

Effekte von Veränderungen der erosiven Bedingungen auf die Ergebnisse von Erosions-Abrasions-Studien

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

vorgelegt von Tolle, Alexandra
aus Wolfenbüttel

Gießen 2016

Aus dem Medizinischen Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Poliklinik für Zahnerhaltungskunde und Präventive Zahnheilkunde
Kommissarischer Direktor: Prof. Dr. Bernd Wöstmann
der Justus-Liebig Universität Gießen

Gutachter: Prof. Dr. Nadine Schlüter

Gutachter: PD Dr. Peter Rehmann

Tag der Disputation: 16.09.2016

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
1 Einleitung	1
2 Material und Methode	12
2.1 Probenherstellung	13
2.2 Lösungen	14
2.2.1 Demineralisationslösungen	14
2.2.2 Mineralsalzlösungen	14
2.2.3 Marktprodukte / Zahnpastensuspensionen	15
2.3 Versuchsdurchführung	16
2.4 Bestimmung des Substanzverlustes	20
2.5 Ergebnisse der Konstanzmessungen	23
2.6 Statistik	24
2.7 Material- und Chemikalienliste	26
2.7.1 Materialliste	26
2.7.2 Chemikalienliste	27
2.7.3 Inhaltsstoffe der verwendeten Produkte	28
3 Ergebnisse	29
3.1 Kontrollgruppen	30
3.2 Modelle mit 1%iger und 0,5%iger Zitronensäure	33
3.3 Modelle mit 0,3%iger Zitronensäure	39
3.4 Effekte der Mineralsalzkonzentration in den Zahnpastensuspensionen	41
4 Diskussion	45
4.1 Probenmaterial	45
4.2 Messmethode	48
4.3 Erosives Medium	52
4.3.1 Art der Säure in der Demineralisationslösung	52
4.3.2 Konzentration und pH-Wert der Demineralisationslösungen	53
4.3.3 Bewegungsform der Demineralisationslösung	54
4.4 Marktprodukte	56
4.4.1 Wirkstoff	56
4.4.2 Abrasivität	57
4.5 Diskussion der Ergebnisse	60

4.5.1	Diskussion der Kontrollgruppen	60
4.5.2	Diskussion der Gruppen mit wirkstoffhaltigen Suspensionen.....	70
4.6	Einfluss der Mineralsalzkonzentration in den Zahnpastensuspensionen.....	80
5	Schlussfolgerung und Ausblick	84
6	Zusammenfassung	89
7	Summary	92
8	Literaturverzeichnis.....	95
9	Anhang	111
9.1	Übersicht zur Literaturrecherche.....	111
9.1.1	Übersicht über Studiendesign, Substrat, Behandlung, erosives Medium und Schüttelbewegung	111
9.1.2	Übersicht über Produkte, Wirkstoff, Abrasivität, Slurry, Putzdruck.....	121
9.1.3	Übersicht über Probenlagerung, Messmethode und Referenzfläche.....	128
9.1.4	Übersicht über Substanzverluste, Zyklus, Gesamterosion sowie Gesamtabrasion.....	135
9.1.5	Übersicht über zusätzliche Informationen und Ergebnisse.....	145
9.1.6	Verzeichnis der in der Übersicht zur Literaturrecherche verwendeten Abkürzungen	156
9.2	Erklärung zur Dissertation	157

1 Einleitung

Dentale Erosionen sind säurebedingte Zahnhartsubstanzverluste, die ohne den Einfluss von Mikroorganismen entstehen [Pindborg, 1970]. Sie können durch die chronische Einwirkung extrinsischer [Zero, 1996] oder intrinsischer Säuren [Scheutzel, 1996] auf die Zahnoberfläche verursacht werden [Meurman und tenCate, 1996]. Die Daten zur Prävalenz von Erosionen schwanken je nach Studiendesign und verwendeten Indizes. So zeigten in einer deutschen Studie mit Kindergartenkindern zwischen 2 und 7 Jahren 32% der Kinder Erosionen [Wiegand et al., 2006b]. In einer weiteren Studie lagen erosive Defekte an mindestens einem Zahn im Milchgebiss bei 70% bzw. im bleibenden Gebiss bei 12% der untersuchten Kinder zwischen 8 und 18 Jahren vor [Ganss et al., 2001]. Die Prävalenz von Erosionen bei Erwachsenen im Alter zwischen 18 und 88 Jahren liegt je nach Studie zwischen 4 und 82% [Lussi und Jaeggi, 2009].

Erosionen sind irreversible Zahnhartsubstanzverluste. Sie beginnen an der Schmelzoberfläche. Erosionen treten auf plaquefreien Bereichen auf. Kommt es durch chronische Säureeinwirkung zu Erosionen, so ist das erste klinische Anzeichen der Verlust des für den Schmelz typischen Oberflächenglanzes. Bei weiterer Einwirkung der Säuren können flächenhafte Verluste der Zahnhartsubstanz resultieren. Diese sind in ihrer Ausdehnung zumeist breiter als tief und setzen sich zentripetal fort. Meist verbleibt ein intakter Schmelzbereich entlang des Gingivasaumes. Eine mögliche Erklärung liefert die Hypothese, dass Säuren dort aufgrund von Plaque und/oder Sulkusflüssigkeit kaum demineralisierend auf den Schmelz wirken können. Okklusal werden zunächst muldenförmige Defekte auf den Höckerspitzen manifest. Später können Ränder von Restaurationen über das Zahnhartsubstanzniveau erhaben sein und das Höcker-Fissuren-Relief kann eingeebnet werden. Wenn die Schmelzerosionen entsprechend weit fortgeschritten sind, kann es zur Dentin- oder sogar zur Pulpenexposition kommen [Lussi und Jaeggi, 2008; Lussi et al., 2011].

Der Schmelz ist die am stärksten mineralisierte Substanz des menschlichen Körpers. Er besteht zu 95 Gewichtsprozent aus Mineral. Der mineralische Anteil des Schmelzes besteht hauptsächlich aus Kalzium und Phosphat und liegt vorwiegend als Hydroxylapatit vor. Das größtenteils an Apatitkristalle gebundene Wasser beträgt 4 Gewichtsprozent. Die organische Matrix macht lediglich 1 Gewichtsprozent aus und setzt sich aus Proteinen, Kohlenhydraten und Lipiden zusammen. Während der Schmelzbildung sezernieren die Ameloblasten eine Schmelzmatrix, die zu Kristalliten mineralisiert. Durch die Anordnung dieser Kristallite zueinander entstehen Schmelzprismen. Die meisten Kristallite sind parallel zueinander angeordnet. Dieser Anteil wird als prismatischer Schmelz bezeichnet. Die in ihrer Richtung davon abweichenden Kristallite gehören ebenso zu dem Schmelzprisma und werden interprismatischer Schmelz genannt [Radlanski, 2011].

Erosive Veränderungen beeinflussen nicht nur das klinische Erscheinungsbild der Zahnhartsubstanzen, sondern bewirken auch ein typisches pathohistologisches Bild. Die initiale erosive Schmelzläsion ähnelt histologisch dem aus der adhäsiven Füllungstherapie bekannten retentiven Ätzmuster [Meurman und tenCate, 1996]. Wird die Zahnoberfläche einer Säure ausgesetzt, können die H^+ -Ionen dieser Säure durch das Kristallwasser zu der Kristalloberfläche diffundieren. Dort lösen die Protonen durch Bindung an die Karbonat- oder Phosphat-Ionen diese aus dem Hydroxylapatit heraus. Es kommt zur Demineralisation der Oberfläche. Diese wird durch die H^+ -Ionen direkt angeätzt. So werden die an der Prismenoberfläche befindlichen Kristalle im Gegensatz zu den intraprismatrisch liegenden Kristallen vermehrt aufgelöst und das Ätzmuster entsteht [Eisenburger et al., 2004]. Bei Erosionen handelt es sich also um einen Mineralverlust direkt an der Oberfläche. Im Gegensatz dazu verbleibt bei initialkariösen Läsionen eine pseudointakte Oberflächenschicht, unter der der Mineralverlust voranschreitet. Durch diese Oberflächenschicht wird eine Remineralisierung der darunter befindlichen demineralisierten Strukturen ermöglicht. Eine erosive Läsion hat eine solche pseudointakte Oberflächenschicht nicht, so dass eine Remineralisation der demineralisierten Anteile nicht möglich ist. Durch die Demineralisierung wird die Mikrohärtigkeit der Oberfläche verringert. Dadurch ist diese äußere Schicht anfälliger für

mechanisch bedingte Zahnhartsubstanzverluste [Voronets et al., 2008; Eisenburger et al., 2000; Jaeggi und Lussi, 1999].

Zu diesen mechanisch bedingten Zahnhartsubstanzverlusten gehören die durch Interaktionen von Zähnen mit anderen Materialien verursachten Abrasionen [Addy und Shellis, 2006]. Diese Interaktionen können mit Gegenständen, Nahrungsmitteln oder Mundhygieneartikeln stattfinden. Die dadurch entstandenen Abrasionen können je nach auslösender Noxe sowohl von der Lokalisation als auch von der Morphologie stark variieren. So können Habits wie beispielsweise das dauerhafte Halten einer Pfeife, von Nägeln oder Nadeln zwischen den Zähnen zu sogenannten Usuren führen. Durch ein Patientengespräch kann die Ursache dieser meist in der Front lokalisierten Abrasionen häufig schnell gefunden werden. Durch Nahrungsmittel verursachte Abrasionen werden als Demastikation bezeichnet. Der dabei auftretende Zahnhartsubstanzverlust ist auf den Okklusalfächen lokalisiert [Ganss et al., 2002]. Dagegen sind durch Mundhygieneartikel verursachte Abrasionen in Form von Putzdefekten auf nicht erosiv veränderten Zähnen eher vestibulär zu diagnostizieren [Orchardson und Collins, 1987].

Normalerweise verursachen die meisten Zahnpasten auf nicht erosiv verändertem Schmelz bei bestimmungsgemäßem Gebrauch während der Mundhygiene keine oder nur geringe Substanzdefekte [Hunter et al., 2002]. Hat jedoch eine erosive Demineralisation stattgefunden, können in diesen Bereichen auch durch normale Mundhygienemaßnahmen zusätzliche Substanzverluste auftreten [Addy und Shellis, 2006]. Die Interaktion zwischen abrasiven Prozessen und erodierten Zahnhartgeweben scheint die Hauptursache für okklusal und zervikal lokalisierte Zahnhartsubstanzverluste zu sein. Die der Oberfläche zugewandten Enden der Schmelzkristalle sind durch vorangegangene Demineralisationsprozesse dünner und dadurch für mechanische Einflüsse anfälliger [Addy und Shellis, 2006]. Dabei können diese geschwächten Schmelzanteile bereits durch Bürstvorgänge ohne Zahnpasten abradert werden. Diese durch die Zahnbürste alleine verursachten Substanzverluste sind allerdings sehr gering [Voronets und Lussi, 2010], so dass sie vernachlässigbar zu sein scheinen. Wie sehr die Abrasivität einer Zahnpaste einen zusätzlichen Substanzverlust auf erosiv verändertem Schmelz begünstigt, wird in der Literatur zwar kontrovers diskutiert [Turssi et al., 2004;

Wiegand et al., 2008d]. Allerdings zeigt die aktuelle Studienlage, dass generell die Verwendung einer Zahnpaste ein relevanter Faktor ist, von dem die Höhe des zusätzlichen abrasiven Zahnhartsubstanzverlustes beeinflusst wird (s. Anhang 9.1).

Grundsätzlich soll aus kariesprotektiven Gründen nicht auf fluoridhaltige Präparate bei der Mundhygiene verzichtet werden. Ganz unabhängig davon ist aber zusätzlich die Auswahl von geeigneten Mundhygieneprodukten besonders für Patienten mit Erosionen ein wichtiges Thema. Sind erosive Defekte im Schmelz manifest, sollen die angewendeten Produkte das weitere Voranschreiten der Erosionen minimieren, im besten Fall sogar verhindern sowie die Anfälligkeit der verbleibenden Zahnhartsubstanz für abrasiv bedingte Zahnhartsubstanzverluste reduzieren. Mundhygieneprodukte mit der Indikation Erosion sollen also eine gute antierosive Wirkung aufweisen und dabei die erosiv-abrasiven Effekte möglichst gering halten.

In vielen Erosions-Abrasions-Studien kommen fluoridhaltige Präparate bei Versuchen mit Schmelzproben zur Anwendung. Da es sich bei Erosionsläsionen am Schmelz um Verluste der Oberflächenschicht handelt, ist es das Ziel zahlreicher Therapieoptionen, eine weitere Demineralisation der Oberfläche durch die Etablierung von Schutzschichten zu unterbinden. Grundsätzlich gibt es mehrere Möglichkeiten solche Schutzschichten zu generieren. Ein Ansatz ist das Abdecken mit Kompositen. Jedoch ist die Haltbarkeit sowohl von Adhäsiven als auch von Fissurenversiegelungsmaterialien, appliziert auf Erosionsdefekten, mit drei respektive neun Monaten eher als gering einzustufen [Sundaram et al., 2007; Bartlett et al., 2011]. Zudem ist eine regelmäßige, engmaschige Kontrolle zwingend notwendig, um gelöste oder defekte Anteile rechtzeitig erneuern zu können. Für den Patienten ist es erstrebenswert andere Strategien zu verfolgen, die von solchen Kontrollen unabhängig sind. Biopolymere haben beispielsweise das Potential Schutzschichten zu bilden. Allerdings ist die Studienlage zu der klinischen Verwendung von Biopolymeren bei erosiven Zahnhartsubstanzdefekten noch gering und es gibt noch keine mittelfristigen oder Langzeiterfahrungen. Es sind erste Mundhygieneprodukte mit Biopolymeren auf dem Markt erhältlich. Besonders in Kombination mit

polyvalenten Fluoridverbindungen scheinen diese Produkte vielversprechend zu sein [Ganss et al., 2012].

Allgemein ist die Anwendung fluoridhaltiger Mundhygieneprodukte sowohl in Form von Zahnpasten als auch von Mundspüllösungen eine sinnvolle Therapiemaßnahme zum Schutz der Zahnoberflächen gegen erosive Einflüsse. Nach der Anwendung der meisten Fluoride, wie Natriumfluorid (NaF) oder Aminfluorid (AmF), kommt es zur Ausbildung einer Schutzschicht, die säurelöslich ist und somit erst durch eine hochfrequente Anwendung der Produkte protektive Wirkung zeigt. Bei Verwendung von herkömmlichen fluoridhaltigen (NaF) Zahnpasten bilden sich kalziumfluorid-ähnliche Deckschichten. Die Dicke dieser Deckschichten hängt unter anderem von der Fluoridkonzentration und dem pH-Wert in dem verwendeten Produkt, sowie von der Applikationsdauer ab [Saxegaard und Rolla, 1988]. Aber auch die Art der Fluoridverbindung hat einen wesentlichen Einfluss auf die entstehende Deckschicht und deren Säureresistenz [Ganss et al., 2008]. Monovalente Fluoridverbindungen, wie etwa NaF, führen zur Bildung einer leicht säurelöslichen Deckschicht. Ganz anders stellen sich hingegen die Präzipitate dar, die durch Anwendung von polyvalenten Fluoridverbindungen, wie etwa Zinn in Kombination mit Fluorid, entstehen. Sie zeigen eine erhebliche Säureresistenz [Ganss et al., 2007b; Ganss et al., 2008]. In der vorliegenden Arbeit wurden daher Mundhygieneprodukte mit unterschiedlichen Fluoridverbindungen verwendet. Ein Präparat enthielt monovalente Fluoridverbindungen in Form von Natriumfluorid, ein anderes Präparat enthielt polyvalente Fluoridverbindungen in Form von Zinnfluorid und ein weiteres wirkstoffhaltiges Präparat enthielt diese beiden Wirkstoffe in Kombination.

In-vitro-Studien sind die häufigsten Studienmodelle für Erosions- und Erosions-Abrasions-Studien. Sie helfen, ein besseres Verständnis für die Wirkungsmechanismen von Präparaten zu entwickeln.

Die Vorteile von in-vitro-Studien sind die gute Möglichkeit zur Standardisierung, die Steuerung der Parameter und der Ausschluss von probandenabhängigen Faktoren [West et al., 2011], wie sie in in-situ-Studien vorzufinden sind. Dagegen können beispielsweise die erosionsprotektiven und wirkstoffmodifizierenden Eigenschaften des Speichels und der Schutz durch

das auf der Zahnoberfläche anhaftende Pellikel in vitro nicht ausreichend nachgestellt werden [Young und Tenuta, 2011].

Es gibt viele Parameter, die einen Einfluss auf die Ergebnisse von in vitro und auch in situ Studien haben. So zeigten sich beispielsweise in zwei Erosions-Abrasions-Versuchen Unterschiede in der Höhe der Substanzverluste in Abhängigkeit von der Ausrichtung der Proben (parallel oder senkrecht zur Lösungsoberfläche) bei linearen Bewegungen der Demineralisationslösung unter ansonsten identischen Bedingungen [Ganss et al., 2011]. Da selbst auf den ersten Blick wenig relevante Faktoren in der Modellation des Versuchsaufbaus großen Einfluss auf die Ergebnisse haben können, ist die Standardisierung von Studienmodellen ein besonders wichtiger Aspekt.

Bei einer PubMed-Suche vom Oktober 2013, die die Jahre 1960 – 2013 einschloss, mit den Suchbegriffen „dental“, „erosion“, „abrasion“ und „enamel“ sowie optional zusätzlich mit dem Suchbegriff „in vitro“ wurden insgesamt 226 Artikel gefunden. Es wurden 62 in vitro, in situ und kombinierte in vitro/in situ Studien, die den Einfluss von Abrasionen in Kombination mit Erosionen untersuchen, erfasst (9.1, Anhang). Retrospektiven, Reviews und ähnliche Artikel sowie Studien, die einen anderen Schwerpunkt als Erosion und/oder Abrasion aufzeigten, wurden ausgeschlossen.

Insgesamt zeigt sich eine hohe Variationsbreite der Studienmodelle und -parameter (9.1, Anhang). In der Tabelle wurde aufgelistet, welches Substrat als Probenmaterial und welches erosive Medium verwendet wurden. Es wurde notiert, ob die Behandlungen unter erosiven und/oder abrasiven sowie unter statischen oder dynamischen Bedingungen stattfanden, wie der Ablauf in zyklischen Versuchsmodellen eingeteilt wurde, die sich daraus ergebende Gesamtdauer für Erosion sowie Abrasion und wie die Proben zwischen den Behandlungen gelagert wurden. Auch wurden die verwendeten wirkstoffhaltigen Produkte beziehungsweise die angegebenen Wirkstoffe verzeichnet. Bei Verwendung von Zahnpasten wurden die Abrasivität, soweit diese bekannt war, und die Lösung zur Herstellung sowie das Mischungsverhältnis der verwendeten Zahnpastensuspension vermerkt. Die verwendeten Messmethoden und die jeweiligen Referenzflächen sowie die

Substanzverluste der Proben wurden notiert. Die Ergebnisse der jeweiligen Studie wurden in Stichpunkten zusammengefasst.

In den folgenden Absätzen werden die Schwankungsbreiten dieser Parameter entfaltet. Dabei wird auf einzelne Literaturangaben der Übersichtlichkeit halber verzichtet und an dieser Stelle auf die Tabelle im Anhang 9.1 verwiesen.

Zu den 62 eingeschlossenen Studien zählten sechs in situ Studien, 17 kombinierte in vitro/in situ Studien und 39 in vitro Studien. In 21 dieser Studien wurden bovine, in vier Studien sowohl bovine als auch humane Schmelzproben verwendet. In 14 Studien wurden zusätzlich zu Schmelz- auch Dentinproben untersucht. In 39 Studien erfolgte ein Vergleich von Erosions-Abrasions- mit reinen Erosionsbehandlungen, in vier Studien fand gar keine Abrasion statt.

Die Proben wurden entweder durch Getränke oder durch synthetische Säuren demineralisiert. Bei den Getränken handelte es sich entweder um Limonaden mit einem pH-Wert zwischen 2,3 und 3,0 oder um Säfte mit einem pH-Wert zwischen 2,2 und 4,0. In einer Studie wurde Grapefruitsaft mit einem pH-Wert von 7,0 verwendet. Bei den synthetischen Säuren wurde überwiegend Zitronensäure mit einer Konzentration zwischen 0,3 und 6,0% und einem pH-Wert zwischen 2,3 und 4,0 verwendet. In vier Studien wurden die Proben mit Salzsäure in einer Konzentration zwischen 0,0025 und 0,01 mol/L und einem pH-Wert zwischen 2,1 und 2,6 demineralisiert. In einer Studie wurde 30%ige Phosphorsäure mit einem pH-Wert von 1,4 verwendet.

Die Temperatur der Demineralisationslösung betrug in den Studien zwischen 20°C und 37°C, meistens wurde jedoch keine Angabe gemacht. Auch die Bewegung der Lösung wurde häufig nicht angegeben. In einigen Studien fand die Demineralisation ohne Bewegung (statisch) statt, teilweise floss die Lösung mit einer Fließrate von 60µL/min bis 5mL/min über die Proben. Bei einer dynamischen Demineralisation fand die Bewegung bei 35 bis 270 Umdrehungen oder Bewegungen pro Minute statt, wobei die Form der Bewegung meist nicht angegeben wurde. Die Gesamtdemineralisationszeit betrug zwischen 30 Sekunden und 60 Stunden.

