen. Von den Produkten mit klassischen Fluoridverbindungen wie Amin- und Natriumfluorid konnten Sensodyne Multicare (29%,  $p \leq 0,05$ ), Elmex Intensiv (38%,  $p \leq 0,01$ ), Elmex Sensitiv (42%,  $p \leq 0,001$ ), Sensodyne Proschmelz (55%,  $p \leq 0,001$ ) und Apacare (57%,  $p \leq 0,001$ ) den Substanzverlust gegenüber Placebo signifikant reduzieren.

Die größte signifikante Reduktion und somit den geringsten Substanzverlust gegenüber dem Placebo erzielte erwartungsgemäß auch unter Bürstabrasion die Positivbürstkontrolle (76%,  $p \leq 0,001$ ).

Alle Zahnpasten mit polyvalenten Metallkationen konnten die Substanzverluste signifikant gegenüber Placebo reduzieren: Elmex Erosionsschutz (49%,  $p \leq 0,001$ , ProExpert Zahnschmelzschild (51%,  $p \leq 0,001$ ) und Emofluor Zahnpaste (69%,  $p \leq 0,001$ ). Die fluoridfreien Produkte und auch die mit speziellen Wirkstoffen erzielten keine signifikante Reduktion der Substanzverluste gegenüber Placebo.

Gegenüber der Positivbürstkontrolle zeigten sich zwei Produkte als ähnlich effektiv (nicht signifikante Unterschiede) und konnten die Substanzverluste gegenüber dem Placebo signifikant reduzieren: Apacare (57%,  $p \leq 0,001$ ) und Emofluor Zahnpaste (69%,  $p \leq 0,001$ ).

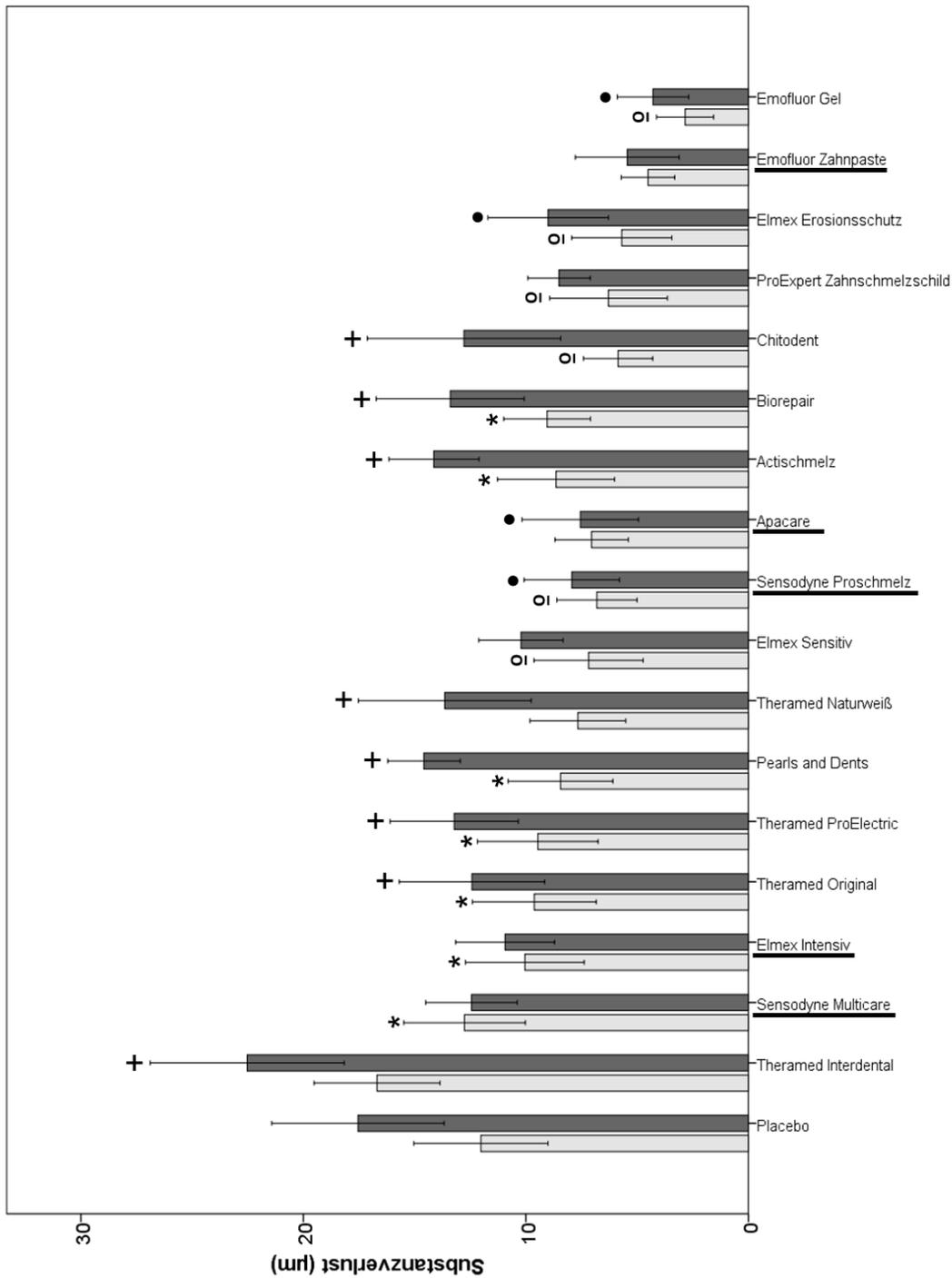
Die Wirkeffekte von drei Produkten waren vergleichbar (nicht signifikante Unterschiede) mit der Emofluor Zahnpaste: Apacare, Elmex Erosionsschutz und Sensodyne Proschmelz.

Zusammenfassend sind die niedrigsten und höchsten Substanzverluste aufgeführt. Den geringsten Substanzverlust erzielte auch in Experiment II wieder die Positivkontrolle (4,3  $\mu\text{m}$ ), das Placebo (17,5  $\mu\text{m}$ ) und Theramed Interdental (22,5  $\mu\text{m}$ ) erzielten erneut hohe Substanzverluste.

**Tab. 3.01:** Darstellung der RDA- und REA-Werte, des Substanzverlustes nach Immersion in Zahnpastenslurry und zusätzlicher Abrasion ( $\mu\text{m}$ ; Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung; **fett** = signifikant geringere Substanzverluste im Vergleich zu Placebo), Erhöhung des Substanzverlustes durch Abrasion ( $\mu\text{m}$ ; **fett/kursiv** = kein signifikanter Unterschied zwischen Slurry und Slurry+Abrasion), des Hauptwirkstoffs (in Klammern deklarierter Wirkstoffgehalt in ppm; NaF = Natriumfluorid, AmF = Aminfluorid, SnCl<sub>2</sub> = Zinnchlorid, SnF<sub>2</sub> = Zinnfluorid, n.d. = Wirkstoffkonzentration nicht deklariert), des Abrasivstoffpartikelanteils im Sediment gemessen in Gew.%, und der Partikelgröße in Klassen.

Produkt	RDA	REA	Substanzverlust ( $\mu\text{m}$ )	Erhöhung des Substanzverlustes durch Abrasion ( $\mu\text{m}$ )	Hauptwirkstoff	Abrasivstoffpartikel (Gew.%)	Partikel $\geq 30 \mu\text{m}$ < $40 \mu\text{m}$	Partikel $\geq 40 \mu\text{m}$ < $50 \mu\text{m}$	Partikel $\geq 50 \mu\text{m}$
Placebo	80,4	4,3	17,5 $\pm$ 3,9	5,5	---	10,1	ja	nein	nein
Theramed Interdental	110,4	9,7	22,5 $\pm$ 4,4	5,8	NaF (1450 F <sup>-</sup> )	10,0	ja	nein	nein
Pearls and Dents	49,8	5,0	14,6 $\pm$ 1,6	6,1	AmF, NaF (1200 F <sup>-</sup> )	14,4	ja	ja	ja
Actischmelz	66,5	2,7	14,1 $\pm$ 2,0	5,5	NaF (n.d.)	15,4	ja	ja	nein
Theramed Naturweiß	106,4	3,5	13,6 $\pm$ 3,9	6,0	NaF (1450 F <sup>-</sup> )	15,1	ja	ja	nein
Biorepair	119,2	3,3	13,4 $\pm$ 3,3	4,4	---	17,3	ja	ja	ja
Theramed ProElectric	46,3	2,3	13,2 $\pm$ 2,9	3,8	NaF (1450 F <sup>-</sup> )	19,0	ja	ja	ja
Chitodent	76,2	6,8	12,8 $\pm$ 4,3	6,9	---	16,3	ja	ja	nein
Theramed Original	94,8	4,1	12,4 $\pm$ 3,3	2,8	NaF (1450 F <sup>-</sup> )	9,2	ja	ja	nein
Sensodyne Multicare	37,3	3,0	<b>12,7<math>\pm</math>2,1</b>	<b>-0,3</b>	NaF (1400 F <sup>-</sup> )	15,8	ja	ja	nein
Elmex Intensiv	198,5	15,3	<b>10,9<math>\pm</math>2,2</b>	<b>0,9</b>	AmF, NaF (1400 F <sup>-</sup> )	20,9	nein	nein	nein
Elmex Sensitiv	36,1	2,7	<b>10,2<math>\pm</math>1,9</b>	3,0	AmF (1400 F <sup>-</sup> )	7,6	ja	ja	nein
Elmex Erosionsschutz	80,4	4,3	<b>9,0<math>\pm</math>2,7</b>	3,3	SnCl <sub>2</sub> , AmF, NaF (3500 Sn, 1400 F <sup>-</sup> )	14,2	ja	ja	nein
ProExpert Zahnschmelzschild	126,1	5,7	<b>8,5<math>\pm</math>1,4</b>	2,2	SnCl <sub>2</sub> , NaF (Sn n.d., 1450 F <sup>-</sup> )	13,2	ja	ja	ja
Sensodyne Proschmelz	34,7	3,0	<b>7,9<math>\pm</math>2,1</b>	<b>1,1</b>	NaF (1450 F <sup>-</sup> )	17,0	ja	ja	ja
Apacare	49,0	1,9	<b>7,6<math>\pm</math>2,6</b>	<b>0,5</b>	NaF (1450 F <sup>-</sup> )	13,9	ja	ja	nein
Emofluor Zahnpaste	26,7	3,3	<b>5,4<math>\pm</math>2,3</b>	<b>0,9</b>	SnF <sub>2</sub> (3000 Sn; 1000 F <sup>-</sup> )	19,2	ja	nein	nein
Emofluor Gel	4,5	0,4	<b>4,3<math>\pm</math>1,6</b>	1,4	SnF <sub>2</sub> (3000 Sn; 1000 F <sup>-</sup> )	---	---	---	---

**Abb. 3.01:** Substanzverluste ( $\mu\text{m}$ ; Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung) nach Immersion in Slurries (hellgraue Säulen) und nach zusätzlichem Bürsten (dunkelgraue Säulen).



**Fehlende Signifikanz zu Placebo** ist in den Slurrygruppen durch einen Stern (\*) und in den Slurry- und Abrasionsgruppen durch ein Kreuz (+) gekennzeichnet.

**Fehlende Signifikanz zur Emofluor Zahnpaste** ist durch einen leeren Kreis (o) in den Slurrygruppen und durch einen gefüllten Kreis (•) in den Slurry- und Abrasionsgruppen gekennzeichnet.

Zahnpasten, bei denen die Bürstabrasion nicht zu einer Erhöhung des Substanzverlustes geführt hat, sind durch Unterstreichungen der Namen gekennzeichnet.

### 3.3 Rasterelektronenmikroskopie

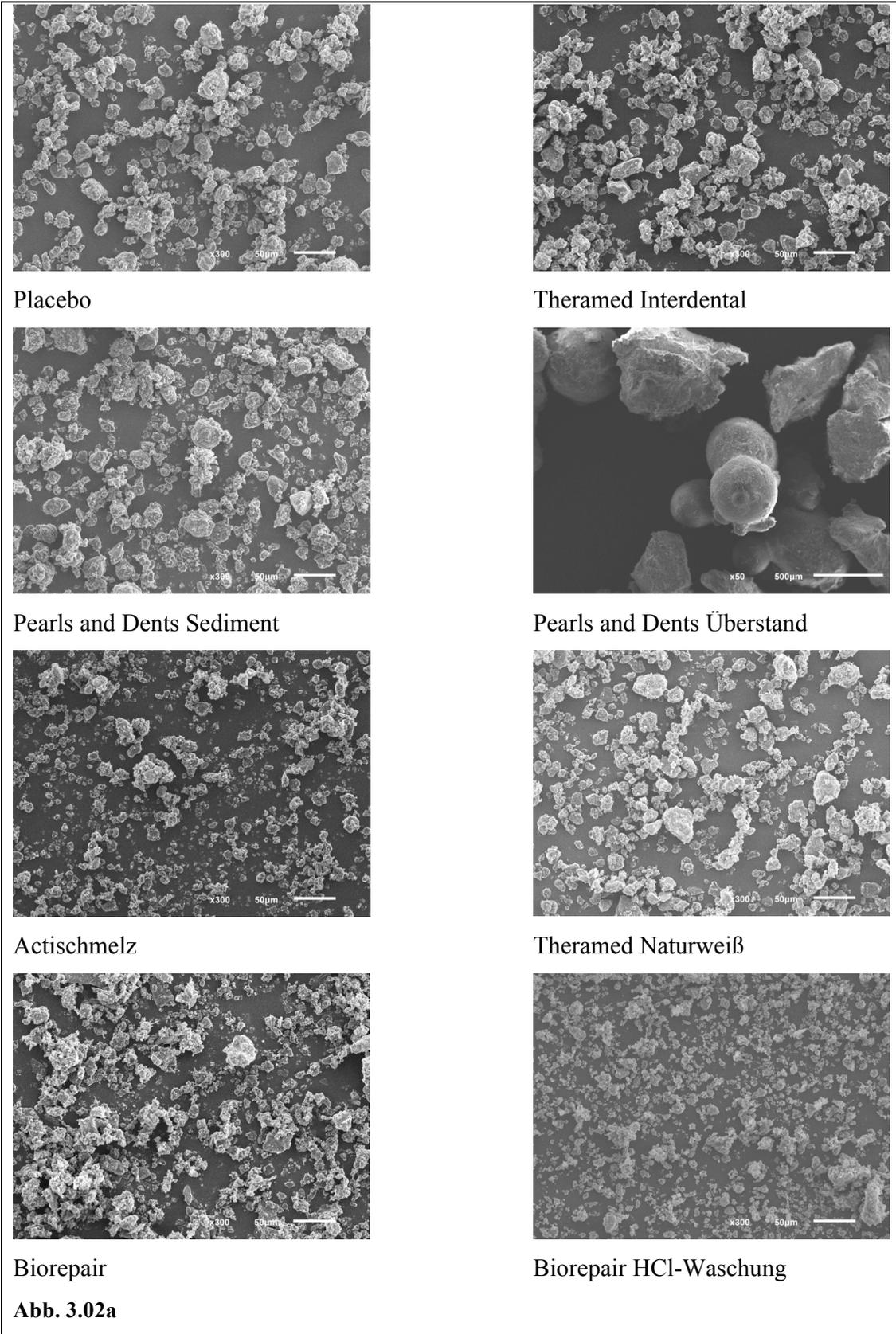
#### 3.3.1 Größen und Formen der Putzkörper

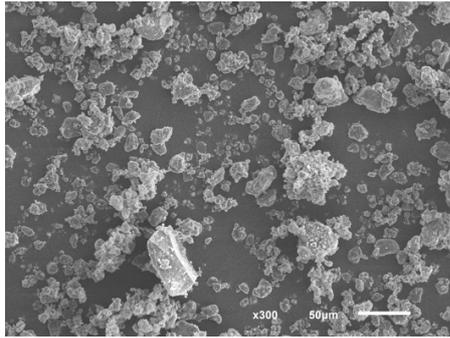
Abbildung 3.02a und 3.02b zeigen die Aufnahmen der aus den Zahnpastenslurries extrahierten Putzkörper, die zugehörigen Partikelgrößen sind in Tabelle 3.01 dargestellt. Die strukturellen Unterschiede waren im Sediment der meisten Pasten sehr gering, es zeigten sich eine Vielzahl unregelmäßig geformter, teils abgerundeter, teils scharfkantiger Abrasiva.

Bei den meisten der untersuchten Produkte waren Putzkörper  $>10\ \mu\text{m}$  und  $<50\ \mu\text{m}$  vorhanden. Insgesamt drei Produkte wiesen Putzkörper bis maximal  $40\ \mu\text{m}$  auf: das Placebo, Theramed Interdental und die Emofluor Zahnpaste. Elmex Intensiv hingegen wies im extrahierten Sediment nur eine große Menge homogener kleiner Putzkörper von maximal  $10\text{--}30\ \mu\text{m}$  Größe auf.

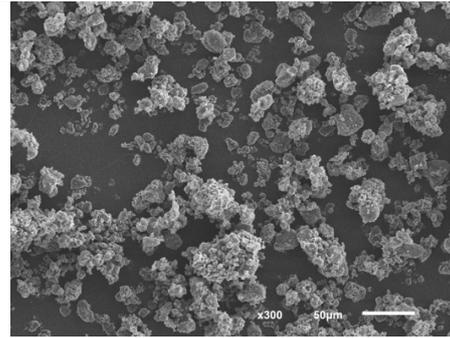
Lediglich fünf Zahnpasten (Pearls and Dents, Biorepair, Theramed ProElectric, ProExpert Zahnschmelzschild und Sensodyne ProSchmelz) wiesen Putzkörper  $>50\ \mu\text{m}$  auf.

Zwei Produkte enthielten Partikel im wässrigen Überstand welche separat untersucht wurden. Pearls and Dents enthielt im Überstand teils runde, teils unregelmäßig geformte Abrasivstoffpartikel bis zu einer Größe von  $500\ \mu\text{m}$ . Die Zahnpaste Elmex Sensitiv wies hingegen viele homogene kugelförmige Abrasiva von etwa  $10\ \mu\text{m}$  Größe auf.

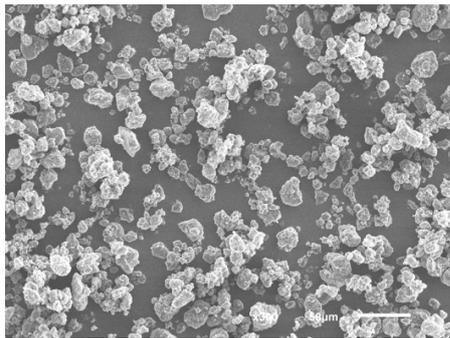




Theramed ProElectric

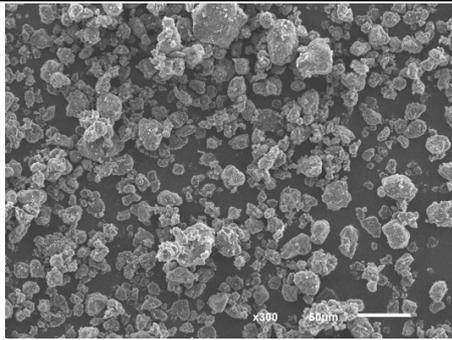


Chitodent

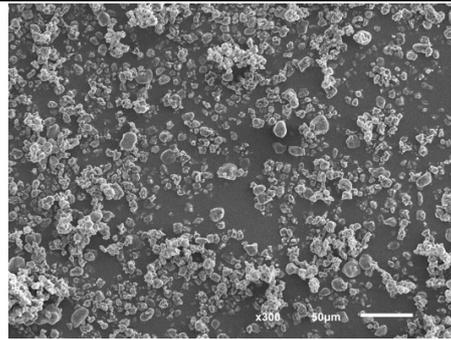


Theramed Original

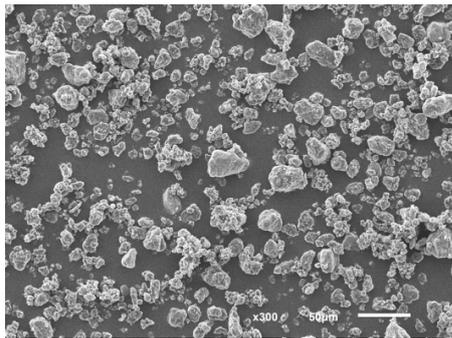
**Abb. 3.02a Fortsetzung:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der aus dem Sediment und Überstand (Pearls and Dents) extrahierten Putzkörper. Die Einteilung ist analog zu Tab. 3.01 vorgenommen. In Abb. 3.02a werden alle Produkte dargestellt, welche in Bezug auf den Substanzverlust unter Erosion und Bürstabrasion keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zum Placebo aufwiesen. Abgesehen von der Aufnahme des Überstandes bei Pearls and Dents (50x Originalvergrößerung) wurde mit einer Originalvergrößerung von 300x aufgenommen. Es sind keine einheitlichen Formen der Abrasiva erkennbar, auch die Größe variiert im Bereich von 10 µm und 50 µm. Im Überstand von Pearls and Dents sind sehr große Abrasivstoffpartikel (>500 µm) von unterschiedlicher Form zu erkennen.



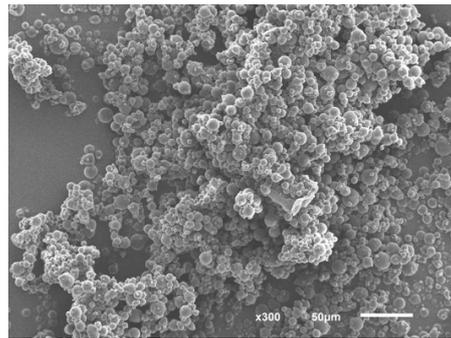
Sensodyne Multicare



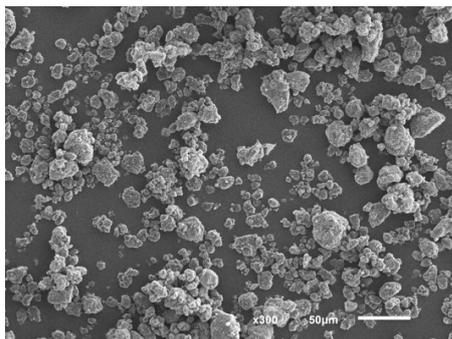
Elmex Intensiv



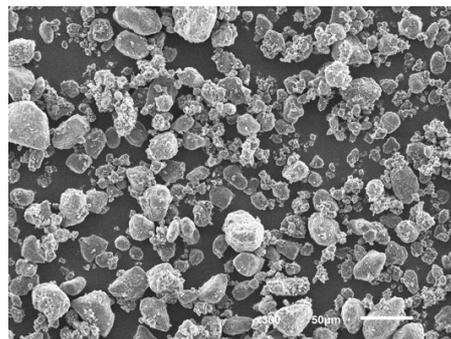
Elmex Sensitiv Sediment



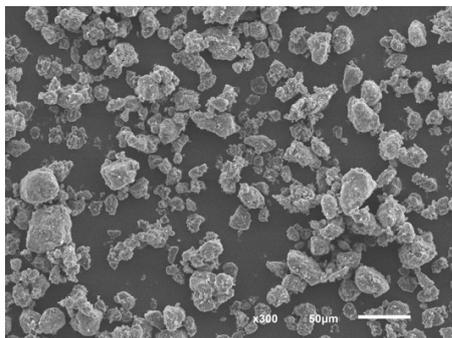
Elmex Sensitiv Überstand



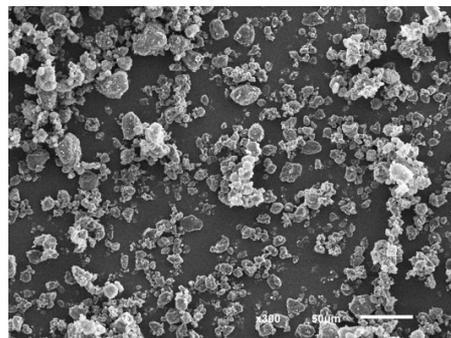
Elmex Erosionsschutz



ProExpert Zahnschmelzschild

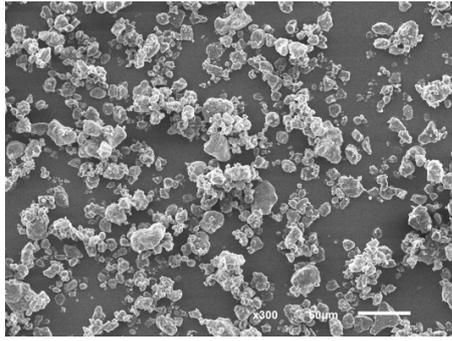


Sensodyne Proschmelz



Apacare

**Abb. 3.02b**



### Emofluor Zahnpaste

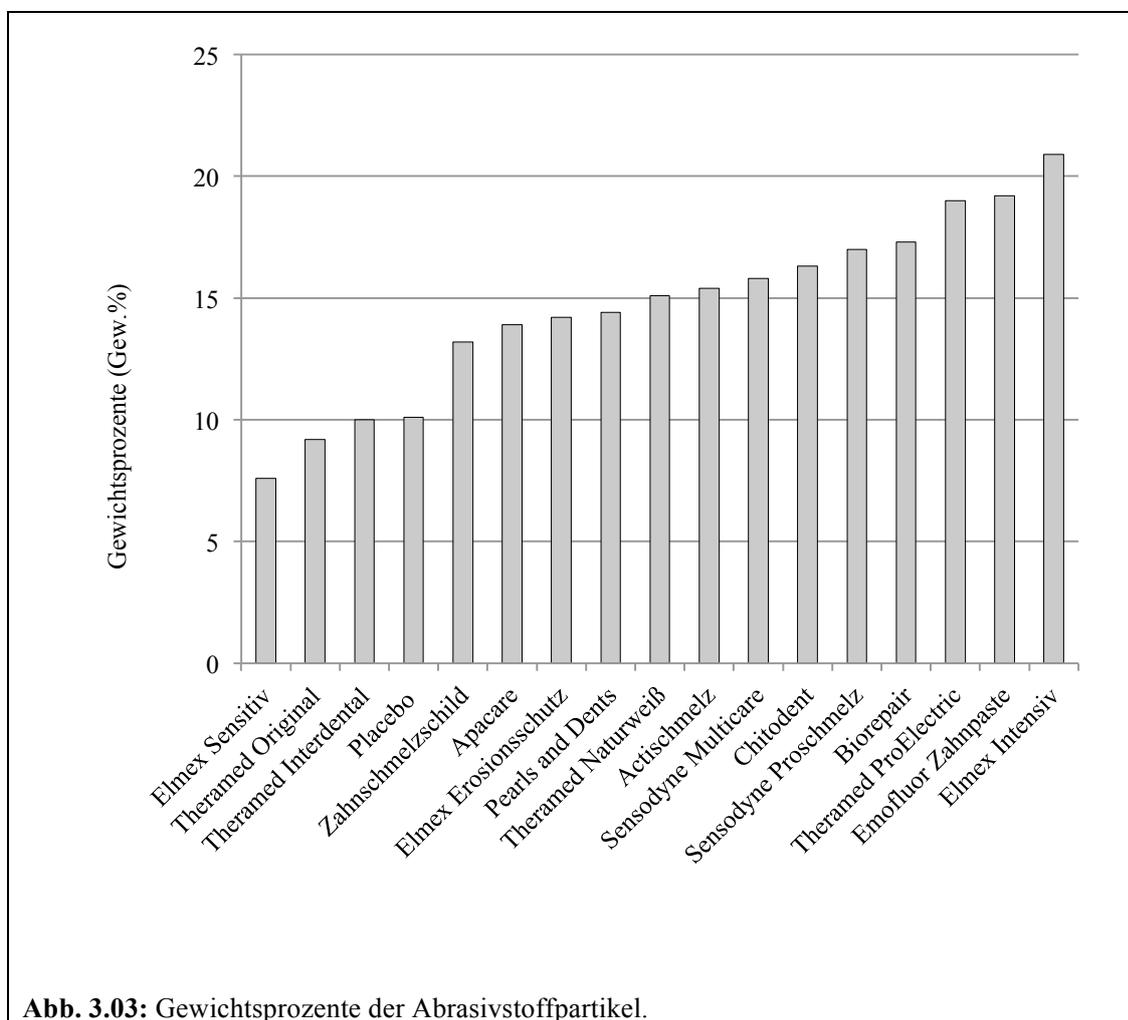
**Abb. 3.02b Fortsetzung:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der aus dem Sediment und Überstand (Elmex Sensitiv) extrahierten Putzkörper. Die Einteilung ist analog zu Tab. 3.01 vorgenommen. Abb. 3.02b zeigt alle Produkte, die signifikant geringere Substanzverluste unter Erosion und Bürstabrasion im Vergleich zum Placebo erzielten. Es wurde mit einer Originalvergrößerung von 300x aufgenommen. Es sind keine einheitlichen Formen der Abrasiva erkennbar, auch die Größe variiert im Bereich von 10  $\mu\text{m}$  und 50  $\mu\text{m}$ . Auffällig sind die großen Abrasiva in ProExpert Zahnschmelzschild und Sensodyne Proschmelz. Im Gegensatz dazu weist die Zahnpaste Elmex Intensiv eine Vielzahl kleiner Partikel auf, die nicht größer als 30  $\mu\text{m}$  sind. Elmex Sensitiv zeigt im Überstand viele kleine kugelförmige Partikel.