Die verwendeten Mundhygieneprodukte waren sowohl handelsübliche als auch experimentelle Formulierungen in Form von Zahnpasten, Gelen, Lacken oder Mundspüllösungen. Überwiegend wurden fluoridhaltige Produkte, häufig mit Natrium- oder Aminfluorid, verwendet, wobei die Konzentrationen zwischen Mundspüllösungen mit 250 ppm Fluorid und Lacken mit bis zu 45.200 ppm Fluorid divergieren. In neun Studien wurden Formulierungen mit Metallionen, meist Zinn- oder Titanverbindungen, untersucht. Teilweise wurden wirkstofffreie Formulierungen verwendet. In einigen Studien wurde die Abrasivität der Zahnpasten angegeben. Dabei lagen die REA-Werte zwischen 2 und 9 und die RDA-Werte zwischen 30 und 189. Die RDA-Werte von abrasivstofffreien Gelen lagen zwischen 7 und 21. In sieben Studien wurden die Produkte unvermischt verwendet. In den meisten Studien wurden die Produkte zu einer Suspension mit Remineralisationslösung, künstlichem Speichel oder destilliertem Wasser im Verhältnis 2:1 bis 1:10, überwiegend 1:3 (Zahnpaste : Flüssigkeit) angemischt. Bei den Bürstvorgängen wurde ein Putzdruck von 20 bis 400 g aufgewendet. Die Gesamtdauer von Abrasionseinflüssen betrug je nach Angabe zwischen 20 und 144.000 Bürststrichen oder zwischen 30 Sekunden und 56 Minuten.

Die meisten Studien waren zyklisch angelegt. Dabei können zwei Varianten unterschieden werden. Entweder dauerte ein Zyklus einen Tag und die Studie 2 bis 25 Tage oder es wurden zwischen 3 und 60 Zyklen, in einer Studie sogar 720 Zyklen, ohne Unterbrechung durchgeführt. In den Zyklen wurden die Proben häufig zwischenzeitlich in einer remineralisierenden Lösung gelagert. Dabei handelte es sich entweder um eine Mineralsalzlösung mit oder ohne Enzyme, künstlichen Speichel mit oder ohne Puffer, Glukose oder Enzyme, gepoolten Speichel oder die Proben wurden in in situ Studien intraoral getragen.

Die Substanzverluste wurden überwiegend nach Beendigung der Versuche durch unterschiedliche Messmethoden quantifiziert und/oder qualifiziert, in einzelnen Studien wurden auch Verlaufsmessungen durchgeführt. Die verwendeten Messmethoden waren die optische, ohne Kontakt arbeitende, und die mechanische, unter Kontakt arbeitende, Profilometrie, die Bestimmung der Oberflächenhärte durch die Mikrohärtmessung oder die Nanoindentation, die

Rasterelektronenmikroskopie, verschiedene Arten von Elementanalysen und die Mikroradiographie. Die für die Messungen notwendigen Referenzflächen wurden häufig durch Abdecken oder Abkleben eines Teils der Probenoberfläche mit Nagellack, lichthärtendem Kunststoff, Klebebändern oder anderen Materialien generiert. In einigen Studien wurden die Referenzflächen durch Keramik- oder Edelstahlringe gestellt.

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass schon bei Studien, die ähnliche Modelle anwenden, eine große Variationsbreite bei vielen Parametern vorliegt. Häufig sind Angaben zu Geräteeinstellungen und Durchführungen unzureichend oder gar nicht aufgeführt. Durch diese Vielzahl an unterschiedlichen Modellvarianten sind viele Studien nicht miteinander vergleichbar. So ist es nicht nur schwierig, die Ergebnisse aus in-situ-Studien mit denen aus in-vitro-Studien zu vergleichen.

Die vielen in-vitro-Studien zum Thema Erosion/Abrasion unterscheiden sich teilweise sowohl hinsichtlich der verwendeten Materialien als auch der angewandten Methodik. Es gibt Übersichtsarbeiten, die auf einige Unterschiede in den Versuchsaufbauten und -durchführungen eingehen [Young und Tenuta, 2011; Wiegand und Attin, 2011; Huysmans et al., 2011]. In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss der Parameter pH-Wert, Konzentration und Schüttelart der Demineralisationslösung sowie Mineralgehalt der Lösung zum Anmischen der Suspensionen auf die Ergebnisse von Erosions-Abrasions-Studien sowie auf den Wirkstoffeffekt und den antierosiven/antiabrasiven Effekt einiger Marktprodukte systematisch untersucht. Zwar liegen für einige Parameter bereits Untersuchungen vor. So wurde in einer Studie durch kontrollierte Modellation der Bürstparameter (Putzdruck, Temperatur während des Bürstens sowie Bürstgeschwindigkeit) bei Verwendung unterschiedlicher Abrasivstoffe (Kalziumkarbonat, Kalziumpyrophosphat, präzipitierte Silikate) ein neues in-vitro-Modell zur Untersuchung der Abrasivität von Zahnpasten erstellt [Parry et al., 2008]. Der Einfluss des erosiven Mediums auf die Höhe des Zahnhartsubstanzverlustes durch Konzentration, pH-Wert, Temperatur, Demineralisationszeit oder Pufferkapazität wurde in mehreren Studien genauer betrachtet [West et al., 2000; Shellis et al., 2010; Barbour et al., 2003; Barbour und Shellis, 2007; Cairns et al., 2002; Cochrane et al., 2012]. Auch wurde der

Einfluss der Fließgeschwindigkeit beziehungsweise der Fließrate der Demineralisationslösung untersucht [Attin et al., 2012; Eisenburger und Addy, 2003; Wiegand et al., 2007a]. In den meisten Arbeiten wurde allerdings nur untersucht, welche Auswirkung das Verändern eines einzelnen Parameters auf die Ergebnisse von Erosions- oder Erosions-Abrasions-Studien hat. Das Zusammenwirken von Veränderungen unterschiedlicher Parameter und deren gegenseitige Beeinflussung wurden jedoch bisher nicht umfangreich betrachtet.

Daher war das Ziel dieser Studie, die Effekte von Veränderungen erosiver Bedingungen auf die Ergebnisse von Erosions- sowie Erosions-Abrasions-Studien im Schmelz darzustellen. Unter anderem wurde untersucht, welchen Einfluss die Konzentration der Demineralisationslösung auf die erosiven sowie erosiv-abrasiven Schmelzverluste hat. In der vorliegenden Arbeit wurde zur Demineralisation der Proben Zitronensäure verwendet. Dabei fand die Demineralisation entweder auf einer Schüttelplatte oder in einem Wasserbad statt. Dadurch wurde zusätzlich der Einfluss der Schüttelart auf die Höhe der Substanzverluste untersucht. Anhand von vier verschiedenen Mundhygieneprodukten, einer fluoridfreien sowie drei wirkstoffhaltiger Formulierungen, wurde der Einfluss der veränderten Parameter auf die erosiv-abrasiven Substanzverluste untersucht. Die Produkte wurden in Form von Suspensionen (Slurries), gemischt aus Mineralsalzlösung und Zahnpaste/-gel, angewendet, um mögliche Wirkungseffekte darzustellen. Zusätzlich wurde ein Teil der Proben während der Behandlung mit diesen Suspensionen gebürstet. Dadurch wurde untersucht ob oder wie sich die Wirkungseffekte unter abrasiven Bedingungen in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Parametern verändern. In einem anschließenden Experiment wurde untersucht, ob die Mineralsalzkonzentration in der Lösung zum Anmischen der Suspensionen einen Einfluss auf die Wirkungseffekte unter erosiven sowie erosiv-abrasiven Bedingungen aufweist. Es sollte untersucht werden, ob es möglich ist, durch veränderte Versuchsbedingungen die Wirkungseffekte und die Abrasionseffekte deutlich differenziert darzustellen.

Dadurch könnte die Voraussage von Effekten verbessert und die Wirkung mit geeigneten Versuchsmodellen besser dargestellt werden. Dies könnte zur Entwicklung von Modellen führen, die zwischen verschiedenen Effekten

diskriminieren und eventuell genauere Vorhersagewerte für die Wirkung in situ oder sogar in der klinischen Situation bieten könnten.

2 Material und Methode

Die vorliegende Studie bestand aus drei Versuchen. Dabei wurde anhand mehrerer Parameter deren Einfluss auf die Ergebnisse von Erosions- und Erosions-Abrasions-Studien an humanem Schmelz untersucht. Die Schmelzproben wurden mit Zitronensäuren unterschiedlicher Konzentrationen demineralisiert. In Versuch 1 (V1) fand die Demineralisation in einem Wasserbad (WB) statt. In Versuch 2 (V2) wurden die Proben auf einer Schüttelplatte (SP) demineralisiert. Dadurch wurde untersucht, ob die Art der Schüttelbewegung des erosiven Mediums einen Einfluss auf die Höhe des Zahnhartsubstanzverlustes hat. Diese beiden Versuche bestanden aus jeweils vier Experimenten (E1.1 – E1.4 und E2.1 –E2.4), in denen Zitronensäuren in vier unterschiedlichen Konzentrationen zur Provokation der Erosion verwendet wurden. Zusätzlich wurde der Einfluss von drei unterschiedlichen Zahnpasten und einem Gel auf erodierten Schmelz hinsichtlich ihrer Wirkstoff- und ihrer Abrasionseffekte, also auf ihre antierosive und auf ihre antierosive/antiabrasive Wirkung hin untersucht. Dazu wurden in jedem der Experimente Suspensionen aus den vier Mundhygieneprodukten und Mineralsalzlösung hergestellt. Die eine Hälfte der Proben wurde ausschließlich mit diesen Suspensionen behandelt, die andere Hälfte der Proben wurde während der Zahnpastenbehandlung zusätzlich gebürstet. Eine dieser vier Zahnpasten enthielt keinen Wirkstoff (fluoridfrei) und diente als Kontrollzahnpaste. Entsprechend gab es in jedem Experiment zwei mit fluoridfreier Zahnpaste behandelte Kontrollgruppen (gebürstet und ungebürstet). Zusätzlich wurde in jedem Experiment eine Probengruppe mitgeführt, die nur demineralisiert und keiner Zahnpastenbehandlung unterzogen wurde. Diese Gruppe stellte die Negativkontrollgruppe dar. So gab es in jedem Experiment drei Kontrollgruppen.

Da sich Auflagerungen gebildet haben, wurde in einem dritten Versuch (V3) die Konzentration der Mineralsalzlösung, die zum Anmischen der Zahnpastensuspensionen verwendet wurde, verändert. Dadurch wurde deren Einfluss auf die Effekte der Zahnpasten in Anwesenheit einer schwachen Säure dargestellt.

2.1 Probenherstellung

Für die Versuche wurden Schmelzproben aus menschlichen, vollständig retinierten dritten Molaren gewonnen. Die Zähne wurden bis zur Verwendung in gesättigter Thymol-Lösung (Chem. 1) aufbewahrt. Zunächst wurden von den Zähnen die Wurzeln entfernt. Anschließend wurde der äußere Schmelzmantel in einer Dicke von etwa 1 mm abgetrennt (Mat. 1). Die natürliche Oberfläche der Schmelzproben wurde mit Schleifpapier der Körnung P 1200 (Mat. 2) um etwa 200 µm reduziert und plangeschliffen. Mit Schleifpapier der Körnung 3 µm (Mat. 3) wurde die Oberfläche poliert (Mat. 4). Es entstand eine Probenoberfläche mit einer Größe von ungefähr 3 mm x 3 mm. Alle Trenn- und Schleifvorgänge wurden unter ausreichender Wasserkühlung (50 mL/min) durchgeführt.

Die Proben wurden unter einem Stereomikroskop (Mat. 5) bei zehnfacher Vergrößerung auf Risse und Verunreinigungen kontrolliert. Anschließend wurden die Proben mit einem optischen Oberflächenmessgerät (Mat. 6) auf ihre Planheit vermessen. Die maximale Abweichung von der Planheit betrug $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

Insgesamt wurden so 1780 Schmelzproben hergestellt. Sowohl für Versuch 1 (Schüttelplatte) als auch für Versuch 2 (Wasserbad) wurden jeweils 720 Schmelzproben hergestellt. Diese wurden auf 36 Gruppen aufgeteilt. Für den Versuch, in dem die Zahnpastensuspensionen mit unterschiedlich konzentrierten Mineralsalzlösungen angemischt wurden (V3), wurden 340 Schmelzproben hergestellt und auf 17 Gruppen aufgeteilt ($n=20$ pro Gruppe).

Die Schmelzproben wurden mit einem lichthärtenden Kunststoff (Mat. 7) entsprechend ihrer Gruppenzuordnung auf Probenträger geklebt, die zu einer Bürstmaschine gehören. Die Probenoberfläche wurde zur Hälfte mit dem lichthärtenden Kunststoff abgedeckt. Diese abgedeckte Hälfte diente als Referenzfläche. Die nicht abgedeckte Hälfte stellte die Versuchsfläche dar.

Bis zur weiteren Verwendung wurden die Proben bei 100% Luftfeuchtigkeit im Kühlschrank aufbewahrt.

2.2 Lösungen

2.2.1 Demineralisationslösungen

Für die Demineralisation der Proben wurden in den Versuchen 1 und 2 Zitronensäuren (Chem. 2) unterschiedlicher Konzentration und unterschiedlicher pH-Werte verwendet (Tab.1).

Tab. 1: Auflistung der in den Versuchen verwendeten Zitronensäuren. Angegeben ist die Menge an Zitronensäure-Monohydrat pro Liter destilliertem Wasser, die daraus resultierenden Konzentrationen sowie die pH-Werte.

	<i>Konzentration</i>	<i>pH-Wert</i>	<i>Zitronensäure Monohydrat [g/L]</i>
<i>Säure 1</i>	1%	2,3	10
<i>Säure 2</i>	0,5%	2,5	5
<i>Säure 3</i>	0,3%	2,8	3
<i>Säure 4</i>	0,3%	3,6	3 (+ NaOH ad pH 3,6)

Die pH-Werte der Zitronensäuren für die Säuren 1-3 ergaben sich als native Werte zu den entsprechenden Konzentrationen. Für die Säure 4 wurde der pH-Wert der Zitronensäure durch Zugabe von Natronlauge (NaOH) (Chem. 3) auf einen Wert von 3,6 adjustiert (Mat. 8).

Für den Versuch 3 wurde nur die 0,3%ige Zitronensäure mit nativem pH-Wert (Säure 3) verwendet.

2.2.2 Mineralsalzlösungen

Für die Lagerung der Proben in den Versuchen 1 und 2 wurde eine Mineralsalzlösung mit einem pH-Wert von 6,7 verwendet. Die Mineralsalzlösung enthielt 4,08 mmol H_3PO_4 (Chem. 4), 11,90 mmol NaHCO_3 (Chem. 5), 20,10 mmol KCl (Chem. 6) und 1,98 mmol CaCl_2 (Chem. 7).

Dazu wurden 0,4 g H_3PO_4 in 40 mL destilliertem Wasser (Aqua dest.), 1,5 g KCl in 100 mL Aqua dest. und 1 g NaHCO_3 in 100 mL Aqua dest. gelöst. Die Lösungen wurden zusammengegeben und bis zu einem Volumen von 600 mL mit Aqua dest. aufgefüllt. Anschließend wurden 0,2 g CaCl_2 in 100 mL Aqua

dest. gelöst und unter Rühren (Mat. 9 und 10) zu der Lösung hinzugefügt. Die Lösung wurde mit Aqua dest. auf 1 L aufgefüllt und anschließend wurde der pH-Wert gemessen (pH 6,7) [Gerrard und Winter, 1986].

2.2.3 Marktprodukte / Zahnpastensuspensionen

In den Versuchen wurden drei verschiedene Zahnpasten und ein Gel verwendet (Tab. 2). Zur Vereinfachung wird im Folgenden auch das Gel als Zahnpaste benannt.

Tab. 2: Darstellung der in den Versuchen verwendeten Produkte. Diese unterschieden sich in ihren Wirkstoffen, ihrer Abrasivität und dem pH-Wert ihrer Suspension.

<i>Produktname</i>	<i>pH-Wert der Suspension</i>	<i>Wirkstoff</i>	<i>RDA</i>
Pro-Expert Zahnfleischschutz (Mat. 11)	6,0	SnF ₂ , NaF	119
Colgate Gel Kam (Mat. 12)	4,3	SnF ₂	60
Colgate Dentagard original (Mat. 13)	7,0	NaF	80
Gaba Aronal fluoridfrei, Kontrollzahnpaste (Mat. 14)	7,2	-	77

In den Versuchen wurden die Zahnpasten in Form von Zahnpastensuspensionen (Slurries) verwendet. Zur Herstellung der Slurries wurden die Zahnpasten jeweils im Verhältnis 1:3 nach Gewicht (Mat. 15) mit der Mineralsalzlösung (Versuch 1 und 2) zu einer homogenen Suspension mit einem Magnetrührer vermischt.

Für die Herstellung der Zahnpastensuspensionen in Versuch 3 wurde die Mineralsalzlösung wie oben beschrieben hergestellt. Allerdings wurde sie nach Gewicht im Verhältnis 1:1 mit Aqua dest. verdünnt (Experiment E3.3a). In einem weiteren Experiment des Versuchs 3 (Experiment E3.3b) wurde die Mineralsalzlösung zum Anmischen der Zahnpastensuspensionen durch Aqua dest. ersetzt. Durch die unterschiedlichen Konzentrationen der Mineralsalzlösungen sollte der Einfluss der Kalzium- und der Phosphatkonzentration auf die Effekte der verwendeten Zahnpasten untersucht werden.

Alle Suspensionen wurden jeden Tag vor Versuchsbeginn neu angemischt.

2.3 Versuchsdurchführung

Die Studie wurde in drei Versuche eingeteilt. Im Versuch 1 wurden die Proben in einem Wasserbad (WB; Mat. 16) bei 25°C und einer Schüttelfrequenz von etwa 35 Bewegungen pro Minute erodiert. Dabei wurde eine weiche Bewegung der Zitronensäure erzeugt. Im Versuch 2 wurden die Proben auf einer Schüttelplatte (SP; Mat. 17) mit einer Frequenz von etwa 40 Bewegungen pro Minute erodiert. Die dabei erzeugte Bewegung der Zitronensäure stellte sich ruckartig dar. Die Versuche 1 und 2 unterteilten sich entsprechend der verwendeten Zitronensäuren in jeweils vier Experimente (E1.1 – E1.4 und E2.1 – E2.4). In den Experimenten E1.1 und E2.1 wurde die 1%ige Zitronensäure verwendet, in den Experimenten E1.2 und E2.2 die 0,5%ige Säure. Bei den Experimenten E1.3 und E2.3 wurde die 0,3%ige Säure mit dem nativen pH-Wert 2,8 und in den Experimenten E1.4 und E2.4 die 0,3%ige Säure mit dem adjustierten pH-Wert 3,6 verwendet.

Der Versuch 3 teilte sich in zwei Experimente (E3.3a und E3.3b). Die Proben wurden wie in Versuch 2 auf der Schüttelplatte (SP) in 0,3%iger Zitronensäure mit dem nativen pH-Wert 2,8 geschwenkt.

Tab. 3: Übersicht über die Versuche. In Versuch 1 fand die Demineralisation im Wasserbad statt und die Suspensionen wurden mit Mineralsalzlösung angemischt. In Versuch 2 fand die Demineralisation auf einer Schüttelplatte statt, die Suspensionen wurden ebenfalls mit Mineralsalzlösung angemischt. In Versuch 3 fand die Demineralisation mit der 0,3%igen Zitronensäure auf der Schüttelplatte statt, die Suspensionen wurden mit verdünnter Mineralsalzlösung (E3.3a) bzw. Aqua dest. (E3.3b) angemischt. Der Experimentname setzt sich zusammen aus der Versuchsnummer und der Nummer der verwendeten Säure.

Versuch 1 (Wasserbad)	Versuch 2 (Schüttelplatte)	Versuch 3 (Schüttelplatte)
Suspensionen mit Mineralsalzlösung angemischt	Suspensionen mit Mineralsalzlösung angemischt	Demineralisation mit 0,3% Zitronensäure, nativer pH-Wert
<u>Experiment 1.1</u> 1% Zitronensäure, nativer pH-Wert	<u>Experiment 2.1</u> 1% Zitronensäure, nativer pH-Wert	<u>Experiment 3.3a</u> Suspensionen mit verdünnter Mineralsalzlösung angemischt
<u>Experiment 1.2</u> 0,5% Zitronensäure, nativer pH-Wert	<u>Experiment 2.2</u> 0,5% Zitronensäure, nativer pH-Wert	<u>Experiment 3.3b</u> Suspensionen mit Aqua dest. angemischt
<u>Experiment 1.3</u> 0,3% Zitronensäure, nativer pH-Wert	<u>Experiment 2.3</u> 0,3% Zitronensäure, nativer pH-Wert	
<u>Experiment 1.4</u> 0,3% Zitronensäure, adjustierter pH-Wert 3,6	<u>Experiment 2.4</u> 0,3% Zitronensäure, adjustierter pH-Wert 3,6	

Die Experimente wurden über einen Zeitraum von jeweils 10 Tagen (2 x 5 Wochentage) durchgeführt. Am Wochenende wurden die Proben bei 100% Luftfeuchtigkeit im Kühlschrank aufbewahrt. Die verwendeten Lösungen wurden jeden Tag vor Versuchsbeginn neu angesetzt.

Um das zeitgleiche Umsetzen aller Proben einer Gruppe zu ermöglichen, wurden die Probenträger in spezielle Halterungen eingebracht. Entsprechend ihrer Zuordnung wurden die Proben in der jeweiligen Zitronensäure täglich für 6 x 2 min demineralisiert. Alle Zeiten wurden mit einem Kurzzeitmesser (Mat. 18) gemessen. Die Demineralisationen erfolgten im Abstand von 60 min.

In jedem Experiment wurden vier Gruppen mit je einer der vier Zahnpastensuspensionen behandelt (S = Suspension/Slurry). Für die Suspensionsbehandlung wurden die Proben zweimal täglich für 2 min direkt im Anschluss an die erste und an die letzte Demineralisation in die jeweilige Zahnpastensuspension bei Raumtemperatur gegeben.

Vier weitere Gruppen wurden während der zweiminütigen Suspensionsbehandlung mit der entsprechenden Suspension für 15 sec im Bürstsimulator (ADA-Referenzbürste, Verfahrensweg 6, Zick- Zack- Modus, Frequenz 60/min, Druck 200 g, Mat. 19) zusätzlich gebürstet (B = Bürst). Um eventuelle Unterschiede in der Einwirkung der Bürstköpfe und der Bürstrichtung weitestgehend zu vermeiden, wurden die Probenträger in dem zweiten Bürstdurchgang des Tages um 180° um die vertikale Achse gedreht.

Eine weitere Gruppe wurde mitgeführt, die weder gebürstet noch mit einer Zahnpaste behandelt wurde. Diese Proben wurden lediglich mit der entsprechenden Säure demineralisiert (Negativkontrolle) und nach dem anschließenden Abspülen für 30 sec unter fließendem Wasser in die Mineralsalzlösung gegeben.

Eine Übersicht über die Probeneinteilung (n = 20) pro Experiment gibt Tab. 4.

Tab. 4: Übersicht über die Gruppeneinteilung der Schmelzproben und ihre Zugehörigkeit zu den unterschiedlichen Suspensionen. Jedes Mundhygieneprodukt wird im Folgenden entsprechend der Bezeichnung des Wirkstoffs (Bez. Wirkst.) benannt. Der Gruppenname (GN) setzt sich aus dem Wirkstoff und der Art der Behandlung zusammen. Die jeweilige Gruppe, die mit der Suspension behandelt wurde, wird der S-Gruppe (Suspension/Slurry) zugeordnet. Die Proben der S+B-Gruppe wurden während dieser Suspensionsbehandlung gebürstet. Die Negativkontrollgruppe (Neg.ktr.) wurde keiner Zahnpastenbehandlung unterzogen.

<i>Produktname</i>		<i>Pro-Expert</i>	<i>Gel Kam</i>	<i>Dentagard</i>	<i>Aronal F-frei</i>	-
<i>Bez. Wirkst.</i>		SnF ₂ /NaF	SnF ₂	NaF	F-frei	-
<i>GN</i>	<i>Slurry</i>	SnF ₂ /NaF S	SnF ₂ S	NaF S	Slurrykontrolle	Neg. ktr.
	<i>Slurry + Bürsten</i>	SnF ₂ /NaF S+B	SnF ₂ S+B	NaF S+B	Bürstkontrolle	

Zwischen den Demineralisations- und Suspensionsbehandlungen wurden die Proben in der Mineralsalzlösung aufbewahrt. Nach der Entnahme aus der

Mineralsalz- bzw. aus der Demineralisationslösung wurden die Proben für 30 sec unter fließendem Wasser abgespült. Nach der Entnahme aus den Suspensionen wurden die Proben für 60 sec unter fließendem Wasser abgespült, so dass makroskopisch keine Zahnpastenreste mehr zu erkennen waren.

Ein Schema des Versuchsablaufs ist Abb. 1 zu entnehmen.

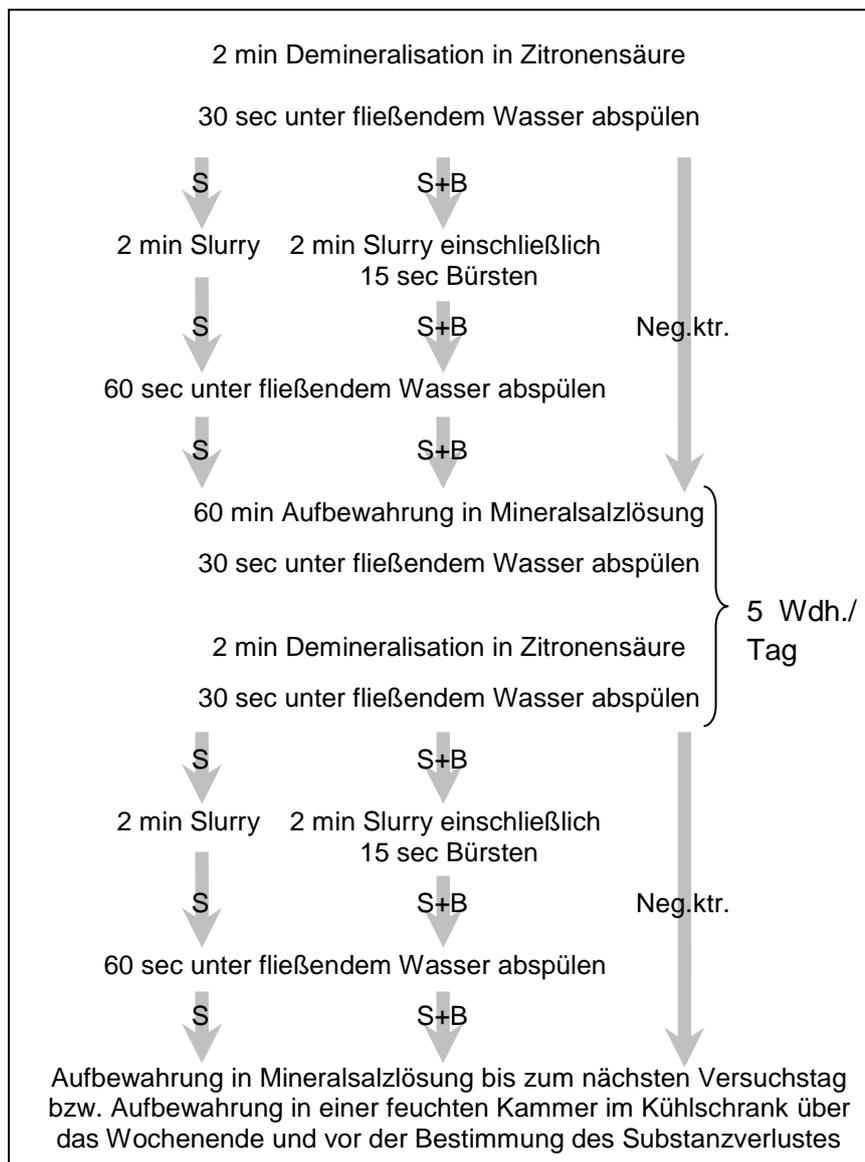


Abb. 1: Schema des Versuchsablaufes eines Versuchstages. Die Schmelzproben der Slurry-Gruppen wurden zwei Mal pro Tag mit einer Zahnpastensuspension behandelt (Pfeile mit der Beschriftung S). Proben der Bürst-Gruppen wurden innerhalb dieser Slurrybehandlung zusätzlich gebürstet (Pfeile mit der Beschriftung S+B). Proben der Negativkontrollgruppen wurden nur de- und remineralisiert (Pfeile mit der Beschriftung Neg.ktr.) und keiner Slurrybehandlung zugeführt.

Insgesamt wurden täglich fünf Wiederholungen (5 Wdh.) der Remineralisation und der Demineralisation vor der zweiten Slurrybehandlung durchgeführt.

2.4 Bestimmung des Substanzverlustes

Der Substanzverlust wurde am Ende von jedem Versuch profilometrisch bestimmt. Die Profilometrie ist die zwei- oder dreidimensionale Vermessung von Oberflächentopographien. Dabei werden die Oberflächen mit einem Profilometer entweder mechanisch, also taktil mit einem Taster, oder optisch erfasst. Diese Messmethode ist nicht destruktiv, so dass eventuell notwendige Mehrfachmessungen möglich sind. Die Messungen zur Bestimmung des Substanzverlustes wurden in dieser Studie mit dem optischen Profilometer MicroProf® und der Steuerungssoftware Acquire durchgeführt (Mat. 6). Das Profilometer arbeitet berührungslos über einen lichtoptischen Sensor (Mat. 6). Die Lichtquelle des Sensors ist Weißlicht, der Messbereich beträgt 300 µm, das vertikale Auflösungsvermögen liegt bei 10 nm, das laterale Auflösungsvermögen liegt bei 1-2 µm. Dieser Sensor nutzt als Messverfahren die chromatische Aberration von Linsen aus. Dazu wird die Probe mit fokussiertem Weißlicht, das vertikal in Licht unterschiedlicher Wellenlänge aufgefächert wurde, beleuchtet. Trifft dieses aufgefächerte Licht auf der Probenoberfläche auf, wird es reflektiert und gelangt über ein Glasfaserkabel in ein Miniaturspektrometer. In diesem wird über die Wellenlänge des reflektierten Lichtes der Abstand des Sensors zur Probe ermittelt. Die Messsignale können mit voller Auflösung für jeden Messpunkt bestimmt werden. Dadurch sind die Messungen unabhängig von der Probenstruktur ohne nachzufokussieren durchführbar.

Nach dem zehnten Versuchstag wurden die Abdeckungen der Referenzbereiche bei allen Proben entfernt. Die Proben wurden bei zehnfacher Vergrößerung (Mat. 5) erneut auf Verunreinigungen und Beschädigungen überprüft. Bis zur Auswertung verblieben die Proben bei 100% Luftfeuchtigkeit im Kühlschrank. Es wurden jeweils drei Profilschriebe pro Probe in einem Abstand von 200 µm zueinander aufgezeichnet. Die Profilschriebe verliefen senkrecht zur Grenze zwischen dem Referenz- und dem Versuchsareal. Die Messstrecke betrug jeweils 2 mm bei 200 Messpunkten. Dabei wurde jeweils

1 mm auf der Referenz- und 1 mm auf der Versuchsfläche gemessen [s. Abb. 2].

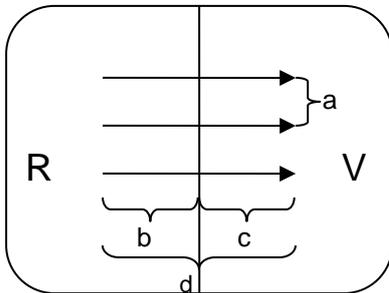


Abb. 2: Schematische Darstellung einer Probe nach dem Versuch. Die Pfeile stellen die Profilschriebe im Abstand von 200 µm (a) dar. Die mit R gekennzeichnete Probenhälfte ist die Referenzfläche, die mit V versehene Hälfte ist die Versuchsfläche. Es wurde 1 mm auf der Referenzfläche (b) und 1 mm auf der Versuchsfläche (c) gemessen, so dass die Profilschriebe insgesamt 2 mm Länge (d) aufwiesen.

Die Auswertung der Profilschriebe erfolgte mit dem Programm FRT Mark III (Version 3.9, Windows XP; Mat. 6). Es wurde zunächst eine Ausgleichsgerade auf den äußeren 0,5 mm der Referenzfläche konstruiert, um den Schrieb im Koordinatensystem parallel zur x-Achse auszurichten (Fitsubstraktion). Anschließend wurde auf den äußeren 0,5 mm der Versuchsfläche eine zur ersten Ausgleichsgeraden parallele zweite Ausgleichsgerade konstruiert. Der vertikale Abstand der beiden Geraden stellte den Substanzverlust in µm dar [Abb. 3].

Der Substanzverlust einer Probe wurde in µm als Mittelwert der drei Schriebe pro Probe angegeben.

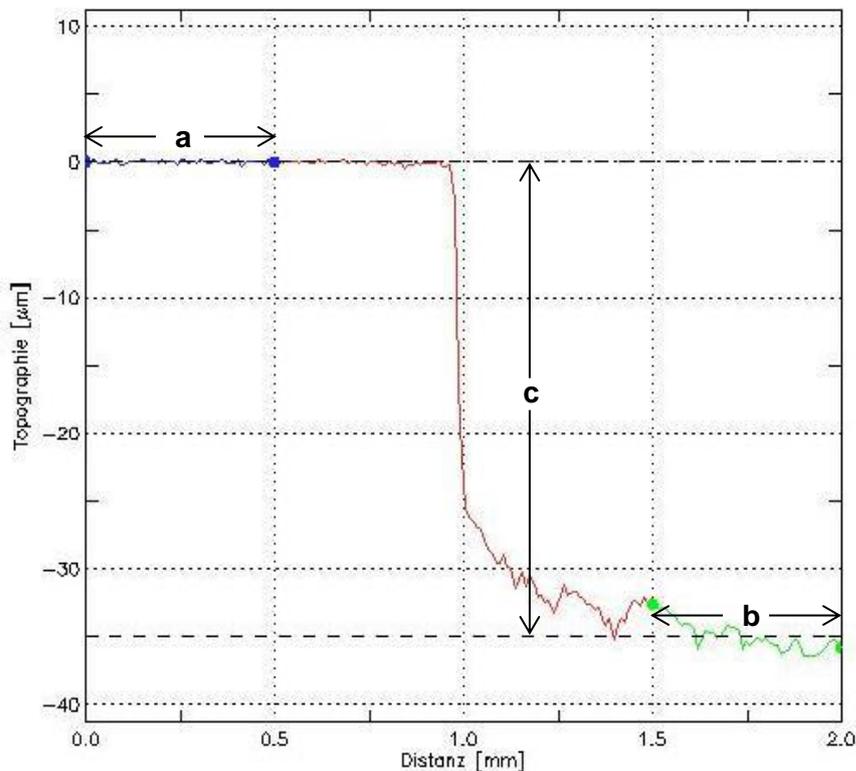


Abb. 3: Ausgewerteter Profilschrieb. Es wurde eine Ausgleichsgerade durch die äußeren 0,5 mm der Referenzfläche (a) konstruiert und parallel zur x - Achse im Koordinatensystem ausgerichtet. Parallel zu dieser Linie wurde eine Ausgleichsgerade durch die äußeren 0,5 mm der Versuchsfläche (b) konstruiert. Der vertikale Abstand der beiden Geraden (c) stellt den Substanzverlust der Probe in μm dar.

Zusätzlich wurden an drei Proben Konstanzmessungen durchgeführt. Diese zufällig gewählten Proben gehörten zu den Negativkontrollgruppen, die auf der Schüttelplatte (SP) mit Zitronensäure der Konzentration 1%, 0,5% und 0,3% demineralisiert wurden. Es wurden zwanzig Profilschriebe pro Probe aufgezeichnet, zwischen denen die Proben in ihrer Position unter dem Profilometer belassen wurden. Weitere zwanzig Profilschriebe wurden aufgezeichnet, zwischen denen die Proben jeweils vom Profilometer entfernt und erneut positioniert wurden. Diese Repositionierungen wurden durch Markierungen auf dem Messtisch ermöglicht.

2.5 Ergebnisse der Konstanzmessungen

Die Tabelle 5 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der drei für die Konstanzmessungen verwendeten Proben.

Tab. 5: Die Tabelle enthält die Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) für die Proben der Konstanzmessungen. Die verwendeten Proben wurden auf der Schüttelplatte mit Zitronensäure der Konzentration 1%, 0,5% und 0,3% (jeweils nativer pH-Wert) demineralisiert. Dabei wurden die Proben zwischen den Profilschrieben zunächst in ihrer Position unter dem Profilometer belassen. Anschließend wurden die Proben zwischen den Profilschrieben vom Profilometer entfernt und erneut repositioniert.

<i>Zitronensäurekonzentration</i>	<i>1%</i>	<i>0,5%</i>	<i>0,3%</i>
	MW ± SD	MW ± SD	MW ± SD
<i>belassen</i>	34,0 ± 0,2	9,5 ± 0,1	1,9 ± 0,1
<i>repositioniert</i>	35,5 ± 1,0	8,7 ± 0,7	2,3 ± 0,7

2.6 Statistik

Die statistische Auswertung erfolgte mit der Software SPSS 20.0 für Windows [Armonk, New York, USA] (Mat. 20).

Die Daten aller Gruppen wurden im Hinblick auf Abweichungen von der Gauss-Verteilung (Kolmogorov-Smirnov-Test) geprüft. Es wurde in keinem Fall eine statistisch signifikante Abweichung gefunden.

Der Vergleich des Mineralstatus innerhalb eines Experiments zwischen den Gruppen getrennt nach Bürst- und Slurrybehandlung erfolgte mit der einfachen Varianzanalyse (ANOVA). Die Homogenität der Varianzen wurde mit dem Levene-Test überprüft. Da eine signifikante Abweichung von der Homogenität vorlag, wurde ein Anschlussstest nach Tamhane durchgeführt.

Der Vergleich der Ergebnisse der Bürst- und Slurrygruppen innerhalb eines Experiments erfolgt mit einer einfachen Varianzanalyse (ANOVA). Der Vergleich entsprechend gleich behandelter Gruppen zwischen den Experimenten erfolgte ebenfalls mit einer ANOVA. Als Anschlussstest wurde aufgrund einer signifikanten Abweichung von der Homogenität der Varianzen (Levene-Test) der Test nach Tamhane verwendet.

Die Interaktion zwischen den unterschiedlichen Faktoren wurde durch eine faktorielle ANOVA (GLM 3) und einen Test der Effekte zwischen den Subjekten analysiert.

Das Signifikanzniveau wurde auf 0,05 festgelegt.

Ein Vergleich zwischen den Kontrollgruppen erfolgte unabhängig von dem Vorhandensein von Auflagerungen. In den mit wirkstoffhaltiger Suspension behandelten Gruppen wurden nur die Gruppen mit Substanzverlusten statistisch ausgewertet. Gruppen mit Auflagerungen wurden statistisch nicht untersucht mit Ausnahme von dem Vergleich zwischen gebürsteten und nicht gebürsteten Proben unter ansonsten gleichen Bedingungen in den Experimenten zu den Effekten der Mineralsalzkonzentration in den Zahnpastensuspensionen (Experimente 2.3, 3.3a, 3.3b; Ergebnisteil 3.4). Es ist nicht bekannt, ob die Auflagerungen stabil sind. Auch ist die Dicke der

24

Auflagerungen für die Auswertung unerheblich, da lediglich die Substanzverluste in ihrer Dimension verglichen werden sollten.

2.7 Material- und Chemikalienliste

2.7.1 Materialliste

- Mat. 1: Exact Trennschleifsystem, Exact Apparatebau O. Herrmann, Norderstedt (D)
- Mat. 2: Schleifpapier, Körnung P 1200, 12 µm, Leco Corporation, St. Joseph (USA)
- Mat. 3: Apex DGD Diamantschleifscheibe 3 µm, 12“, Buehler GmbH, Düsseldorf (D)
- Mat. 4: Exact Mikroschleifsystem und Vakuumpumpe Typ N022 AN. 18, Exact Apparatebau O. Herrmann, Norderstedt (D)
- Mat. 5: Auflichtmikroskop Nikon SMZ-2T, Vergrößerung 10 x, Tokyo (J)
- Mat. 6: optisches Profilometer MicroProf®; Software Acquire; Software Mark III (Version 3.9; Windows XP); Sensor FRT CWL, Fries Research & Technology, Bergisch Gladbach (D)
- Mat. 7: Fixationskleber Technovit 7230 VLC, Kulzer Exact, Wehrheim (D)
- Mat. 8: pH-Meter 761 Calimatic, Knick, Berlin (D)
- Mat. 9: Magnetrührgerät IKA RCT Classic, IKA®-Werke GmbH & CO. KG, Staufen (D)
- Mat. 10: Magnetrührer, IDL Windaus Labortechnik, Magdeburg (D)
- Mat. 11: blend-a-med Pro-Expert Zahnfleischschutz, P&G Manufacturing GmbH, Groß-Gerau (D)
- Mat. 12: Colgate Gel Kam, Colgate- Palmolive Company, New York (USA)
- Mat. 13: Colgate Dentagard original, Colgate- Palmolive GmbH, Hamburg (D)

Mat. 14: GABA Aronal Fluoridfrei, GABA International AG, Daishin Trading Co.,
(J)

Mat. 15: Waage Mettler PJ 3000, Mettler-Toledo, Gießen (D)

Mat. 16: Wasserbad GFL, Model 1083, Burgwedel (D)

Mat. 17: Schüttelplatte, Modell 3006, GFL, Burgwedel (D)

Mat. 18: Stoppuhr/ Count-down-Timer, Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe
(D)

Mat. 19: Zahnbürstsimulator, SD Mechatronik GmbH, Feldkirchen-Westerham
(D)

Mat. 20: SPSS 20.0 für Windows, Armonk, New York (USA)

2.7.2 Chemikalienliste

Chem. 1: Thymol-Pulver, T0501-100G, Lot# 011M0098V, Fluka Chemie AG,
Buchs (CH)

Chem. 2: Zitronensäure Monohydrat, Art.Nr. 3958.1, Charge 091168602, EG
Nr. 2010691, Carl Roth GmbH + Co KG, Karlsruhe (D)

Chem. 3: Natriumhydroxid, 9137.1000, 3306 1583, Merck, Darmstadt (D)

Chem. 4: Orthophosphorsäure 99%, K41230365 037, Merck, Darmstadt (D)

Chem. 5: Natriumhydrogencarbonat, K41326329 046, Riedel-DE, Hän AG,
Hannover (D)

Chem. 6: Kaliumchlorid reinst, 12636-250G, Lot# SZBA2360V, Merck,
Darmstadt (D)

Chem. 7: Kalziumchlorid, 406 AA 493388, Art. 2388, Merck, Darmstadt (D)

2.7.3 Inhaltsstoffe der verwendeten Produkte

Produktname	Inhaltsstoffe
Pro-Expert Zahnfleischschutz (Mat. 11)	Glycerin, Hydrated Silica, Sodium Hexametaphosphate, Propylene Glycol, PEG-6, Aqua, Zinc Lactate, CI 77891, Sodium Lauryl Sulfate, Sodium Gluconate, Aroma, Chondrus Crispus, Trisodium Phosphate, Stannous Fluoride, Sodium Saccharin, Xanthan Gum, Silica, Sodium Fluoride
Colgate Gel Kam (Mat. 12)	Glycerin, Stannous Fluoride, Hydroxyethylcellulose, Aroma
Colgate Dentagard (Mat. 13)	Aqua, Hydrated Silica, Sorbitol, Glycerin, PEG-12, Sodium Lauryl Sulfate, Aroma, Cellulose Gum, Sodium Fluoride, Sodium Saccharin, Chamomilla Recutita, Mentha Piperita, Commiphora Myrrha, Salvia Officinalis, CI 74260, CI 77891
Aronal fluoridfrei (Mat. 14)	Aqua, Dicalcium Phosphate Dihydrate, Dicalcium Phosphate, Propylene Glycol, Glycerin, Hydroxyethylcellulose, Sodium Lauryl Sulfate, Titanium Dioxide, Aroma, Silica, Methylparaben, Sodium Saccharin, Retinyl Palmitate, Propylparaben

3 Ergebnisse

Eine Probe konnte nicht ausgewertet werden, da sich die Abdeckung der Referenzfläche gelöst hatte. Diese Probe wurde in 0,5%iger Zitronensäure im Wasserbad demineralisiert und mit der NaF-haltigen Zahnpaste behandelt und gebürstet. Bei allen anderen Proben konnten Profilschriebe aufgezeichnet und ausgewertet werden.