### 3.3.2 Putzkörperanteil in den Zahnpasten

Die Putzkörperanteile der Zahnpasten sind numerisch in Tabelle 3.01 und Tabelle 3.03 bzw. in Abbildung 3.03 in aufsteigender Reihenfolge grafisch dargestellt.

Den höchsten Putzkörperanteil wies Elmex Intensiv mit 20,9 Gew.% auf. Ein ähnlich hoher Putzkörperanteil befand sich in Theramed ProElectric (19,0 Gew.%) und der Emofluor Zahnpaste (19,2 Gew.%).

Den geringsten prozentualen Putzkörperanteil wies Elmex Sensitiv mit 7,6 Gew.% auf, gefolgt von Theramed Original (9,2 Gew.%), Theramed Interdental (10,0 Gew.%) und Placebo (10,1 Gew.%).



**Abb. 3.03:** Gewichtsprozent der Abrasivstoffpartikel.

#### 3.3.3 Elementanalyse der Abrasiva

Mittels EDX wurden pro Produkt je sechs große und sechs kleine Partikel untersucht. Lediglich zwei Produkte enthielten feste Partikel im Überstand nach dem Zentrifugieren (Elmex Sensitiv und Pearls and Dents). Bei diesen wurden separat sechs Messungen der enthaltenen Festkörper der Proben vorgenommen. Bei den angegebenen Werten handelt es sich um normierte Massenprozent. Die gerundeten Elementzusammensetzungen sind in Tabelle 3.02 als Mittelwerte dargestellt. Um die Verhältnisse der enthaltenen Elemente zu veranschaulichen sind sie als Grafik dargestellt (Abb. 3.04). Die Verhältnisse von Silizium und Sauerstoff sind in Tabelle 3.03 aufgeführt.

Die meisten Partikel der untersuchten Produkte enthielten größtenteils Silizium (20–35 Gew.%) und Sauerstoff (30–40 Gew.%). Diese lagen häufig in einem Verhältnis von 1:1 bis 1:1,6 vor.

Fünf Zahnpasten bildeten eine Ausnahme und wiesen ein abweichendes Verhältnis von Silizium und Sauerstoff auf: Actischmelz, Biorepair, Theramed Original, Elmex Intensiv und Pearls and Dents.

Bei dem hydroxylapatithaltigen Actischmelz entsprach die Menge an enthaltenem Sauerstoff (41 Gew.%) und Silizium (23 Gew.%) denen der restlichen Produkte, das Verhältnis (1:1,7) hingegen war leicht erhöht. Zusätzlich waren Kalzium (12 Gew.%) und Phosphor (5 Gew.%) nachweisbar.

Das hydroxylapatithaltige Biorepair wies ebenfalls ein erhöhtes Verhältnis von Silizium und Sauerstoff (1:2,7) auf. Außerdem zeigte es hohe Kalzium- (22 Gew.%) und Phosphorwerte (8 Gew.%). Nach Waschen mit 0,5 molarer Salzsäure verringerte sich das Verhältnis von Silizium zu Sauerstoff (1:1,2). Die Werte für Sauerstoff (52 Gew.%) und Silizium (42 Gew.%) lagen deutlich höher als bei der Mehrzahl der untersuchten Produkte. Kalzium und Phosphor waren nicht mehr nachweisbar.

Auch Theramed Original wies ein erhöhtes Verhältnis (1:2) von Silizium (25 Gew.%) und Sauerstoff (51 Gew.%) auf. Allerdings ließen sich keine anderen Elemente nachweisen.

Die Zahnpaste Elmex Intensiv enthielt auf den großen Partikeln Aluminium (29 Gew.%), Sauerstoff (40 Gew.%) und Silizium (12 Gew.%), womit auch das Silizium-Sauerstoff-Verhältnis (1:3,2) erhöht war.

Bei Pearls and Dents wurden Partikel aus dem Sediment sowie aus dem Überstand untersucht. Auf Partikeln aus dem Sediment befanden sich Sauerstoff (37 Gew.%) und Silizium (8 Gew.%), somit war das Verhältnis von Sauerstoff und Silizium erhöht (1:4,3). Neben diesen Elementen befanden sich noch erhöhte Anteile Phosphor (12 Gew.%), Natrium (9 Gew.%) und Titan (1,3 bzw. 1,5 Gew.%) im Sediment. Die Partikel im Überstand wiesen Kohlenstoff (75 Gew.%), einen geringeren Anteil Sauerstoff (20 Gew.%) und Titan (2,3 Gew.%) auf.

Ähnlich verhielt es sich bei Elmex Sensitiv, welches im Überstand einen hohen Anteil Kohlenstoff (96 Gew.%) und nur einen sehr kleinen Teil Sauerstoff (4 Gew.%) enthielt. Im Sediment hingegen waren hauptsächlich Sauerstoff (41 Gew.%) und Silizium (25 Gew.%) im oben genannten Verhältnis (1:1,6) vorhanden. Des Weiteren befand sich auf den kleinen Partikeln Titan (1,6 Gew.%).

Bei den folgenden Produkten lagen die Silizium- und Sauerstoffmengen im oben genannten Verhältnis vor, es konnten allerdings andere Elemente wie Zinn, Natrium, Kalium, Titan und Chlor nachgewiesen werden.

In der Untersuchung von den drei zinnhaltigen Produkten lieferten nur zwei nennenswerte Mengen an Zinn. Elmex Erosionsschutz und ProExpert Zahnschmelzschild enthielten beide die gleiche Menge Zinn (2,4 Gew.%) auf der Oberfläche der Abrasiva. Bei der Emofluor Zahnpaste lagen die Zinnanteile unterhalb der Nachweisgrenze (0,1–0,3 Gew.%).

Insgesamt konnte bei sechs Produkten Natrium bestimmt werden. Bei Elmex Erosionsschutz enthielten die großen Partikel Natrium (1,6 Gew.%). ProExpert Zahnschmelzschild wies ebenfalls auf den großen Partikeln Natrium auf (1,2 Gew.%). Auch Theramed Interdental enthielt Natrium (1,1 Gew.%).

Sensodyne Multicare (2,3 Gew.%) und Sensodyne Proschmelz (2,1 Gew.%) enthielten neben dem bereits genannten Pearls and Dents (9 Gew.%) erhöhte Natriumanteile. Die beiden Produkte des Herstellers Sensodyne zeigten auch als einzige nennenswerte Kaliumwerte (2,0–2,6 Gew.%).

Titan befand sich außer in dem bereits erwähnten Pearls and Dents (1,5 Gew.%) und Elmex Sensitiv (1,6 Gew.%) auch in Sensodyne Multicare (1 Gew.%), dem Placebo (1,3 Gew.%) und Apacare (1,1 Gew.%). Weitere vier Produkte wiesen trotz Deklaration, Titan lediglich unterhalb der Nachweisgrenze auf: Elmex Erosionsschutz

(0,5 Gew.%), Elmex Intensiv (0,5 Gew.%), Emofluor Zahnpaste (0,3 Gew.%) und Sensodyne Proschmelz (0 Gew.%).

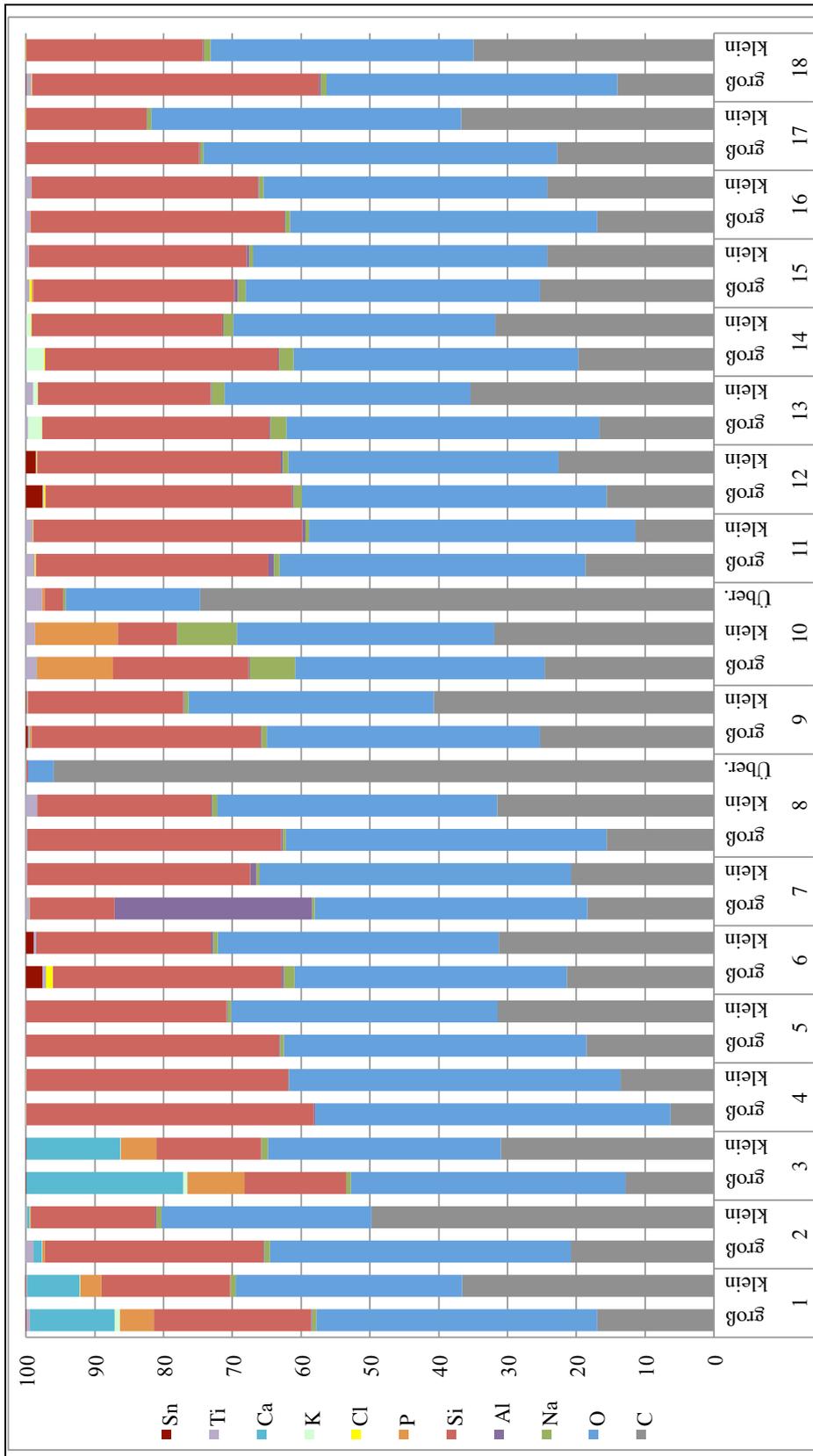
Chlor hingegen ließ sich ausschließlich auf den großen Partikeln von Elmex Erosionsschutz in bedeutsamer Menge (1 Gew.%) nachweisen.

**Tab. 3.02:** Elementanalyse der Zahnpasten; Pkg. = Putzkörpergröße, Über. = Überstand, Massenprozentage normiert (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung).

Produkt	Pkg.	C	O	Na	Al	Si	P	Cl	K	Ca	Ti	Sn
Actischmelz	klein	36,6 $\pm$ 8,0	33,0 $\pm$ 4,6	0,7 $\pm$ 0,2	0,1 $\pm$ 0,1	18,8 $\pm$ 9,9	3,0 $\pm$ 3,5	0,0 $\pm$ 0,0	0,1 $\pm$ 0,1	7,7 $\pm$ 9,2	0,1 $\pm$ 0,1	0,0 $\pm$ 0,0
	groß	16,9 $\pm$ 9,1	40,9 $\pm$ 3,2	0,6 $\pm$ 0,2	0,1 $\pm$ 0,1	22,9 $\pm$ 11,6	5,0 $\pm$ 2,6	0,0 $\pm$ 0,0	0,7 $\pm$ 0,4	12,3 $\pm$ 7,2	0,5 $\pm$ 0,4	0,0 $\pm$ 0,1
Apacare	klein	49,8 $\pm$ 9,9	30,6 $\pm$ 4,8	0,7 $\pm$ 0,1	0,1 $\pm$ 0,0	18,2 $\pm$ 5,5	0,1 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,3 $\pm$ 0,1	0,2 $\pm$ 0,1	0,0 $\pm$ 0,0
	groß	20,8 $\pm$ 9,0	43,7 $\pm$ 5,5	0,9 $\pm$ 0,2	0,2 $\pm$ 0,1	31,6 $\pm$ 4,1	0,4 $\pm$ 0,4	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	1,2 $\pm$ 1,0	1,1 $\pm$ 1,0	0,0 $\pm$ 0,0
Biorepair	klein	31,0 $\pm$ 3,9	33,9 $\pm$ 1,0	0,9 $\pm$ 0,3	0,1 $\pm$ 0,1	15,3 $\pm$ 11,3	5,1 $\pm$ 3,1	0,0 $\pm$ 0,0	0,1 $\pm$ 0,1	13,7 $\pm$ 9,3	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,1
	groß	12,9 $\pm$ 5,7	39,9 $\pm$ 5,9	0,7 $\pm$ 0,2	0,0 $\pm$ 0,1	14,8 $\pm$ 12,9	8,3 $\pm$ 4,9	0,0 $\pm$ 0,0	0,6 $\pm$ 0,2	22,7 $\pm$ 14,4	0,0 $\pm$ 0,0	0,1 $\pm$ 0,2
Biorepair gewaschen	klein	13,6 $\pm$ 8,3	48,1 $\pm$ 5,7	0,1 $\pm$ 0,1	0,2 $\pm$ 0,0	38,0 $\pm$ 8,3	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0
	groß	6,3 $\pm$ 2,4	51,7 $\pm$ 3,6	0,0 $\pm$ 0,0	0,2 $\pm$ 0,1	41,8 $\pm$ 5,4	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0
Chitodont	klein	31,5 $\pm$ 7,5	38,8 $\pm$ 6,0	0,5 $\pm$ 0,2	0,2 $\pm$ 0,0	29,1 $\pm$ 4,3	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0
	groß	18,6 $\pm$ 5,9	44,0 $\pm$ 2,8	0,5 $\pm$ 0,1	0,2 $\pm$ 0,1	36,8 $\pm$ 6,5	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0
Elmex	klein	31,3 $\pm$ 7,1	40,9 $\pm$ 3,1	0,7 $\pm$ 0,2	0,2 $\pm$ 0,1	25,4 $\pm$ 4,3	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,1	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,4 $\pm$ 0,6	1,1 $\pm$ 1,0
	groß	21,4 $\pm$ 8,2	39,6 $\pm$ 3,7	1,6 $\pm$ 0,4	0,3 $\pm$ 0,1	33,3 $\pm$ 8,8	0,0 $\pm$ 0,0	1,0 $\pm$ 0,4	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,5 $\pm$ 0,3	2,4 $\pm$ 1,7
Erosionsschutz	klein	20,8 $\pm$ 6,3	45,3 $\pm$ 3,4	0,4 $\pm$ 0,1	0,9 $\pm$ 0,3	32,5 $\pm$ 4,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,1 $\pm$ 0,1	0,0 $\pm$ 0,0
	groß	18,4 $\pm$ 7,8	39,6 $\pm$ 1,6	0,4 $\pm$ 0,3	28,7 $\pm$ 21,4	12,3 $\pm$ 14,6	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,5 $\pm$ 0,3	0,0 $\pm$ 0,0
Elmex Sensitiv	Über.	95,9 $\pm$ 0,7	3,8 $\pm$ 0,6	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,2 $\pm$ 0,2	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,1 $\pm$ 0,1	0,0 $\pm$ 0,0
	klein	31,5 $\pm$ 8,1	40,7 $\pm$ 2,7	0,7 $\pm$ 0,1	0,1 $\pm$ 0,1	25,3 $\pm$ 6,8	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	1,6 $\pm$ 1,1	0,0 $\pm$ 0,0
Ermofluor Zahnpaste	groß	15,6 $\pm$ 5,5	46,6 $\pm$ 2,8	0,5 $\pm$ 0,2	0,2 $\pm$ 0,1	36,8 $\pm$ 6,9	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,2 $\pm$ 0,2	0,0 $\pm$ 0,0
	klein	40,7 $\pm$ 7,9	35,7 $\pm$ 3,5	0,6 $\pm$ 0,1	0,1 $\pm$ 0,0	22,6 $\pm$ 7,0	0,1 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,1 $\pm$ 0,1	0,1 $\pm$ 0,1
Pearls and Dents	groß	25,3 $\pm$ 4,1	39,8 $\pm$ 3,1	0,7 $\pm$ 0,1	0,2 $\pm$ 0,1	33,3 $\pm$ 5,5	0,2 $\pm$ 0,2	0,0 $\pm$ 0,1	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,3 $\pm$ 0,3	0,3 $\pm$ 0,3
	Über.	74,7 $\pm$ 9,5	19,6 $\pm$ 6,1	0,3 $\pm$ 0,3	0,0 $\pm$ 0,0	2,7 $\pm$ 2,6	0,4 $\pm$ 0,4	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	2,3 $\pm$ 1,2	0,0 $\pm$ 0,0
Pearls and Dents	klein	31,9 $\pm$ 14,5	37,4 $\pm$ 5,1	8,6 $\pm$ 6,5	0,1 $\pm$ 0,1	8,6 $\pm$ 7,4	12 $\pm$ 9,4	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	1,3 $\pm$ 1,2	0,0 $\pm$ 0,0
	groß	24,6 $\pm$ 3,3	36,3 $\pm$ 2,8	6,6 $\pm$ 5,9	0,2 $\pm$ 0,1	19,7 $\pm$ 15,4	11 $\pm$ 9,5	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	0,0 $\pm$ 0,0	1,5 $\pm$ 1,1	0,0 $\pm$ 0,0

Tab. 3.02 Fortsetzung

Produkt	Pkg.	C	O	Na	Al	Si	P	Cl	K	Ca	Ti	Sn
Placebo	klein	11,4 ±3,6	47,5 ±3,9	0,5 ±0,2	0,4 ±0,2	39,1 ±4,1	0,0 ±0,0	0,1 ±0,1	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	1,0 ±0,6	0,0 ±0,0
	groß	18,7 ±3,9	44,4 ±4,4	0,8 ±0,1	0,8 ±1,1	33,8 ±3,5	0,0 ±0,0	0,1 ±0,1	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	1,3 ±0,7	0,0 ±0,0
ProExpert Zahnschmelz- schild	klein	22,6 ±2,3	39,3 ±2,7	0,8 ±0,2	0,2 ±0,0	35,4 ±3,4	0,1 ±0,1	0,1 ±0,1	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,1 ±0,2	1,4 ±0,6
	groß	15,6 ±3,9	44,3 ±4,4	1,2 ±0,3	0,2 ±0,1	35,8 ±5,7	0,1 ±0,2	0,2 ±0,1	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,1 ±0,1	2,4 ±0,9
Sensodyne	klein	35,4 ±11,1	35,7 ±2,7	1,9 ±1,0	0,1 ±0,1	25,1 ±9,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,1	0,7 ±0,4	0,0 ±0,0	1,0 ±1,0	0,0 ±0,0
Multicare	groß	16,6 ±3,6	45,5 ±2,7	2,3 ±0,6	0,2 ±0,0	33,0 ±3,8	0,0 ±0,0	0,1 ±0,1	2,0 ±0,4	0,0 ±0,0	0,2 ±0,2	0,0 ±0,0
Sensodyne	klein	31,8 ±8,9	38,1 ±5,9	1,4 ±0,7	0,1 ±0,1	27,7 ±5,9	0,0 ±0,0	0,0 ±0,1	0,7 ±0,5	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0
Proschmelz	groß	19,8 ±4,4	41,4 ±3,1	2,1 ±1,0	0,2 ±0,1	33,9 ±6,5	0,0 ±0,0	0,1 ±0,1	2,6 ±1,1	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0
Theramed	klein	24,2 ±2,9	42,7 ±3,5	0,6 ±0,2	0,4 ±0,2	31,7 ±2,8	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,4 ±0,4	0,0 ±0,0
Interdental	groß	25,3 ±6,5	42,8 ±11,0	1,1 ±0,4	0,5 ±0,5	29,2 ±5,4	0,3 ±0,3	0,3 ±0,6	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,5 ±0,7	0,0 ±0,0
Theramed Naturweiß	klein	24,2 ±10,4	41,2 ±5,3	0,7 ±0,3	0,1 ±0,0	32,9 ±6,6	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,8 ±0,9	0,0 ±0,0
	groß	17,0 ±6,2	44,6 ±6,0	0,7 ±0,1	0,2 ±0,1	36,9 ±3,8	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,6 ±0,8	0,0 ±0,0
Theramed	klein	36,8 ±4,5	45,1 ±2,2	0,6 ±0,4	0,1 ±0,0	17,5 ±2,6	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0
Original	groß	22,8 ±3,4	51,4 ±1,8	0,5 ±0,1	0,1 ±0,0	25,1 ±3,2	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0
Theramed	klein	35,0 ±8,0	38,2 ±5,1	1,0 ±0,2	0,1 ±0,1	25,7 ±4,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0	0,0 ±0,0
ProElectric	groß	14,0 ±4,1	42,3 ±11,5	0,9 ±0,2	0,2 ±0,1	41,7 ±11	0,1 ±0,2	0,0 ±0,1	0,0 ±0,0	0,0 ±0,1	0,7 ±1,6	0,1 ±0,1



**Abb. 3.04:** Darstellung der Elementanalyse der einzelnen Produkte. Über. = Überstand; Nummerierung in alphabetischer Reihenfolge: 1 Actischmelz, 2 Apacare, 3 Biorepair, 4 Biorepair gewaschen, 5 Chitodont, 6 Elmex Erosionsschutz, 7 Elmex Intensiv, 8 Elmex Sensitiv, 9 Emofluor Zahnpaste, 10 Pearls and Dents, 11 Placebo, 12 ProExpert Zahnschmelzschild, 13 Sensodyne Multicare, 14 Sensodyne Proschmelz, 15 Theramed Interdental, 16 Theramed Naturweiß, 17 Theramed Original, 18 Theramed ProElectric.

### 3.3.4 Vergleich mit vom Hersteller angegebener Siliziumverbindung und -menge

Nach der Kosmetikverordnung deklarieren die Zahnpastenhersteller die Inhaltsstoffe nach ihrem Gewichtsanteil in absteigender Reihenfolge. Dies gilt für alle Inhaltsstoffe die mehr als 1% des Inhalts ausmachen. Somit gibt der Rang der deklarierten Siliziumverbindung in der Liste der Inhaltsstoffe einen Anhaltspunkt über deren relativ zu anderen Inhaltsstoffen vorhandene Menge.

In Tabelle 3.03 sind die mithilfe der EDX-Analyse gemessenen normierten Massenprozentanteile von Sauerstoff und Silizium, die jeweils deklarierten Siliziumverbindungen und ihr Rang in der Liste der Inhaltsstoffe dargestellt. Des Weiteren wurde das Verhältnis von Silizium und Sauerstoff berechnet. Außerdem wurden die Daten dem Putzkörperanteil gegenübergestellt.

**Tab. 3.01:** Elementanalyse der Zahnpasten. Pkg. = Putzkörpergröße, n.d. = nicht deklariert, aufgrund der beschriebenen Waschung mit HCl und der dadurch bedingten Massenverluste war die Ermittlung der Gew.% bei „Biorepair gewaschen“ nicht sinnvoll und wurde nicht durchgeführt, EDX-Daten aus Tab. 3.02, Verhältnis von Silizium und Sauerstoff, vom Hersteller deklarierte Siliziumverbindung, ihr Rang in der Liste der Inhaltsstoffe in Klammern, Putzkörperanteil in Gew.%.

Produkt	Pkg.	Si	O	Verhältnis	Siliziumverbindung (Rang)	Gew.%
Actischmelz	klein	18,8	33,0	1:1,7	Hydrated Silica (4)	15,4
	groß	22,9	40,9	1:1,7		
Apacare	klein	18,2	30,6	1:1,6	Hydrated Silica (2)	13,9
	groß	31,6	43,7	1:1,3		
Biorepair	klein	15,3	33,9	1:2,2	Hydrated Silica (3), Silica (6)	17,3
	groß	14,8	39,9	1:2,7		
Biorepair gewaschen	klein	38,0	48,1	1:1,2	Hydrated Silica (3), Silica (6)	---
	groß	41,8	51,7	1:1,2		
Chitodent	klein	29,1	38,8	1:1,3	Hydrated Silica (3)	16,0
	groß	36,8	44,0	1:1,1		
Elmex Erosionsschutz	klein	25,4	40,9	1:1,6	Hydrated Silica (4)	14,2
	groß	33,3	39,6	1:1,1		
Elmex Intensiv	klein	32,5	45,3	1:1,3	Hydrated Silica (2)	20,9
	groß	12,3	39,6	1:3,2		
Elmex Sensitiv	klein	25,3	40,7	1:1,6	Hydrated Silica (5), Silica Dimethyl Silylate (8)	7,6
	groß	36,8	46,6	1:1,2		
Emofluor Zahnpaste	klein	22,6	35,7	1:1,5	Silica (2)	19,2
	groß	33,3	39,8	1:1,1		
Pearls and Dents	klein	8,6	37,4	1:4,3	Silica (5)	14,4
	groß	19,7	36,3	1:1,8		

Tab. 3.03 Fortsetzung

Produkt	Pkg.	Si	O	Verhältnis	Siliziumverbindung (Rang)	Gew.%
Placebo	klein	39,1	47,5	1:1,2	n.d.	10,1
	groß	33,8	44,4	1:1,3		
ProExpert Zahnschmelzschild	klein	35,4	39,3	1:1,1	Hydrated Silica (3), Silica (18)	13,2
	groß	35,8	44,3	1:1,2		
Sensodyne Multicare	klein	25,1	35,7	1:1,4	Hydrated Silica (3)	15,8
	groß	33,0	45,5	1:1,3		
Sensodyne Proschmelz	klein	27,7	38,1	1:1,3	Hydrated Silica (3)	17,0
	groß	33,9	41,4	1:1,2		
Theramed Interdental	klein	31,7	42,7	1:1,3	Hydrated Silica (3)	10,0
	groß	29,2	42,8	1:1,4		
Theramed Naturweiß	klein	32,9	41,2	1:1,2	Hydrated Silica (3)	15,1
	groß	36,9	44,6	1:1,2		
Theramed Original	klein	17,5	45,1	1:2,5	Hydrated Silica (3)	9,2
	groß	25,1	51,4	1:2,0		
Theramed ProElectric	klein	25,7	38,2	1:1,4	Hydrated Silica (3)	19,0
	groß	41,7	42,3	1:1,0		

### 3.4 Fluorid- und pH-Werte

In Tabelle 3.04 sind die Fluoridwerte und die pH-Werte der Slurries der untersuchten Produkte angegeben, außerdem die vom Hersteller deklarierte Fluoridmenge. Zur Bestimmung der Fluoridwerte wurde aus drei Messwerten der Mittelwert gebildet. Die jeweils enthaltene Fluoridverbindung ist in Tabelle 3.01 aufgeführt.

Vier Produkte enthielten weniger bzw. mehr Fluorid als deklariert: Elmex Intensiv (deklariert: 1400 ppm, Mittelwert: 1210 ppm), Apacare (deklariert: 1450 ppm, Mittelwert: 1210 ppm), Emofluor Zahnpaste (deklariert 1000 ppm, Mittelwert: 779 ppm) und Elmex Erosionsschutz (deklariert 1400 ppm, Mittelwert: 1603 ppm).

Den niedrigsten pH-Wert wies das Slurry von Elmex Erosionsschutz (pH 4,0) auf, gefolgt von Emofluor Zahnpaste (pH 4,6) und Elmex Intensiv (pH 5,0). Am basischsten waren Biorepair (pH 8,7), Actischmelz (pH 8,2) und Sensodyne Proschmelz (pH 7,8).

**Tab. 3.02:** pH-Wert der Slurries; Fluoridwerte und Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung in ppm, deklarierte Fluoridmenge (Herstellerangabe), Produkte in alphabetischer Reihenfolge, n.d. = nicht deklariert.

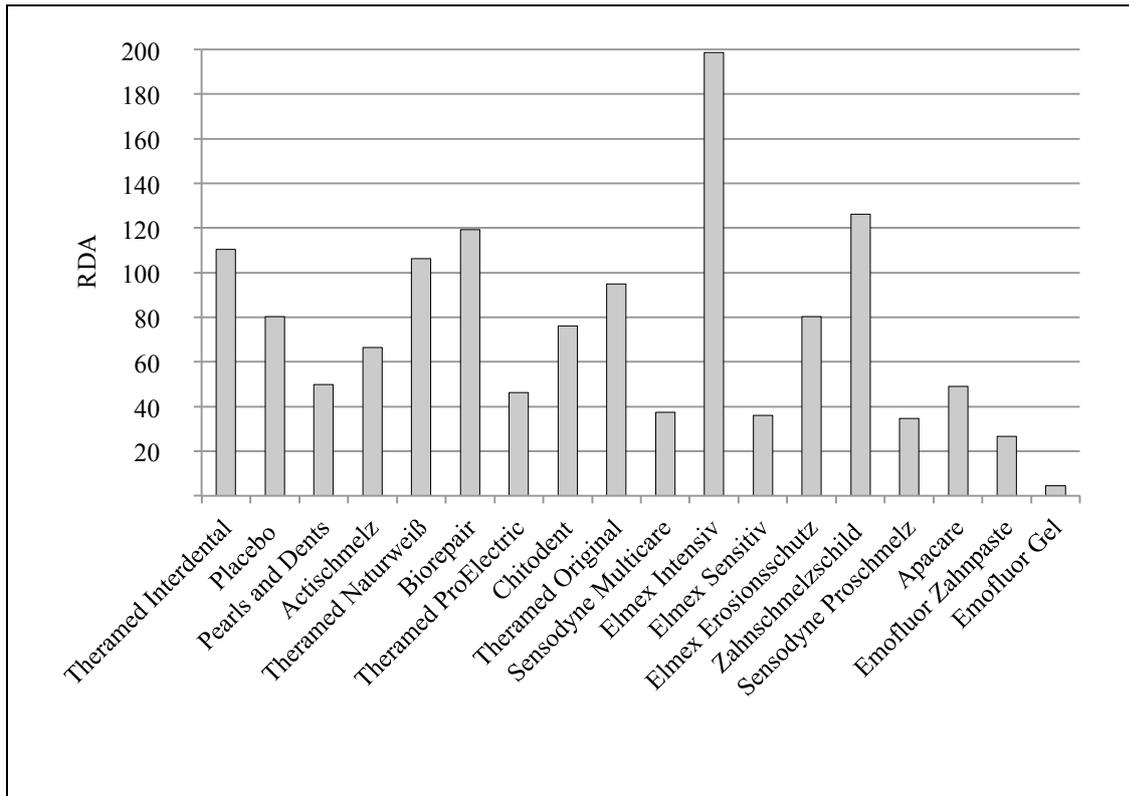
Produkt	pH-Wert Slurry	Fluoridwert (ppm)	Herstellerangabe (ppm)
Actischmelz	8,2	<b>694,7</b> $\pm$ 2,9	n.d.
Apacare	7,4	<b>1210,0</b> $\pm$ 17,3	1450
Biorepair	8,7	<b>0,0</b> $\pm$ 0,0	0
Chitodent	6,3	<b>0,0</b> $\pm$ 0,0	0
Elmex Erosionsschutz	4,0	<b>1603,3</b> $\pm$ 5,8	1400
Elmex Intensiv	5,0	<b>1210,0</b> $\pm$ 36,1	1400
Elmex Sensitiv	4,8	<b>1366,7</b> $\pm$ 5,8	1400
Emofluor Gel	5,1	<b>1023,3</b> $\pm$ 5,8	1000
Emofluor Zahnpaste	4,6	<b>779,3</b> $\pm$ 14,6	1000
Pearls and Dents	6,0	<b>1126,7</b> $\pm$ 25,2	1200
Placebo	6,5	<b>0,0</b> $\pm$ 0,0	0
ProExpert Zahnschmelzschild	6,2	<b>1220,0</b> $\pm$ 10,0	1450
Sensodyne Multicare	7,7	<b>1403,3</b> $\pm$ 15,3	1450
Sensodyne Proschmelz	7,8	<b>1426,7</b> $\pm$ 11,5	1450
Theramed Naturweiß	7,5	<b>1440,0</b> $\pm$ 0,0	1450
Theramed Original	7,3	<b>1336,7</b> $\pm$ 20,8	1450
Theramed ProElectric	7,6	<b>1413,3</b> $\pm$ 11,5	1450
Theramed Interdental	7,3	<b>1453,3</b> $\pm$ 5,8	1450

### **3.5 RDA- und REA-Werte**

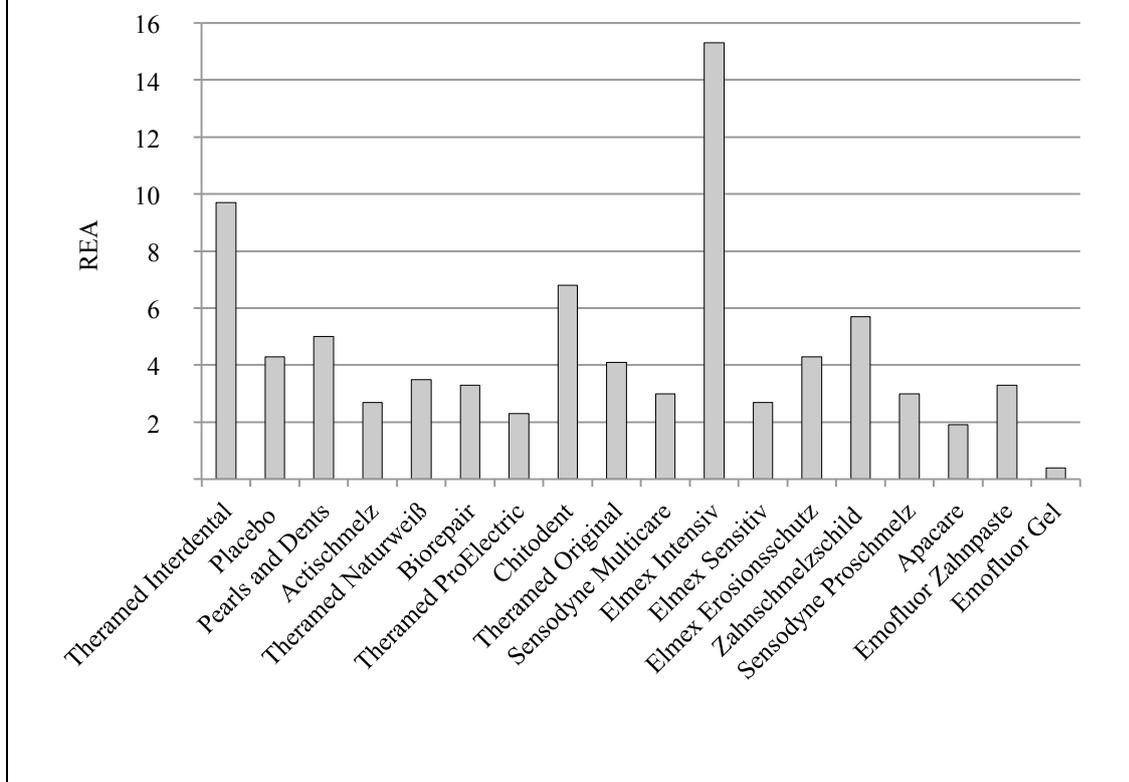
In Tabelle 3.01 und Abbildung 3.05 bzw. 3.06 sind die RDA- und REA-Werte in absteigender Reihenfolge nach der Höhe des Substanzverlustes im Vergleich zum Placebo dargestellt.

RDA-Werte über 100 wurden von insgesamt fünf Produkten erzielt. Der höchste Wert fand sich bei Elmex Intensiv mit 198,5, gefolgt von ProExpert Zahnschmelzschild (126,1) und Biorepair (119,2). Sieben Produkte verzeichneten RDA-Werte unter 50, bei sechs davon handelte es sich um Produkte, welche den Substanzverlust signifikant im Vergleich zum Placebo nach Bürstabrasion verringern konnten. Die drei niedrigsten Werte wurden von Sensodyne ProSchmelz (34,7), Emofluor Zahnpaste (26,7) und dem Emofluor Gel (4,5) erreicht.

REA-Werte zwischen 3 und 6 erzielten zehn Produkte. Elmex Intensiv wies mit 15,3 den höchsten REA-Wert auf, gefolgt von Theramed Interdental (9,7) und Chitodent (6,8). Die drei geringsten REA-Werte fanden sich bei Emofluor Gel (0,4) Apacare (1,9) und Theramed ProElectric (2,3).



**Abb. 3.05:** Darstellung der RDA-Werte, die Produkte sind in absteigender Reihenfolge der Substanzverluste nach Bürstabrasion sortiert, s. Tab. 3.01.



**Abb. 3.06:** Darstellung der REA-Werte, die Produkte sind in absteigender Reihenfolge der Substanzverluste nach Bürstabrasion sortiert, s. Tab. 3.01.

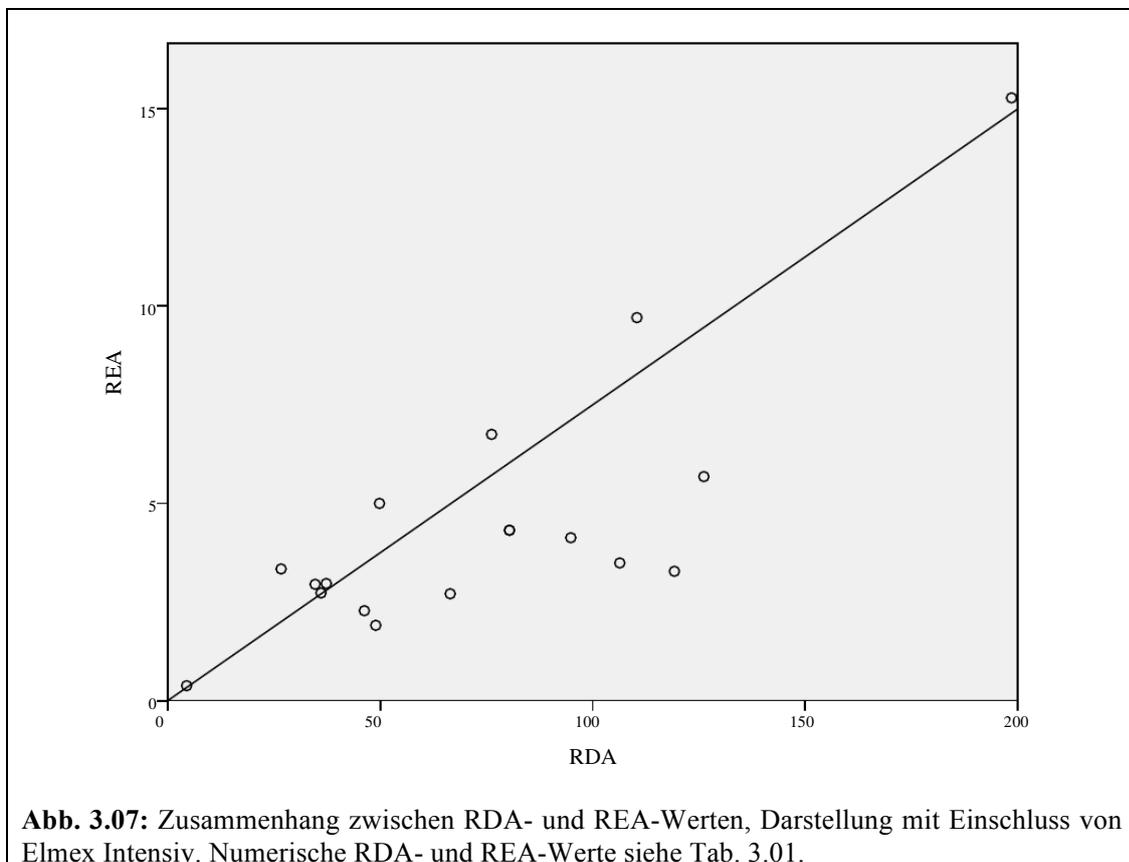
### 3.6 RDA/REA, Putzkörperanteile und Putzkörpergröße in Bezug zum Substanzverlust durch Bürstabrasion

Es wurden RDA-Werte zwischen 4,5 (Emofluor Gel) und 198,5 (Elmex Intensiv) gemessen, die REA-Werte lagen zwischen 0,4 (Emofluor Gel) und 15,3 (Elmex Intensiv). Im Folgenden sind die Ergebnisse der linearen Regression und Kurvenanpassung der RDA-, REA-Werte, des Putzkörperanteils und der Substanzverluste aufgeführt.

Aufgrund der Diskrepanz des geringen Substanzverlustes und den hohen RDA- bzw. REA-Werten bei Elmex Intensiv wurde eine Regressionsanalyse mit und ohne Elmex Intensiv gerechnet.

#### 3.6.1 Lineare Regression

RDA- und REA-Werte korrelieren linear miteinander (ohne Elmex Intensiv  $R^2 = 0,380$ ,  $p \leq 0,01$ ; mit Elmex Intensiv  $R^2 = 0,655$ ;  $p \leq 0,01$ ) (Abb. 3.07).



Zwischen dem RDA-Wert und dem Substanzverlust durch Bürstabrasion war eine moderate lineare Korrelation zu erkennen ( $R^2 = 0,288$ ,  $p \leq 0,05$ ; ohne Elmex Intensiv). Der lineare Zusammenhang zwischen den REA-Werten und dem Substanzverlust war eindeutiger ( $R^2 = 0,440$ ,  $p \leq 0,01$ ; ohne Elmex Intensiv). Mit Elmex Intensiv eingeschlossen, ließ sich sowohl bei den RDA- als auch bei den REA-Werten keine signifikante lineare Korrelation zu den Substanzverlusten durch Bürstabrasion ermitteln (RDA und Substanzverlust:  $R^2 = 0,137$ ; REA und Substanzverlust:  $R^2 = 0,134$ ). Näheres siehe Kapitel 4.5.5.

Mithilfe des RDA- und REA-Wertes konnten unter Ausschluss von Elmex Intensiv 29% bzw. 44% der Substanzverluste erklärt werden.

Der Putzkörperanteil der einzelnen Zahnpasten variierte zwischen 7,6 (Elmex Sensitiv) und 20,9 (Elmex Intensiv) Gewichtsprozent. Ein linearer Zusammenhang zwischen dem Putzkörperanteil und der Erhöhung des Substanzverlustes nach dem Bürsten bzw. den RDA- und REA-Werten zeigte sich nicht. Auch die Putzkörpergröße korrelierte nicht mit der Erhöhung des Substanzverlustes durch Bürstabrasion bzw. den RDA- und REA-Werten. Nahezu alle Zahnpasten enthielten Partikelgrößen von über 30  $\mu\text{m}$  und 40  $\mu\text{m}$ , unabhängig davon, ob sie eine Erhöhung des Substanzverlustes durch Bürsten erzielten oder nicht.

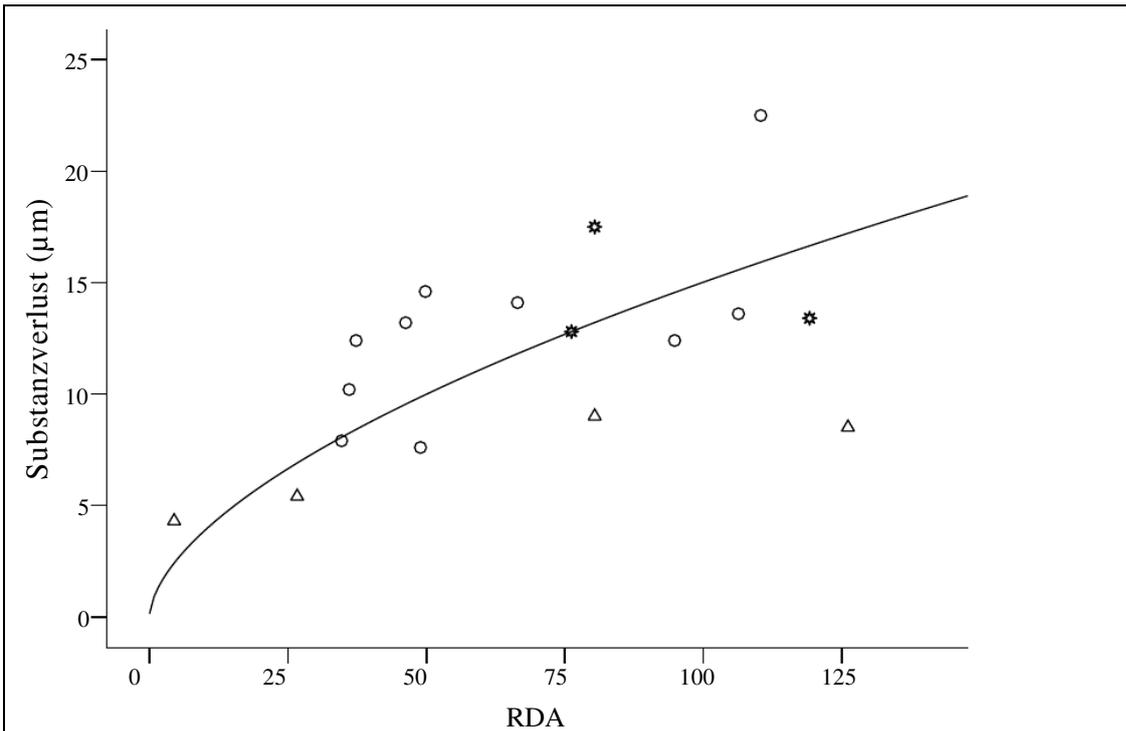
#### **3.6.2 Kurvenanpassung**

Im Folgenden werden die Zahnpasten und das Zahngel näher betrachtet. Es zeigte sich, dass nicht-lineare Modelle den Zusammenhang von Substanzverlust und den Parametern RDA/REA und Putzkörperanteil besser darstellen können.

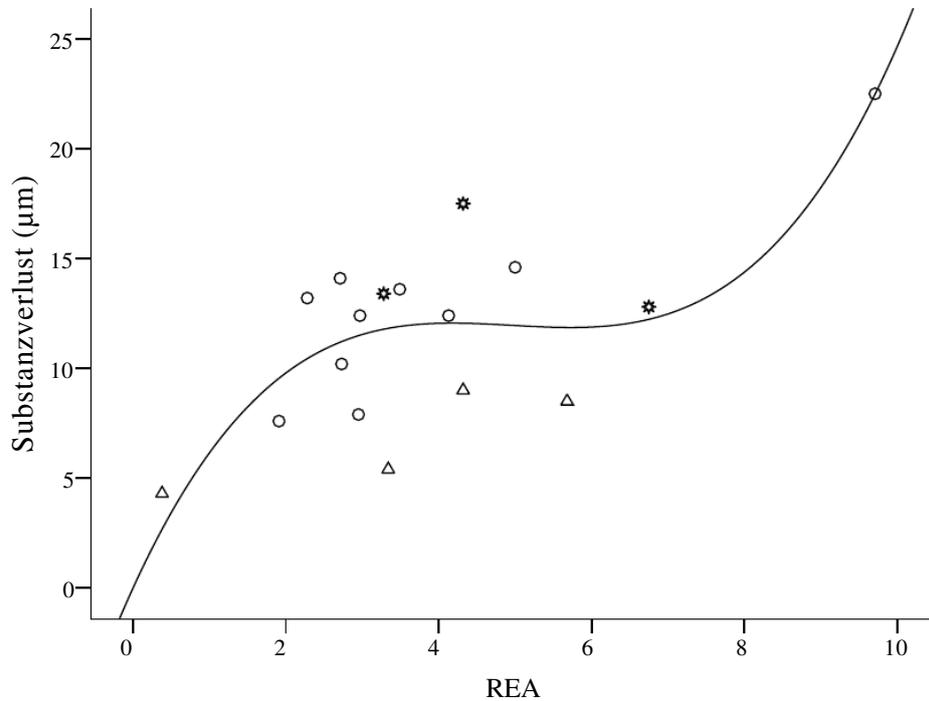
Für die Beziehung von RDA und Substanzverlust erwies sich eine Potenzfunktion als am aussagekräftigsten ( $R^2 = 0,981$ ;  $p \leq 0,001$ ; Abb. 3.08).

Der Zusammenhang von REA-Wert und den Substanzverlusten wurde am deutlichsten durch ein kubisches Modell dargestellt. ( $R^2 = 0,947$ ;  $p \leq 0,001$ ; Abb. 3.09).