Makroskopisch waren die Referenzflächen aller Proben glatt, glänzend und frei von Verunreinigungen. Die Versuchsflächen der Proben wiesen im luftgetrockneten Zustand teilweise makroskopisch sichtbare Auflagerungen auf. So fanden sich Präzipitate auf Proben der Negativkontrollen, die mit 0,3%iger Zitronensäure (nativer pH-Wert) im Wasserbad beziehungsweise mit 0,3%iger Zitronensäure (pH-Wert 3,6) auf der Schüttelplatte demineralisiert wurden. Bei den Gruppen, die mit einer der vier Zahnpastensuspensionen behandelt wurden, zeigten sich zum Teil auch Auflagerungen. Diese kamen gehäuft bei den Experimenten mit schwachen Säuren vor (0,3%, nativer pH-Wert oder pH 3,6). Diese Auflagerungen hatten eine blasse, den verwendeten Marktprodukten entsprechende Färbung. Unter 10-facher Vergrößerung zeigten sich Unterschiede in der Struktur der Auflagerungen. Alle diese Auflagerungen waren nach dem Messen mit einer Sonde entfernbar. Die darunter befindliche Versuchsfläche stellte sich bei den meisten Proben sowohl glatt, als auch glänzend dar und wies teilweise Polierstreifen vom Herstellungsvorgang auf. Die Versuchsflächen, auf denen keine Auflagerungen zu sehen waren, hatten eine matte, weißlich opake Oberfläche. Diese kreidige Oberfläche fühlte sich mit der Sonde glatt und hart an. Teilweise stellte sich bei diesen Proben eine makroskopisch deutlich sichtbare Stufe zwischen der Referenz- und der Versuchsfläche dar. Dabei lag die Versuchsfläche unterhalb des Niveaus der Referenzfläche.

3.1 Kontrollgruppen

Zu den Kontrollgruppen gehören neben den Negativkontrollgruppen auch die mit der Zahnpastensuspension aus Mineralsalzlösung und fluoridfreier Zahnpaste behandelten Slurrykontrollgruppen und Bürstkontrollgruppen.

Die Abbildung 4 zeigt den Substanzverlust bzw. die Auflagerungen sowie die Standardabweichungen in μm für die Kontrollgruppen der Versuche 1 und 2. Ein statistischer Vergleich erfolgte zwischen den drei Kontrollgruppen eines Experimentes eines Versuchs.

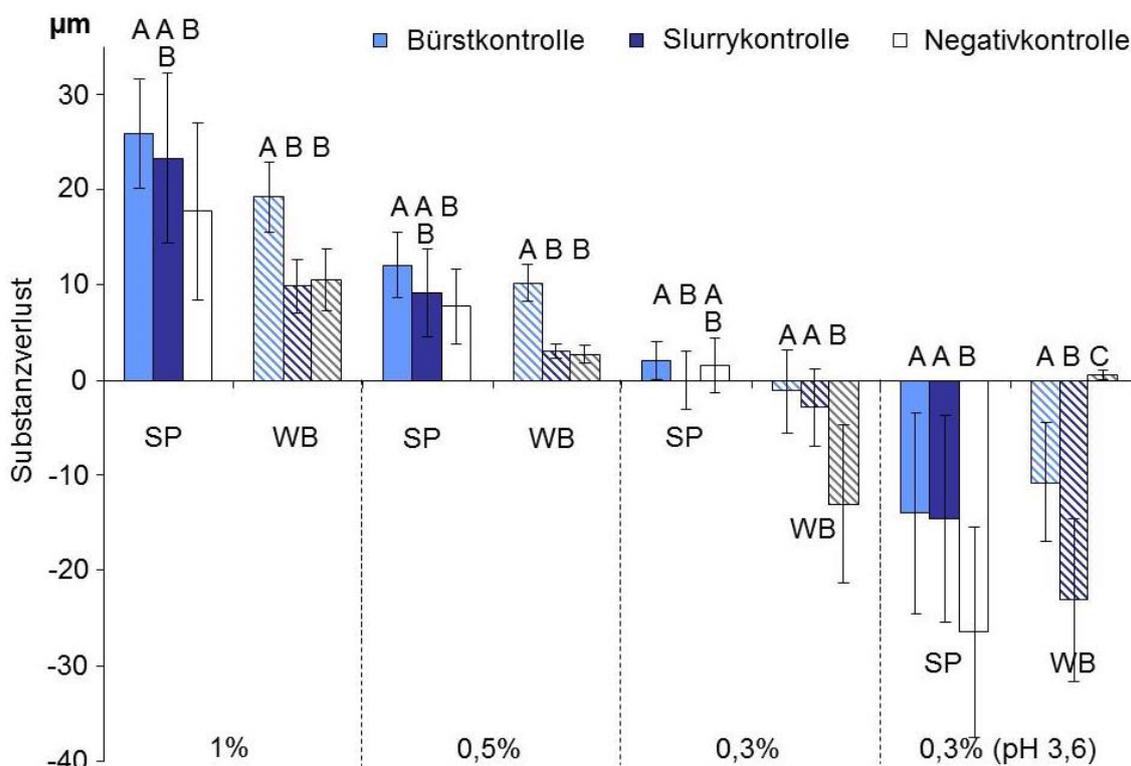


Abb. 4: Das Balkendiagramm stellt die Substanzverluste (positive Werte) und die Auflagerungen (negative Werte) der Kontrollgruppen dar. Es sind die Mittelwerte mit Standardabweichungen dargestellt. Die dunkelblauen Balken sind den Gruppen zuzuordnen, die mit der fluoridfreien Suspension behandelt wurden (Slurrykontrollgruppe). Die hellblauen Balken stehen für die Proben, die während der Behandlung mit der fluoridfreien Suspension gebürstet wurden (Bürstkontrollgruppe). Die weißen Balken stellen die Negativkontrollgruppen dar (nur Demineralisation). Die vollständig gefärbten Balken zeigen die Proben, die auf der Schüttelplatte (SP) demineralisiert wurden. Die schraffierten Balken (Negativkontrolle grau schraffiert) repräsentieren die Proben, die im Wasserbad (WB) demineralisiert wurden. Die Beschriftungen 1%, 0,5%, 0,3% und 0,3% (pH 3,6) geben an, in welcher Zitronensäure die Proben demineralisiert wurden.

Die drei Kontrollgruppen einer Demineralisationsbedingung wurden untereinander statistisch verglichen. Dabei geben die Buchstaben Aufschluss, ob die Höhe von Substanzverlust bzw. Auflagerung zwischen den Kontrollgruppen signifikante Unterschiede aufweisen ($p \leq 0,05$). Gleiche Buchstaben bedeuten, dass es keinen signifikanten Unterschied in der gemessenen Höhe von Substanzverlust / Auflagerung gibt.

In den mit 1- und 0,5%iger Zitronensäure behandelten Kontrollgruppen konnten zwei grundsätzliche Beobachtungen festgestellt werden.

Zum einen waren die Substanzverluste für die im Wasserbad (WB) demineralisierten Proben deutlich geringer als für die auf der Schüttelplatte (SP) demineralisierten Proben. Die Bürstkontrollen wiesen im Wasserbad 26% (1% Zitronensäure) respektive 16% (0,5% Zitronensäure) geringere Substanzverluste auf als auf der Schüttelplatte. Bei den Slurrykontrollen waren die Substanzverluste im Wasserbad sogar um 58% (1% Zitronensäure) respektive 66% (0,5% Zitronensäure) geringer als auf der Schüttelplatte.

Zum anderen waren die Substanzverluste für die Gruppen nach einer Demineralisation mit 0,5%iger Zitronensäure deutlich geringer als nach einer Demineralisation mit 1%iger Zitronensäure. Bei den Bürstkontrollen waren die Substanzverluste sowohl auf der Schüttelplatte als auch im Wasserbad auf ungefähr die Hälfte reduziert. Die Substanzverluste der Slurry- und der Negativkontrollen waren nach Demineralisation mit 0,5%iger Zitronensäure um etwa 60% (SP) bis 70% (WB) geringer als nach Demineralisation mit 1%iger Zitronensäure.

Zusätzlich konnte bei den mit 1- und 0,5%iger Zitronensäure behandelten Kontrollgruppen festgestellt werden, dass die Negativkontrollen um 31% (SP, 1% Zitronensäure), 46% (WB, 1% Zitronensäure), 36% (SP, 0,5% Zitronensäure) sowie 74% (WB, 0,5% Zitronensäure) geringere Substanzverluste als die Bürstkontrollen zeigten.

Die Substanzverluste der Negativ- und der Slurrykontrollen wiesen nach der Demineralisation mit Zitronensäure der Konzentration 0,5% und 1% jeweils keinen statistisch signifikanten Unterschied auf.

In den Experimenten mit den beiden milden Zitronensäuren (0,3%) verhielt es sich anders.

Nach der Demineralisation mit 0,3%iger Zitronensäure (nativer pH-Wert) auf der Schüttelplatte zeigten sowohl die Slurry- als auch die Bürstkontrolle keine bis geringe Substanzverluste, die sich nicht signifikant von dem Substanzverlust der Negativkontrolle unterschieden.

Sowohl nach der Demineralisation mit 0,3%iger Zitronensäure mit nativem pH-Wert im Wasserbad als auch mit adjustiertem pH-Wert (3,6) auf der Schüttelplatte sowie im Wasserbad wiesen die Proben Auflagerungen auf. Lediglich die Negativkontrolle nach einer Demineralisation mit pH-adjustierter Zitronensäure im Wasserbad zeigte weder Auflagerungen noch Substanzverluste.

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Kontrollgruppen sind der Tabelle 6 zu entnehmen.

Tab. 6: Die Tabelle enthält die Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) der Kontrollgruppen in μm . Die Proben der Negativkontrollen wurden nur demineralisiert (sechs mal 2 min pro Tag), Proben der Slurrykontrollgruppen wurden zusätzlich einer Behandlung mit fluoridfreier Zahnpastensuspension unterzogen (zwei mal 2 min pro Tag). Die Proben der Bürstkontrollgruppen wurden während dieser Slurrybehandlung zusätzlich gebürstet (15 sec innerhalb der 2 min). Die Demineralisation fand mit Zitronensäuren unterschiedlicher Konzentrationen (1%, 0,5%, 0,3%, jeweils mit nativem pH-Wert, und 0,3% mit pH-Wert auf 3,6 adjustiert) entweder auf der Schüttelplatte (SP) oder im Wasserbad (WB) statt. Positive Werte geben Substanzverluste an, negative Werte stehen für Auflagerungen (**fett gedruckt**).

		<i>Bürstkontrolle</i>	<i>Slurrykontrolle</i>	<i>Negativkontrolle</i>
		MW \pm SD	MW \pm SD	MW \pm SD
1%	SP	25,8 \pm 5,7	23,3 \pm 9,1	17,7 \pm 9,6
	WB	19,2 \pm 3,7	9,8 \pm 2,9	10,5 \pm 3,3
0,5%	SP	12,1 \pm 3,5	9,1 \pm 4,6	7,7 \pm 3,9
	WB	10,2 \pm 2,0	3,1 \pm 0,8	2,7 \pm 1,0
0,3%	SP	2,1 \pm 2,0	-0,1 \pm 3,0	1,5 \pm 2,8
	WB	-1,2 \pm 4,4	-2,9 \pm 4,1	-13,0 \pm 8,6
pH 3,6	SP	-14,0 \pm 10,7	-14,5 \pm 10,7	-26,4 \pm 10,8
	WB	-10,7 \pm 5,7	-23,1 \pm 7,9	0,6 \pm 0,4

3.2 Modelle mit 1%iger und 0,5%iger Zitronensäure

Im Folgenden werden die Substanzverluste der Slurrykontrolle als Referenz (=100%) für die anderen Gruppen genommen. Es gibt unter denselben Demineralisationsbedingungen zwischen der Negativ- und der Slurrykontrolle keine signifikanten Unterschiede in der Höhe der Substanzverluste (Abb. 4). Zur Übersichtlichkeit werden die Negativkontrollgruppen nicht weiter aufgeführt (die Werte sind Tabelle 5 zu entnehmen). Tabelle 7 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen für die mit 1%iger sowie 0,5%iger Zitronensäure demineralisierten Gruppen.

Tab. 7: Die Tabelle enthält die Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) der mit 1%iger sowie 0,5%iger Zitronensäure behandelten Gruppen in μm . Die Demineralisation fand entweder auf der Schüttelplatte (SP) oder im Wasserbad (WB) statt. Die Gruppen wurden entsprechend der Zuordnung zu einer Zahnpaste entweder nur mit der zugehörigen Suspension behandelt (S) oder zusätzlich während dieser Behandlung gebürstet (S+B). Positive Werte geben Substanzverluste an, negative Werte (**fett gedruckt**) stehen für Auflagerungen. Die statistische Auswertung wurde für Proben mit Substanzverlusten erstellt. Gruppen mit Auflagerungen wurden statistisch nicht ausgewertet. Der Vergleich zwischen den verschiedenen Zahnpasten unter ansonsten gleichen Bedingungen (Zeilen) wurde für die mit den Suspensionen behandelten Gruppen mit Zahlen, für die zusätzlich gebürsteten Gruppen mit Großbuchstaben dargestellt. Gleiche Buchstaben oder Zahlen bedeuten, dass es keinen statistisch signifikanten Unterschied in der Höhe der Substanzverluste gibt. Bei dem Vergleich zwischen SP und WB wurden die Proben, die unter ansonsten gleichen Bedingungen (innerhalb einer Spalte) keinen signifikanten Unterschied aufwiesen, mit * markiert (nur bei 0,5%, S+B, NaF). Der Vergleich der Proben der Bürst- und Slurrygruppen, die mit der gleichen Suspension unter denselben Bedingungen behandelt wurden, ist in dieser Tabelle nicht dargestellt und kann der Abbildung 5 entnommen werden. Das Signifikanzniveau lag bei $p \leq 0,05$.

		<i>Kontrolle</i>	<i>SnF₂/NaF</i>	<i>SnF₂</i>	<i>NaF</i>
		MW \pm SD	MW \pm SD	MW \pm SD	MW \pm SD
1%	S	23,3 \pm 9,1 ¹	22,0 \pm 7,8 ¹	11,9 \pm 5,6 ²	21,8 \pm 6,7 ¹
	S+B	25,8 \pm 5,7 ^A	37,7 \pm 12,2 ^B	17,0 \pm 8,2 ^C	29,1 \pm 5,7 ^{AB}
1%	S	9,8 \pm 2,9 ¹	5,3 \pm 1,2 ²	3,7 \pm 1,1 ³	7,1 \pm 3,1 ^{1:2}
	S+B	19,2 \pm 3,7 ^A	23,1 \pm 5,8 ^A	8,2 \pm 1,4 ^B	12,6 \pm 2,3 ^C
0,5%	S	9,1 \pm 4,6 ¹	6,9 \pm 3,2 ¹	2,1 \pm 2,2 ²	3,0 \pm 4,7 ²
	S+B	12,1 \pm 3,5 ^A	9,3 \pm 5,9 ^{AC}	4,1 \pm 2,3 ^B	5,7 \pm 4,3 ^{BC*}
0,5%	S	3,1 \pm 0,8 ¹	2,9 \pm 0,7 ¹	-1,4 \pm 2,0	-0,1 \pm 1,7
	S+B	10,2 \pm 2,0 ^A	4,3 \pm 2,0 ^B	-0,3 \pm 2,9	5,3 \pm 2,4 ^{B*}

Die beiden folgenden Diagramme (Abb. 5) zeigen den relativen Substanzverlust in Bezug zu der Slurrykontrolle des jeweiligen Modells.

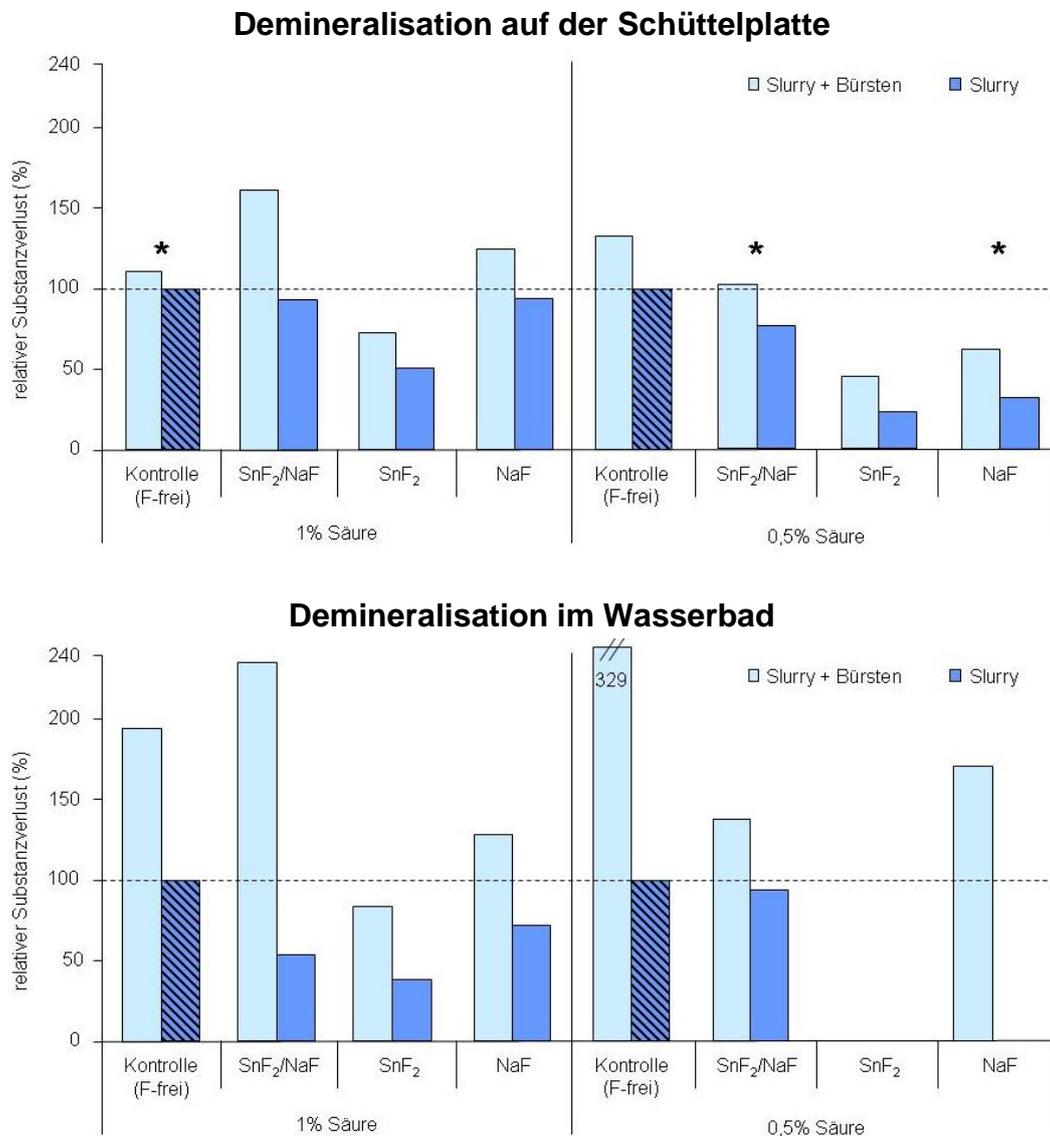


Abb. 5: Die Diagramme zeigen den relativen Substanzverlust in Bezug zur jeweiligen Slurrykontrollgruppe in den unterschiedlichen Modellen. Das obere Diagramm stellt die Werte für die Demineralisation auf der Schüttelplatte (SP) dar, das untere Diagramm für die Demineralisation im Wasserbad (WB). Die Demineralisation erfolgte mit Zitronensäuren der Konzentration 1% und 0,5%. Die eine Hälfte der Proben wurde mit der entsprechenden Suspension behandelt (dunkelblaue Balken), die andere Hälfte der Proben wurde während dieser Suspensionsbehandlung zusätzlich gebürstet (hellblaue Balken). Unter den Balken stehen die in den Produkten enthaltenen Wirkstoffe Zinnfluorid (SnF₂) und/oder Natriumfluorid (NaF). Die Kontrollgruppen wurden mit fluoridfreier Zahnpastensuspension behandelt. Die ungebürstete Slurrykontrollgruppe diente als Referenz (100%; schraffierte Balken). Gruppen mit Auflagerungen wurden nicht dargestellt (WB, 0,5%, SnF₂ beide Gruppen sowie NaF ungebürstet). Die Proben der Bürst- und Slurrygruppen, die bei der Behandlung mit gleicher Suspension unter denselben Bedingungen keinen signifikanten Unterschied aufwiesen, wurden mit * markiert, alle anderen Unterschiede waren signifikant ($p \leq 0,05$).