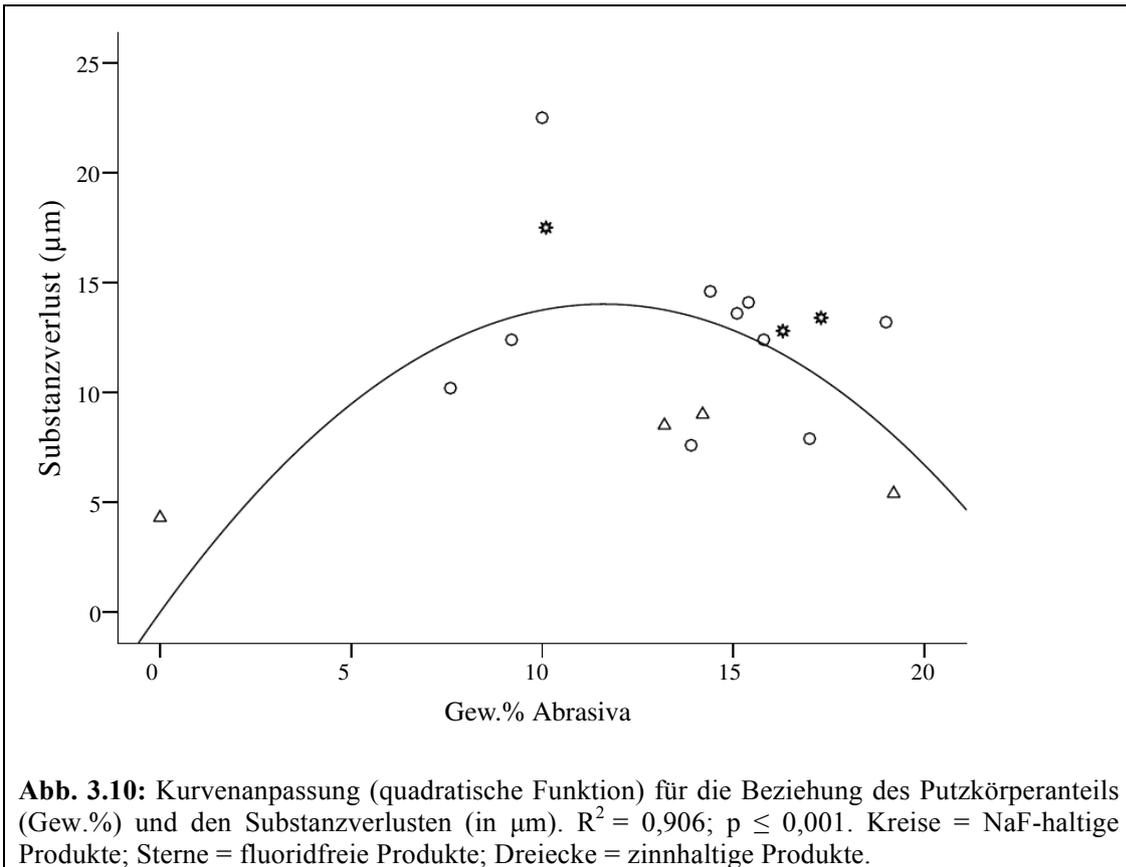
Mithilfe einer quadratischen Funktion konnte die Beziehung des Putzkörperanteils und des Substanzverlustes am besten abgebildet werden ( $R^2 = 0,906$ ;  $p \leq 0,001$ ; Abb. 3.10).



**Abb. 3.08:** Kurvenanpassung (Potenzfunktion) für die Beziehung von RDA und Substanzverlusten (in  $\mu\text{m}$ ).  $R^2 = 0,981$ ;  $p \leq 0,001$ . Kreise = NaF-haltige Produkte; Sterne = fluoridfreie Produkte; Dreiecke = zinnhaltige Produkte.



**Abb. 3.09:** Kurvenanpassung (kubisches Modell) für die Beziehung von REA und Substanzverlusten (in  $\mu\text{m}$ ).  $R^2 = 0,947$ ;  $p \leq 0,001$ . Kreise = NaF-haltige Produkte; Sterne = fluoridfreie Produkte; Dreiecke = zinnhaltige Produkte.



## **4 Diskussion**

In der vorliegenden Arbeit wurden wie in der Vorgängerstudie [Ganss et al., 2011] eine Vielzahl unterschiedlicher Zahnpasten und ein Zahngel mit verschiedenen Wirkstoffen untersucht und ihre Wirkeffekte direkt verglichen. Ziel der aktuellen Studie war es, die anti-erosive Wirkung der Produkte und die Effekte nach Bürstabrasiion am Zahnschmelz zu untersuchen. Die Ergebnisse sollten durch die Form, Größe und Menge der Putzkörper, die Wirkstoffe und die RDA- und REA-Werte der einzelnen Zahnpasten erklärt werden.

### **4.1 Material und Methoden**

#### **4.1.1 Probenherstellung und Experimente I und II**

Die Verwendung von Schmelzproben humaner Molaren entspricht wie auch die Verwendung von bovinen Schmelzproben dem derzeitigen Standard für Experimente zu Erosion und Abrasion [Wiegand & Attin, 2011]. Da bei Verwendung natürlicher Schmelzoberflächen die Ergebnisse stark schwanken können [Ganss et al., 2000], ist die Präparation von planen und polierten Versuchsfeldern notwendig, um mittels Profilometrie reliable Ergebnisse zu erzielen [Schlueter et al., 2011].

Die Experimente der Studie folgen dem Standardverfahren der Arbeitsgruppe. Das Studiendesign entspricht dem gegenwärtigen Standard für Erosions- bzw. Erosions-Abrasions-Experimente [Wiegand & Attin, 2011].

Das bei diesen In-vitro-Experimenten verwendete Design sollte die tägliche Mundhygiene simulieren und eine Übertragbarkeit in situ gewährleisten. Die sechsmalige Säureexposition pro Versuchstag stellte den Konsum von sauren Softgetränken bzw. sauren Haupt- und Zwischenmahlzeiten dar.

Erosion und Abrasion interagieren und es ist bekannt, dass erodierte Zahnhartsubstanz sensibler auf eine Abrasion durch Zahnpaste reagiert [Ferreira et al., 2013]. Aus diesem Grund wurde das morgendliche und abendliche Zähneputzen mit den empfohlenen

2 min abgebildet. Bei dieser Putzzeit wird jeder Quadrant 30 s lang gebürstet, wobei die Zahnflächen (oral, okklusal und vestibulär; approximal ausgeschlossen, da hier die Zahnbürste kaum wirkt) jeweils etwa 10 s in Kontakt mit der Zahnbürste stehen. Die Bürstzeit von 15 s im Experiment liegt damit in einer klinisch relevanten Größenordnung und etwas höher als in der alltäglichen Mundhygiene. Das Auflagegewicht von 200 g entspricht der durchschnittlich beim Zähneputzen angewandten Kraft [Ganss et al., 2009]. Das Spülen unter Leitungswasser nach dem Bürsten bzw. Slurrykontakt simuliert das Ausspülen nach dem Zähneputzen, das der allgemeinen Praxis entspricht. So zeigte beispielsweise eine englische Studie, dass 74–77% der Befragten nach dem Zähneputzen den Mund mit Wasser ausspülten [McGrady et al., 2012].

In Experiment I wurden die Proben ausschließlich den chemischen Reizen durch die Erosion ausgesetzt, somit konnten die anti-erosiven Wirkeffekte der Produkte betrachtet werden. Deshalb war ein Vergleich mit Experiment II möglich, in welchem die Proben der physikochemischen Interaktion von Abrasion und Erosion ausgesetzt wurden. Die zusätzlichen physikalischen Reize führen zu einer sichtbaren Zunahme der Substanzverluste in Experiment II. Es ist denkbar, dass die Zunahme der Substanzverluste allein schon durch die Wirkung der Zahnbürsten entsteht. Schlueter und Wiegand gehen jedoch davon aus, dass die Zahnbürste selbst keinen signifikanten Einfluss auf die Abrasion hat, hingegen die Kombination von Zähneputzen und Zahnpaste den entscheidenden Faktor darstellt [Wiegand & Schlueter, 2014].

### **4.1.2 Messmethoden**

Im Folgenden sind die in der Studie angewandten Messmethoden aufgeführt, also die Profilometrie und die Rasterelektronenmikroskopie in Kombination mit der EDX-Analyse.

Die Analyse von Oberflächen wird in der Erosionsforschung häufig mit der Oberflächenprofilometrie durchgeführt, mit der es möglich ist, den Substanzverlust einer Versuchs- gegenüber einer Referenzfläche zu messen. Außerdem erlaubt sie eine Analyse der Rautiefe. Für die in diesem In-vitro-Experiment erzielten Werte ist die Profilometrie der gegenwärtige Goldstandard zur Quantifizierung von durch Erosion bzw. Abrasion entstandenen Substanzverlusten [Schlueter et al., 2011].

Zu unterscheiden sind zwei Verfahren, ein kontaktloses und eines, bei dem die Messung mit Kontakt erfolgt. In der vorliegenden Studie wurde die Oberfläche der Proben kontaktlos analysiert. Bei diesen optischen, also kontaktlosen Sensoren, liegt der Vorteil darin, dass die Oberflächen nicht berührt und auch nicht zerstört werden können.

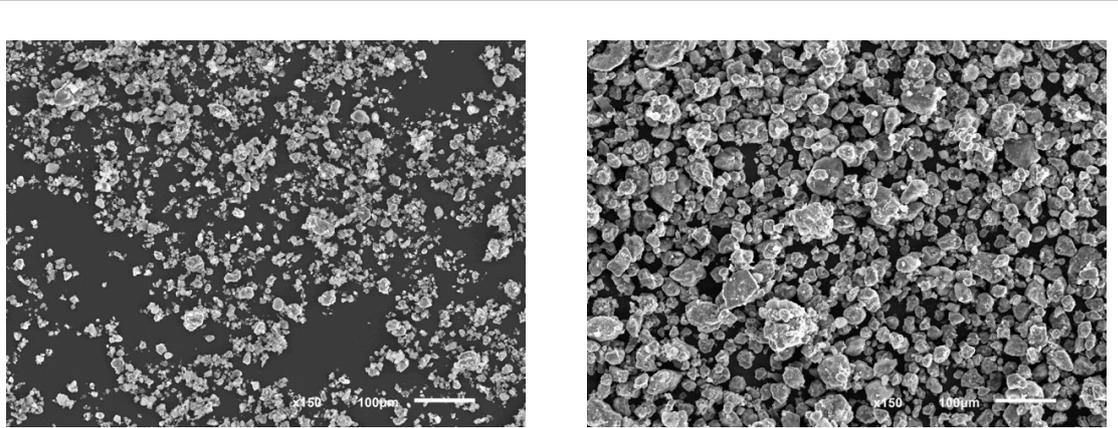
Das Rasterelektronenmikroskop ist als Standard in der qualitativen bildgebenden Untersuchung zu sehen und bietet in Kombination mit der standardfreien EDX-Analyse auch die Möglichkeit der quantitativen Untersuchung. Das qualitativ analysierte Objekt wird mit der standardfreien EDX-Analyse quantitativ auf die vorliegende Elementzusammensetzung untersucht. Auf Basis von Atomdatenbanken kann mit der standardfreien EDX-Analyse unter Auswahl bestimmter Elemente eine relative Elementzusammensetzung des analysierten Objekts ermittelt werden [Eggert, 2006].

### **4.1.3 Analyse der Putzkörper**

Da für die Analyse und Extraktion der Putzkörper aus Zahnpasten bisher keine Verfahren existieren, wurden die Putzkörper mittels eines eigens entwickelten Verfahrens aus den Zahnpasten extrahiert und auf Probenteller aufgetragen. Ziel war es, eine möglichst aussagekräftige Darstellung der Putzkörper aus dem gesamten Sediment der Zahnpasten zu erhalten.

In Vorversuchen wurden unterschiedliche Verfahren zur Extraktion und Zerkleinerung der getrockneten Zahnpastenslurries getestet. Die Zerkleinerung mit Stößel oder Kunststoff-Spateln im Porzellanmörser führte zu einer Zerstörung der Putzkörper, außerdem konnte so kein einheitlicher homogener Bedeckungsgrad der Probenteller erreicht werden (Abb. 4.01). Auch die Zerkleinerung auf Plexiglasplatten mithilfe eines Kunststoff-Spatels erwies sich als ineffizient.

Es zeigte sich, dass lediglich das beschriebene Verfahren mit Porzellanmörser und Einmalzahnbürste den gewünschten Bedeckungsgrad und intakte Putzkörper liefern konnte (Abb. 4.01). Es sollte eine Übersichts- und eine Nahaufnahme angefertigt werden. Für die Nahaufnahme wurden repräsentative Bereiche mit einem homogenen Monolayer ohne Konglomerate und unterschiedlichen Putzkörpergrößen (wenn vorhanden) aufgesucht.

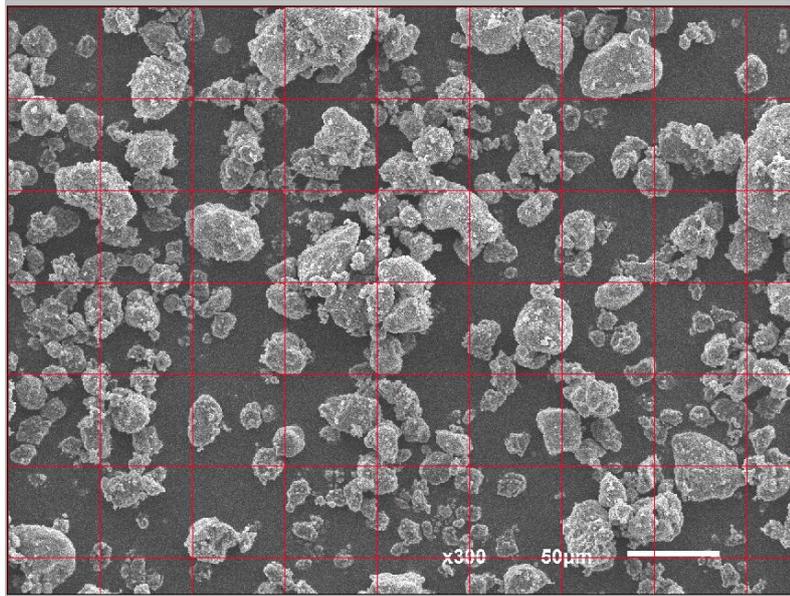


**Abb. 4.01:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der aus dem Sediment von Elmex Sensitiv extrahierten Putzkörper im Rahmen der Vorversuche. Die linke Aufnahme zeigt die Putzkörper nach Zerkleinern im Mörser mit Stößel. Deutlich sichtbar sind in dieser Aufnahme die Putzkörper zerstört. Rechts sind die intakten Putzkörper nach Zerkleinern im Mörser mittels Zahnbürste und drucklosem Auftragen dargestellt.

Um die enthaltenen Putzkörper beurteilen zu können, wurde versucht, qualitative Beurteilungskriterien zu entwickeln.

Die entstandenen Bilddateien wurden mit dem Bildbearbeitungsprogramm Photoshop (Mat. 38) mit Rastern von 10, 20, 30, 40 und 50 µm überlagert (Abb. 4.02). Nach Anlegen der Raster in aufsteigender Größe war es möglich, die Größe der Putzkörper mit einer Ja/Nein Aussage zu bestimmen.

Die qualitative Beurteilung befasste sich außerdem mit der Form der Putzkörper. Die Beurteilung der Form gestaltete sich allerdings schwierig, da die aus dem Sediment extrahierten Putzkörper sich nur geringfügig in ihrem Aussehen unterschieden. Häufig war eine Vielzahl unterschiedlich geformter Partikel zu erkennen, einige eher rund, andere scharfkantig bzw. spitz. Da sich aus diesen Gründen die verschiedenen Putzkörperformen kaum klassifizieren ließen und die Erstellung von objektiv reproduzierbaren Beurteilungskriterien nicht möglich war, wurde dieser Aspekt nicht weiter verfolgt. Eine weitere Möglichkeit zur qualitativen Beurteilung bietet die Elementbestimmung mittels EDX-Analyse. Diese lieferte objektive Daten, die in den folgenden Kapiteln genauer erläutert werden.



**Abb. 4.02:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Sensodyne Proschmelz, überlagert mit 50  $\mu\text{m}$  Raster (rot) zur Größenbestimmung der Putzkörper, deutlich sind hier mehrere Putzkörper  $>50 \mu\text{m}$  zu erkennen.

## 4.2 Vorgängerstudie und Produktauswahl

In der Vorgängerstudie [Ganss et al., 2011] wurde ein etwas anderes Versuchsdesign angewendet, welches einige methodische Schwächen zeigte. Hierbei handelte es sich um die Probenausrichtung in der Demineralisationslösung, ein deutlich erosiveres Versuchsmodell, außerdem wurden lediglich die RDA-Werte der Testprodukte bestimmt.

Die Probenausrichtung der Vorgängerstudie entsprach nicht der in Abb. 2.01 dargestellten. In Experiment I wurden die Proben auf Glasprobenträgern vertikal in der Demineralisationslösung positioniert, in Experiment II hingegen horizontal. Deshalb unterschieden sich die gemessenen Substanzverluste innerhalb der Negativkontrolle (nur Erosion), wobei der Mittelwert in Experiment I bei  $37,1 \pm 5,5 \mu\text{m}$  und in Experiment II bei  $19,3 \pm 3,0 \mu\text{m}$  lag.

Somit konnten die Ergebnisse der zwei Experimente nicht direkt miteinander verglichen werden. Es ist möglich, dass die unterschiedliche Positionierung der Probenträger durch die Bewegung des Schütteltischs bzw. Wasserbads in der Demineralisationslösung zu unterschiedlichen Fließrichtungen bzw. Strömungen führt. Voraussetzung für eine Demineralisation ist immer eine ungesättigte Säure, deren Bestreben eine Sättigung mit Mineralien des Zahnschmelzes ist [Larsen, 1990]. Shellis et al. gehen davon aus, dass die Ausprägung einer Erosion durch die Beseitigung der aus dem Schmelz gelösten Mineralien von der Kontaktfläche Säure-Zahnschmelz kontrolliert wird [Shellis et al., 2005]. Aus diesen Gründen wurden in einer nachfolgenden Studie der Arbeitsgruppe umfangreiche Untersuchungen zur Anordnung der Proben in der Demineralisationslösung durchgeführt [Ganss et al., 2012]. Die horizontale Probenanordnung mit der Grenze zwischen Referenz- und Versuchsfläche im rechten Winkel zur Bewegungsrichtung von Wasserbad bzw. Schütteltisch führte zu einer reliablen Abbildung der Wirkeffekte unter Abrasion und Erosion. In der vorliegenden Studie wurde in beiden Experimenten die gleiche standardisierte Anordnung vorgenommen und die Proben wurden wie in Abbildung 2.01 ausgerichtet.

Die Vorgängerstudie stellte aufgrund des niedrigeren pH-Werts der Demineralisationslösung mit 2,4 und durch die Verwendung von höher konzentrierter 1%iger Zitronensäure ein deutlich erosiveres Modell dar [Ganss et al., 2011]. In der

vorliegenden Arbeit wurde mittels eines milderen pH-Werts (2,5) und einer geringeren konzentrierten Zitronensäure (0,5%ig) eine moderatere Erosion erzeugt. Dies ergab sich ebenfalls aus einer Untersuchung von Ganss et al. aus dem Jahr 2012, in der unterschiedlich starke Säuren untersucht wurden; essentiell ist hier die Balance zwischen zu milder und zu starker Erosivität [Ganss et al., 2012].

Diese Veränderungen waren notwendig, um das experimentelle Design, welches ursprünglich für Studien zur Untersuchung der Effizienz von Mundspüllösungen gedacht war, an die Erfordernisse im Zusammenhang mit Abrasion anzupassen.

Des Weiteren wurden 2011 lediglich die RDA-Werte der Produkte bestimmt [Ganss et al., 2011]. In der vorliegenden Studie wurden sowohl die RDA- als auch die REA-Werte bestimmt.

### **4.2.1 Produktauswahl, Ergebnisse und Schlussfolgerung der Vorgängerstudie**

#### **Produktauswahl**

In der Vorgängerstudie wurde ebenfalls eine Vielzahl an unterschiedlichen Zahnpasten untersucht, insgesamt 14 Zahnpasten, ein Zahngel und eine Mundspüllösung als Kontrollgruppe. Sie ließen sich in drei Gruppen einteilen: konventionelle, zinnhaltige und Produkte mit anti-erosiven Effekten. Außerdem wurden zwei Kontrollgruppen verwendet: eine zinnhaltige Mundspüllösung und eine fluoridfreie Zahnpaste.

#### **Ergebnisse Experiment I (Slurry = Wirkstoffeffekte)**

Im Experiment I zur alleinigen Erosion ohne Bürstabrasion konnten alle Produkte mit Ausnahme von einem hydroxylapatithaltigen, fluoridfreien Produkt und einem Produkt mit klassischer Fluoridverbindung den Substanzverlust signifikant gegenüber der Negativkontrolle (nur Erosion) reduzieren. Die Reduktion der Substanzverluste betrug 19–78%, wobei ein zinnhaltiges Gel die höchste Reduktion erzielte. Die besten Werte unter den Zahnpasten erzielte mit 55% Reduktion eine zinnhaltige Zahnpaste und zeigte sich somit signifikant effektiver als die restlichen untersuchten Zahnpasten.

Im Vergleich zur Positivkontrollgruppe (zinnhaltige Mundspüllösung) war lediglich das zinnhaltige Gel ähnlich effektiv, alle anderen Produkte zeigten sich als signifikant weniger effektiv. Innerhalb der Gruppe der natriumfluoridhaltigen Zahnpasten zeigten sich nur geringe Unterschiede, maximal konnte eine Reduktion von 42% erreicht

werden. Unter den Produkten mit speziellen Wirkstoffen zeigte das hydroxylapatithaltige, fluoridfreie Produkt keinen signifikanten Effekt gegenüber der Negativkontrolle. Ein Produkt mit dem Wirkstoff Chitosan konnte eine ähnliche Reduktion wie die natriumfluoridhaltigen Produkte erzielen.

#### **Ergebnisse Experiment II (Slurry + Bürsten)**

In Experiment II zur Erosion und Abrasion konnten insgesamt vier natriumfluoridhaltige Produkte eine signifikante Reduktion (29–37%) der Substanzverluste gegenüber der Negativbürstkontrolle (Erosion und fluoridfreie Zahnpaste / Erosion und Abrasion) erzielen. Bei drei Produkten handelte es sich um Produkte mit konventionellen Fluoridverbindungen. Die besten Effekte erreichte ein ebenfalls natriumfluoridhaltiges Produkt aus der Gruppe der speziellen Zahnpasten.

Die höchste Reduktion der Substanzverluste gegenüber der Negativbürstkontrolle (Erosion und Abrasion) zeigte das zinnhaltige Gel mit 75%, gefolgt von der Positivbürstkontrollgruppe (zinnhaltige Mundspüllösung und fluoridfreie Zahnpaste) mit 62%. Das chitosanhaltige und ein hydroxylapatithaltiges Präparat, die beide speziell für Erosionen effektiv sein sollen, konnten hingegen wie auch eine zinnhaltige Zahnpaste keine signifikante Reduktion erzielen. Sie waren ähnlich effektiv wie die natriumfluoridhaltigen Produkte. Die höchsten Substanzverluste traten bei einer fluoridfreien Zahnpaste auf.

#### **Schlussfolgerung**

Insgesamt führten die natriumfluoridhaltigen Produkte zu einer Reduktion der erosionsbedingten Substanzverluste, diese wurde aber durch die zusätzliche Abrasion limitiert. Das gleiche galt für die Effekte der zinnhaltigen Zahnpaste. Die speziell für Erosionen ausgelegten Produkte zeigten sich nicht als effektiver, teilweise sogar weniger effektiv als die konventionellen Produkte.

#### **4.2.2 Produktauswahl der vorliegenden Studie**

Die vorliegende Studie sollte ein breites Spektrum an unterschiedlichen Produkten untersuchen. Einige Produkte der Vorgängerstudie wurden erneut untersucht: Apacare, Biorepair, Chitodent, Sensodyne Multicare, Sensodyne Proschmelz, Theramed Naturweiß, Theramed Original 2in1.

Ganss et al. gehen davon aus, dass vermutlich die physikalischen Reize der Putzkörper die durchaus positiven Effekte vieler Produkte bei Erosion wieder zunichtemachen [Ganss et al., 2013]. Dies bestätigen die erwähnten Ergebnisse und die Schlussfolgerung der Vorgängerstudie [Ganss et al., 2011]. Deshalb wurden in der aktuellen Studie vermehrt Produkte mit speziellen Inhaltsstoffen und unterschiedlichen Putzkörpern untersucht, beispielsweise Chitodent mit dem Wirkstoff Chitosan und Pearls and Dents mit Polyethylenputzkörpern. Aufgrund der starken Wirkeffekte zinnhaltiger Produkte wurden drei zinnhaltige Zahnpasten untersucht. Um einen Vergleich zu herkömmlichen Zahnpastenformulierungen vornehmen zu können, wurden ebenfalls mehrere natriumfluoridhaltige Produkte untersucht. Außerdem werden viele der untersuchten Produkte vom Hersteller aufgrund spezifischer Wirkeffekte als besonders wirkungsvoll beworben. Theramed Interdental soll speziell im Interdentalraum reinigen, Theramed ProElectric ist für den Einsatz mit elektrischen Zahnbürsten konzipiert und Elmex Intensiv soll sich durch besondere Reinigungseigenschaften auszeichnen. Die drei hydroxylapatithaltigen Produkte versprechen eine künstliche Schmelzregeneration.

Als Positivkontrolle und Positivbürstkontrolle wurde das abrasivstofffreie und zinnhaltige Emofluor Gel eingesetzt, da das im Rahmen der Vorgängerstudie untersuchte zinnhaltige Gel-Kam vom Markt genommen wurde.

Aufgrund der oben beschriebenen Überlegungen wurden in der vorliegenden Studie folgende neue Produkte untersucht: Actischmelz, Elmex Erosionsschutz, Elmex Intensiv, Elmex Sensitiv, Emofluor Zahnpaste, Emofluor Gel, Pearls and Dents, ProExpert Zahnschmelzschild, Theramed Interdental, Theramed ProElectric.

### 4.3 Ergebnisse Experiment I: Wirkstoffeffekte

In Experiment I wurden die Proben sechsmal täglich demineralisiert und zweimal täglich in Zahnpastenslurry gegeben. Die Ergebnisse dieses Experiments geben Aufschluss über die Wirkstoffeffekte der Produkte.

#### Produkte mit klassischen Fluoridverbindungen

Produkte, die klassische Fluoridverbindungen wie Amin- und Natriumfluorid enthalten, erzielen mit einer Reduktion der Substanzverluste von 0–43% vergleichbare Ergebnisse wie in der Literatur [Ganss et al., 2013; Huysmans et al., 2014].

Die Wirkung von Natrium- und Aminfluorid basiert auf der Bildung eines  $\text{CaF}_2$ -ähnlichen Niederschlags auf der Zahnhartsubstanz. Dieser ist leicht säurelöslich und wirkt als eine Art Fluoriddepot und kann so über längere Zeit Fluoridionen abgeben [ten Cate, 1997; Cury & Tenuta, 2008]. Bei einem Abfall des pH-Wertes können die Fluoridionen eine Demineralisation verhindern und eine Remineralisation bewirken.

In der vorliegenden Studie sind aufgrund der neutralen pH-Werte der meisten Slurries (s. Tab. 3.04) mit Ausnahme von Elmex Intensiv (pH 5,0), Elmex Sensitiv (pH 4,8) und wegen der geringen Einwirkzeiten nur geringfügig Niederschläge zu erwarten [Petzold, 2001]. Petzold et al. lösten unterschiedliche Fluoridverbindungen in destilliertem Wasser, welches in etwa den hier vorliegenden pH-Werten entspricht und ermittelten die Präzipitation von  $\text{CaF}_2$ -Salzen auf dem Zahnschmelz. Bei Aminfluorid sind nach 2 min nur vereinzelte Präzipitate sichtbar, bei Natriumfluorid war hingegen keine Präzipitation nachweisbar ist [Petzold, 2001].

Des Weiteren zeigten sich diese  $\text{CaF}_2$ -Niederschläge bei In-vitro-Experimenten am Schmelz als sehr leicht säurelöslich [Ganss et al., 2007]. Aufgrund der Kombination der leichten Löslichkeit und des geringen Grades an Präzipitation erzielen die klassischen Fluoridverbindungen nur geringfügige Wirkeffekte. Außerdem wird die Verfügbarkeit des Fluorids offenbar durch die enthaltenen Putzkörper beeinflusst [Zero, 2006].

Die Produkte, die klassische Fluoridverbindungen enthielten, unterschieden sich nur geringfügig. Theramed Interdental dagegen erhöhte den Substanzverlust gegenüber Placebo signifikant um 39%. Theramed Interdental enthält einen Komplexbildner

(Dinatrium-Azacycloheptan-diphosphonat), vermutlich um die postulierte Reinigung des Interdentalraums durch die Inhibition der Zahnsteinbildung zu erzielen. Die Reduktion der Zahnsteinakkumulation durch Chelatoren beruht auf der Hemmung der Präzipitation von Mineralsalzen aus dem Speichel. Eventuell führt dieser Effekt auch zu einer Inhibition des  $\text{CaF}_2$ -Niederschlags klassischer Fluoridverbindungen und limitiert somit deren erosionshemmende Wirkung. Dies könnte zusätzlich die Wirkung des enthaltenen Natriumfluorids begrenzt sowie auch die Remineralisation der erodierten Schmelzoberfläche inhibiert haben.

Es ist weiterhin denkbar, dass Dinatrium-Azacycloheptan-diphosphonat Kalziumionen aus dem bereits demineralisierten Schmelz entfernt und sich so die signifikante Erhöhung der Substanzverluste bei Theramed Interdental erklären lässt.

#### **Fluoridfreie Produkte**

Das fluoridfreie Chitodent erzielte eine 51%ige Reduktion des Substanzverlustes und war somit ähnlich effektiv wie die wirkungsstärksten Präparate mit klassischen Fluoridverbindungen. Vergleichbare Wirkeffekte konnten bereits in der Vorgängerstudie aufgezeigt werden; auch hier lag die Reduktion von Chitodent im Bereich der Wirksamkeit von konventionellen natriumfluoridhaltigen Präparaten [Ganss et al., 2011].

Chitodent enthält den Wirkstoff Chitosan, ein polykationisches Biopolymer, das aus Chitin durch N-Deacetylierung hergestellt wird. Die Wirkung von Chitosan ist vergleichbar mit der der Pellikel. Bei dieser handelt es sich um eine Schicht aus Speichelbestandteilen, hauptsächlich Proteinen, den Muzinen und Peptiden [Lussi & Carvalho, 2014], welche durch elektrostatische Kräfte am Zahnschmelz absorbieren. Die Pellikel bildet also eine Barriere gegen chemische und physikalische Reize. Sie kann die Zahnhartsubstanz in gewissem Maße vor dem Kontakt mit extrinsischer oder intrinsischer Säure schützen.

Chitosan wird ebenfalls an der negativ geladenen Schmelzoberfläche absorbiert und bildet hier sogenannte Multilayer [Lundin et al., 2008]. Diese sind in gewissem Maße pH-stabil [Claesson & Ninham, 1992] und inhibieren vermutlich eine Demineralisation des Schmelzes [Lee et al., 2012]. Es ist davon auszugehen, dass die Wirkeffekte von Chitosan in vivo stärker sind, weil das kationische Chitosan in der Lage ist, an die ebenfalls negativ geladene Oberfläche der Pellikel zu binden und somit deren Oberflächeneigenschaften zu modifizieren [van der Mei et al., 2007]. Zusätzlich konnte

eine Bildung von Multilayern mit Muzinen nachgewiesen werden [Svensson et al., 2006].

Das weitere fluoridfreie Produkt Biorepair konnte dagegen keine signifikante Reduktion des Substanzverlustes gegenüber dem Placebo erzielen. Dies unterstreicht die Ergebnisse der Vorgängerstudie [Ganss et al., 2011]. Der Hersteller bewirbt Biorepair mit den Worten „Draufputzen statt abnutzen“. Laut Herstellerangaben enthält es 20% künstlichen Zahnschmelz. Poggio et al. konnten in einer Studie auf erosiv angegriffenem Schmelz eine Ablagerung von Mikropartikeln erkennen. Dieser apatithaltige Niederschlag überdeckte die prismatischen und interprismatischen Schmelzstrukturen [Poggio et al., 2010]. Allerdings liegt das enthaltene Zink-Hydroxylapatit in nano-kristalliner Form vor und ist vermutlich somit leicht säurelöslich. Die entstandenen Niederschläge werden im Zuge einer auftretenden Demineralisation offenbar rasch gelöst.

#### **Produkte mit polyvalenten Metallkationen**

Am effektivsten zeigten sich die zinnhaltigen Produkte, wobei das zinnhaltige Emofluor Gel mit 76% die beste Reduktion der Substanzverluste erzielen konnte. Die Zahnpasten zeigten Wirkeffekte von 48–62%. Diese Werte entsprechen den in der Literatur bekannten Effekten bei Immersion im Slurry [Ganss et al., 2011; Comar et al., 2012; Ganss et al., 2013; Huysmans et al., 2014].

Die starken Wirkeffekte der zinnhaltigen Produkte in der vorliegenden Untersuchung bestätigen sich auch durch die Ergebnisse einer Studie, bei welcher saure Formulierungen mit unterschiedlichen Fluoridverbindungen verglichen wurden und sich das Zinnfluorid am wirksamsten darstellte [Ganss et al., 2007].

Zinn kann als Zinnfluorid oder als Zinnchlorid, ähnlich wie Natrium- und Aminfluorid, säurestabile Niederschläge bilden [Ellingsen, 1986]. Ganss et al. konnten in einem vergleichbaren In-vitro-Experiment Niederschläge von 1–3 Gew.% auf den Schmelzproben feststellen [Ganss et al., 2012].

Für die Bildung von Niederschlägen und die Verfügbarkeit von Zinn ist ein niedriger pH-Wert essentiell [Hove et al., 2014; Magalhães et al., 2014]. Drei der vier zinnhaltigen Produkte erwiesen dementsprechend niedrige pH-Werte: Elmex Erosionsschutz (pH 4,0), Emofluor Zahnpaste (pH 4,6) und Emofluor Gel (pH 5,1). Das

Slurry von ProExpert Zahnschmelzschild wies mit 6,2 einen deutlich höheren pH-Wert auf. Inwiefern die Produkte aufgrund der unterschiedlichen pH-Werte zu bestimmten zinnhaltigen Niederschlägen führten, konnte in der vorliegenden Studie nicht untersucht werden.

Des Weiteren kann Zinn unter erosiven Bedingungen bis zu 20 µm tief in den Schmelz eingebaut werden und so auch über einen längeren Zeitraum eine Demineralisation des Schmelzes inhibieren [Schlueter et al., 2009].

Eine norwegische Studie konnte für eine zinnhaltige Mundspüllösung eine signifikante Reduktion der Substanzverluste um 100% gegenüber dem Placebo nachweisen [Hove et al., 2014]. Huysmans et al. konnten in einer Übersichtsarbeit Effekte für zinnhaltige Mundspüllösungen im Bereich von 78–82% am Schmelz nachweisen [Huysmans et al., 2014]. Hier reihen sich die Wirkeffekte des untersuchten Emofluor Gels ein, welches eine ähnlich einfache Formulierung wie Mundspüllösungen aufweist und keine Putzkörper enthält. Aufgrund der geringen Menge an Inhaltsstoffen weist das Zinn bei diesem Präparat eine hohe Verfügbarkeit auf.

Beim Zinnion handelt es sich um ein relativ instabiles Ion, welches sehr reaktionsfreudig ist. Damit Zinn überhaupt wirken kann, benötigt es also eine stabilisierend wirkende Substanz in der Zahnpaste bzw. dem Gel. Vermutlich stellt Phosphocolamin in der Emofluor Zahnpaste und dem Emofluor Gel diese Substanz dar. In Elmex Erosionsschutz kommen hierfür stattdessen Aminfluorid und Natriumglukonat zum Einsatz, letzteres befindet sich auch in der ProExpert Zahnschmelzschild-Formulierung [Mühlemann & Schmid, 1985]. Je weniger aktive Inhaltsstoffe ein Präparat enthält, desto leichter ist auch das Zinn verfügbar, weil dieses dann weniger Reaktionspartner zur Verfügung hat, wie beispielweise die Putzkörper, mit denen es eine feste Bindung eingehen kann. Dies erklärt vermutlich die markanten Wirkeffekte von Emofluor Gel mit lediglich zehn verschiedenen Inhaltsstoffen.

Bei Elmex Erosionsschutz und ProExpert Zahnschmelzschild konnte mittels EDX-Analyse eine Bindung von Zinn an Partikel aus dem Sediment der Produkte nachgewiesen werden. Hierbei handelte es sich um 1,1–2,4 Gew.%. Vergleichbare Ergebnisse für zinnhaltige Formulierungen konnten als Niederschlag auf Zahnschmelzproben im Bereich von 1–3 Gew.% nachgewiesen werden [Ganss et al., 2012]. Unter den drei zinnhaltigen Zahnpasten erwies sich die Emofluor Zahnpaste mit

einer 62%igen Reduktion der Substanzverluste als die effektivste. Für sie wurde keine nennenswerte Menge an Zinn auf den Sedimentpartikeln gefunden und es ist davon auszugehen, dass mehr freie Zinnionen vorhanden sind und wirken können; hiermit lassen sich möglicherweise die besseren Wirkeffekte der Emofluor Zahnpaste und des Gels erklären (näheres s. Kap. 4.5.4).

#### **4.4 Ergebnisse Experiment II: Wirkstoffeffekte unter Bürstabrasion**

In Experiment II wurden die Proben sechsmal täglich demineralisiert und zweimal täglich während der Immersion in den Slurries gebürstet. Die hieraus gewonnenen Ergebnisse bilden die Effektivität der Produkte unter dem Zusammenspiel von physikalischen und chemischen Reizen ab.

##### **Produkte mit klassischen Fluoridverbindungen**

Unter zusätzlicher Bürstabrasion konnte bei den meisten Produkten eine Zunahme der Substanzverluste gemessen werden.

Sechs der elf Produkte mit klassischen Fluoridverbindungen zeigten sich nicht signifikant effektiver als das Placebo. Die restlichen fünf Produkte waren in der Lage, den Substanzverlust zwischen 29 und 57% signifikant gegenüber dem Placebo zu reduzieren. Ähnlich Werte wurden in der Vorgängerstudie gemessen (29–37% Reduktion der Substanzverluste durch vier der acht natriumfluoridhaltigen Produkte) [Ganss et al., 2011]. Dies entspricht auch den Werten aus der Literatur [Huysmans et al., 2014].

##### **Fluoridfreie Produkte**

Hara et al. konnten in einer Studie zeigen, dass unabhängig von der Abrasivität des Produkts fluoridhaltige Zahnpastenformulierungen effektiver wirken als fluoridfreie und Substanzverluste reduzieren [Hara et al., 2009].

Das fluoridfreie Biorepair erzielte unter zusätzlicher Abrasion keine signifikante Reduktion gegenüber Placebo.

Auch das chitosanhaltige Chitodent konnte bei zusätzlicher Abrasion den Substanzverlust gegenüber Placebo nicht signifikant reduzieren. Diese Ergebnisse entsprechen denen der Vorgängerstudie [Ganss et al., 2011].

##### **Produkte mit polyvalenten Metallkationen**

Die zinnhaltigen Zahnpasten erreichten mit einer Reduktion der Substanzverluste zwischen 49 und 69% auch unter Bürstabrasion starke Wirkeffekte. Huysmans et al. ermittelten in einer Übersichtsarbeit Werte von 0–66% für Zahnpasten mit polyvalenten Metallkationen [Huysmans et al., 2014]. Eine norwegische Zahnpaste zeigte sich mit

einer signifikanten Reduktion von 50% gegenüber der entsprechenden fluoridfreien Zahnpaste als ähnlich effektiv ( $\text{SnF}_2$ ; Solidox) [Hove et al., 2014]. Vergleichbare Effekte erzielten Pro-Health (Oral B) mit 42% und eine experimentelle zinnfluoridhaltige Zahnpaste ( $\text{SnF}_2$ ; 1450 ppm F<sup>-</sup>) mit 44% Reduktion der Substanzverluste gegenüber Placebo [Comar et al., 2012].

Die vorliegenden Ergebnisse von ProExpert Zahnschmelzschild mit einer 51%igen Reduktion ließen sich für Blend a med® Pro Expert Produkte in der Literatur nicht bestätigen [Ganss et al., 2011, 2012; Huysmans et al., 2011; Hove et al., 2014].

Für das abrasivstofffreie Emofluor Gel konnte mit 76% die stärkste Reduktion der Substanzverluste gemessen werden, eine vergleichbare Reduktion von 75–77% erzielte das ebenfalls abrasivstofffreie zinnfluoridhaltige Gel Gel-Kam (Colgate) [Ganss et al., 2011, 2012].

#### **Einfluss der Wirkstoffeffekte**

Es ist erkennbar, dass ein starker Wirkstoffeffekt keine Prognose für die Effekte unter Bürstabrasion darstellt.

Einige Produkte, wie beispielsweise Sensodyne Multicare zeigten sich trotz geringen Wirkstoffeffekten als effektiv unter Bürstabrasion.

Auf der anderen Seite können durch die Bürstabrasion Wirkstoffeffekte verloren gehen, wie sich bei Chitodent zeigt. Die gute Effektivität mit einer Reduktion der Substanzverluste um 51% unter Erosion ist unter Bürstabrasion nicht erkennbar. Mit einer nicht signifikanten Reduktion von 27% gegenüber Placebo zeigt sich das chitosanhaltige Produkt wirkschwächer als die fünf effektivsten Produkte mit klassischen Fluoridverbindungen, reiht sich aber in den Großteil der natriumfluoridhaltigen Produkte ein. Ähnliche Effekte wurden bereits in der Vorgängerstudie unter erosiveren Bedingungen beobachtet [Ganss et al., 2011].

Ganss et al. ermittelten für eine experimentelle zinnhaltige Formulierung mit Zusatz von Chitosan eine 67,3%ige Reduktion unter Bürstabrasion [Ganss et al., 2012].

Das in der vorliegenden Studie untersuchte Elmex Erosionsschutz enthielt ebenfalls die Wirkstoffe Chitosan und Zinn. Dieses stellte sich mit einer 49%igen Reduktion deutlich effektiver dar als Chitodent (27%). Es zeigte sich also, dass das Biopolymer Chitosan in Kombination mit Zinn durchaus unter Bürstabrasion akzeptable Werte erzielen kann, wobei hier vermutlich das Zinn den nachhaltigeren Effekt bewirkt. Der Niederschlag [Ellingsen, 1986] und die Inkorporation des Zinns in die Schmelzoberfläche [Schlueter

et al., 2009] erweisen sich vermutlich als resistenter gegen eine erosive Demineralisation als die durch Chitosan ausgebildeten Multilayer [Lundin et al., 2008]. Insgesamt konnte bei drei Produkten mit ausgeprägten Wirkungseffekten im Erosionsexperiment eine nicht signifikante Erhöhung der Substanzverluste unter Bürstabrasion festgestellt werden (Apacare, Emofluor Zahnpaste und Sensodyne Proschmelz). Dies bestätigt die Ergebnisse der Vorgängerstudie [Ganss et al., 2011].

Lussi et al. gehen davon aus, dass die Immersion im Zahnpastenslurry oder künstlichen Speichel nicht zu einer vollständigen Wiederherstellung der ursprünglichen Mikrohärtigkeit des erodierten Schmelzes führt [Lussi et al., 2008]. Das bedeutet, dass es nicht zu einer verstärkten Resistenz gegenüber Bürstabrasion kommt und erklärt die Diversität der vorliegenden Ergebnisse. Die Wirkungseffekte haben keinen oder wenn nur einen begrenzten Vorhersagewert.

In der vorliegenden Studie zeigen sich wie auch in der Literatur vielversprechende Wirkeffekte für polyvalente Metallkationen und Biopolymere [Ganss et al., 2013]. Ganss et al. gehen jedoch davon aus, dass ihre Wirkung und die anderer aktiver Wirkstoffe häufig durch die enthaltenen Abrasiva begrenzt wird, da diese die erodierte Zahnhartsubstanz physikalisch angreifen und somit den gebildeten Schutz gegenüber Säureangriffen möglicherweise reduzieren.

## 4.5 Tribologisches System

Die Interpretation der Ergebnisse des Experiments II Erosion und Abrasion stellt ein neues dreidimensionales Problem dar. Man muss davon ausgehen, dass die Zunahme der Substanzverluste unter Bürstabrasion gegenüber alleiniger Erosion mit von Produkt zu Produkt variierenden physikalischen Reizen zusammenhängt. Unter diesem Gesichtspunkt ist es sinnvoll, sich das experimentelle Design als „Tribologisches System“ bzw. einen Drei-Körper-Verschleiß vorzustellen.

Die Tribologie umfasst „die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung. Sie umfasst das Gesamtgebiet von Reibung und Verschleiß, einschließlich Schmierung und schließt entsprechende Grenzflächenwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch Flüssigkeiten oder Gasen ein“ (ehemals DIN Norm 50320) [Deters et al., 2002].

Ein tribologisches System besteht aus der Systemstruktur, also den stofflichen Komponenten, und dem Beanspruchungskollektiv [Deters et al., 2002]. Die Systemstruktur beinhaltet beispielsweise beim Läppen bzw. Polieren das Arbeitsstück, den Zwischenkörper (Flüssigkeit und Abrasiva bzw. Granulat) und den Gegenkörper [Deters et al., 2002; Evans et al., 2003]. Das Beanspruchungskollektiv besteht aus einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren: dem Verlauf und der Dauer der Belastung, der Temperatur und Geschwindigkeit sowie der Bewegungsart und Bewegungsform [Deters et al., 2002]. Alle Bestandteile bzw. Faktoren der Systemstruktur und des Beanspruchungskollektivs können den Drei-Körper-Verschleiß beeinflussen.

In der vorliegenden Studie besteht die Systemstruktur des tribologischen Systems aus folgenden Komponenten: der Schmelzprobe (Arbeitsstück), dem Zahnpastenslurry (Zwischenkörper) und der Zahnbürste (Gegenkörper). Das Beanspruchungskollektiv umfasst den Verfahrenweg, die Verfahrensgeschwindigkeit, die Bewegung, den Anpressdruck, die Zeit der Beanspruchung und die Temperatur.

Durch die standardisierte Durchführung des Experiments sind das Arbeitsstück, der Gegenkörper und das Beanspruchungskollektiv als gleichbleibende Parameter zu werten. Sie haben immer den gleichen Einfluss auf den im Experiment II aufgetretenen

Substanzverlust bzw. Verschleiß. Dieser ist auf die Variable, den Zwischenkörper (Zahnpastenslurry), zurückzuführen.

Prinzipiell kommt es in tribologischen Systemen zu Verschleiß durch Abrasion, Adhäsion, Ermüdung und tribochemische Reaktionen [Deters et al., 2002].

Der in Experiment II aufgetretene Verschleiß lässt sich durch zwei unterschiedliche Mechanismen erklären: durch tribochemische Reaktionen und Abrasion. Als tribochemische Reaktion ist generell ein Verschleiß durch chemische Reaktionen der Komponenten der Systemstruktur zu verstehen, in der vorliegenden Studie entspricht dies der erosiven Demineralisation der Schmelzproben und dem Kontakt der Proben mit dem Zahnpastenslurry und dessen Wirkstoffen. Die Abrasion ist definiert als Verschleiß durch „furchende oder ritzende Beanspruchung“ [Deters et al., 2002].

Diesen Überlegungen folgend sind die Zahnpasten, also die Zwischenkörper, die einzig wechselnden Parameter in der vorliegenden Studie. Sie sind die entscheidenden Modulatoren der aufgetretenen Abrasion und tribochemischen Reaktionen.

Bedenkt man dies, lässt sich das Versuchsdesign des Experiments II im Wesentlichen mit der industriellen Fertigungstechnik des Läppens vergleichen, bei welchem die Zwischenkörper hier also die Zahnpasten präziser definiert sind. Das Läppen bezeichnet ein Verfahren, bei dem es zu Materialabtrag durch Politur mit Abrasiva und Flüssigkeit kommt; es wird auch als chemisch-mechanische Politur bezeichnet. Evans et al. verstehen das Läppen als ein Vier-Komponenten-System bestehend aus Arbeitsstück, Gegenkörper, Flüssigkeit und Abrasiva [Evans et al., 2003]. Die Determination des Zwischenkörpers als Abrasiva und Flüssigkeit ermöglicht die Einteilung der Zahnpasten in ihre festen (Abrasiva) und flüssigen (Wirkstoffe und Inhaltsstoffe) Bestandteile. Aufgrund dieser Einteilung konnten folgende Faktoren definiert werden, welche möglicherweise einen Einfluss auf die Abrasivität der Zahnpasten haben. Sie werden im Folgenden erläutert:

- Putzkörpergröße, -anteil und -form
- die RDA- und REA-Werte der einzelnen Zahnpasten
- die Putzkörper (Elementanalyse)
- die Wirkstoffe (Inhaltsstoffe) und Hilfsstoffe der Produkte

#### 4.5.1 Putzkörpergröße, -anteil und -form

Unter physikalischen Gesichtspunkten wäre zu erwarten, dass die Abrasiva der Zahnpasten den Verschleiß bestimmen. Demnach müssten Produkte mit großen oder scharfkantigen Partikeln bzw. einer hohen Menge an Abrasivstoffen auch einen größeren Substanzverlust generieren.

In diesem Zusammenhang wird nun zuerst der Einfluss der unterschiedlichen Putzkörpergrößen auf die Substanzverluste diskutiert und folgend der Putzkörperanteil und die Putzkörperform.

Unabhängig davon, ob sie eine Erhöhung des Substanzverlustes durch Bürsten erzielen oder nicht, enthielten fast alle untersuchten Produkte Putzkörper im Bereich zwischen 10 und 40  $\mu\text{m}$ . Lediglich fünf Produkte wiesen Putzkörper auf, die größer als 50  $\mu\text{m}$  waren. Ähnliche Putzkörpergrößen ergab eine Studie des Fraunhofer Instituts, die Silika zwischen 1 und 30  $\mu\text{m}$  identifizierte [Scherge et al., 2013].

Es konnte gezeigt werden, dass kleine Partikel bis zu einer bestimmten Größe, der sogenannten Critical Particle Size (CPS) im Bereich von 30–100  $\mu\text{m}$ , linear mit den erzeugten Substanzverlusten korrelieren [Coronado, 2012]. Bei einem Überschreiten der CPS ist kein direkter Zusammenhang mehr zu erkennen, es sind hingegen drei unterschiedliche Effekte möglich: eine Zunahme, Abnahme oder Konstanz der Substanzverluste.

Ähnliche Ergebnisse konnte eine Übersichtsarbeit zum Läppen liefern. Es zeigte sich ein nicht linearer Einfluss der Abrasivagröße auf den Substanzverlust, wobei bei kleinen Abrasivgrößen eine starke Zunahme der Substanzverluste zu erkennen war. Allerdings war ab einer Partikelgröße von ca. 20  $\mu\text{m}$  lediglich eine moderate Zunahme der Substanzverluste sichtbar [Cong et al., 2009].

Die in der vorliegenden Studie ermittelten Putzkörpergrößen stehen hingegen nicht in einem linearen Zusammenhang zu den verschiedenen Substanzverlusten oder dem RDA und REA. Sowohl Produkte mit niedrigem als auch mit hohem Substanzabtrag enthielten große (>40  $\mu\text{m}$ ) und sehr große (>50  $\mu\text{m}$ ) Abrasiva. Auch konnte keine CPS für die untersuchten Produkte bestimmt werden, obwohl die Produkte durchaus Abrasiva im oben genannten Bereich enthalten. Coronado stellt jedoch fest, dass der Effekt der CPS nicht unbedingt auf jedes Drei-Körper-Verschleiß-Modell zu übertragen ist [Coronado, 2012]. Man kann davon ausgehen, dass die CPS und somit die Partikelgröße sicherlich in einparametrischen Untersuchungen eine Rolle spielt, aber in

der vorliegenden Studie nur ein Parameter unter vielen ist und deswegen vermutlich nicht den zentral modulierenden Faktor darstellt.