Nach der Demineralisation mit 1%iger Zitronensäure auf der Schüttelplatte wiesen im Vergleich mit der Slurrykontrolle (Referenzgruppe) die mit SnF_2/NaF sowie die mit NaF behandelten ungebürsteten Proben nur geringfügig niedrigere Substanzverluste auf. Die mit SnF_2 -haltiger Suspension behandelten Proben zeigten eine Reduktion des Substanzverlustes um 50% im Vergleich mit der Referenzgruppe.

Die mit SnF_2/NaF gebürsteten Proben zeigten um 62% und die mit NaF gebürsteten Proben um 25% höhere Substanzverluste als die Referenzgruppe. Die mit SnF_2 gebürsteten Proben zeigten eine Reduktion des Substanzverlustes um 27% im Vergleich mit der Referenzgruppe.

Im Vergleich der Bürstgruppen mit den zugehörigen Slurrygruppen wies die Bürstkontrolle einen um 11% höheren Substanzverlust als die Slurrykontrolle auf. Die mit einer der wirkstoffhaltigen Suspensionen gebürsteten Gruppen zeigten für die Behandlung mit SnF_2/NaF um 68%, für SnF_2 um 22% und für NaF um 31% höhere Substanzverluste als die mit der entsprechenden Suspension behandelten nicht gebürsteten Gruppen.

Nach der Demineralisation mit 0,5%iger Zitronensäure auf der Schüttelplatte waren die Substanzverluste für die Slurrygruppen um 24% (SnF_2/NaF), 77% (SnF_2) und 67% (NaF) geringer als der Substanzverlust der Referenzgruppe (Slurrykontrolle).

Die mit SnF_2/NaF gebürsteten Proben zeigten einen ungefähr genauso großen Substanzverlust wie die Referenzgruppe. Die mit SnF_2 gebürsteten Proben wiesen dagegen eine Reduktion des Substanzverlustes um 55% und die mit NaF gebürsteten Proben um 37% im Vergleich mit der Referenzgruppe auf.

In diesem Modell waren die Substanzverluste der Bürstgruppen bei allen vier Zahnpasten um jeweils 20 bis 30% höher als die Substanzverluste der jeweils zugehörigen Slurrygruppe.

Nach der Demineralisation mit 1%iger Zitronensäure im Wasserbad zeigten die drei mit einer wirkstoffhaltigen Suspension behandelten nicht gebürsteten

Gruppen im Vergleich mit der Slurrykontrolle (Referenzgruppe) eine Reduktion des Substanzverlustes um 46% (SnF_2/NaF), 62% (SnF_2) respektive 28% (NaF). Die mit SnF_2/NaF gebürsteten Proben wiesen um 136% und die mit NaF gebürsteten Proben um 29% höhere Substanzverluste als die Referenzgruppe auf. Die mit SnF_2 gebürsteten Proben zeigten eine Reduktion des Substanzverlustes um 16% im Vergleich mit der Referenzgruppe.

Im Vergleich der Bürstgruppen mit den zugehörigen Slurrygruppen zeigte die Bürstkontrolle einen doppelt so großen Substanzverlust wie die Slurrykontrolle. Die mit einer der wirkstoffhaltigen Suspensionen gebürsteten Gruppen zeigten für die Behandlung mit SnF_2/NaF um 182%, für SnF_2 um 46% und für NaF um 57% höhere Substanzverluste als die mit der entsprechenden Suspension behandelten nicht gebürsteten Gruppen.

Nach der Demineralisation mit 0,5%iger Zitronensäure im Wasserbad zeigten im Vergleich mit der Slurrykontrolle (Referenzgruppe) die mit SnF_2/NaF behandelten nicht gebürsteten Proben nur geringfügig niedrigere Substanzverluste. Sowohl die mit SnF_2 - als auch die mit NaF -haltiger Suspension behandelten nicht gebürsteten Proben wiesen unter diesen Demineralisationsbedingungen Auflagerungen auf.

Die mit SnF_2/NaF gebürsteten Proben zeigten um 39% und die mit NaF gebürsteten Proben um 71% höhere Substanzverluste als die Referenzgruppe. Die mit SnF_2 gebürsteten Proben wiesen Auflagerungen auf.

Im Vergleich der Bürstgruppen mit den zugehörigen Slurrygruppen wies die Bürstkontrolle einen mehr als verdreifachten Substanzverlust in Relation zur Slurrykontrolle auf. Die mit SnF_2/NaF -haltiger Suspensionen gebürsteten Proben zeigten um 45% höhere Substanzverluste als die mit dieser Suspension behandelten nicht gebürsteten Proben.

Der Einfluss der Interaktionen zwischen den unterschiedlichen Parametern auf die Studienergebnisse wurde für die Proben aller Gruppen aus den Versuchen 1 und 2 statistisch untersucht. Zusätzlich wurde der Einfluss der Interaktionen der unterschiedlichen Parameter auf die Studienergebnisse für die mit 1%iger und 0,5%iger Säure demineralisierten Proben statistisch untersucht. In diesen Experimenten kam es zu nahezu keinen Auflagerungen auf den Proben, die Auswirkungen auf die statistische Auswertung haben könnten. Die Werte für die Signifikanzen sind der Tabelle 8 zu entnehmen.

Tab. 8: Signifikanzwerte der Interaktionen zwischen den unterschiedlichen Parametern sowie Wirkstoffen auf die Studienergebnisse zum Einen für die Proben, die mit 1%iger und 0,5%iger Säure demineralisiert wurden (Proben 1% und 0,5%) und zum Anderen für alle Gruppen der Versuche 1 und 2 (alle Proben). Als Parameter wurden neben der Säure (Zitronensäure mit der Konzentration 1%, 0,5%, 0,3% mit nativem pH-Wert, 0,3% mit adjustiertem pH-Wert), der Bewegung (Wasserbad oder Schüttelplatte) und der Behandlung (Slurry oder Slurry und Bürsten) auch die Wirkstoffe (der Zahnpasten und des Gels) untersucht. Das Signifikanzniveau lag bei $p \leq 0,05$. Die nicht signifikanten Werte sind **fett** gedruckt.

Parameter	Proben 1% und 0,5% (n = 319)	alle Proben (n = 639)
Wirkstoff (SnF ₂ , NaF, SnF ₂ /NaF)	0,000	0,000
Säure (1%, 0,5%, 0,3%, 0,3% pH 3,6)	0,000	0,000
Behandlung (Slurry, Bürsten)	0,000	0,000
Bewegung (WB, SP)	0,000	0,000
Wirkstoff * Säure	0,000	0,000
Wirkstoff * Behandlung	0,000	0,000
Wirkstoff * Bewegung	0,002	0,013
Säure * Behandlung	0,000	0,000
Säure * Bewegung	0,000	0,000
Behandlung * Bewegung	0,064	0,816
Wirkstoff * Säure * Behandlung	0,000	0,000
Wirkstoff * Säure * Bewegung	0,000	0,000
Wirkstoff * Behandlung * Bewegung	0,019	0,000
Säure * Behandlung * Bewegung	0,806	0,000
Wirkstoff * Säure * Behandlung * Bewegung	0,262	0,003

Für die Daten aller Proben in den Versuchen 1 und 2 zeigte jeder einzelne Parameter und jede Kombination der unterschiedlichen Parameter einen signifikanten Einfluss ($p \leq 0,05$) auf die Ergebnisse der Studie mit der Ausnahme der Kombination Behandlung (Slurry oder Slurry und Bürsten) und Bewegung (Schüttelplatte oder Wasserbad) ($p = 0,816$). Für die Daten der Proben, die mit 1%iger und 0,5%iger Säure demineralisiert wurden, zeigte die Kombination der Parameter Behandlung und Bewegung keinen signifikanten Einfluss auf die Studienergebnisse ($p = 0,064$), ebenso die Kombination der Parameter Säure (Konzentration 1%, 0,5%, 0,3% mit nativem pH-Wert oder 0,3% mit adjustiertem pH-Wert), Behandlung und Bewegung sowie die Kombination aller vier Parameter ($p = 0,806$ respektive $p = 0,262$). Alle anderen Kombination sowie jeder einzelne Parameter hatten einen signifikanten Einfluss ($p \leq 0,05$) auf die Ergebnisse der Studie.

3.3 Modelle mit 0,3%iger Zitronensäure

In den Versuchen wurde 0,3%ige Zitronensäure sowohl mit nativem als auch mit adjustiertem pH-Wert verwendet. Dabei zeigten sich auf den Proben überwiegend Auflagerungen (s. Tab. 9).

Tab. 9: Die Tabelle enthält die Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) der mit 0,3%iger Zitronensäure behandelten Gruppen in μm . Die Zitronensäuren hatten sowohl einen nativen pH-Wert (als 0,3% benannte Zeilen) als auch einen adjustierten pH-Wert (*pH 3,6*). Die Demineralisation fand entweder auf der Schüttelplatte (SP) oder im Wasserbad (WB) statt. Die Gruppen wurden entsprechend der Zuordnung zu einer Zahnpaste entweder nur mit der zugehörigen Suspension behandelt (S) oder zusätzlich während dieser Behandlung gebürstet (S+B). Positive Werte geben Substanzverluste an, negative Werte (**fett gedruckt**) stehen für Auflagerungen. Die statistische Auswertung wurde für Proben mit Substanzverlusten erstellt. Gruppen mit Auflagerungen wurden statistisch nicht ausgewertet. Die Großbuchstaben stehen für den Vergleich zwischen den verschiedenen Zahnpasten unter ansonsten gleichen Bedingungen (Zeile; nur bei 0,3% SP, S+B). Die Kleinbuchstaben stellen den Vergleich zwischen den auf der Schüttelplatte und den im Wasserbad demineralisierten Proben der Slurrygruppen (lateinisch) sowie der Bürstgruppen (griechisch) unter ansonsten gleichen Bedingungen (innerhalb einer Spalte) dar. Gleiche Buchstaben bedeuten, dass es keinen statistisch signifikanten Unterschied in der Höhe der Substanzverluste gibt. Die Proben der Bürst- und Slurrygruppen, die bei Behandlung mit gleicher Suspension unter denselben Bedingungen einen signifikanten Unterschied aufwiesen, wurden mit * markiert.

		<i>Kontrolle</i>	<i>SnF₂/NaF</i>	<i>SnF₂</i>	<i>NaF</i>
		MW \pm SD	MW \pm SD	MW \pm SD	MW \pm SD
0,3% SP	S	-0,1 \pm 3,0	2,0 \pm 1,1 ^{a*}	-13,0 \pm 6,7	-23,1 \pm 6,2
	S+B	2,1 \pm 2,0 ^A	8,4 \pm 4,4 ^{Bα*}	2,1 \pm 1,2 ^A	-10,9 \pm 6,1
0,3% WB	S	-2,9 \pm 4,1	1,2 \pm 0,3 ^b	-15,0 \pm 10,7	-22,4 \pm 14,4
	S+B	-1,2 \pm 4,4	4,3 \pm 1,7 ^{β}	-6,7 \pm 8,2	-23,6 \pm 11,8
<i>pH 3,6</i> SP	S	-14,5 \pm 10,7	0,7 \pm 0,6 ^c	-2,8 \pm 5,1	-25,5 \pm 21,7
	S+B	-14,0 \pm 10,7	0,6 \pm 0,3 ^{δ}	-0,1 \pm 2,6	-27,9 \pm 15,5
<i>pH 3,6</i> WB	S	-23,1 \pm 7,9	0,6 \pm 0,3 ^c	-20,6 \pm 15,5	-11,9 \pm 19,9
	S+B	-10,7 \pm 5,7	0,5 \pm 0,3 ^{δ}	-4,4 \pm 7,1	-23,8 \pm 6,5

Bei den mit SnF₂/NaF-haltiger Suspension behandelten Gruppen sind geringe Substanzverluste aufgetreten. Die anderen Gruppen wiesen überwiegend Auflagerungen auf. Lediglich die mit fluoridfreier sowie SnF₂-haltiger

Suspension gebürsteten Proben, die mit der nativen 0,3%igen Zitronensäure auf der Schüttelplatte demineralisiert wurden, zeigten leichte Substanzverluste, die untereinander keinen statistisch signifikanten Unterschied in der Höhe aufwiesen. Diese Substanzverluste waren um 75% geringer als die Substanzverluste der SnF₂/NaF-Gruppe.

Nach der Demineralisation mit der nativen 0,3%igen Zitronensäure stellten sich für die mit SnF₂/NaF-haltiger Suspension behandelten Proben die Substanzverluste der gebürsteten Gruppen signifikant höher dar als die Verluste der nicht gebürsteten Gruppen. Auch war der Substanzverlust bei den auf der Schüttelplatte demineralisierten Proben signifikant größer als bei den im Wasserbad demineralisierten Proben.

Nach der Demineralisation mit pH-Wert adjustierter Zitronensäure zeigten die mit SnF₂/NaF-haltiger Suspension behandelten Gruppen Substanzverluste von 0,5 - 0,7 µm. Für diese vier Gruppen gab es weder zwischen den gebürsteten und den nicht gebürsteten Proben noch zwischen den auf der Schüttelplatte und den im Wasserbad demineralisierten Proben einen statistisch signifikanten Unterschied.

3.4 Effekte der Mineralsalzkonzentration in den Zahnpastensuspensionen

Abbildung 6 zeigt die Substanzverluste und Auflagerungen in Abhängigkeit von der Lösung, mit der die Zahnpastensuspensionen aus den Marktprodukten angemischt wurden. Es wurde Mineralsalzlösung (MSL), verdünnte Mineralsalzlösung (verd. MSL; 1:1 mit Aqua dest.) sowie destilliertes Wasser verwendet. Die Demineralisation fand mit Zitronensäure der Konzentration 0,3% (nativer pH-Wert) auf der Schüttelplatte statt.

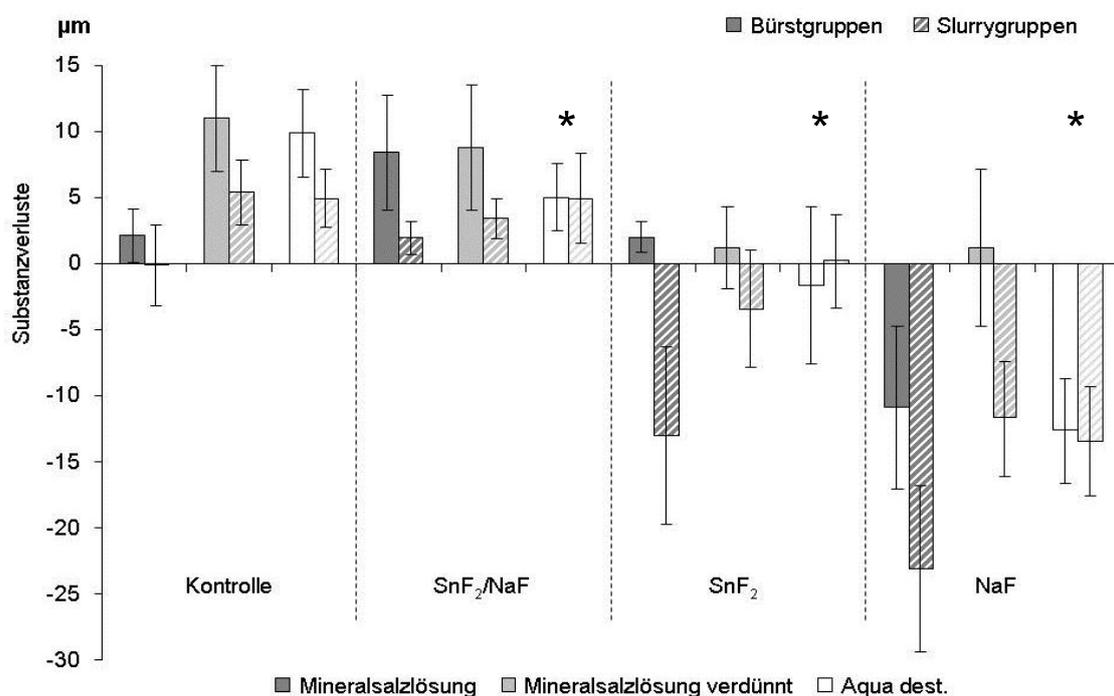


Abb. 6: Das Balkendiagramm zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Substanzverluste (positive Werte) und Auflagerungen (negative Werte) in Abhängigkeit von der Lösung, mit der die Suspensionen aus den Marktprodukten angemischt wurden. Die Demineralisation der Proben fand mit 0,3%iger Zitronensäure (nativer pH-Wert) auf der Schüttelplatte statt. Die verwendeten Slurries wurden entweder mit Mineralsalzlösung (dunkelgraue Balken), mit verdünnter Mineralsalzlösung (hellgraue Balken) oder mit destilliertem Wasser (Aqua dest.; weiße Balken) angemischt. Die eine Hälfte der Proben wurde mit der entsprechenden Suspension behandelt (schraffierte Balken), die andere Hälfte wurde während dieser Slurrybehandlung zusätzlich gebürstet (vollständig gefärbte Balken). Die Gruppen, die bei Behandlung mit gleicher Suspension keinen signifikanten Unterschied zwischen gebürsteten und nicht gebürsteten Proben aufwiesen, wurden mit * markiert. Die restliche statistische Auswertung dieses Versuchs ist der Tabelle 8 zu entnehmen.

Bei den mit der fluoridfreien Zahnpaste behandelten Kontrollgruppen sind überwiegend Substanzverluste aufgetreten.

Lediglich die Slurrykontrollgruppe, die mit einer Suspension aus fluoridfreier Zahnpaste und MSL behandelt wurde, zeigt im Mittel weder Auflagerungen noch Substanzverluste. Die Substanzverluste der Slurrygruppen nach Anwendung der Suspensionen aus verd. MSL und aus destilliertem Wasser zeigten keinen signifikanten Unterschied zueinander.

Die Substanzverluste der Bürstgruppen sind signifikant höher im Vergleich mit den zugehörigen Slurrygruppen.

Die Höhe der Substanzverluste der mit einer Suspension aus MSL gebürsteten Proben ist signifikant geringer als die Verluste der mit einer Suspension aus verd. MSL oder destilliertem Wasser gebürsteten Proben. Die beiden letzteren Gruppen zeigen keinen signifikanten Unterschied untereinander.

Die mit der SnF₂/NaF-haltigen Zahnpaste behandelten Proben wiesen in allen Gruppen Substanzverluste auf.

Die mit der Suspension aus MSL behandelten nicht gebürsteten Proben wiesen einen signifikant geringeren Substanzverlust auf als die mit einer Suspension aus verd. MSL oder destilliertem Wasser behandelten Proben. Die beiden letzteren Gruppen zeigten keinen signifikanten Unterschied in der Höhe ihrer Substanzverluste auf. Tendenziell nahm die Höhe der Substanzverluste für die nicht gebürsteten Proben mit abnehmendem Mineralgehalt der Suspensionen zu.

Die Proben, die mit einer Suspension aus destilliertem Wasser behandelt wurden, zeigten keinen signifikanten Unterschied zwischen der Bürst- und der Slurrygruppe. Die Substanzverluste der mit einer Suspension aus MSL oder verd. MSL gebürsteten Proben waren signifikant größer als die Verluste der entsprechenden Slurrygruppen und zeigten untereinander keinen signifikanten Unterschied.

Die mit dem SnF₂-haltigen Gel behandelten Proben wiesen entweder Auflagerungen oder geringe Substanzverluste auf.

Die mit der Suspension aus MSL behandelten und nicht gebürsteten Proben wiesen deutliche Auflagerungen auf. Die mit einer Suspension aus verd. MSL behandelten nicht gebürsteten Proben zeigten um etwa 75% weniger hohe Auflagerungen. Die mit einer Suspension aus destilliertem Wasser behandelten nicht gebürsteten Proben wiesen im Mittel weder Auflagerungen noch Substanzverluste auf. Die Höhe der Auflagerungen bei den nicht gebürsteten Proben nahm mit dem abnehmendem Mineralgehalt der Suspension ab.

Sowohl die mit der Suspension aus MSL als auch die mit der Suspension aus verd. MSL gebürsteten Proben zeigten geringe, zu den Auflagerungen der mit diesen Suspensionen nicht gebürsteten Gruppen statistisch signifikant unterschiedliche Substanzverluste. Die mit der Suspension aus destilliertem Wasser gebürsteten Proben wiesen leichte Auflagerungen auf, die sich statistisch nicht von den Werten der zugehörigen nicht gebürsteten Proben unterscheiden.

Die geringen Substanzverluste der mit der Suspension aus MSL gebürsteten Proben zeigten keinen signifikanten Unterschied in ihrer Höhe zu den Verlusten der mit einer Suspension aus verd. MSL gebürsteten Proben.

Die mit NaF-haltiger Zahnpaste behandelten Proben zeigten überwiegend Auflagerungen. Lediglich die Gruppe, die mit der Suspension aus verd. MSL gebürstet wurde, zeigte unter diesen Versuchsbedingungen im Mittel geringe Substanzverluste.

Die Auflagerungen der mit der Suspension aus MSL behandelten nicht gebürsteten Proben waren ungefähr doppelt so hoch im Vergleich mit den Auflagerungen der anderen mit NaF-haltiger Suspension behandelten Gruppen. Im Vergleich zwischen der Bürst- und der Slurrygruppe unter ansonsten gleichen Bedingungen zeigten die mit der Suspension aus destilliertem Wasser behandelten Proben keinen statistisch signifikanten Unterschied untereinander. Es fand keine weitere statistische Auswertung für Gruppen mit Auflagerungen statt.

Eine Übersicht über die Mittelwerte und Standardabweichungen gibt Tabelle 10.

Tab. 10: Die Tabelle enthält die Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) der mit 0,3%iger Zitronensäure (nativer pH-Wert) auf der Schüttelplatte demineralisierten Proben in μm . Die Proben wurden mit einer Suspension behandelt (S). Die Hälfte der Proben wurde zusätzlich während dieser Behandlung gebürstet (S+B). Die Suspensionen wurden entweder mit Mineralsalzlösung (MSL), verdünnter Mineralsalzlösung (verd. MSL) oder destilliertem Wasser (Aqua dest.) aus den vier Marktprodukten angemischt. Positive Werte geben Substanzverluste an, negative Werte (**fett gedruckt**) stehen für Auflagerungen. Die statistische Auswertung wurde für Proben mit Substanzverlusten erstellt. Gruppen mit Auflagerungen wurden statistisch nicht ausgewertet mit Ausnahme für den Vergleich zwischen gebürsteten und nicht gebürsteten Proben unter ansonsten gleichen Bedingungen (s. auch Abb. 6). Die Großbuchstaben stehen für den Vergleich zwischen den verschiedenen Zahnpasten unter ansonsten gleichen Bedingungen (innerhalb einer Zeile). Die lateinischen Kleinbuchstaben zeigen den Vergleich zwischen den Slurrygruppen (grau) und die griechischen Kleinbuchstaben den Vergleich zwischen den Bürstgruppen (weiß), die mit Zahnpastensuspensionen unterschiedlichen Mineralgehaltes behandelt wurden (innerhalb einer Spalte). Gleiche Buchstaben bedeuten, dass es keinen statistisch signifikanten Unterschied in der Höhe der Substanzverluste gibt. Die Gruppen, die bei Behandlung mit der gleichen Suspension unter denselben Bedingungen keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den gebürsteten und den nicht gebürsteten Proben aufwiesen, wurden mit einem * markiert.

		<i>Kontrolle</i>	<i>SnF₂/NaF</i>	<i>SnF₂</i>	<i>NaF</i>
		MW \pm SD	MW \pm SD	MW \pm SD	MW \pm SD
<i>MSL</i>	S	-0,1 \pm 3,0	2,0 \pm 1,1 ^a	-13,0 \pm 6,7	-23,1 \pm 6,2
	S+B	2,1 \pm 2,0 ^{Aα}	8,4 \pm 4,4 ^{Bα}	2,1 \pm 1,2 ^{Aα}	-10,9 \pm 6,1
<i>verd. MSL</i>	S	5,4 \pm 2,5 ^{Aa}	3,4 \pm 1,4 ^{Bb}	-3,4 \pm 4,3	-11,7 \pm 4,1
	S+B	11,0 \pm 4,0 ^{Aβ}	8,8 \pm 4,8 ^{Aα}	1,2 \pm 2,9 ^{Bα}	1,2 \pm 6,0 ^B
<i>Aqua dest.</i>	S	4,9 \pm 2,2 ^{Aa}	4,9 \pm 3,3 ^{Ab*[*]}	0,2 \pm 3,5 ^{B*[*]}	-13,4 \pm 3,9*
	S+B	9,9 \pm 3,4 ^{Aβ}	5,0 \pm 2,5 ^{Bβ*[*]}	-1,7 \pm 6,1*	-12,7 \pm 3,9*

4 Diskussion

4.1 Probenmaterial

Für diese Studie wurden Proben aus menschlichen, zuvor vollständig retinierten dritten Molaren hergestellt. So wurde sichergestellt, dass die verwendeten Zähne kariesfrei und nicht den Einflüssen der Mundhöhle ausgesetzt waren. Dadurch lag möglichst einheitliches Probenmaterial vor.

Es wurde humanes Material verwendet, da Erosions-Abrasions-Vorgänge multifaktoriell sind und das Voranschreiten von Zahnhartsubstanzdefekten sowie deren Vermeidung unter anderem von dem verwendeten Probenmaterial abhängig sein können [Attin et al., 2007]. Neben humanem Material kommt auch bovines Material in Frage, welches in zahlreichen Studien verwendet wurde [Rochel et al., 2011; Levy et al., 2012; Wegehaupt et al., 2011; Wiegand et al., 2010; Moretto et al., 2010] (siehe auch Tabelle 9.1.1 im Anhang). Der Vorteil bei der Verwendung von bovinem gegenüber humanem Material ist die gute Verfügbarkeit. Allerdings zeigt bovines Material mitunter im Vergleich zu humanem Material andere Eigenschaften.

Es liegen einige Studien vor, die die Eigenschaften von humanen und bovinen Zahnhartsubstanzen unter erosiven oder erosiv-abrasiven Bedingungen vergleichen [Attin et al., 2007; Rios et al., 2006b; White et al., 2010]. Eine rasterelektronenmikroskopische Studie zeigte, dass boviner Schmelz poröser als humaner Schmelz ist und die Kristallite in gesundem bovinem Schmelz einen größeren Durchmesser (etwa 57 nm) haben als die Kristallite in gesundem humanem Schmelz (etwa 36 nm) [Arends und Jongebloed, 1978]. Vermutlich ist daher boviner Schmelz anfälliger für Demineralisationsprozesse als humaner Schmelz [Attin et al., 2007]. In einer Erosionsstudie konnte bei kurzen Demineralisationszeiten bis zu einer Minute kein statistisch signifikanter Unterschied bei Messung der Nanohärte zwischen den bovinen und den humanen Schmelzproben gezeigt werden [White et al., 2010]. Allerdings zeigten sich bei längeren Demineralisationszeiten von bis zu 60 Minuten bei

den bovinen Proben statistisch signifikant höhere Substanzverluste (um etwa 30%) als bei humanen Schmelzproben [White et al., 2010]. In der vorliegenden Arbeit wurden die Proben jeweils insgesamt über einen Zeitraum von 120 Minuten demineralisiert. Daher wären nach dieser Zeit signifikant höhere Substanzverluste bei Verwendung von bovinem Material zu erwarten gewesen. Unter rein erosiven sowie unter erosiv-abrasiven Bedingungen zeigten sich für humane Schmelzproben sowohl statistisch signifikant geringere Substanzverluste [Attin et al., 2007; Rios et al., 2006b] als auch signifikant höhere Werte der oberflächlichen Mikrohärtigkeit als bei Schmelzproben von Rinderzähnen [Rios et al., 2006b]. Die Verwendung von bovinen Zähnen hätte somit unter Umständen zur Überschätzung der Erosions-/Abrasionseffekte geführt.

In einem Review über humane und bovine Zahnhartsubstanzen und deren Eigenschaften und Verhalten unter erosiven Einflüssen [Laurance-Young et al., 2011] wurde zusammengefasst, dass es keinen optimalen Ersatz für humanes Probenmaterial gibt. Zwar läuft die Demineralisation bis hin zur Dissolution von bovinem und humanem Schmelz morphologisch gleich ab [Meurman und Frank, 1991]. Auch würde es ohne die an bovinem Material durchgeführten in-vitro-Studien weit weniger allgemeines Verständnis für die von multifaktoriellen Einflüssen abhängigen Vorgänge unter erosiven und/oder abrasiven Bedingungen geben. Jedoch sollte wenn möglich humanes Probenmaterial verwendet werden [Laurance-Young et al., 2011].

Die Proben wurden hergestellt, indem Schmelzschnitte schrittweise plan poliert wurden. Dadurch wurde die natürliche Oberfläche, in der niedrigere Konzentrationen an Magnesium und Karbonat als in den tieferen Schmelzschichten vorliegen [Barbour und Rees, 2004], entfernt. In Studien wurde gezeigt, dass die polierte Schmelzoberfläche unter erosiven Bedingungen mehr Substanzverluste aufweist als die natürliche Oberfläche und somit anfälliger für Erosionen ist [Ganss et al., 2000; Meurman und Frank, 1991]. Dadurch sind die Substanzverluste in Studien mit polierten Schmelzproben größer als in der klinischen Situation bei intakter

Schmelzoberfläche zu erwarten wäre. Bei der vorliegenden Studie kann diese polierte Fläche jedoch als Zustand angesehen werden, der der intraoralen Situation von Patienten mit Erosionen entspricht, bei der die äußerste Schmelzschicht durch Säuren bereits entfernt wurde [Attin, 2006].

Zusätzlich wirkt sich eine plane Oberfläche günstig auf das Messen von Stufenhöhen aus, weil dabei reliablere Werte erhalten werden als bei gekrümmten oder unebenen Oberflächen [West et al., 2011]. So ist nach dem Polieren der Schmelzoberfläche eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Proben oder sogar zwischen den Studien möglich.

4.2 Messmethode

In der vorliegenden Arbeit sind die Anforderungen an die Messmethode hoch, da der erwartete Messbereich umfangreich ist. Da das Messverfahren im Anschluss an den Versuchsteil stattfand, keine Zwischenmessungen vorgesehen waren und die Schmelzproben nach dem Messen zu keinen weiteren Untersuchungen benötigt wurden, hätten sowohl destruktive als auch non-destruktive Methoden in Erwägung gezogen werden können. Wegen der in einigen Gruppen auf den Proben befindlichen Auflagerungen sollte eine Methode gewählt werden, die ohne Veränderung dieser Auflagerungen die Oberfläche erfassen und zudem sowohl große als auch kleine Substanzverluste darstellen kann.

In der Erosionsforschung häufig angewandte Messmethoden sind unter anderem die Profilometrie [Wiegand et al., 2010; Magalhaes et al., 2008; Passos et al., 2013; Ganss et al., 2011; Esteves-Oliveira et al., 2011; Rochel et al., 2011], die longitudinale Mikroradiographie (LMR) [Ganss et al., 2009], die Kalziumanalyse [Ganss et al., 2009], die Oberflächenhärtebestimmung [Jaeggi und Lussi, 1999; Magalhaes et al., 2008; Moretto et al., 2010; Austin et al., 2011] sowie die Nanoindentation [Voronets und Lussi, 2010]. Vergleichende Übersichtsarbeiten sind bereits vorhanden [Stenhagen et al., 2010; Schlueter et al., 2011; Barbour und Rees, 2004; Hannig et al., 2008] und im Folgenden soll nur kurz auf Messprinzipien sowie ihre Vor- und Nachteile eingegangen werden.

Die in der Erosionsforschung häufig genutzten Messmethoden sind für initiale Läsionen die chemische Analyse der gelösten Mineralien und die Bestimmung der Härte der Schmelzoberfläche sowie für fortgeschrittene Läsionen ebenfalls die chemische Analyse, die Mikroradiographie und die Profilometrie [Schlueter et al., 2011].

Die Kalziumanalyse ist ein in der Erosionsforschung etabliertes [Grenby, 1996] und auch für geringe Substanzverluste zuverlässiges Messverfahren [Field et

al., 2010; Attin, 2006]. Der Substanzverlust wird durch die in Lösung gegangene Menge an Mineralien in der Demineralisationsflüssigkeit angegeben. Jedoch sind Aussagen zur Quantifizierung von Substanzverlusten nur indirekt möglich, indem die Menge an in Lösung gegangenem Mineral mit einer Formel, die den durchschnittlichen Gehalt an Mineral in der Zahnhartsubstanz berücksichtigt, als räumlicher Substanzverlust umgerechnet wird [Ganss et al., 2005]. Qualitative Aussagen zu physikalischen und morphologischen Veränderungen sind ebenso wenig möglich [Field et al., 2010; Schlueter et al., 2011] wie die Darstellung von Mineralanlagerungen auf der Probenoberfläche [Schlueter et al., 2011]. Daher war die Kalziumanalyse für die vorliegende Arbeit nicht als Messmethode geeignet.

Bei der Mikrohärtbestimmung wird durch einen vorgegebenen Diamantkörper auf der Probenoberfläche eine Impression verursacht [Attin, 2006]. Dabei wird anhand des Ausmaßes der Impression und der dafür aufgebrauchten Kraft die Oberflächenhärte bestimmt [Schlueter et al., 2011]. Die Impressionen sind auf gesundem Schmelz etwa 1,5 bis 5 μm tief [Featherstone, 1992; Attin, 2006]. Diese Messmethode wird überwiegend bei initialen Läsionen ohne oder mit nur geringen räumlichen Substanzverlusten angewandt [Cheng et al., 2009; Voronets und Lussi, 2010]. Sie ist bei Substanzverlusten, die die Tiefe der bereits erfolgten Impressionen (maximal 5 μm) überschreitet, ungeeignet, da dieser Verlust nicht quantifiziert werden kann.

Die Nanoindentation funktioniert nach demselben Prinzip in geringeren Dimensionen. So verursacht der verwendete Diamant eine Impression von normalerweise maximal 1 μm Länge [Schlueter et al., 2011; Mahoney et al., 2003] und etwa 200 nm Tiefe [Barbour und Rees, 2004]. Daher ist die Nanoindentation bei frühen initialen Läsionen mit geringer Ausdehnung der demineralisierten Oberfläche noch sensitiver als die Mikrohärtbestimmung [Barbour und Rees, 2004].

Da in der vorliegenden Arbeit auch Auflagerungen und Substanzverluste von mehr als 5 μm dargestellt werden mussten, waren die Nanoindentation sowie die Mikrohärtbestimmung als Messmethode ungeeignet.

Die longitudinale Mikroradiographie ist eine Messmethode, die den Mineralgehalt der Proben mit Röntgenstrahlung im Vergleich zu einem Referenzkörper auf einem Röntgenfilm darstellt [Barbour und Rees, 2004; de Josselin de Jong et al., 1987]. Der Vorteil der Mikroradiographie, das Vermögen die unter der Oberfläche befindlichen teilweise demineralisierten Zahnhartsubstanzanteile darstellen zu können [Pretty et al., 2004; Field et al., 2010; Barbour und Rees, 2004], ist für die vorliegende Arbeit nicht relevant. Zudem erbringen die durch die Mikroradiographie gewonnenen Werte keine Informationen über die Oberflächenmorphologie [Field et al., 2010]. Diese Messmethode ist für größere Substanz- oder Mineralverluste gut geeignet [Field et al., 2010], jedoch ist das Verfahren bei Substanzverlusten von weniger als 20 μm nicht reliabel [Ganss et al., 2005; Attin, 2006]. Für die in dieser Arbeit erwarteten teilweise sehr geringen Substanzverluste war das Verfahren der longitudinalen Mikroradiographie daher ebenfalls nicht geeignet.

Die Profilometrie ist die zwei- oder dreidimensionale Darstellung der Oberflächentopographie mit einem mechanischen Taster oder optischen Sensor [Schlueter et al., 2011]. Ein mechanischer Taster erfasst unter Berührung die Probenoberfläche. Er kann in die sehr fragile äußerste Schicht der erosiven Läsion [Attin, 2006; Barbour und Rees, 2004] und auch in vorhandene Auflagerungen einsinken und diese beschädigen. Daher war die unter Berührung arbeitende Profilometrie nicht geeignet. Die optische Profilometrie hingegen erfasst die Probenoberfläche berührungslos. Daher können mit diesem Messverfahren sowohl Substanzverluste als auch Auflagerungen dargestellt werden. Mit der optischen Profilometrie kann abhängig von dem verwendeten Sensor in einem vertikalen Bereich von bis zu 10 mm gemessen werden [Schlueter et al., 2011], so dass auch große Substanzverluste erfasst werden können. Geringe Substanzverluste ab einem Wert von 1 μm [Hannig et al., 2008], teilweise sogar Substanzverluste und Auflagerungen von weniger als 1 μm [Cross et al., 2009] können mit einem optischen Profilometer zuverlässig gemessen werden. Die Rauigkeit von 50

Schmelzproben nach Säureeinwirkung liegt bei etwa $0,4 \mu\text{m}$ [Attin et al., 2009]. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Profilometrie ab einer Stufenhöhe, die größer als die Rauigkeit der Oberfläche ist, zu einer korrekten Messbarkeit der Substanzverluste oder Auflagerungen führt [Attin und Wegehaupt, 2014].

Die optische Profilometrie erfüllt damit alle gestellten Anforderungen und wurde als Messmethode für die vorliegende Arbeit gewählt. Da der Sensor ohne Berührung misst, konnten sowohl vorhandene Auflagerungen von den Zahnpastensuspensionen als auch Präzipitate der Mineralsalzlösung dargestellt werden. Durch die in dieser Studie durchgeführten Konstanzmessungen wurde gezeigt, dass sowohl große als auch kleine Substanzverluste reproduzierbar und genau dargestellt werden konnten.

4.3 Erosives Medium

Mehrere Eigenschaften der zur Demineralisation eingesetzten Säure haben Einfluss auf das Entstehen und Voranschreiten der erosiven Läsion. Dazu gehören neben der Dauer der Demineralisation [West et al., 2000] auch die Konzentration [Shellis et al., 2010; West et al., 2000], die Bewegung [Eisenburger und Addy, 2003; Wiegand et al., 2007a] sowie der pH-Wert, die Temperatur, die Menge an titrierbarer Säure, die Puffereigenschaften oder das Potential zur Chelatbildung der Demineralisationslösung [West et al., 2001].

4.3.1 Art der Säure in der Demineralisationslösung

Zitronensäure ist die in Erosions- oder Erosions-Abrasions-Studien am häufigsten zur Demineralisation genutzte synthetische Säure (siehe auch Tabelle 9.1 im Anhang). Auch in Studien der eigenen Arbeitsgruppe wurde meistens Zitronensäure als Demineralisationslösung verwendet [Ganss et al., 2000; Ganss et al., 2005; Ganss et al., 2011; Ganss et al., 2008; Schlueter et al., 2009c; Schlueter et al., 2007; Ganss et al., 2012; Schlueter et al., 2010]. Häufig wird die Demineralisation auch direkt mit handelsüblichen Getränken wie Säften oder Limonaden durchgeführt [Moretto et al., 2010; Levy et al., 2012; Wiegand et al., 2010; Wegehaupt et al., 2011; Rochel et al., 2011; Levy et al., 2012]. Allerdings sind dabei veränderte Puffereigenschaften der verschiedenen enthaltenen Säuren [Cairns et al., 2002] oder Wechselwirkungen anderer Inhaltsstoffe dieser Getränke mit der Schmelzoberfläche nicht auszuschließen, wodurch eine Standardisierung der Versuchsbedingungen schlechter möglich ist. Die Verwendung von Zitronensäure in der vorliegenden Arbeit ermöglichte also eine bessere Standardisierung sowie eine gute Vergleichbarkeit mit Studien der eigenen Arbeitsgruppe und der Literatur.

Zitronensäure ist eine diätetische Säure, die sowohl in vielen Lebensmitteln natürlich vorkommt als auch industriell zugesetzt wird. Im Jahr 1994 wurden

rund 60% der synthetischen Zitronensäure in der Lebensmittelindustrie eingesetzt [Bundesinstitut für Risikobewertung, 2005].

Zitronensäure ist aufgrund des niedrigen nativen pH-Wertes erosiv. Zusätzlich stellt ihre Eigenschaft als Chelator ein erosionssteigerndes Potential dar [West et al., 2001], sie dissoziiert in drei Schritten unter Abgabe von H^+ -Ionen [Shellis et al., 2014]. Bei ansteigendem pH-Wert werden Kalzium-Ionen durch Bindung aus dem Gleichgewicht entzogen. Dadurch kann der Speichel auch bei steigendem pH-Wert im Verhältnis zum Zahn untersättigt sein, so dass durch den Chelateffekt weitere Ionen aus der Zahnhartsubstanz herausgelöst werden können [Meurman und tenCate, 1996] und damit dieser Effekt einen erosiv bedingten Zahnhartsubstanzverlust verstärken kann.

4.3.2 Konzentration und pH-Wert der Demineralisationslösungen

In der vorliegenden Arbeit wurde Zitronensäure in den Konzentrationen 1%, 0,5% sowie 0,3% mit nativem pH-Wert und Zitronensäure in der Konzentration 0,3% mit einem adjustiertem pH-Wert von 3,6 verwendet. Auch in der Literatur wurden in Studien Zitronensäuren mit den Konzentrationen 1% [Shellis et al., 2010; West et al., 2000] und 0,5% [West et al., 2000] ebenso wie Säuren der schwachen Konzentration 0,3% sowohl mit nativem [West et al., 2000] als auch mit adjustiertem pH-Wert [Eisenburger und Addy, 2001; West et al., 2001; Shellis et al., 2010] verwendet. Dies führt zu einer guten Vergleichbarkeit mit Erosions- oder Erosions- Abrasions- Studien, die in der Literatur zu finden sind (s.a. Tabelle 9.1 im Anhang).

In der Literatur findet man Studien, bei denen die Demineralisation mit mehreren Zitronensäuren unterschiedlicher Konzentrationen durchgeführt wurde [Shellis et al., 2010; West et al., 2000]. Zwar zeigen diese Studien, dass die Säurekonzentration erheblichen Einfluss auf die Progression der Demineralisation in Zahnhartgeweben hat. Auch wurde gezeigt, dass eine Erhöhung der Konzentration der Demineralisationslösung einen erhöhten Substanzverlust verursacht [Shellis et al., 2010]. Allerdings handelt es sich bei diesen beiden Studien um reine Erosionsstudien in denen es weder abrasive

Einflüsse vorlagen noch wirkstoffhaltige Präparate beziehungsweise Suspensionen Anwendung fanden.

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Zitronensäuren wiesen native pH-Werte von 2,3 bis 2,8 auf. Diese Werte entsprechen etwa dem Bereich, in dem sich die pH-Werte von säurehaltigen Erfrischungsgetränken befinden [Jain et al., 2007; Larsen und Nyvad, 1999]. Zusätzlich wurde eine 0,3%ige Zitronensäure mit einem adjustiertem pH-Wert von 3,6 verwendet. Dies entspricht ungefähr dem pH-Wert von Orangensaft [Attin et al., 2005].