Dass allerdings ein Zusammenhang zwischen dem Putzkörperanteil und dem Substanzverlust besteht, konnten Manly und Harte bereits 1976 an Dentin aufzeigen. Dabei führte eine Putzkörperkonzentration von 100% zu halb so hohen Substanzverlusten wie eine Konzentration von 50% [Harte & Manly, 1976]. Dies bestätigen auch die Ergebnisse einer anderen Studie an gesundem Dentin und Schmelz, bei der erst ab Putzkörperkonzentrationen oberhalb von 33,3 Gew.% signifikante Unterschiede der Substanzverluste am Dentin zu verzeichnen waren. Am Schmelz hingegen zeigten sich selbst bei einer Erhöhung auf bis zu 80 Gew.% Putzkörperanteil keine Unterschiede und keine Zunahme der Substanzverluste [Franzò et al., 2010].

Cong et al. konnten in einer Übersichtsarbeit zum Läppen in einem dem Versuchsdesign der Studie vergleichbaren Verfahren zeigen, dass die Erhöhung der Substanzverluste und der Abrasivagehalt proportional zueinander sind. Es kam zu einem starken Anstieg der Substanzverluste bis etwa 10 Gew.% Abrasivagehalt. Ab etwa 15–20 Gew.% trat eine Plateauphase auf [Cong et al., 2009]. Ahn et al. konnten in einer Studie zur industriell eingesetzten chemisch-mechanischen Politur vergleichbare Effekte für Silika-haltige Slurries aufzeigen [Ahn et al., 2004]. Bis zu einem gewissen Punkt nahmen die Substanzverluste mit steigender Abrasivstoffkonzentration erheblich zu, vergleichbar den Effekten bei einer Zunahme der Abrasivgröße und dem Erreichen der CPS [Coronado, 2012], schwangen dann aber um und nahmen entweder nur mäßig zu, blieben konstant oder nahmen ab.

Eine andere Studie der Arbeitsgruppe untersuchte, unter Verwendung des gleichen Versuchsdesigns wie in der vorliegenden Studie, experimentelle Formulierungen mit unterschiedlichen Putzkörperkonzentrationen (0, 5, 10, 15 und 20 Gew.%) [Ganss et al., 2017]. Bis zu einer Konzentration von 10 Gew.% nahm der Substanzverlust unter Abrasion zu, stagnierte im Bereich von 15 Gew.% und nahm oberhalb von 20 Gew.% wieder ab.

Hier reihen sich auch die Ergebnisse der vorliegenden Studie ein. Vierzehn der untersuchten Produkte enthielten einen Putzkörperanteil von 10 bis 20,9 Gew.%. Der Putzkörperanteil der Produkte korrelierte nicht linear mit der von ihnen erzielten Substanzverluste. Die Beziehung ließ sich allerdings mithilfe einer quadratischen Funktion darstellen ( $R^2 = 0,906$ ;  $p \leq 0,001$ ; Abb. 3.10). Bis zu 10 Gew.% Putzkörper-

anteil nahmen die Substanzverluste zu, im Bereich von 10 bis 15 Gew.% zeigte sich eine Plateauphase mit keiner weiteren Zunahme der Substanzverluste und ab 15 Gew.% kam es zu einer Abnahme der Substanzverluste.

Wie bereits erwähnt, lassen sich hier Vergleiche zur CPS ziehen [Coronado, 2012]. Es scheint also eine kritische Putzkörperkonzentration zu geben, nach deren Überschreitung es nicht zu einer weiteren Erhöhung der Substanzverluste kommen muss. Diese scheint im Bereich von 10 bis 15 Gew.% zu liegen und könnte als „Critical Particle Concentration“ (CPC) bezeichnet werden.

Neben der Größe der Putzkörper und des Putzkörperanteils wurde mittels Raster-elektronenmikroskopie eine qualitative Beurteilung der Form versucht, da diese mutmaßlich auch die Abrasivität der Putzkörper beeinflusst. Bereits Scherge et al. erkannten eine Vielzahl an Putzkörpern unterschiedlicher Form und Größe [Scherge et al., 2013].

In der vorliegenden Studie zeigten sich nur geringfügige Unterschiede zwischen den Produkten, lediglich die in den Überständen enthaltenen Polymere unterschieden sich deutlich. Zwar konnten bei einigen Zahnpasten scharfkantigere, besonders runde oder auch unregelmäßig geformte Abrasiva erkannt werden, es gestaltete sich allerdings schwierig, bei solch marginalen Differenzen objektiv reproduzierbare Beurteilungskriterien zu erstellen. Aus diesem Grund wurde dieser Ansatz fallen gelassen.

### **4.5.2 RDA/REA und Einfluss der erosiven Demineralisation**

Zur Bestimmung der Abrasivität einer Zahnpasten-Formulierung gibt es unterschiedliche Verfahren, wobei die Messung der RDA- bzw. REA-Werte als Goldstandard zu sehen ist.

Die vorliegende Studie betrachtet die Abrasion an erodiertem Schmelz. Prinzipiell ist gesunder Schmelz deutlich härter als gesundes Dentin, daher wurden für die Bestimmung der Abrasivität von Zahnpasten mit RDA und REA unterschiedliche Messverfahren entwickelt.

Fraglich ist nun, welches Verfahren für die Abrasivität am erodierten Schmelz den aussagekräftigeren Wert liefert. Problematisch zur Abrasivitätsbestimmung für Produkte, die speziell für Erosionen konzipiert sind, ist alleine schon das Verfahren, da bei beiden Verfahren gesunder Schmelz bzw. Dentin genutzt wird. Diese unterscheiden

sich in ihren physikalischen Eigenschaften und der histologischen Struktur maßgeblich von erodiertem Zahnhartgewebe. Zusätzlich ist bei erodiertem Schmelz die Mikrohärtigkeit abhängig von der Stärke der Demineralisation und somit kein fester Wert. Die Mikrohärtigkeit kann stark abnehmen, deshalb kann erodierter Schmelz im Gegensatz zu gesundem Schmelz durch physikalische Einwirkungen abgetragen werden [Attin et al., 1997]. Attin et al. gehen von einer Korrelation der Mikrohärtigkeit und Abrasion aus: Je mehr die Mikrohärtigkeit abnimmt, desto höher ist auch die Abrasion durch Zahnpaste. Somit stellt sich auch die Frage, inwiefern der REA-Wert als legitimer Vorhersagewert für die Bürstabration am erodierten Schmelz gelten kann.

Entscheidend für die Aussagekraft der RDA- bzw. REA-Werte ist des Weiteren, ob diese aus ein und demselben Labor stammen oder nicht. So lassen vom Hersteller deklarierte Werte in der Regel keinen Vergleich mit anderen Produkten zu. Dies zeigten auch die Ergebnisse der Studie: Einzig die Produkte Emofluor Gel (18) und Zahnpaste (37) enthielten Angaben zum RDA-Wert. Diese unterschieden sich allerdings deutlich von den Ergebnissen der vorliegenden Studie, mit einem RDA von 4,5 bei Emofluor Gel und 26,7 bei der Emofluor Zahnpaste.

Ungeachtet der methodischen Schwächen der RDA- und REA-Messung für die Abrasivitätsbestimmung an erodiertem Schmelz sind diese doch in der vorliegenden Arbeit als wichtiger Parameter zur Beurteilung der Abrasivität zu sehen, speziell, da die hier ermittelten Werte aus demselben Labor stammen und somit untereinander vergleichbar sind.

In der Literatur sind unterschiedliche Ergebnisse zu finden, inwiefern die Abrasivität einer Zahnpastenformulierung den Substanzverlust beeinflusst.

Hara et al. teilten in einer Studie unterschiedlich abrasive experimentelle Zahnpastenformulierungen in jeweils drei Gruppen ein (REA-Wert der fluoridfreien Formulierung: niedrig: 3,8; mittel: 5,8 und hoch: 8,9 bzw. fluoridhaltig: niedrig: 4,1; mittel: 5,6; hoch: 8,5). Speziell für die fluoridhaltigen zeigte sich ein linearer Zusammenhang von REA-Werten und den Substanzverlusten, welche insgesamt geringer waren als bei den fluoridfreien. Die fluoridfreien Produkte zeigten einen ähnlichen Trend, allerdings waren keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen mittel und hoch zu erkennen [Hara et al., 2009]. Eine andere Studie konnte zeigen, dass Abrasivstoffe vorhanden sein müssen, damit beachtenswerte Substanzverluste entstehen [Wiegand et al., 2008]. Unter Verwendung der gleichen Putzkörper (Kalzium Pyrophosphat)

beeinflusste der REA-Wert (6 bzw. 9) lediglich bei der Bürstung mit harten Borsten die Substanzverluste [Wiegand et al., 2008].

Einen linearen Zusammenhang der RDA-Werte und des Substanzverlustes zeigte eine Studie, die drei Produkte mit RDA-Werten von 30, 75 und 165 untersuchte [Scherge et al., 2013].

Franzò et al. konnten für zwei Produkte mit unterschiedlichen RDA-Werten (90 und 200), aber gleichen REA-Werten (4) am Dentin signifikante Unterschiede der Substanzverluste bei Putzkörperkonzentrationen über 33,3 Gew.% erkennen [Franzò et al., 2010]. Eine signifikante Zunahme der Substanzverluste am Schmelz bzw. signifikante Unterschiede zwischen den zwei Produkten ließen sich in der Studie nicht erkennen. Inwiefern der hier gleichbleibende REA-Wert allerdings als Prädiktor für die hier gleichbleibenden Substanzverluste am Schmelz zu sehen ist, ist eher fraglich, da in der Studie gesunder Schmelz untersucht wurde und dieser nur marginale Substanzverluste aufweist [Franzò et al., 2010].

In der vorliegenden Studie zeigte sich hingegen eine signifikante lineare Korrelation der RDA- und REA-Werte (signifikante lineare Korrelation der RDA- und REA-Werte;  $R^2 = 0,655$ ;  $p \leq 0,01$ ).

Außerdem zeigten sich moderat lineare Zusammenhänge zwischen den Substanzverlusten durch Bürstabrasion und RDA bzw. REA unter Ausschluss von Elmex Intensiv (s. Kap. 4.5.4 Elmex Intensiv). Hierbei konnten mithilfe des RDA- und REA-Wertes 29% bzw. 44% der Substanzverluste unter Bürstabrasion erklärt werden. Unter Einschluss von Elmex Intensiv zeigte sich keine signifikant lineare Korrelation für RDA bzw. REA und die Substanzverluste.

Die vorliegende Studie zeigte, dass mittels Kurvenanpassung die moderat lineare Korrelation von RDA bzw. REA und des Substanzverlustes anschaulicher abgebildet werden kann (Abb. 3.08 und 3.09). Die Beziehung von RDA und Substanzverlusten ließ sich durch eine Potenzfunktion darstellen ( $R^2 = 0,981$ ;  $p \leq 0,001$ ; Abb. 3.08), wobei in dem mittleren Bereich der Kurve mit RDA-Werten von 30 bis 100 kein wesentlicher Einfluss auf den Substanzverlust erkennbar war. Dies bestätigt auch die Kurvenanpassung für den REA-Wert und den Substanzverlust, welche am anschaulichsten mit einem kubischen Modell abgebildet wurde ( $R^2 = 0,947$ ;  $p \leq 0,001$ ; Abb. 3.09). Hier hatten ebenfalls lediglich niedrige und hohe REA-Werte einen starken Einfluss auf den Substanzverlust, mittlere Werte im Bereich von 2 bis 7 hingegen nicht.

### **Einfluss der erosiven Demineralisation**

Wie bereits erwähnt, ist die erosive Demineralisation, also die Erosion der Schmelzproben, als tribochemische Reaktion zu sehen, die auf der einen Seite selbst zu Substanzverlusten führt. Auf der anderen Seite stellt sie einen Faktor dar, der den durch Abrasion entstehenden Verschleiß maßgeblich beeinflusst.

Auf Grund der von Shellis et al. beschriebenen Demineralisation der oberflächlichen Schicht des Schmelzes, die in direktem Kontakt zur Säure steht, und der „near surface demineralization“ in der unterhalb liegenden dünnen Schicht kommt es zu einer Demineralisation der Oberflächenstruktur [Shellis et al., 2013]. Diese entmineralisierte Schicht beträgt maximal wenige Mikrometer und ist aufgrund ihrer geringeren Mikrohärtigkeit leichter anfällig gegenüber physikalischen Reizen. In einer Studie betrug diese demineralisierte Schicht nach einmaliger Säureexposition 254–323 nm, abhängig von der verwendeten Säure [Voronets & Lussi, 2010]. Es ist davon auszugehen, dass die Erhaltung der Stabilität bzw. der Schutz dieser Schicht maßgeblich das Ausmaß der Abrasion begrenzt.

Bei erodiertem Schmelz kommt es trotz der Abnahme der Mikrohärtigkeit nicht zu einem vollständigen Verlust der demineralisierten Schicht durch Zahnpastenabration, es bleibt stets eine entmineralisierte Schicht vorhanden [Rios et al., 2008]. Ähnliches konnte auch für erodierten Schmelz im Ultraschallbad nachgewiesen werden [Eisenburger et al., 2004]. Die Ergebnisse dieser Studie legen nahe, dass selbst milde physikalische Reize, wie sie im Ultraschallbad auftreten, zu einer teilweisen Abtragung der entmineralisierten Schicht genügen. Dies verdeutlicht die Fragilität dieses erosiv geschädigten Schmelzbandes.

Auf der anderen Seite konnte in Studien nachgewiesen werden, dass die reine Bürstung ohne Zahnpaste keine nennenswerten Substanzverluste erzeugt, allerdings von der Borstenhärtigkeit bzw. Steifigkeit moduliert wird. Die Substanzverluste treten erst durch die Anwesenheit von Abrasivstoffen auf [Wiegand et al., 2008; Voronets & Lussi, 2010].

Entscheidend ist allerdings, dass physikalische Reize ausschließlich in dieser Schicht wirksam sein können, da der unterhalb liegende gesunde Schmelz resistent gegen Abrasion ist. Selbst bei einer Erhöhung des Putzkörperanteils kommt es auf gesundem Zahnschmelz nicht zu einem signifikanten Anstieg des Substanzverlustes [Franzò et al., 2010].

### 4.5.3 Putzkörperart

Ein weiterer Aspekt, welcher die Abrasivität einer Zahnpaste beeinflusst, ist die Art der enthaltenen Putzkörper. Es kommen unterschiedliche Putzkörper in den Zahnpasten-Formulierungen zum Einsatz: Silika bzw. hydratisierte Silika, Kalziumkarbonat, Natriumbikarbonat, Kalziumhydrogenphosphat, Kalziumpyrophosphat, Alumina, Perlite, Natriummetaphosphat und Nanohydroxyapatit. In neueren Produkten sind häufig auch Polyethylenputzkörper enthalten [Zero, 2006; Joiner, 2010; Lippert, 2013]. Am häufigsten kommen Silika und Kalziumkarbonat in Konzentrationen von 8–20 Gew.% in Zahnpasten zum Einsatz. Natriumbikarbonat ist weniger abrasiv als Silika, wird hauptsächlich zur Einstellung der Viskosität genutzt und dementsprechend auch in höheren Konzentrationen von bis zu 50 Gew.% eingesetzt. Dem stehen hoch abrasive Polierstoffe wie Alumina und Perlite gegenüber, die allerdings nur in geringen Mengen von 1–2 Gew.% und in Kombination mit anderen Abrasiva eingesetzt werden [Lippert, 2013].

Da es sich bei Silika um die am häufigsten eingesetzten Abrasiva handelt, sollen diese im Folgenden näher betrachtet werden. Aufgrund der schlechten Datenlage ist es nicht möglich, präzise Informationen über die unterschiedlichen Silika in den untersuchten Produkten zu finden, auch fehlen Studien, die sich speziell mit den verschiedenen Silikatyphen beschäftigen. Lediglich grobe Daten der Hersteller sind aus deren Produktbroschüren zu entnehmen. Nachfolgend sind einige der wichtigsten Silika-Hersteller aufgeführt mit Angaben zu unterschiedlichen Silika aus ihrem Angebot.

Sorbosil (PQ Corporation) bietet Silika mit unterschiedlichen RDA-Werten im Bereich von 20 bis 125 an. Silika mit einem RDA von 20 sind ausschließlich zur Eindickung gedacht und haben wenig abrasive Wirkung. Interessant ist auch, dass bei den Sorbosil-Silika der Putzkörperanteil in Zahnpasten mit dem RDA-Wert, bis etwa 5–10 Gew.% linear ansteigt und danach abflacht [PQ Corporation, 2008]. Diese Daten sind vergleichbar mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie und einer vorhergehenden Untersuchung der Arbeitsgruppe zur Beziehung von Putzkörperanteil und Substanzverlusten [Ganss et al., 2017].

Zeodent-Silika der Firma Huber nennen hingegen keine exakten RDA-Werte für ihre jeweiligen Silikatyphen und beschreiben die Abrasivität mit den Worten hoch, medium, niedrig und schonend. Wie auch bei den Sorbosil-Silika zeigte sich hier ein vergleichbarer Zusammenhang von Abrasivität und Putzkörperanteil. Interessanterweise

sind alle angebotenen Silika nahezu gleich groß (8–10 µm), obwohl sie sich in ihrer Abrasivität unterscheiden [Huber Dental Silicas, 2010].

Grace Davison, der Hersteller von Syloblanc und Silodent, führt ebenfalls keine exakten RDA- oder REA-Werte für seine unterschiedlichen Produkte auf. Ähnlich den Produkten Zeodent und Sorbosil gibt auch dieser Hersteller einen Zusammenhang von RDA und Putzkörperanteil an [Grace Davison, 2011].

Wie bereits erwähnt, sind die am häufigsten verwendeten Abrasiva in Zahnpasten Silika und hydratisierte Silika, diese Siliziumverbindungen waren laut Herstellerangaben in unterschiedlicher Zusammensetzung und Menge in den untersuchten Produkten enthalten.

Die EDX-Analyse in der vorliegenden Studie bestätigte diese Angaben und konnte in den meisten Produkten Silizium (20–35 Gew.%) und Sauerstoff (30–40 Gew.%) in einem Verhältnis von 1:1 bis 1:1,6 feststellen. Die mittels EDX quantifizierten Silizium-Sauerstoff-Verhältnisse legen nahe, dass es sich um unterschiedliche Zustandsformen von Siliziumdioxid handelt, vermutlich um amorphes und kristallines, welche sich in ihren Eigenschaften unterscheiden und teils abradierend, verdickend oder polierend wirken. Bei einem Verhältnis von Silizium zu Sauerstoff von 1:1,4 handelt es sich um Siliziumdioxid (SiO<sub>2</sub>). Abhängig vom Wasseranteil, welcher mit dem Sauerstoffanteil zusammenhängt, können hydratisierte Silika verschiedene Si – O<sub>2</sub> Verhältnisse aufweisen. Mit den für die Studie zur Verfügung stehenden Methoden war es jedoch nicht möglich, diese Zustandsformen bzw. die Mengenverhältnisse der untersuchten Partikel genauer zu bestimmen.

Fünf Zahnpasten bildeten eine Ausnahme und zeigten ein abweichendes Silizium-Sauerstoff-Verhältnis: Actischmelz (1:1,7), Biorepair (1:2,7, nach dem Waschen mit HCl 1:1,2), Elmex Intensiv (1:3,2), Pearls and Dents (1:1,8) und Theramed Original (1:2). Inwiefern eine Abweichung des Silizium-Sauerstoff-Verhältnisses allerdings einen Effekt auf den Substanzverlust hat, ist eher fraglich, zumal Elmex Intensiv, eines der fünf Produkte, den Substanzverlust signifikant um 38% gegenüber Placebo reduzieren konnte. Dies widerspricht einem kausalen Zusammenhang des Silizium-Sauerstoff-Verhältnisses und der Substanzverluste unter Bürstabrasion.

Interessant sind außerdem die in Biorepair gefundenen Partikel, auf denen größere Mengen an Phosphor und Kalzium nachgewiesen werden konnten. Es handelt sich

vermutlich um die vom Hersteller deklarierten Hydroxylapatitverbindungen. Nach einer Waschung mit Salzsäure normalisierten sich die Werte und Silizium und Sauerstoff waren im durchschnittlichem Verhältnis (1:1,2) enthalten. Außerdem blieben nach der Waschung kleinere Partikel zurück (Abb. 3.02). Biorepair enthält also möglicherweise beschichtete Silika oder aber die Hydroxylapatitverbindungen binden an die Putzkörper und sind somit nicht mehr verfügbar.

In den beiden Produkten Elmex Sensitiv und Pearls and Dents sind Polymer-Putzkörper enthalten, die durch hohe Kohlenstoffmengen mittels EDX-Analyse bestätigt wurden. Aufgrund ihres geringen Gewichts waren die Polymere nicht im Sediment, sondern in den Überständen der zwei Zahnpasten vorhanden. Die genaue Wirkung bzw. das Verhalten dieser Putzkörper ließ sich mit den angewandten Methoden nicht ermitteln. Allerdings ist es denkbar, dass die Putzkörper auch bei der Bürstung in den Slurries die obere Schicht bilden und scheinbar keinen Einfluss auf die eigentliche Reinigung bzw. Abrasion haben.

### **4.5.4 Flüssige Phase und Hilfsstoffe**

Im Sinne der Tribologie sind ein weiterer Parameter, der die Abrasivität bzw. die Wirkeffekte einer Zahnpaste beeinflusst, die enthaltenen Hilfsstoffe. Diese treten hauptsächlich gelöst auf und befinden sich in der flüssigen Phase des Vier-Komponenten-Systems. Bei der chemischen-mechanischen Politur sind physikalische, mechanische und chemische Wirkeffekte der Flüssigkeit möglich. Dabei beruht der Abtransport des abgetragenen Materials auf physikalischen und chemischen Effekten [Evans et al., 2003]. Die chemischen Wirkeffekte gehen hauptsächlich von den Wirkstoffen aus und sind umfassend in den Kapiteln 4.3 und 4.4 erläutert.

In diesem Zusammenhang stellt der pH-Wert der flüssigen Phase einen wichtigen Parameter dar. Bei der chemisch-mechanischen Politur kann der pH-Wert der Slurries das Zeta-Potential der Oberfläche des Arbeitsstücks verändern und so dazu führen, dass die Abrasiva durch dieses Potential entweder angezogen oder abgestoßen werden [Evans et al., 2003].

Der Schmelz weist in natürlichem Speichel ein negatives Zeta-Potential im Bereich von -8 bis -14 mV auf und unbehandelt -15 bis -30 mV. Dies führt zu einer Adhäsion von

sogenannten Speichelmizellen bzw. Speichelproteinen [Young et al., 1997], welche die Pellikel bilden. Ob die Pellikel in vivo einen Schutz vor erosiver Demineralisation oder Abrasion bietet, ist bisher nicht hinreichend belegt und hat in der vorliegenden Studie keinen Einfluss, da hier künstlicher Speichel verwendet wurde, welcher ausschließlich eine Remineralisation bewirken kann.

Andererseits ist zu bedenken, dass Silika, welche den Hauptteil der Abrasiva stellen, bei pH-Werten zwischen 2 und 10 ein negatives Zeta-Potential besitzen [Kim & Lawler, 2005] und unter Umständen eher von dem ebenfalls negativen Zeta-Potential des Schmelzes abgestoßen werden. Kim und Lawler erkannten eine lineare und proportionale Beziehung von pH-Wert und Zeta-Potential zwischen einem pH von 2 und 5. Bei höheren pH-Werten wurde ein geringerer Einfluss auf das Zeta-Potential festgestellt. Entscheidend ist, dass das Zeta-Potential der Silika in Richtung eines basischen pH-Werts negativer wurde [Kim & Lawler, 2005].

Einige Studien zeigten, dass der pH-Wert der Zahnpasten bzw. Slurries keinen Einfluss auf die Substanzverluste durch Abrasion hat und dass Produkte mit sauren pH-Werten keine signifikanten Unterschiede gegenüber solchen mit neutralen aufwiesen [Lussi et al., 2008; Moron et al., 2013].

Brighenti et al. stellten hingegen fest, dass Zahnpasten durch eine Senkung des pH-Werts bessere Wirkeffekte aufweisen und mehr verfügbares Fluorid enthalten als Produkte mit einem neutralen pH-Wert [Brighenti et al., 2006].

Mit den zur Verfügung stehenden Untersuchungsmöglichkeiten ließ sich der pH-Wert der Slurries bestimmen, nicht aber dessen Einfluss auf das Zeta-Potential der Schmelzproben. Die Slurries der meisten der untersuchten Produkte hatten einen pH-Wert zwischen 6 und 8 und zeigten sowohl schwache als auch starke Wirkeffekte unter Abrasion. Interessant ist allerdings, dass die drei Produkte mit den niedrigsten pH-Werten der Slurries auch zu sehr geringen Substanzverlusten unter Bürstabrasion führten und signifikante Wirkeffekte gegenüber dem Placebo verzeichneten: Elmex Erosionsschutz (pH 4,0), Emofluor Zahnpaste (pH 4,6) und Elmex Intensiv (pH 5,0). Prinzipiell ist ein niedriger pH-Wert wesentlich für die Verfügbarkeit von Fluorid und Zinn (s. Kap. 4.3). Wie bereits erwähnt, wurde bei zwei der drei zinnfluoridhaltigen Produkte Zinn auf der Oberfläche der Putzkörper nachgewiesen. Interessant ist, dass Elmex Erosionsschutz und ProExpert Zahnschmelzschild (1,1–2,4 Gew.% Zinn) deutlich schwächere Wirkeffekte als die Emofluor Zahnpaste erzielten, bei dieser sich

allerdings keine nennenswerten Mengen an Zinn auf den Putzkörpern fanden. Durch die negative Oberfläche, also das negative Zeta-Potential der Silika, können hier Kationen wie das Zinnion absorbiert werden und somit deren Verfügbarkeit limitieren [Magalhães et al., 2014].