4.3.3 Bewegungsform der Demineralisationslösung

In vielen in-vitro-Studien fand die Demineralisation unter Bewegung der Säure statt. Angaben zur Art und Frequenz der Bewegung sind häufig nicht genauer benannt, wodurch quantitative Vergleiche nur bedingt möglich sind. Jedoch wurde festgestellt, dass sowohl die Art als auch die Geschwindigkeit der Flüssigkeitsbewegung einen Einfluss auf die Höhe der Substanzverluste hat. So erhöht sich die Höhe des Substanzverlustes durch einen laminaren Fluss der Demineralisationslösung gegenüber einer unbewegten Lösung. Durch Rühren der Lösung steigt die Höhe des Substanzverlustes weiter an und erhöht sich mit der Rührgeschwindigkeit. Auch durch das Auftreffen der Demineralisationslösung als Strahl wird ein höherer Substanzverlust als beim laminaren Spülen erzielt [Eisenburger und Addy, 2003].

In den dieser Arbeit zugrunde liegenden Versuchen wurde eine Hälfte der Proben im Wasserbad, die andere Hälfte auf der Schüttelplatte erodiert. Auch in einer vorangegangenen Studie der eigenen Arbeitsgruppe zeigte sich ein Unterschied in der Höhe der Substanzverluste nach Demineralisation der Proben auf die beiden in der vorliegenden Arbeit angewendeten Demineralisationsarten [Ganss et al., 2011]. In der vorangegangenen Studie waren die Substanzverluste für die Negativkontrollgruppe nach der Demineralisation mit 0,05 molarer (= 1%iger) Zitronensäure auf der Schüttelplatte fast doppelt so hoch (+ 92%) im Vergleich mit den Werten der

Substanzverluste nach Demineralisation im Wasserbad. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass sich in jener Studie zusätzlich zu der Art der Bewegung auch die Lagerung der Proben in der Demineralisationslösung unterschied. Während die Proben im Wasserbad horizontal gelagert wurden und die Lösung über die Probenoberfläche bewegt wurde, wurden die Proben auf der Schüttelplatte senkrecht gelagert und die Lösung wurde gegen die Probenoberfläche bewegt [Ganss et al., 2011]. In der vorliegenden Studie wurden alle Proben horizontal gelagert, um diesen Einfluss der Strömungsrichtung von der Demineralisationslösung zu den Probenoberflächen zu standardisieren. Zusätzlich wurden alle Proben auch entsprechend der Abdeckungen der Referenzflächen gleich ausgerichtet. Die Grenze zwischen Referenz- und Versuchsfläche aller Proben verlief parallel zur Strömungsrichtung der Demineralisationslösung. Alle Proben wurden also in derselben Richtung in Relation zum Verfahrensweg angeordnet. Bei den beiden Bewegungsformen waren sowohl der Verfahrensweg als auch die Frequenz nahezu gleich. Allerdings stellten sich die Bewegungen der Säure im Wasserbad sanft und kaum sichtbar dar, während die Säure auf der Schüttelplatte abrupte Bewegungen und leichte Wellen zeigte.

Durch die Standardisierung der Lagerungsrichtung und der Einstellungen des Verfahrensweges konnte damit der Einfluss anderer Parameter als die Bewegungsform auf die Höhe der Substanzverluste ausgeschlossen werden.

4.4 Marktprodukte

In der vorliegenden Arbeit wurden vier Marktprodukte in Form von Suspensionen angewendet. Diese Marktprodukte unterscheiden sich sowohl in ihren Wirkstoffen als auch in ihrer Abrasivität.

Es liegen Studien vor, in denen Marktprodukte oder experimentelle Formulierungen mit unterschiedlichen Wirkstoffen [Ganss et al., 2011; Hjortsjo et al., 2010] oder Abrasivitäten [Macdonald et al., 2010; Voronets et al., 2008; Hara et al., 2009; Parry et al., 2008] verwendet wurden. Auch andere Eigenschaften der Produkte können auf die Wirksamkeit und das Vermögen, erosiv- abrasive Zahnhartsubstanzverluste zu verringern oder zu inhibieren Einfluss haben. So ist anzunehmen, dass beispielsweise der pH-Wert [Attin et al., 1999] oder die Pufferkapazität [Betke et al., 2003] eines Produktes die Wirksamkeit beeinflussen. In der vorliegenden Arbeit werden die Produkte vor allem hinsichtlich ihrer Wirkstoffe betrachtet. Die Bedeutung der Abrasivität soll nur kurz diskutiert werden.

4.4.1 Wirkstoff

Durch die Wahl der Produkte sollte ein möglichst breites Wirkspektrum erreicht werden. Von den vier in der vorliegenden Arbeit verwendeten Marktprodukten enthielten drei Präparate Fluoridverbindungen.

Natriumfluorid ist der am weitesten verbreitete Wirkstoff in Mundhygieneprodukten. Daher wurde eine handelsübliche natriumfluoridhaltige Zahnpaste ohne besondere zusätzliche Indikation ausgewählt, um einen Vergleich mit vielen publizierten Studien zu ermöglichen (s.a. Tabelle 9.1 im Anhang). Zwar gibt es auf dem Markt spezielle Produkte mit der Indikation „Erosionsprophylaxe“. Viele dieser Produkte konnten allerdings in Versuchen im Vergleich mit herkömmlichen natrium- oder aminfluoridhaltigen Produkten keine bessere Wirksamkeit aufzeigen [Ganss et al., 2011], fluoridfreie Präparate mit der Indikation „Erosionsprophylaxe“ sind mitunter sogar unwirksam [Ganss et

al., 2011; Wang et al., 2011]. Daher wurde in der vorliegenden Arbeit kein solches Präparat untersucht. Produkte mit Zinnfluorid können den Zahnhartsubstanzverlust stärker reduzieren als natriumfluoridhaltige Präparate [Hooper et al., 2007; Hara et al., 2013; Comar et al., 2012]. Auch andere polyvalente Metallkationen wurden auf ihre erosionsprophylaktische Wirkung untersucht, von denen Titanverbindungen unter milden erosiven Bedingungen ebenfalls eine gute antierosive Wirkung aufweisen [Schlueter et al., 2009a; Yu et al., 2010; Hove et al., 2006; Hove et al., 2007; Wiegand et al., 2010; Levy et al., 2012]. Allerdings ist Titantetrafluorid in Deutschland als Wirkstoff nicht zugelassen. In der vorliegenden Arbeit wurde aufgrund der guten antierosiven Wirkung ein rein zinnfluoridhaltiges Produkt verwendet. Zudem wurde in einigen vorangegangenen Studien der eigenen Arbeitsgruppe dieses zinnfluoridhaltige und als wirksames Antierosivum bewertete Präparat als Positivkontrolle verwendet [Ganss et al., 2012; Ganss et al., 2011]. Dadurch wurde eine bessere Vergleichbarkeit innerhalb der Arbeiten der Arbeitsgruppe geschaffen. Das dritte verwendete Marktprodukt beinhaltet eine Kombination der beiden Wirkstoffe Natrium- und Zinnfluorid. Zusätzlich ist Hexametaphosphat enthalten, das in der vorliegenden Zahnpaste als Stabilisator für die Zinnverbindungen dient. Das vierte Produkt enthält keine Wirkstoffe und diente als Kontrolle.

4.4.2 Abrasivität

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Marktprodukte unterscheiden sich neben den Wirkstoffen auch in ihrer Abrasivität voneinander. Die Abrasivität von Zahnpasten wird durch den RDA-Wert angegeben. Dieser Wert steht für die ‚relative dentin abrasivity‘, also die Abrasivität einer Testsubstanz auf einer Dentinprobe in Relation zu der Abrasivität einer Standardsubstanz auf einer Dentinprobe. Niedrig-abrasive Zahnpasten weisen nach Indianapolis-Standard RDA-Werte unter 70 auf, moderate Werte liegen zwischen 70 und 150 und hoch-abrasive Zahnpasten haben einen RDA-Wert zwischen 151 und 250 [Giles et al., 2009]. Die RDA-Werte können theoretisch beliebig groß werden, jedoch wurde durch die International Organization for Standardization (Norm

DIN EN ISO 11609) sowie die American National Standards Institute und die American Dental Association (ANSI/ADA Standard No. 62 Dental Abrasive Pastes) ein Grenzwert von 250 festgesetzt, der bei Zahnpasten nicht überschritten werden sollte. Dadurch soll eine Schädigung der Zahnhartsubstanz durch eine eventuell zu hohe Abrasivität von Mundhygieneprodukten vermieden werden.

Auf gesundem Schmelz verursachen die meisten Zahnpasten keinen oder nur vernachlässigbare Substanzverluste [Hunter et al., 2002; Hooper et al., 2003]. Dagegen ist erosiv veränderter Schmelz anfälliger für Bürstabrasionen [Hooper et al., 2003]. Zum Einfluss des RDA-Wertes auf die Höhe des Substanzverlustes bei erodierter Zahnhartsubstanz liegen allerdings widersprüchliche Studien vor. In in vitro-Studien konnte unter erosiv-abrasiven Bedingungen eine positive Korrelation zwischen dem Verlust von Zahnhartsubstanz und dem RDA-Wert der dort verwendeten Produkte gezeigt werden [Voronets et al., 2008; Hara et al., 2009]. Dagegen zeigen andere Studien keinen oder nur einen vernachlässigbaren Einfluss des RDA-Wertes auf den Substanzverlust von Schmelz sowohl in vitro [Franzo et al., 2010], als auch in situ [Hooper et al., 2003].

In der vorliegenden Arbeit weisen die fluoridfreie Paste, die NaF-haltige Paste und das SnF₂-haltige Gel moderate oder geringe RDA-Werte von 77, 80 und 60 auf. Die SnF₂/NaF-haltige Paste setzt sich mit einem RDA-Wert von 119 zwar deutlich von den anderen Produkten ab, ist jedoch noch im moderaten RDA-Bereich [Gonzalez-Cabezas et al., 2013; Macdonald et al., 2010]. Die RDA-Werte der in der vorliegenden Studie verwendeten vier Produkte sind also deutlich geringer als der festgesetzte Grenzwert. Die Werte wurden für eine Studie der eigenen Arbeitsgruppe ermittelt [Ganss et al., 2011]. Dabei sollte beachtet werden, dass die RDA-Werte abhängig von der Durchführung ihrer Ermittlung stark schwanken können [Dörfer, 2011]. Es gibt mehrere Verfahren zur Ermittlung der RDA-Werte. Zwischen den mit unterschiedlichen Methoden ermittelten RDA-Werten derselben Testsubstanzen zeigten sich Unterschiede von teilweise über 50 Einheiten [Gonzalez-Cabezas et al., 2013] und auch die Werte aus unterschiedlichen Laboren können trotz der selben Methode

schwanken. Da die Werte der vier in der vorliegenden Studie verwendeten Produkte in einem einzigen Labor ermittelt wurden, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Relation der Werte untereinander korrekt ist.

4.5 Diskussion der Ergebnisse

4.5.1 Diskussion der Kontrollgruppen

In der vorliegenden Arbeit wurden für jeden Versuch drei Kontrollgruppen mitgeführt. Zu diesen gehören jeweils neben einer Negativkontrolle, die nur demineralisiert wurde, auch eine mit fluoridfreier Zahnpastensuspension behandelte Slurrykontrollgruppe sowie eine Bürstkontrollgruppe. Im Folgenden sollen die Effekte der Parameter Konzentration, pH-Wert und Bewegung der Säure sowie der Einfluss der Präzipitate auf die Ergebnisse der Kontrollgruppen näher betrachtet werden. Zusätzlich wird der Effekt der Abrasion auf die Resultate in diesen Gruppen diskutiert.

Säure

Konzentration

In kaum einer der in der Literaturrecherche einbezogenen 62 Studien werden Säuren unterschiedlicher Konzentrationen verwendet um deren Einfluss auf Erosions- oder Erosions- Abrasions- Studien zu untersuchen. Zwar findet man in der Literatur Studien, die belegen, dass eine höhere Säurekonzentration zu einem erhöhten Zahnhartsubstanzverlust führt [Shellis et al., 2010; Hughes et al., 2000; West et al., 2000]. In einer dieser Studien wurden allerdings lediglich zwei unterschiedliche Säurekonzentration verwendet [Shellis et al., 2010], so dass eine Aussage über eine Proportionalität nur bedingt getätigt werden kann. Ein Vergleich der Ergebnisse mit der Literatur ist insgesamt schwierig, da die erosiven Bedingungen zwischen den verwendeten Modellen ausgesprochen stark variieren. So wurden beispielsweise in zwei der genannten Studien die Säuren bei höheren Temperaturen verwendet [Hughes et al., 2000; West et al., 2000]. Es ist bekannt, dass die Erosivität einer Demineralisationslösung mit einem Anstieg der Temperatur steigt [Barbour et al., 2006]. In einer der genannten Studien wurden Zitronensäuren unterschiedlicher Konzentration verwendet, deren pH-Werte adjustiert waren [Hughes et al., 2000]. Die dort

untersuchten Säuren wiesen Konzentrationen von 0,1%, 0,35% und 0,6% auf und ihre pH-Werte waren jeweils auf 2,8 oder 3,3 beziehungsweise 3,8 adjustiert. So hatten einige der verwendeten Säuren ähnliche Konzentrationen und / oder pH-Werte wie in der vorliegenden Arbeit, durch die höheren Temperaturen waren die Demineralisationsbedingungen dennoch nicht vergleichbar. In einer weiteren Arbeit wurden zwar Zitronensäuren mit nativem pH-Wert mit teilweise denselben Konzentrationen wie in der vorliegenden Arbeit verwendet [West et al., 2000]. Allerdings wurde in jener Studie ein Modell angewendet, in dem keine Remineralisation stattfand. Dort wird gezeigt, dass die Höhe des Substanzverlustes mit Zunahme der Konzentration der Zitronensäure nicht linear steigt und zwischen einer Konzentration von 0,5% und 1% ein Plateau erreicht [West et al., 2000]. Durch das Dissoziieren der Zitronensäure in drei Schritten kann die Säure als Puffer wirken und pH-Schwankungen teilweise ausgleichen. Dadurch scheint es zu einem nicht linearen Zusammenhang zwischen Substanzverlust und Säurekonzentration zu kommen [Azadi-Schossig et al., 2015].

Die Konzentration von nativen Säuren ist ein Faktor, der die Höhe des Substanzverlustes beeinflusst. Grösseren Einfluss auf die Demineralisation scheinen der Sättigungsgrad in Bezug zur Zahnhartsubstanz [Barbour et al., 2005], die Konzentration der undissoziierten Säure und insbesondere der pH-Wert zu haben [Barbour und Shellis, 2007; Barbour et al., 2011]. Da in der vorliegenden Arbeit weder der Sättigungsgrad noch die Konzentration der undissoziierten Säure untersucht wurden, werden diese Parameter im Folgenden nicht diskutiert.

pH-Wert

Die pH-Werte der vier verwendeten Zitronensäuren liegen zwischen 2,3 und 3,6. In einer publizierten Studie konnte festgestellt werden, dass in diesem pH-Wert-Bereich bei der Demineralisation mit 0,3%iger Zitronensäure eine Erniedrigung des pH-Wertes von 4 auf 3 nur zu geringfügig höheren Substanzverlusten führt, während bei einer Erniedrigung des pH-Wertes von 3

auf 2,15 die Höhe des Substanzverlustes von 2-4 μm auf etwa 11,5 μm um das 2,5- bis 3-fache zunimmt [West et al., 2001]. Das bestätigt die Erkenntnisse einer anderen Studie, in der bei einer Änderung des pH-Wertes einer 0,3%igen Zitronensäure von pH 3,2 auf pH 2,54 auch eine Vervielfachung des Substanzverlustes um das 2,5- bis 3-fache von etwa 17 μm auf etwa 45 μm dargestellt werden konnte [Eisenburger und Addy, 2001]. Dies liegt daran, dass die Auflösungsgeschwindigkeit der Zahnhartsubstanzen durch Zitronensäure in dem Bereich zwischen pH 3,9 und pH 3,2 geringer ist als im Bereich zwischen pH 3,2 und pH 2,45 [Shellis et al., 2010]. Die Löslichkeit von Apatit vervielfacht sich bei einem Abfall des pH-Wertes von 3 auf 2,5, um mehr als das fünffache von 75 g/l auf 400 g/l [Larsen und Nyvad, 1999]. Zudem nimmt die Härte von Schmelz proportional zu einem sinkenden pH-Wert im Bereich von 6,3 bis 3,1 linear ab. Die Demineralisation mit einer Zitronensäure, die einen pH-Wert kleiner als 3,1 aufweist, scheint zu keiner weiteren Reduktion der Schmelzhärte zu führen [Barbour et al., 2003].

Die unterschiedlichen Auflösungsgeschwindigkeiten der Zahnhartsubstanz und die Vervielfachung der Apatitlöslichkeit je nach pH-Bereich sowie der unterschiedliche Einfluss der Chelatwirkung der Zitronensäure führen zusammenfassend dazu, dass der Substanzverlust bei einer Verringerung des pH-Wertes einen nicht-linearen Anstieg aufweist.

Diese Aussage kann durch die Ergebnisse in der vorliegenden Arbeit nur bedingt für die Gruppen nach Demineralisation mit 0,5%iger und 1%iger Zitronensäure bestätigt werden. Da in der vorliegenden Arbeit die Konzentrationen und die pH-Werte nicht getrennt voneinander betrachtet wurden, bezieht sich der folgende Abschnitt auf die pH-Werte unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Konzentrationen.

Der nicht-lineare Anstieg verläuft in etwa, wie es auch nach den in anderen Arbeiten dargestellten Zusammenhängen zu erwarten gewesen wäre [Shellis et al., 2010; Eisenburger und Addy, 2001; West et al., 2001; Larsen und Nyvad, 1999]. Dabei hat die Demineralisation mit der 1%igen Zitronensäure (pH 2,3) zu einem etwa 2,5- bis 3-fach höheren Substanzverlust geführt im Vergleich mit

dem Substanzverlust, der nach einer Demineralisation mit der 0,5%igen Säure (pH 2,5) dargestellt wurde. So liegt der gemessene Substanzverlust nach der Demineralisation mit 1%iger Säure auf der Schüttelplatte bei einem Wert von 17,7 μm im Vergleich mit dem Substanzverlust von 7,7 μm bei 0,5%iger Säure. Dies entspricht unter Berücksichtigung des normalen Schwankungsbereiches ungefähr dem 2,5-fachen Substanzverlust und bestätigt die Erwartungen aus den anderen Studien. Mit einer Erhöhung des Substanzverlustes um das 3,9fache nach der Demineralisation im Wasserbad durch die Erhöhung der Säurekonzentration von 0,5% auf 1% ist das Ergebnis beider Bewegungstypen in Ansätzen vergleichbar.

Präzipitate

Die Mineralsalzlösung ist in allen Modellen dieselbe, jedoch nur in den Modellen mit 0,3%iger Säure bilden sich flächendeckende Präzipitate. Daher kann davon ausgegangen werden, dass in allen Modellen Präzipitate entstehen, jedoch nur in diesen Modellen mit 0,3%iger Zitronensäure unabhängig vom pH-Wert die erosiven Bedingungen zu mild sind, um diese Präzipitate wieder zu lösen.

Bei den zuvor genannten Studien, in denen der Einfluss von Säureparametern wie Konzentration und pH-Wert untersucht wurde, handelt es sich um Studien, in denen eine einmalige Demineralisation durchgeführt wurde. Eine zwischenzeitliche Remineralisation fand nicht statt. Es wurde festgestellt, dass bei gleicher Gesamtdemineralisationsdauer der Substanzverlust höher ist, wenn die einzelnen Demineralisationen zeitlich kürzer und damit häufiger durchgeführt werden [Creanor et al., 2011]. Dies kann durch den häufigeren Austausch der Demineralisationslösung und dadurch die erhöhte Konzentration von reaktionsbereiten Protonen erklärt werden. Daher müssten in den Studien, in denen nur eine Demineralisationsphase stattfand, die Substanzverluste geringer sein als in der vorliegenden Arbeit mit multiplen Demineralisationen. Dennoch konnten in anderen Studien teilweise auch mit 0,3%igen Säuren und weniger sauren pH-Werten Substanzverluste erzeugt werden [Shellis et al., 2010; Eisenburger und Addy, 2001], während unter diesen sehr milden erosiven

Bedingungen in der vorliegenden Arbeit überwiegend Auflagerungen dargestellt wurden.

Im Gegensatz zu den genannten Studien wurde in der vorliegenden Arbeit zur Remineralisation eine Mineralsalzlösung ohne Puffer oder Muzine verwendet, die in Bezug zu Hydroxylapatit und somit auch zu der Zahnhartsubstanz übersättigt ist und zur Ausfällung von den genannten Präzipitaten führt. Diese Präzipitate konnten offensichtlich durch die 0,3%igen Säuren nicht wieder gelöst werden. Sie verhinderten dadurch nicht nur einen Substanzverlust sondern bildeten mess- und sichtbare Auflagerungen. Die Präzipitate waren zum Teil sehr fragil und nicht proportional zur Säurestärke. Diese fragilen Auflagerungen lösten sich wahrscheinlich beim Erreichen einer entsprechenden Stärke teilweise oder im Ganzen von den Proben, wodurch eine große Standardabweichung in diesen Gruppen resultierte.

Unter den Ablagerungen waren sogar bei den Proben der im Wasserbad mit auf pH-Wert 3,6 adjustierter Säure demineralisierten Negativkontrollgruppe die durch die Probenherstellung bedingten Polierspuren mikroskopisch nachweisbar. Die Präzipitate haben also die Oberfläche gänzlich vor erosiven Einflüssen geschützt.