Da der pH-Wert des Slurries das Zeta-Potential der Silika bestimmt, also je saurer desto weniger negativ das Zeta-Potential [Kim & Lawler, 2005], müsste man davon ausgehen, dass die Emofluor Zahnpaste (pH 4,6) den geringsten pH-Wert aufweist und die beiden anderen Produkte ProExpert Zahnschmelzschild (pH 6,2) und Elmex Erosionsschutz (pH 4,0) höhere pH-Werte. Dies ist aber nicht der Fall. Entscheidend ist, dass die Emofluor Zahnpaste einen sehr niedrigen pH-Wert hat und keine nennenswerten Mengen an Zinn auf den Putzkörpern aufweist. Deswegen sind scheinbar mehr verfügbare Zinnionen vorhanden als in den beiden anderen Produkten. Die bessere Wirkung der Emofluor Zahnpaste lässt sich damit erklären.

Zwei Produkte wiesen in den Slurries pH-Werte  $>8$  auf, zeigten keine signifikanten Unterschiede der Substanzverluste gegenüber dem Placebo und keine starken Wirkstoffeffekte: Biorepair (pH 8,7) und Actischmelz (pH 8,2).

Außerdem konnte gezeigt werden, dass der pH-Wert der Formulierung keinen Effekt auf den Substanzverlust hat, die Fluoridmenge und die Viskosität hingegen diesen maßgeblich beeinflussen [Moron et al., 2013].

Die Analyse der pH-Werte der untersuchten Produkte lässt zwar keine eindeutige Schlussfolgerung zu, kann aber die Notwendigkeit eines sauren pH-Werts für die Verfügbarkeit von Zinn bestätigen.

Inwiefern die unterschiedlichen Hilfsstoffe und deren Zusammensetzung in den Zahnpastenformulierungen einen Einfluss auf die Effektivität haben, ist nicht bekannt. Es ist möglich, dass Feuchthaltemittel wie Glycerin, oberflächenaktive Stoffe oder Verdicker, wie Carboxymethylcellulose, Xanthan Gum, Cellulose Gum die Effektivität beeinflussen, indem sie lubrifizierend wirken. Beispielsweise erzeugen Silika und auch Kalziumpyrophosphat-Putzkörper in Glycerin wesentlich geringere Substanzverluste am Dentin als in Carboxymethylcellulose [Harte & Manly, 1976]. Moore und Addy untersuchten die Kombination unterschiedlicher Detergenzien und unterschiedlicher Putzkörper. Hier zeigte sich für die meisten der Putzkörper in Kombination mit Natriumlaurylsulfat eine geringere Abrasion. Die Autoren führen dies auf die

schaumbildende Eigenschaft von Natriumlaurylsulfat zurück, wodurch die Abrasiva schwerer in Kontakt mit der Dentinoberfläche kommen können [Moore & Addy, 2005].

### 4.5.5 Elmex Intensiv

Das Produkt Elmex Intensivreinigung ist aufgrund seines sehr speziellen Anwendungsbereichs nicht für die tägliche Mundhygiene konzipiert und wird nur zur gelegentlichen intensiven Reinigung eingesetzt. Gerade aufgrund dieser Indikation ist es besonders interessant für die vorliegende Studie, da diese im Speziellen die Fraktion der Putzkörper in den unterschiedlichen Produkten untersuchen sollte und man davon ausgehen muss, dass Elmex Intensiv besondere Wirkeffekte erzielt.

Wie erwähnt konnte in Elmex Intensiv mit 20,9 Gew.% der höchste Putzkörperanteil der untersuchten Produkte nachgewiesen werden. Dies scheint sich auch in den Ergebnissen der RDA- und REA-Messung wiederzuspiegeln, bei denen Elmex Intensiv ebenfalls die höchsten Ergebnisse mit einem RDA von 198,5 und einem REA von 15,3 erzielte. Auf der anderen Seite enthielten die Emofluor Zahnpaste (19,2 Gew.%) und Theramed ProElectric (19 Gew.%) Putzkörper in ähnlicher Menge. Bei beiden waren jedoch die RDA- (26,7 und 46,3) und REA-Werte (3,3 und 2,3) deutlich niedriger. Allerdings scheinen diese drei Werte kein Prädiktor für das Verhalten eines Produkts unter einer erosiven Demineralisation und Bürstabrasion zu sein. Elmex Intensiv zeigte keine signifikante Zunahme der Substanzverluste unter Bürstabrasion und wirkte mit einer signifikanten Reduktion der Substanzverluste von 38% gegenüber Placebo durchaus akzeptabel.

Durch die hohe Putzkörpermenge und den hohen RDA- und REA-Wert unterscheidet sich Elmex Intensiv deutlich von den anderen Produkten. Möglicherweise liegt dies an den enthaltenen Putzkörpern, denn neben hydratisierten Silika sind laut Herstellerangaben auch Alumina enthalten. Hierbei handelt es sich um Aluminiumoxid, einen stark abrasiven Polierstoff, welcher normalerweise in geringen Konzentrationen von 1–2 Gew.% eingesetzt wird [Lippert, 2013]. Mit einer Mohs-Härte von 9 sind Alumina wesentlich härter als die sonst üblichen Silika (2,5–5 Mohs-Härte) und als Schmelz [Strassler, 2010].

Neben Elmex Intensiv sind diese lediglich für Elmex Erosionsschutz und Theramed Interdental deklariert, allerdings erst an späterer Rangfolge. Da die Inhaltsstoffe anhand

der enthaltenen Menge im Produkt aufgeführt sind, gibt dies Aufschluss über eine eventuell höhere Konzentration in Elmex Intensiv. Mittels EDX war es möglich, in Elmex Intensiv nahezu alle großen untersuchten Partikel als Aluminiumoxid-Abrasiva zu identifizieren. Dies erklärt die hohen RDA- und REA-Werte.

Die Tribologie umfasst verschiedene Bewegungsformen, die zu Materialverschleiß führen können: das Gleiten, Rollen, Stoßen, und Strömen [Deters et al., 2002]. Die Bewegung der Abrasiva ist im Wesentlichen als ein Rollen über die Schmelzprobe zu verstehen. Allerdings ist beim Rollen immer ein Anteil an mikro- oder makroskopischen Gleitbewegungen vorhanden, dem sogenannten „Mikro- bzw. Makroschlupf“ [Deters et al., 2002].

Interessant ist, dass bei Elmex Intensiv die zusätzliche Bürstung nicht zu einer Erhöhung der Substanzverluste führte. Es ist möglich, dass mikromorphologische Phänomene eine Rolle spielen, denn der Großteil der in Elmex Intensiv enthaltenen Putzkörper konnte als Silika identifiziert werden und war eher klein und homogen.

Vorstellbar sind drei unterschiedliche Mechanismen:

1. Im Zuge der Bürstabrasion bewegen sich die Abrasiva über die Oberfläche der Schmelzprobe und können hier so mechanisch Unebenheiten und Erhöhungen abtragen. Es ist nun denkbar, dass einige Putzkörper in entstandenen Senken innerhalb der erodierten Schmelzoberfläche verbleiben und diese füllen. Die restlichen Abrasiva werden über diese Schicht bewegt und können keinen Verschleiß mehr erzeugen. Diese Theorie des „Abgleitens“ könnte durch den oben genannten Mikroschlupf erklärt werden.
2. Möglicherweise werden einige der kleinen Abrasiva in das entmineralisierte Schmelzband impaktiert und verbleiben dort. Dies würde ebenfalls zu einem Abgleiten bzw. Makroschlupf der restlichen Partikel über diese Schicht führen. Da bei der RDA- und REA-Messung gesunde Schmelzproben verwendet werden, bei denen keine oberflächlich entmineralisierte Schicht vorhanden ist, kann es nicht zu einer Impaktierung der kleinen Abrasiva kommen. Mithilfe dieser Hypothese ließen sich die hohen RDA- und REA-Werte sowie die ebenfalls auffällige Diskrepanz des hohen Putzkörperanteils und der niedrigen Substanzverluste nach Bürstabrasion erklären.
3. Es ist denkbar, dass die Vielzahl kleiner Abrasiva vermehrt an den Zahnbürstenborsten akkumuliert. Lewis et al. konnten bereits zeigen, dass sich die Putzkörper in Suspension bei Bewegung der Zahnbürsten zu den Borstenspitzen

orientieren und zwischen diesen ohne Kontakt zur Oberfläche der Probe verbleiben. Entscheidend schien die Art der Bewegung zu sein; so zeigte sich bei Gleitbewegungen bereits eine Akkumulation kleiner Partikel und bei reziproken Bewegungen eine vermehrte Akkumulation [Lewis et al., 2004]. Bei der RDA- bzw. REA-Messung wurden die Proben mit einer Kreuzbewegung gebürstet, in Experiment II hingegen mit einer Zick-Zack-Bewegung. Möglicherweise führen diese zwei Bewegungsarten zu einem unterschiedlichen Akkumulationsverhalten der kleinen Abrasiva, die in dieser Menge einzig in Elmex Intensiv enthalten sind. Dieses Verhalten kann die konträren Ergebnisse in der RDA-/REA-Messung und den Substanzverlusten durch Erosion/Abrasion erklären.

## 4.6 Schlussfolgerung

Ziel der vorliegenden Studie war es speziell, die physikalischen und chemischen Effekte und die Interaktion der Putzkörperfraktion und der aktiven Inhaltsstoffe zu untersuchen, welche die erosionsprotektiven Effekte der Produkte möglicherweise beeinflussen.

Die Nullhypothese konnte abgelehnt werden, da sich die verschiedenen Produkte sowohl unter alleiniger Erosion als auch unter zusätzlicher Bürstabrasion maßgeblich in ihrer Wirkung unterschieden.

Die Studie konnte zeigen, dass starke bzw. schwach anti-erosive Wirkeffekte kein Prädiktor für das Verhalten eines Produkts unter Bürstabrasion sind.

Abgesehen von Theramed Interdental und Sensodyne Multicare zeigten die Zahnpasten mit klassischen Fluoridverbindungen ähnliche Wirkeffekte, die allerdings stark nach zusätzlicher Bürstabrasion variierten.

Am effektivsten zeigten sich die zinnhaltigen Zahnpasten unter Erosion und Abrasion, weshalb sie gegenwärtig auch die zuverlässigste Empfehlung in der Erosionsprävention sind. Die stärksten Wirkeffekte unter allen Produkten erreichte das Zinnfluoridgel; es kann deshalb ebenfalls eine sinnvolle Empfehlung darstellen. Ebenso zeigte sich die Kombination der anti-erosiven Wirkstoffe Zinn und Chitosan als effektiv.

Die Abrasivstoffsysteme stellen vermutlich einen wichtigen Modulator der Abrasion dar. Um dies zu untersuchen erfolgte eine Analyse folgender Parameter: der Form und Größe der Putzkörper, Putzkörperanteil, RDA- und REA-Werte der einzelnen Zahnpasten, Elementanalyse der enthaltenen Putzkörper und die Wirkstoffe.

In der vorliegenden Studie konnte die Untersuchung der Abrasivaform und -größe keine sinnvolle Erklärung der aufgetretenen Abrasion liefern.

Für den Putzkörperanteil sind allerdings kausale Zusammenhänge zu vermuten, hier konnte eine Critical Particle Concentration (CPC) definiert werden. Bis zum Erreichen dieser kam es zu einer Zunahme der Substanzverluste und oberhalb zu einer Abnahme. Dies entspricht auch den Ergebnissen einer Übersichtsarbeit zum Thema chemisch-mechanische Politur, dem Läppen [Evans et al., 2003].

Da in der vorliegenden Studie die RDA- und REA-Werte aus demselben Labor stammen, liefern sie wichtige Anhaltspunkte und können 29% bzw. 44% der Varianz der Substanzverluste erklären. Diese scheinen allerdings aufgrund der Nutzung von gesunden Dentin- bzw. Schmelzproben kein eindeutiger Vorhersagewert für das Verhalten von Zahnpasten unter Erosionen zu sein. Speziell die Diskrepanz der hohen RDA- und REA-Werte zu einer signifikanten Reduktion der Substanzverluste gegenüber Placebo für Elmex Intensiv bestätigen dies. Die Studie legt also nahe, dass die Aussagekraft der RDA- und REA-Werte für die Abrasivität von Zahnpasten an erodiertem Schmelz begrenzt ist und vermutlich hier lediglich als Richtwert verstanden werden kann. Dies unterstreicht, wie von Dörfer et al. beschrieben, dass die In-vitro-Messung der Abrasivität nicht als sichere Vorhersagemethode für das Verhalten einer Zahnpaste unter klinischen Bedingungen dienen kann [Dörfer et al., 2010].

Des Weiteren konnten in der vorliegenden Untersuchung mittels der Elementanalyse unterschiedliche Putzkörper identifiziert werden, darunter Silika, Alumina und Polyethylen; Zusammenhänge mit den Substanzverlusten ließen sich jedoch nicht erkennen.

Es ist davon auszugehen, dass die jeweiligen Parameter in einparametrischen Untersuchungen einen erklärbaren Effekt erzielen, dass dieser allerdings in multiparametrischen Systemen von den Effekten der anderen Faktoren möglicherweise überlagert oder beeinflusst wird.

Außerdem ist noch zu klären, inwieweit die gewonnenen Ergebnisse dieser In-vitro-Studie auf die Komplexe intraorale Situation übertragen werden können. Hier mögen auch andere Faktoren wie etwa die Pellikel einen modulierenden Effekt auf abrasive Phasen haben.

Zusammenfassend sind in Anlehnung an den Verschleiß im Vier-Komponenten-System die Wirkeffekte der Zahnpasten unter Erosion und Abrasion als ein komplexes Zusammenspiel der unterschiedlichen Parameter zu verstehen. Ein alleiniger Hauptparameter konnte nicht festgelegt werden. Das Verständnis dieser Interaktionen ist entscheidend für die Herstellung wirkstarker Zahnpasten zum Einsatz bei Erosion und Abrasion.

Deshalb bilden die vorliegenden Ergebnisse eine Grundlage für eine Vielzahl an nachfolgenden Studien. Dazu würden beispielsweise genauere Untersuchungen der

einzelnen Parameter und deren Wechselwirkungen gehören. Ferner ist es denkbar, weitere in der Systemstruktur interagierende Faktoren zu identifizieren.

## 5 Zusammenfassung

Zahnpasten und -pulver sind aus historischer Sicht ein grundlegender Bestandteil der Mundhygiene des Menschen. Die Deutschen Mundgesundheitsstudien (DMS) zeigen eine Anwenderhäufigkeit von bis zu 80% in nahezu allen Altersgruppen und eine Zunahme der Prävalenz von nicht kariesbedingten Zahnhartsubstanzverlusten durch Erosion und Abrasion.

Ziel der Studie war es deshalb, die erosionsprotektive Wirkung der Zahnpasten und die Effekte nach Erosion und Bürstabrasion am Zahnschmelz zu untersuchen. Im Speziellen sollten die physikalischen und chemischen Effekte und die Interaktion der Fraktion der Putzkörper und der aktiven Inhaltsstoffe analysiert werden, welche die erosionsprotektiven Effekte der untersuchten Produkte möglicherweise beeinflussen.

Hierzu erfolgte die Analyse folgender Parameter:

- Form und Größe der enthaltenen Putzkörper
- Putzkörperanteil der Produkte
- die RDA- und REA-Werte der einzelnen Zahnpasten
- die Elementanalyse der enthaltenen Putzkörper
- die Wirkstoffe (Inhaltsstoffe) der Produkte

In diesem In-vitro-Experiment wurden insgesamt 17 Zahnpasten und ein Zahngel untersucht. Es handelte sich um acht natriumfluoridhaltige, drei hydroxylapatithaltige (zwei natriumfluoridhaltig, eins fluoridfrei), ein fluoridfreies chitosanhaltiges Präparat, drei zinnfluoridhaltige Zahnpasten, ein Präparat mit Polyethylenputzkörpern, ein zinnfluoridhaltiges Zahngel (Positivkontrolle) und ein wirkstofffreies Präparat (Placebo). Als Negativkontrolle wurde die alleinige Erosion ohne Einsatz eines Präparats betrachtet. Die Untersuchung bestand aus zwei unterschiedlichen Versuchsreihen (Experiment I und II), die sich jeweils über einen Zeitraum von zehn Tagen erstreckten. In jedem der Experimente wurden humane Schmelzproben sechsmal täglich für 2 min erosiv demineralisiert (0,5%ige Zitronensäure, pH 2,5). Am Anfang und Ende jedes Versuchstages wurden die Proben für 2 min in die Slurries der Produkte gegeben. In Experiment II wurde während dieses zweiminütigen Slurrykontakts für 15 s

mit einem Auflagegewicht von 200 g gebürstet. Anschließend wurden die Substanzverluste profilometrisch bestimmt.

In Experiment I, welches die Wirkeffekte bei alleiniger Erosion untersuchte, zeigte die Applikation des Placebos gegenüber der Negativkontrolle (alleinige Erosion) keinen signifikanten Effekt. Zehn Produkte zeigten signifikante Unterschiede zum Placebo ( $p \leq 0,05$ ). Eins der natriumfluoridhaltigen Produkte führte zu einer Erhöhung der Substanzverluste um 39%. Die restlichen neun führten zu einer signifikanten Reduktion gegenüber Placebo: die vier natriumfluoridhaltigen Produkte reduzierten die Substanzverluste um 36–43%, das chitosanhaltige Präparat führte zu einer Reduktion um 51% und die drei zinnfluoridhaltigen Zahnpasten konnten die Substanzverluste um 48–62% reduzieren. Am effektivsten stellte sich das zinnhaltige Gel (Positivkontrolle) mit einer Reduktion von 76% gegenüber Placebo dar.

Die Ergebnisse aus Experiment II bilden die Effektivität der Produkte unter dem Zusammenspiel von physikalischen und chemischen Reizen ab. Lediglich fünf Produkte (drei zinnfluoridhaltige und zwei natriumfluoridhaltige Formulierungen) zeigten keine signifikante Erhöhung der Substanzverluste gegenüber der alleinigen Erosion (Negativkontrolle). Placebo führte zu einer 31%igen Erhöhung der Substanzverluste gegenüber der Negativkontrolle. Insgesamt neun Produkte zeigten signifikant geringere Substanzverluste als Placebo ( $p \leq 0,05$ ): die fünf natriumfluoridhaltigen Produkte reduzierten die Substanzverluste um 29–57%, die drei zinnfluoridhaltigen Zahnpasten um 49–69% und das zinnfluoridhaltige Gel (Positivkontrolle) um 76%.

Außerdem zeigte sich eine nicht-lineare Beziehung von RDA/REA bzw. dem Putzkörperanteil und den Substanzverlusten, während die Putzkörpergröße keinen Effekt hatte.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die meisten Produkte mit klassischen Fluoridverbindungen unter alleiniger Erosion häufig akzeptable Ergebnisse erzielen. Die chitosan- und zinnhaltigen Präparate stellen sich indes als wirkstärker dar. Nach zusätzlicher Bürstabrasion kam es hingegen zu einer großen Varianz der Effekte. Bestimmte anti-erosive Wirkeffekte sind somit nicht als Prädiktor für das Verhalten eines Produkts unter Bürstabrasion zu sehen. Nach wie vor weisen zinnhaltige Formulierungen die besten Wirkeffekte bei Erosion und Abrasion auf und sind deshalb als klare Empfehlung in der Erosionstherapie zu nennen.

## 6 Summary

Historically, toothpastes and -powders are an essential part of oral hygiene. In 2014, the German Oral Health Survey (Deutsche Mundgesundheitsstudie = DMS) stated a regular use of toothpastes and -powders by up to 80% in nearly all age cohorts and an increasing prevalence of non-carious-induced dental hard tissue loss by erosion and abrasion.

The aim of this study was to examine the erosion-protective effect of toothpastes and their impact after erosion and abrasion by brushing on enamel. In particular, the physical and chemical effects and the interaction of the particulate fraction and the active ingredients, which might modulate the anti-erosive effects of the products, should be analysed.

An analysis for the following parameters was conducted:

- Form and size of the abrasives
- Amount of particulate fraction in the products
- RDA- and REA-value of the toothpastes
- Element analysis of the abrasives
- Active ingredients

In this *in vitro* experiment, a total number of 17 toothpastes and one tooth gel were examined. Eight were sodium fluoride toothpastes, three hydroxyapatite (two also contained sodium fluoride, one was fluoride-free), one toothpaste was a fluoride-free chitosan product, three were stannous fluoride toothpastes and one product contained polyethylene abrasives. One stannous fluoride gel (positive control) and a placebo product, without active ingredients were also implicated in this experiment. Negative control was erosion only. The examination consisted of two different experimental runs (experiment I and II), which took place over a period of ten days. In both experiments, human enamel samples were erosively demineralised for 2 min six cycles daily (0.5% citric acid, pH 2.5). By the beginning and end of each day, samples were immersed in the products' slurries for 2 min. During these immersions, samples in experiment II

were also brushed for 15 s (load 200 g). Afterwards, the tissue loss was quantified profilometrically.

Experiment I, investigating the effect only on erosion, indicated that the application of placebo had no significant effect compared to the negative control (erosion only). Ten products showed a significant difference to placebo ( $p \leq 0,05$ ). One of the sodium fluoride toothpastes increased tissue loss up to 39%. In contrast, nine products showed a significant decrease of tissue loss in comparison to the placebo product. Four products containing sodium fluoride reduced tissue loss by 36 to 43%. The fluoride-free chitosan product decreased tissue loss up to 51% and the three stannous fluoride toothpastes reduced tissue loss by 48 to 62%. The stannous fluoride gel (positive control), being the most effective, showed a reduction of 76% compared to placebo.

Experiment II examined the effects under the interaction of physical and chemical impacts. Five products (three stannous fluoride and two sodium fluoride formulations) showed no significant increase of tissue loss compared to erosion only (negative control). The placebo increased tissue loss by 31% in relation to the negative control. Overall nine products showed significantly less tissue loss than the placebo ( $p \leq 0,05$ ). Five sodium fluoride formulations reduced tissue loss by 29 to 57%, the three stannous fluoride toothpastes by 49 to 69% and the stannous fluoride gel (positive control) by 76%.

Furthermore, the study revealed a non-linear relation of RDA/REA-value, as well as the amount of particles and tissue loss, whereas the particle size had no significant effect.

The results of this study indicate that most products with classical fluoride compounds achieve acceptable results under erosion only. However, chitosan containing and stannous fluoride products show to be more effective. After additional brushing, however, a broad range of effects occurred. Therefore, anti-erosive effects are not to be seen as a predictor for the behaviour and impacts of toothpastes while brushing.

Nevertheless, stannous fluoride formulations are expected to provide the best protection on erosion and abrasion. Therefore, stannous fluoride formulations should be highly recommended in therapy of tooth erosion.

## **7 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis**

### **7.1 Abbildungsverzeichnis**

**Abb. 2.01:** Schema eines Objektträgers mit Schmelzproben.

**Abb. 2.02:** Täglicher experimenteller Ablauf Experiment I und Experiment II.

**Abb. 2.03:** Profilometriegrafik.

**Abb. 2.04:** Zerkleinerung des getrockneten Sediments bzw. des Überstandes der Zahnpastenslurries.

**Abb. 2.05:** Druckloses Auftragen des zerkleinerten Sediments.

**Abb. 2.06:** Gleichmäßige Bedeckung der Probenteller.

**Abb. 3.01:** Substanzverlust nach Immersion in Slurries und nach zusätzlichem Bürsten.

**Abb. 3.02a und 3.02b:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Putzkörper.

**Abb. 3.03:** Gewichtsprozentage der Abrasivstoffpartikel in den Zahnpasten.

**Abb. 3.04:** Darstellung der Elementanalyse der einzelnen Produkte.

**Abb. 3.05:** Darstellung der RDA-Werte.

**Abb. 3.06:** Darstellung der REA-Werte.

**Abb. 3.07:** Zusammenhang zwischen RDA- und REA-Werten.

**Abb. 3.08:** Kurvenanpassung (Potenzfunktion) für die Beziehung von RDA und Substanzverlusten.

**Abb. 3.09:** Kurvenanpassung (kubisches Modell) für die Beziehung von REA und Substanzverlusten.

**Abb. 3.10:** Kurvenanpassung (quadratische Funktion) für die Beziehung des Putzkörperanteils und den Substanzverlusten.

**Abb. 4.01:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der aus dem Sediment extrahierten Putzkörper im Rahmen der Vorversuche.

**Abb. 4.02:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Sensodyne Proschmelz, überlagert mit 50 µm Raster (rot).

## **7.2 Tabellenverzeichnis**

**Tab. 2.01:** Inhaltsstoffe wie vom Hersteller deklariert.

**Tab. 2.02:** In der Dissertation verwendete Abkürzung der Produkte.

**Tab. 2.03:** Einteilung der Produkte in die jeweiligen Versuchsdurchläufe.

**Tab. 3.01:** Darstellung der RDA- und REA-Werte, der Substanzverluste, Wirkstoffe, Putzkörperanteil und -größe.

**Tab. 3.02:** Elementanalyse der Zahnpasten.

**Tab. 3.03:** Silizium - Sauerstoffverhältniss der Produkte.

**Tab. 3.04:** Fluoridwerte, deklarierte Fluoridmenge und pH-Wert der Slurries.

## 8 Literaturverzeichnis

Ahn Y, Yoon JY, Baek CW, Kim YK: Chemical mechanical polishing by colloidal silica-based slurry for micro-scratch reduction. *Wear* 2004; 257: 785–789.

Attin T, Koidl U, Buchalla W, Schaller HG, Kielbassa AM, Hellwig E: Correlation of microhardness and wear in differently eroded bovine dental enamel. *Archives of Oral Biology* 1997; 42: 243–250.

Bibby BG: A test of the effect of fluoride-containing dentifrices on dental caries. *Journal of Dental Research* 1945; 24: 297–303.

Birkeland JM, Haugejorden O: Caries decline before fluoride toothpaste was available: earlier and greater decline in the rural north than in southwestern Norway. *Acta Odontologica Scandinavica* 2001; 59: 7–13.

Birkeland JM, Haugejorden O, Fehr FR von der: Analyses of the caries decline and incidence among Norwegian adolescents 1985-2000. *Acta Odontologica Scandinavica* 2002; 60: 281–289.

Bratthall D, Hänsel-Petersson G, Sundberg H: Reasons for the caries decline: what do the experts believe? *European Journal of Oral Sciences* 1996; 104: 416-422.

Brighenti FL, Delbem ACB., Buzalaf MAR, Oliveira FAL, Ribeiro DB, Sasaki KT: In vitro evaluation of acidified toothpastes with low fluoride content. *Caries Research* 2006; 40: 239–244.

Burt BA: The future of the caries decline. *Journal of Public Health Dentistry* 1985; 45: 261–269.

CAPP database: Country/Area Profile Project in support WHO, unter: <http://www.mah.se/CAPP/> (abgerufen am 24.09.2017)

Carvalho TS, Colon P, Ganss C, Huysmans MC, Lussi A, Schlueter N, Schmalz G, Shellis RP, Tveit AB, Wiegand A: Consensus report of the European Federation of Conservative Dentistry: erosive tooth wear – diagnosis and management. *Clinical Oral Investigations* 2015; 19: 1557–1561.

Claesson PM, Ninham BW: pH-dependent interactions between adsorbed chitosan layers. *Langmuir* 1992; 8: 1406–1412.

Comar LP, Gomes MF, Ito N, Salomão PA, Grizzo LT, Magalhães AC: Effect of NaF, SnF<sub>2</sub>, and TiF<sub>4</sub> toothpastes on bovine enamel and dentin erosion-abrasion in vitro. *International Journal of Dentistry* 2012; 2012: 134350: 1–6.

Cong WL, Zhang PF, Pei ZJ: Experimental investigations on material removal rate and

surface roughness in lapping of substrate wafers: a literature review. *Key Engineering Materials* 2009; 404: 23–31.

Coronado JJ: Effect of abrasive size on wear, in: M. Adamiak (Ed.), *Abrasion Resistance of Materials*, InTech, Rijeka, 2012: 167–184.

Cury JA, Tenuta LMA: How to maintain a cariostatic fluoride concentration in the oral environment. *Advances in Dental Research* 2008; 20: 13–16.

Deters L, Fischer A, Santner E, Stolz U: Verschleiß, Reibung – Definitionen, Begriffe, Prüfung, in: *Gesellschaft für Tribologie, Arbeitsblatt 7 Tribologie 2012*, unter: [http://gft-ev.de/wp-content/uploads/2014/07/2002\\_AB\\_7\\_Tribologie.pdf](http://gft-ev.de/wp-content/uploads/2014/07/2002_AB_7_Tribologie.pdf) (abgerufen am 24.09.2017).

Dörfer C, Addy M, Gonzalez-Cabezas C, Hefferren JJ: Methods to determine dentifrice abrasiveness. *Journal of Clinical Dentistry* 2010; 21: 1–14.

Eggert F: EDX-Spectra simulation in electron probe microanalysis. Optimization of excitation conditions and detection limits. *Microchimica Acta* 2006; 155: 129–136.

Eisenburger M, Shellis RP, Addy M: Scanning electron microscopy of softened enamel. *Caries Research* 2004; 38: 67–74.

Ellingsen JE: Scanning electron microscope and electron microprobe study of reactions of stannous fluoride and stannous chloride with dental enamel. *Scandinavian Journal of Dental Research* 1986; 94: 299–305.

Evans CJ, Paul E, Dornfeld D, Lucca DA, Byrne G, Tricard M, Klocke F, Dambon O, Mullany BA: Material removal mechanisms in lapping and polishing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 2003; 52: 611–633.

Ferreira MC, Ramos-Jorge ML, Delbem ACB, Vieirac RDS: Effect of toothpastes with different abrasives on eroded human enamel: an in situ/ex vivo Study. *The Open Dentistry Journal* 2013; 7: 132–139.

Franzò D, Philpotts CJ, Cox TF, Joiner A: The effect of toothpaste concentration on enamel and dentine wear in vitro. *Journal of Dentistry* 2010; 38: 974–979.

Ganss C, Klimek J, Schwarz N: A comparative profilometric in vitro study of the susceptibility of polished and natural human enamel and dentine surfaces to erosive demineralization. *Archives of Oral Biology* 2000; 45: 897–902.

Ganss C, Lussi A, Grunau O, Klimek J, Schlueter N: Conventional and anti-erosion fluoride toothpastes: Effect on enamel erosion and erosion-abrasion. *Caries Research* 2011; 45: 581–589.

Ganss C, Marten J, Hara AT, Schlueter N: Toothpastes and enamel erosion/abrasion – Impact of active ingredients and the particulate fraction. *Journal of Dentistry* 2016; 54: 62–67.

Ganss C, Möllers M, Schlueter N: Do Abrasives Play a Role in Toothpaste Efficacy against Erosion/Abrasion? *Caries Research* 2017; 51: 52–57.

Ganss C, Schlueter N, Hardt M, Schattenberg P, Klimek J: Effect of fluoride compounds on enamel erosion in vitro: a comparison of amine, sodium and stannous fluoride. *Caries Research* 2007; 42: 2–7.

Ganss C, Schlueter N, Klimek J: Retention of KOH-soluble fluoride on enamel and dentine under erosive conditions - A comparison of in vitro and in situ results. *Archives of Oral Biology* 2007; 52: 9–14.

Ganss C, Schlueter N, Preiss S, Klimek J: Tooth brushing habits in uninstructed adults—frequency, technique, duration and force. *Clinical Oral Investigations* 2009; 13: 203–208.

Ganss C, Schulze K, Schlueter N: Toothpaste and erosion. *Monographs in Oral Science* 2013; 23: 88–99.

Ganss C, von Hinckeldey J, Tolle A, Schulze K, Klimek J, Schlueter N: Efficacy of the stannous ion and a biopolymer in toothpastes on enamel erosion/abrasion. *Journal of Dentistry* 2012; 40: 1036–1043.

González-Cabezas C, Hara AT, Hefferren JJ, Lippert F: Abrasivity testing of dentifrices - challenges and current state of the art. *Monographs in Oral Science* 2013; 23: 100–107.

Grabenstetter RJ, Broge RW, Jackson FL, Radike AW: The measurement of the abrasion of human teeth by dentifrice abrasives: a test utilizing radioactive teeth. *Journal of Dental Research* 1958; 37: 1060–1068.

Grace Davison: Sylodent® / Syloblanc® - Cleaning and Thickening Silica Agents for Toothpaste, unter: [https://grace.com/personal-care/en-US/Documents/Sylodent\\_syloblanc\\_br\\_E\\_120126.pdf](https://grace.com/personal-care/en-US/Documents/Sylodent_syloblanc_br_E_120126.pdf) (abgerufen am 24.09.2017).

Hara AT, González-Cabezas C, Creeth J, Parmar M, Eckert GJ, Zero DT: Interplay between fluoride and abrasivity of dentifrices on dental erosion–abrasion. *Journal of Dentistry* 2009; 37: 781–785.

Hargreaves JA, Thompson GW, Wagg BJ: Changes in caries prevalence of Isle of Lewis children between 1971 and 1981. *Caries Research* 1983; 17: 554–559.

Harte DB, Manly RS: Four variables affecting magnitude of dentifrice abrasiveness. *Journal of Dental Research* 1976; 55: 322–327.

Hefferren JJ: A laboratory method for assessment of dentifrice abrasivity. *Journal of Dental Research* 1976; 55: 563–573.

Hove LH, Stenhagen KR, Holme B, Tveit AB: The protective effect of SnF<sub>2</sub> containing toothpastes and solution on enamel surfaces subjected to erosion and abrasion in situ. *European Archives of Paediatric Dentistry : Official Journal of the European Academy of Paediatric Dentistry* 2014; 15: 237–243.

Huber Dental Silicas: Zeodent® - High Performing Dental Silicas, unter [https://www.hubermaterials.com/userfiles/files/PFDocs/Zeodent%20High%20Performing%20Dental%20Silicas%20\(European%20Version\).pdf](https://www.hubermaterials.com/userfiles/files/PFDocs/Zeodent%20High%20Performing%20Dental%20Silicas%20(European%20Version).pdf) (abgerufen am 24.09.2017).

Huysmans MC, Young A, Ganss C: The role of fluoride in erosion therapy. *Monographs in oral science* 2014; 25: 230–243.

Huysmans MC, Jager DH, Ruben JL, Unk DE, Klijn CP, Vieira, AM: Reduction of erosive wear in situ by stannous fluoride-containing toothpaste. *Caries Research* 2011b; 45: 518–523.

Jardim JJ, Alves LS, Maltz M: The history and global market of oral home-care products. *Brazilian Oral Research* 2009; 23: 17–22.

Joiner A: Whitening toothpastes: A review of the literature. In *Journal of Dentistry* 2010; 38: 17-21.

Jordan AR, Micheelis W: Fünfte Deutsche Mundgesundheitsstudie (DMS V). Institut der Deutschen Zahnärzte (IDZ), Deutscher Zahnärzte Verlag, Köln, 2016.

Kassebaum NJ, Bernabe E, Dahiya M, Bhandari B, Murray CJL, Marcenes W: Global burden of severe periodontitis in 1990-2010: a systematic review and meta-regression. *Journal of Dental Research* 2014; 93: 1045–1053.

Kim J, Lawler DF: Characteristics of zeta potential distribution in silica particles. *Bulletin of the Korean Chemical Society* 2005; 26: 1083–1089.

Larsen M: Chemical events during tooth dissolution. *Journal of Dental Research* 1990; 69: 575–580.

Lee HS, Tsai S, Kuo CC, Bassani AW, Pepe-Mooney B, Miksa D, Masters J, Sullivan R, Composto RJ: Chitosan adsorption on hydroxyapatite and its role in preventing acid erosion. *Journal of Colloid and Interface Science* 2012; 385: 235–243.

Lewis R, Dwyer-Joyce RS, Pickles MJ: Interaction between toothbrushes and toothpaste abrasive particles in simulated tooth cleaning. *Wear* 2004; 257: 368–376.

Lippert F: An introduction to toothpaste - its purpose, history and ingredients. *Monographs in Oral Science* 2013; 23: 1–14.

Lundin M, Macakova L, Dedinaite A, Claesson P: Interactions between chitosan and SDS at a low-charged silica substrate compared to interactions in the bulk - The Effect of Ionic Strength. *Langmuir* 2008; 24: 3814–3827.

Lussi A, Carvalho TS: Erosive tooth wear: A multifactorial condition of growing concern and increasing knowledge. *Monographs in Oral Science* 2014; 25: 1–15.

Lussi A, Megert B, Eggenberger D, Jaeggi T: Impact of different toothpastes on the prevention of erosion. *Caries Research* 2008; 42: 62–67.

Lussi A, Schlueter N, Rakhmatullina E, Ganss C: Dental erosion – An overview with emphasis on chemical and histopathological aspects. *Caries Research* 2011; 45: 2–12.

Magalhães AC, Wiegand A, Buzalaf MAR: Use of dentifrices to prevent erosive tooth wear: harmful or helpful? *Brazilian Oral Research* 2014; 28: 1–6.

Marthaler TM: Changes in dental caries 1953-2003; *Caries Research* 2004; 38: 173–181.

McGrady MG, Ellwood RP, Maguire A, Goodwin M, Boothman N, Pretty IA: The association between social deprivation and the prevalence and severity of dental caries and fluorosis in populations with and without water fluoridation. *BMC Public Health* 2012; 12: 1–17.

Micheelis W, Bauch J: Mundgesundheitszustand und -verhalten in der Bundesrepublik Deutschland (DMS I). Deutscher Ärzte-Verlag, Köln, 1991.

Micheelis W, Reich E: Dritte Deutsche Mundgesundheitsstudie (DMS III). Institut der Deutschen Zahnärzte (IDZ), Deutscher Ärzte-Verlag, Köln, 1999.

Micheelis W, Schiffner U, Hoffmann T, Reis U, Schroeder E: Vierte Deutsche Mundgesundheitsstudie (DMS IV). Institut der Deutschen Zahnärzte (IDZ), Deutscher Zahnärzte Verlag, Köln, 2006.

Moore C, Addy M: Wear of dentine in vitro by toothpaste abrasives and detergents alone and combined. *Journal of Clinical Periodontology* 2005; 32: 1242–1246.

Moron B, Miyazaki S, Ito N, Wiegand A, Vilhena F, Buzalaf M, Magalhães A: Impact of different fluoride concentrations and pH of dentifrices on tooth erosion/abrasion in vitro. *Australian Dental Journal* 2013; 58: 106–111.

Mühlemann H, Schmid H: Orale Kompositionen mit stabilisierten Zinnsalzen. *European Patent* 1985; Patent No. 0026539 B1.

Paraskevas S, Timmerman MF, van der Velden U, van der Weijden GA: Additional effect of dentifrices on the instant efficacy of toothbrushing. *Journal of Periodontology* 2006; 77: 1522–1527.

Petzold M: The influence of different fluoride compounds and treatment conditions on dental enamel: a descriptive in vitro study of the CaF<sub>2</sub> precipitation and microstructure. *Caries Research* 2001; 35: 45–51.

Poggio C, Lombardini M, Colombo M, Bianchi S: Impact of two toothpastes on repairing enamel erosion produced by a soft drink: An AFM in vitro study. *Journal of Dentistry* 2010; 38: 868–874.

PQ Corporation: Sorbosil® - The Sorbosil® Range for toothpastes, unter <https://www.pqcorp.com/products/silicas/sorbosil> (abgerufen 24.09.2017).

Rasines G: Fluoride toothpaste prevents caries in children and adolescents at fluoride concentrations of 1000 ppm and above. *Evidence-Based Dentistry* 2010, 11(1), 6–7.

Ring ME: *Dentistry. An illustrated history.* Harry N Abrams, Inc., Publishers, New York, 1985.

Rios D, Honório HM, Magalhães AC, Silva SMB, Delbem ACB, Machado MA, Buzalaf MAR: Scanning electron microscopic study of the in situ effect of salivary stimulation on erosion and abrasion in human and bovine enamel. *Brazilian Oral Research* 2008; 22: 132–138.

Scherge M, Sarembe S, Kiesow A, Petzold M: Dental tribology at the microscale. *Wear* 2013; 297: 1040–1044.

Schlueter N, Hara AT, Shellis RP, Ganss C: Methods for the measurement and characterization of erosion in enamel and dentine. *Caries Research* 2011; 45: 13–23.

Schlueter N, Hardt M, Lussi A, Engelmann F, Klimek J, Ganss C: Tin-containing fluoride solutions as anti-erosive agents in enamel: an in vitro tin-uptake, tissue-loss, and scanning electron micrograph study. *European Journal of Oral Sciences* 2009; 117: 427–434.

Schlueter N, Tveit AB: Prevalence of erosive tooth wear in risk groups. *Monographs in Oral Science* 2014; 25: 74–98.

Shellis RP, Barbour ME, Jesani A, Lussi A: Effects of buffering properties and undissociated acid concentration on dissolution of dental enamel in relation to pH and acid type. *Caries Research* 2013, 47(6), 601–611.

Shellis RP, Finke M, Eisenburger M, Parker DM, Addy M: Relationship between enamel erosion and liquid flow rate. *European Journal of Oral Sciences* 2005; 113: 232–238.

Stookey GK, Burkhard TA, Schemehorn BR: In vitro removal of stain with dentifrices. *Journal of Dental Research* 1982; 61: 1236–1239.

Strassler HE: Toothpaste ingredients make a difference: patient specific recommendations. *Supervised self-study courses from Benco Dental* 2010, 101–110.

Svensson O, Lindh L, Cárdenas M, Arnebrant T: Layer-by-layer assembly of mucin and chitosan—Influence of surface properties, concentration and type of mucin. *Journal of Colloid and Interface Science* 2006; 299: 608–616.

ten Cate JM: Review on fluoride, with special emphasis on calcium fluoride mechanisms in caries prevention. *European Journal of Oral Sciences* 1997; 105: 461–465.

van der Mei HC, Engels E, de Vries J, Dijkstra RJB, Busscher HJ: Chitosan adsorption to salivary pellicles. *European Journal of Oral Sciences* 2007; 115: 303–307.

von der Fehr FR, Haugejorden O: The start of caries decline and related fluoride use in Norway. *European Journal of Oral Sciences* 1997; 105: 21–26.

Voronets J, Lussi A: Thickness of softened human enamel removed by toothbrush abrasion: an in vitro study. *Clinical Oral Investigations* 2010; 14: 251–256.

Walsh T, Worthington HV, Glenny AM, Appelbe P, Marinho VCC, Shi X: Fluoride toothpastes of different concentrations for preventing dental caries in children and adolescents. *Cochrane Database of Systematic Reviews* 2010; Issue 1; Art. No.: CD007868.

Wiegand A, Attin T: Design of erosion/abrasion studies – insights and rational concepts. *Caries Research* 2011; 45: 53–59.

Wiegand A, Schlueter N: The role of oral hygiene: does toothbrushing harm? *Monographs in oral science* 2014; 25: 215–219.

Wiegand A, Schwerzmann M, Sener B, Magalhães, AC, Roos M, Ziebolz D, Imfeld T, Attin T: Impact of toothpaste slurry abrasivity and toothbrush filament stiffness on abrasion of eroded enamel – an in vitro study. *Acta Odontologica Scandinavica* 2008; 66: 231–235.

Young A, Smistad G, Karlsen J, Rölla G, Rykke M: Zeta potentials of human enamel and hydroxyapatite as measured by the Coulter® DELSA 440. *Advances in Dental Research* 1997; 11: 560–565.

Zero DT: Dentifrices, mouthwashes, and remineralization/caries arrestment strategies. *BMC Oral Health* 2006; 6: 1-13.

## 9 Publikationen

Die Ergebnisse der vorliegenden Dissertation wurden in Teilen publiziert:

### **Toothpastes and enamel erosion/abrasion – Impact of active ingredients and the particulate fraction**

C. Ganss, J. Marten, A.T. Hara, N. Schlueter

Journal of Dentistry 2016; 54: S. 62-67

Des Weiteren wurden Teilaspekte der Ergebnisse der vorliegenden In-vitro-Studie auf der 61. Jahrestagung der European Organisation of Caries Research (ORCA) 2014 in Greifswald, Deutschland präsentiert und als Abstract publiziert:

### **Toothpastes with Special Active Agents and Abrasive Systems: Effects on Enamel Erosion/Abrasion (Abstract)**

O. Grunau, N. Schlueter, J. Marten, J. Klimek, C. Ganss

Caries Res 2014; 48: S. 420

80

### Risk Factors for Dental Erosion Development in Kindergarten Children Aged 2–5 Years

E. Tcherbakova, A. Rodionova\*, E. Maslak, V. Naumova, E. Bakhareva

asrodionova@bk.ru

Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia

**Aim:** To reveal risk factors for development of dental erosion in kindergarten children aged 2–5 years. A case-control study approved by the Volgograd Regional Ethics Committee was conducted to reveal potential risk factors for dental erosion in 2–5 year old kindergarten children in Krasnoarmeysky district, Volgograd, Russia. The study was arranged in randomly selected 18 of 54 kindergartens (33.3%) in Krasnoarmeysky district. 682 children aged 2–5 years attended these kindergartens. 159 of 682 children (23.3%) had dental erosion as were revealed in the previous study. The parents of 159 children with dental erosion were asked to fill in the questionnaire. The response rate was 53.3% (study group, n = 85). The control group was formed of randomly selected 159 parents of children without dental erosions (who attended the same kindergartens). The response rate was 20.1% (control group, n = 32). The control and study groups were comparable by age and gender of the children. The questionnaire consists of 42 questions about the parents (socio-demographic status) and their children (general health, allergic status, taking medicines, dietary habits, and oral hygiene practices). Mean (%), odds ratio (OR), 95% confidence interval (CI), chi-square ( $X^2$ ) test and p-value were calculated to analyze the data. **Results:** The children who consumed citrus fruit several times a day (OR = 1.136, CI 0.615–2.114,  $X^2$  = 0.085, p = 0.7705), citrus drinks (OR = 4.72, CI 2.437–10.047,  $X^2$  = 25.39, p < 0.0001), acid candies (OR = 1.5, CI 0.824–2.787,  $X^2$  = 1.62, p = 0.2031) and those who preferred vegetable marinades (OR = 2.88, CI 1.662–5.247,  $X^2$  = 1.620, p < 0.0001) had a stronger tendency to develop dental erosion. **Conclusion:** Frequent consumption of citrus fruit, citrus drinks, acid candies and vegetable marinades can be identified as risk factors for dental erosion development in 2–5 year old kindergarten children.

The authors would like to acknowledge the personnel of kindergartens for their help. Sources of funding: Volgograd State Medical University.

81

### Toothpastes with Special Active Agents and Abrasive Systems: Effects on Enamel Erosion/ Abrasion

O. Grunau\*, N. Schlueter, J. Marten, J. Klimek, C. Ganss

oliver.grunau@dentist.med.uni-giessen.de

Department of Conservative and Preventive Dentistry, Dental Clinic, Justus-Liebig-University, Giessen, Germany

There is still little known about the influence of overall toothpaste formulation and of abrasives as well as of the interaction between abrasion effect and active agents regarding the anti-erosive/

anti-abrasive effect. Aim of this study was to compare different types of toothpastes: four conventional (1450 ppm F), three hydroxy-apatite (with (1450 ppm F) and without F), four F/Sn-containing formulations (1000–1450 ppm F; 3000–4200 ppm Sn) and four formulations containing special abrasives, e.g. with the indication for interdental cleaning, for use with an powered toothbrush or for sensitive teeth (1400–1450 ppm F). The study was conducted in two experiments. In E1, enamel samples (17 groups, n = 15 each) were demineralised (10 days, 6x2 min/day; 0.5% citric acid, pH 2.6), exposed to toothpaste slurries (2x2 min/day) and intermittently stored in mineral salt solution. In E2, samples were additionally brushed for 15 s during slurry immersion time. Negative control was immersion/brushing with placebo (experimental F-free formulation). Substance loss was quantified profilometrically. Comparison of formulations within one experiment was performed with ANOVA/Tamhane's post hoc. Interaction between active ingredients and abrasive effects were analysed with a factorial ANOVA. Approximately half of non-Sn formulations reduced tissue loss significantly compared to placebo (E1:12.0±3.0 µm; E2:17.5±3.8 µm) between 36% and 51% in E1 and between 30% and 57% in E2. Between the non-Sn toothpaste types no distinct differences were found. The Sn-containing formulations were effective in both experiments (significant reductions between 48% and 77% in E1 and between 49% and 76% in E2). The comparison of the results of E1 and E2 showed that the increase of loss by abrasion was highly variable; a significant interaction between the active agent and the abrasive effect was found (p ≤ 0.001). In conclusion, additional to the active agents, the abrasive system of toothpastes seem to be an important aspect of anti-erosive toothpaste formulations.

This study was supported by Justus-Liebig-University Giessen.

82

### F/Sn Increases the Durability of an Adhesive Used as Erosion Sealant under Erosion-Abrasion Conditions

C. Gressbach\*, C. Ganss, N. Naguib Attia, J. Klimek, N. Schlueter

caroline.gressbach@dentist.med.uni-giessen.de

Department of Conservative and Preventive Dentistry, Dental Clinic, Justus Liebig University, Giessen, Germany

Adhesives can be used for sealing erosive lesions; however, clinical studies revealed limited efficacy. There is evidence that tin potentially increases bond strength of self-etching adhesives. Aim of the present study was to investigate whether the pre-treatment of dentine with different F/Sn solutions can increase the durability of adhesive sealings. Dentine specimens (eight groups, n = 16 per group) were freed of smear-layer (0.5% citric acid, 10 s), treated (15 s) either with none (control), amine fluoride (AmF, 500 ppm F<sup>-</sup>; pH 4.5), SnCl<sub>2</sub> (800/1600 ppm Sn<sup>2+</sup>; pH 1.5), SnCl<sub>2</sub>/AmF (500 ppm F<sup>-</sup>, 800 ppm Sn<sup>2+</sup>; pH 1.5/3.0/4.5) or elmex ErosionProtection mouthrinse (EP, 500 ppm F<sup>-</sup>, 800 ppm Sn<sup>2+</sup>, pH 4.5, GABA Int.), rinsed with tap water (30 s), gently air dried and individually covered with Clearfil™SE (Kuraray). Specimens were demineralised (0.5% citric acid, 2 min) and brushed automatically (15 s, 200 g, NaF-toothpaste, RDA 80) for 1320 cycles. One cycle was demineralisation (alternately 5°C/55°C), rinsing (tap water, 60 s),

420

Caries Res 2014;48:384–450  
DOI: 10.1159/000360836

Abstracts: 61th ORCA Congress

Downloaded by:  
108.91.38.222 - 6/15/2017 4:30:38 PM

## 10 Anhang

### 10.1 Ehrenwörtliche Erklärung

„Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe oder Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nichtveröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten sowie ethische, datenschutzrechtliche und tierschutzrechtliche Grundsätze befolgt. Ich versichere, dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, oder habe diese nachstehend spezifiziert. Die vorgelegte Arbeit wurde weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zweck einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt. Alles aus anderen Quellen und von anderen Personen übernommene Material, das in der Arbeit verwendet wurde oder auf das direkt Bezug genommen wird, wurde als solches kenntlich gemacht. Insbesondere wurden alle Personen genannt, die direkt und indirekt an der Entstehung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren. Mit der Überprüfung meiner Arbeit durch eine Plagiatserkennungssoftware bzw. ein internetbasiertes Softwareprogramm erkläre ich mich einverstanden.“

---

Gießen, 17.04.2019

---

Unterschrift

## **10.2 Danksagung**

Mein Dank gilt insbesondere Frau Prof. Dr. C. Ganß für die Überlassung des Themas dieser Dissertation und für die hervorragende Betreuung und Beratung bei der Erstellung.

In gleichem Maße danke ich Frau Prof. Dr. N. Schlüter, die mir ebenfalls stets mit Rat und Tat zur Seite stand.

Außerdem danke ich Prof. A. Hara (Oral Health Research Institute der Indiana University School of Dentistry (415 Lansing Street, Indianapolis, Indiana 46202-2876)) für die freundliche Erstellung und Überlassung der RDA- und REA-Werte.

Frau Birgit Meier danke ich für die tatkräftige Hilfe bei den Experimenten.

Hannes Voigts danke ich für die hilfreiche Unterstützung bei der grafischen Gestaltung der Arbeit.