Diese Präzipitate können je nach pH-Wert der umgebenden Lösung (pH 7,8 - 5,0) unterschiedliche Kalzium-Phosphat-Verbindungen sein. Im Ruhespeichel können Kalziumkarbonat (pH 7,8 - 7,3), Oktakalziumphosphat (pH 6,1 - 5,6), β -Trikalziumphosphat (pH 6,2 - 5,7), Brushit (pH 6,3 - 5,9) oder Hydroxylapatit (pH 5,0) als Präzipitate ausfallen [Larsen und Pearce, 2003]. Der pH-Wert der frisch hergestellten Mineralsalzlösung lag bei 6,3 und wurde im Verlauf des Versuchstages basischer bis zu einem Wert von 7,5, so dass theoretisch unterschiedliche Kalzium-Phosphat-Verbindungen entstehen können. Ohne Fluorid in der Mineralsalzlösung präzipitiert in vitro allerdings überwiegend Oktakalziumphosphat [Fan et al., 2009], welches unter in vitro Bedingungen in den Porositäten der Zahnhartsubstanz präzipitiert. Diese Repräzipitation ist allerdings nicht als Remineralisation zu verstehen, da die Kalzium- und Phosphatablagerung an der Schmelzoberfläche nicht als

Reparatur im Sinne von einer Wiederherstellung der Prismenstruktur, sondern allenfalls als ein Auffüllen der demineralisierten porösen Anteile zu verstehen ist und vielmehr eine Mineralausfällung auf der Zahnoberfläche darstellt [Eisenburger et al., 2001].

Bewegung

Der Einfluss durch eine Bewegung der Demineralisationslösung auf die Höhe der Zahnhartsubstanzverluste wird besonders deutlich im Vergleich mit einer statischen Lagerung von Proben in einer Demineralisationslösung [Shellis et al., 2005]. Unter statischen Demineralisationsbedingungen sind kaum Substanzverluste messbar [Shellis et al., 2005]. Sobald allerdings irgendeine Form von Bewegung der Demineralisationslösung hinzukommt, steigt die Höhe des Substanzverlustes an.

Grundsätzlich weisen in der vorliegenden Studie die drei Kontrollgruppen, die mit den drei unterschiedlichen Zitronensäuren mit nativen pH-Werten auf der Schüttelplatte demineralisiert wurden, höhere Substanzverluste auf als die unter ansonsten gleichen Bedingungen im Wasserbad demineralisierten Proben. Um diese Unterschiede in der Höhe des erosiven Substanzverlustes zu erklären, müssen die beiden Bewegungsarten genauer betrachtet werden. Die Bewegung der Demineralisationslösung auf der Schüttelplatte kann durch abrupte Richtungswechsel charakterisiert werden. Dagegen zeigte die Zitronensäure im Wasserbad sanfte Übergänge beim Wechseln der Bewegungsrichtung. Dadurch erreichte die Säure in Relation zur Probenoberfläche unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten.

Es konnte gezeigt werden, dass neben der Art der Bewegung auch die Geschwindigkeit, mit der die erosive Flüssigkeit über die Probenoberfläche fließt, Auswirkungen auf die Höhe des Substanzverlustes hat [Wiegand et al., 2007a]. Eine Verzehnfachung der Geschwindigkeit von 0,15 ml/min auf 1,5 ml/min führte zu einer Zunahme des Substanzverlustes auf etwa das Doppelte bis Vierfache bei einer Demineralisationsdauer von 10 respektive 2 Minuten [Wiegand et al., 2007a]. In einer dieselben Parameter untersuchenden Arbeit

[Attin et al., 2012] zeigte sich gegenüber der Demineralisation ohne Bewegung bereits bei der geringen Geschwindigkeit von 10 µl/min des laminaren Flusses ein signifikanter Anstieg des Substanzverlustes auf etwa das 2,4fache. Bei einer Erhöhung der Geschwindigkeit um das Zehnfache auf 100µl/min wird der Substanzverlust pro Minute etwa verdoppelt (pH 2,6) [Attin et al., 2012]. Durch ein zusätzliches Verwirbeln der Demineralisationslösung wurden die Substanzverluste erneut signifikant auf etwa das 3,7fache erhöht [Attin et al., 2012].

Der Einfluss der Geschwindigkeit der Demineralisationslösung auf die Höhe des Substanzverlustes lässt sich durch Betrachtung der chemischen Abläufe in der Lösung an der Grenzfläche zwischen der Säure und der Zahnhartsubstanz erläutern. Die Protonen beziehungsweise die für die Demineralisation zuständigen Bindungsstellen in der Demineralisationslösung werden durch die aus der Zahnoberfläche herausgelösten Ionen gebunden und der pH-Wert der nächstgelegenen Flüssigkeitsschicht dadurch erhöht [Larsen et al., 1993b]. Auch wird die eigentlich bezogen auf die Zahnhartsubstanzen untersättigte Demineralisationslösung in direkter Nachbarschaft zur Zahnoberfläche gesättigt. Dadurch entsteht an der Oberfläche der Zahnhartsubstanz in der Demineralisationslösung ein Bereich von relativ gesättigter Lösung mit weniger saurem pH-Wert. Diese sogenannte Nernst'sche Diffusionsschicht wirkt als Barriere zwischen der umgebenden untersättigten Demineralisationslösung mit niedrigerem pH-Wert und der übersättigten Zahnhartsubstanz. Durch eine Bewegung der Lösung wird dieser gesättigte Anteil der Lösung durch untersättigte Lösung ausgetauscht, es werden wieder H⁺-Ionen zur Verfügung gestellt und die Demineralisation kann weiter voranschreiten [Barbour et al., 2011; Attin et al., 2012]. Die Höhe des Substanzverlustes nimmt also zu, wenn die Fließgeschwindigkeit steigt [Wiegand et al., 2007a], da die gesättigte Lösung schneller durch untersättigte Lösung ersetzt wird. Allerdings wird ab einer entsprechenden Geschwindigkeit keine weitere Steigerung des Substanzverlustes durch eine höhere Fließgeschwindigkeit mehr erreicht [Wiegand et al., 2007a], wenn durch den Austausch der Demineralisationslösung der Abtransport der in Lösung gegangenen Ionen und

das zur Verfügung stellen von neuen H^+ -Ionen schneller ist als die Demineralisation voranschreitet. Dabei soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass die Demineralisation zwar zentripetal voranschreitet, die Demineralisationsfront jedoch keine klare Grenze zwischen der Demineralisationslösung mit den gelösten Ionen und der komplett mineralisierten Zahnhartsubstanz darstellt. Vielmehr gibt es einen teilweise demineralisierten Anteil an der Oberfläche der Zahnhartsubstanz. Dieser Anteil weist Porositäten auf, in die weitere Demineralisationslösung eindringen kann und folgend Ionen herauslöst. Die Dicke der teilweise demineralisierten Schicht ist abhängig von den Demineralisationsbedingungen und kann beispielsweise durch ausfallende Präzipitate auf der Oberfläche und in den porösen Anteilen zunehmen.

Wie beschrieben führt die höhere Fließgeschwindigkeit der Demineralisationslösung zu einem schnelleren Austausch der Lösung der Nernst'schen Diffusionsschicht [Shellis et al., 2014]. Daher kommt es auch auf der Schüttelplatte zu einem rascheren Austausch dieser Schicht. Im Wasserbad ist die Bewegung dagegen sanfter, so dass die Ionen aus der Diffusionsschicht langsamer ausgetauscht werden. Unter milden erosiven Bedingungen wird es unter den langsameren und weniger abrupten Bewegungen vermutlich zusätzlich sogar zu lokalen Sättigungsphänomenen gekommen sein, wodurch sich wahrscheinlich die genannten Präzipitate, vor allem in den Gruppen, die mit 0,3%iger Säure behandelt wurden, ablagern konnten [Featherstone und Lussi, 2006; Shellis et al., 2014].

Die Art der Bewegung der Demineralisationslösung scheint also in Abhängigkeit von der Säurekonzentration sowohl auf die Höhe des Substanzverlustes als auch die Stärke der teilweise demineralisierten Schicht sowie die möglichen Ausfällungen von Präzipitaten Einfluss zu haben.

Abrasion

Bei der Betrachtung der verschiedenen Modelle wurden die Negativkontrollgruppen nicht weiter aufgeführt, da es zwischen den

Substanzverlusten der jeweiligen Slurry- und Negativkontrolle keinen signifikanten Unterschied in ihrer Höhe gibt (s.a. Abb. 4 in 3.1). Das bedeutet, dass die Grundstoffe der Zahnpasten zunächst keinen signifikanten Einfluss auf den Substanzverlust von erodiertem Schmelz haben und damit nicht erosionsprotektiv wirken.

Auf gesundem Schmelz verursachen die meisten Zahnpasten keinen oder nur vernachlässigbare Substanzverluste [Hunter et al., 2002; Hooper et al., 2003]. Dagegen ist erosiv veränderter Schmelz anfälliger für Bürstabrasionen [Hooper et al., 2003]. Der Einfluss des RDA-Wertes auf die Höhe des Substanzverlustes bei erosiv verändertem Schmelz ist noch nicht geklärt. In in vitro-Studien konnte unter erosiv-abrasiven Bedingungen eine positive Korrelation zwischen dem Verlust von Zahnhartsubstanz und dem RDA-Wert der dort verwendeten Produkte gezeigt werden [Voronets et al., 2008; Hara et al., 2009]. Dagegen zeigen andere Studien keinen oder nur einen vernachlässigbaren Einfluss des RDA-Wertes auf den Substanzverlust von Schmelz sowohl in vitro [Franzo et al., 2010], als auch in situ [Hooper et al., 2003]. Der Bürstvorgang als solcher sei bereits ausschlaggebender als das Vorhandensein von Abrasiva [Eisenburger et al., 2003], da durch die mechanische Komponente des Bürstens bereits teilweise demineralisierte Anteile entfernt werden. Auch soll die Tatsache, ob überhaupt Abrasiva vorhanden sind, wichtiger sein als die gemessene Abrasivität eines Produktes [Wiegand et al., 2008d]. Ein Einfluss auf die Höhe des zusätzlichen Substanzverlustes durch die Art der Abrasivstoffe [Parry et al., 2008; Turssi et al., 2004] oder deren Konzentration [Gonzalez-Cabezas et al., 2013] wird ebenfalls kontrovers diskutiert.

In der vorliegenden Arbeit führte ein zusätzliches Bürsten nach der Demineralisation mit 1%iger und 0,5%iger Zitronensäure im Vergleich zu den Substanzverlusten der dazugehörigen Slurrykontrollen in den vier Modellen (1% SP; 0,5% SP; 1% WB; 0,5% WB) zu einem Anstieg der Substanzverluste, wenn auch dieser Anstieg nur bei den Wasserbad-Modellen signifikant war.

Es können zwei Beobachtungen zu den erosiv-abrasiven Effekten gemacht werden. Die Differenz zwischen dem Substanzverlust der Bürst- und der

Slurrykontrollgruppe, die mit derselben Säure auf der Schüttelplatte demineralisiert wurden, ist für die drei verwendeten nativen Zitronensäuren jeweils ungefähr gleich (2 bis 3 μm). Die Differenz zwischen dem Substanzverlust der Bürst- und der Slurrykontrollgruppe, die mit derselben Säure im Wasserbad demineralisiert wurden, ist für die 1%ige und 0,5%ige native Zitronensäure ebenfalls jeweils ungefähr gleich (9 respektive 7 μm). Dies ist überraschend, da in der Literatur gezeigt wurde, dass höhere Säurekonzentrationen zu einem größeren Verlust der Mikrohärtة führen [Nekrashevych und Stösser, 2003].

Die Säurekonzentration scheint damit eher eine untergeordnete Rolle zu spielen, die Bewegung der Demineralisationslösung ist scheinbar ausschlaggebender für die Höhe des Substanzverlustes. Es kann vermutet werden, dass je nach Art der Bewegung die teilweise demineralisierte Schicht unterschiedlich strukturiert beziehungsweise die Schichtdicke bis zur vollständig mineralisierten Zahnhartsubstanz unterschiedlich groß ist. In den Wasserbad-Gruppen ist diese teilweise demineralisierte Schicht scheinbar dicker, da es durch das längere Bestehen der Nernst'schen Diffusionsschicht und durch eventuelle lokale Sättigungsphänomene wahrscheinlich zu mehr Präzipitaten kommt und diese weniger gelöst werden. Dagegen ist diese Schicht bei den Schüttelplatte-Gruppen wohl dünner, da die Nernst'sche Diffusionsschicht schneller ausgetauscht wird und die entstandenen Präzipitate wahrscheinlich schneller wieder gelöst werden.

Insgesamt ist die aktuelle Studienlage zu diesen Zusammenhängen sehr dürftig, daher ist ein Vergleich mit der Literatur leider kaum möglich. Andere Erosions-Abrasions-Studien außer von der eigenen Arbeitsgruppe weisen häufig nur eine von den in der vorliegenden Arbeit verwendeten Kontrollgruppen auf (s. Anhang 9.1). In den Arbeiten, in denen die Demineralisation mit einer Säure in unterschiedlichen Konzentrationen und/oder mit unterschiedlichen pH-Werten durchgeführt wurde, gibt es ebenfalls meistens nur eine der genannten Kontrollgruppen.

4.5.2 Diskussion der Gruppen mit wirkstoffhaltigen Suspensionen

Wirkstoffeffekte

Wirkstoffeffekte konnten nur in den Gruppen, in denen die Demineralisation mit 1%iger und 0,5%iger Säure durchgeführt wurde, dargestellt werden (s.a. Abb. 7). Daher werden die Wirkstoffeffekte anhand der Gruppen mit 1%iger und 0,5%iger Säure diskutiert. In den Gruppen, die mit 0,3%iger Säure demineralisiert wurden, konnten überwiegend Auflagerungen gezeigt werden und somit Unterschiede zwischen den Wirkstoffen nicht aufgedeckt werden. Auf eine statistische Auswertung der Gruppen mit Präzipitaten wurde daher im Wesentlichen verzichtet. Zudem hat die Dicke der Präzipitate keine Aussagekraft, da die Präzipitate eine geringe Stabilität zeigten und nur locker auf der Oberfläche auflagen. Allgemein sind, wie bereits für die Kontrollgruppen gezeigt, die Substanzverluste auch für die mit wirkstoffhaltigen Suspensionen behandelten Gruppen nach der Demineralisation auf der Schüttelplatte jeweils größer als nach der Demineralisation im Wasserbad unter ansonsten gleichen Bedingungen.

NaF - Natriumfluorid

Die Wirksamkeit von Fluorid, insbesondere Natriumfluorid (NaF) und Aminfluorid (AmF), mit Augenmerk auf die Indikation Erosionsprophylaxe wird in der Literatur kontrovers betrachtet. Es liegen Studien vor, in denen der Zahnhartsubstanzverlust bei Verwendung von fluoridhaltigen Zahnpasten oder Gelen signifikant geringer ist verglichen mit der Anwendung derselben Formulierungen ohne Fluorid [Hara et al., 2009; Bartlett et al., 1994]. Dagegen zeigen andere Erosions-Abrasions-Studien keine signifikante Verringerung des Substanzverlustes bei Verwendung von fluoridierter Zahnpaste im Vergleich mit fluoridfreier Paste [Lagerweij et al., 2006; Rios et al., 2008b; Magalhaes et al., 2008]. Auch die Effektivität einer Fluoridzufuhr durch Anwendung fluoridhaltiger Mundspüllösungen oder hochkonzentrierter Produkte wird kontrovers diskutiert. So konnte gezeigt werden, dass der Substanzverlust durch die Anwendung

eines hochkonzentrierten Fluoridgeles [Lagerweij et al., 2006; Attin et al., 1999] oder Fluoridlackes [Vieira et al., 2007] signifikant reduziert wird. Dagegen zeigen in einer anderen Studie die zusätzlich zu den Zahnpasten durchgeführten Anwendungen einer Mundspüllösung und eines Fluoridgeles keine signifikante Wirkung [Ganss et al., 2007a]. Diese Unterschiede in der Effektivität von NaF lassen sich in der vorliegenden Studie ebenfalls wiederfinden. Dabei zeigen sich unter den Demineralisationsbedingungen mit 1%iger Zitronensäure sowohl auf der Schüttelplatte als auch im Wasserbad keine signifikanten Unterschiede zwischen den mit wirkstofffreier und NaF-haltiger Suspension behandelten Proben. In diesen Gruppen scheinen die Demineralisationsbedingungen zu erosiv zu sein, so dass die Wirkungseffekte der NaF-haltigen Suspension die erosiven Effekte nicht kompensieren können. Dagegen führte in einer anderen Studie der eigenen Arbeitsgruppe bei einer Demineralisation mit 1%iger Zitronensäure auf der Schüttelplatte die reine Slurrybehandlung von Schmelzproben mit einer NaF-haltigen Suspension zu einer signifikanten Verringerungen der Substanzverluste um 35% im Vergleich mit der Negativkontrolle [Ganss et al., 2011]. Allerdings wurden die Proben in jener Studie anders gelagert als in der vorliegenden Arbeit, wodurch die unterschiedliche Wirkung bedingt sein könnte. Die mit 0,5%iger Zitronensäure behandelten Proben weisen dagegen sowohl auf der Schüttelplatte als auch im Wasserbad signifikant geringere Substanzverluste in den NaF-Gruppen auf als die Kontrollgruppen. Auch in der Literatur finden sich je nach erosiv-abrasivem Studiendesign Reduktionen des Zahnhartsubstanzverlustes nach Demineralisation mit 1%iger Zitronensäure um 37-62% (in der vorliegenden Studie bis 34%) und nach Demineralisation mit 0,5%iger Zitronensäure um 18-39% (in der vorliegenden Studie ungefähr 50%). In einigen Studien kam es auch zu keiner Reduktion sondern zu einem Anstieg des Substanzverlustes bei Anwendung NaF-haltiger Produkte im Vergleich mit fluoridfreien Präparaten (s. Anhang 9.1.4).

Die Wirkweise von NaF oder auch AmF basiert auf der Ausfällung von kalziumfluorid-ähnlichen Deckschichten auf der Zahnoberfläche [Petzold, 2001]. Diese Deckschicht wird umso dicker, je höher die Fluoridkonzentration und je

länger die Einwirkzeit sind [Saxegaard und Rolla, 1988]. Zwischen der Wirkung der Fluoride unter erosiven Bedingungen und der verwendeten Dosis besteht eine positive Korrelation [Moretto et al., 2010; Moretto et al., 2013].

Kalziumfluorid ist ein leicht lösliches Produkt der Oberflächenfluoridierung, das zum Bestehen 6 ppm Fluorid in der wässrigen Phase benötigen würde und daher in den oralen Flüssigkeiten, die nur 0,01-0,05ppm Fluorid enthalten, unvermeidlich wieder gelöst wird [Larsen und Pearce, 2003]. Da Speichel stark untersättigt ist in Bezug zu Kalziumfluorid, hält durch Fluoridierungsmaßnahmen ausgefälltes Kalziumfluorid so lange die Fluoridkonzentration in der Umgebung aufrecht, bis es als Feststoff aufgebraucht ist [Larsen und Pearce, 2003].

Die Art der Fluoridverbindung hat Einfluss auf die präzipitierte Schicht. Bei den genannten Wirkstoffen NaF und AmF handelt es sich um monovalente Fluoridverbindungen, deren Präzipitate besonders unter in vitro Bedingungen leicht säurelöslich sind [Ganss et al., 2007b] und daher die geringere Effektivität von NaF bedingen. Dass die Effektivität von NaF in der Literatur so kontrovers diskutiert wird, scheint, zumindest zu einem beträchtlichen Teil, an der ungenügenden Standardisierung des Versuchsdesigns zu liegen. So kommt es abhängig von den gewählten Parametern zu unterschiedlichen Ergebnissen.

SnF₂ - Zinnfluorid

In der vorliegenden Studie zeigt sich in den mit 1%iger und 0,5%iger Säure demineralisierten Gruppen sowohl auf der Schüttelplatte als auch im Wasserbad eine bessere Wirksamkeit der SnF₂-haltigen Suspension im Vergleich mit der Wirksamkeit der NaF- und der NaF/SnF₂/HMP-haltigen Suspensionen. Die Substanzverluste der SnF₂-Gruppen sind, unabhängig von der Art der Bewegung der Demineralisationslösung, signifikant geringer als in allen entsprechenden Kontrollgruppen sowie (teilweise signifikant) geringer im Vergleich zu den entsprechenden NaF-Gruppen. Die Anwendung von Fluoridverbindungen mit polyvalenten Metallionen, wie Zinnfluorid, führen im Gegensatz zu monovalenten Fluoridverbindungen zur Bildung säureresistenterer Deckschichten [Ganss et al., 2008; Hove et al., 2008].

die Reaktion zwischen Zinn-Ionen und Hydroxylapatit entstehen Verbindungen auf und in der Schmelzoberfläche [Ganss et al., 2008], die stabiler gegen erosive Einflüsse sind als die kalziumfluorid-ähnlichen Deckschichten aus monovalenten Fluoridverbindungen.

Mögliche Präzipitate aus zinnfluorid-haltigen Präparaten unter erosiven Bedingungen können neben CaF_2 -Salzen auch $\text{Sn}_2(\text{OH})\text{PO}_4$, $\text{Sn}_3\text{F}_3\text{PO}_4$, $\text{Ca}(\text{SnF}_3)_2$, $\text{Sn}(\text{OH})_2$ oder SnHPO_4 sein [Jordan et al., 1971; Krutchkoff et al., 1972; Nelson und Bainbridge, 1973; Babcock et al., 1978; Hercules und Craig, 1978]. Diese Variationsbreite an möglichen Präzipitaten könnte sich aus den unterschiedlichen Versuchsbedingungen, wie etwa dem pH-Wert oder der Konzentration der Wirkstoffe ergeben [Ganss et al., 2010]. Unter pH-neutralen Bedingungen ist Zinn lediglich auf der Zahnoberfläche nachweisbar [Schlueter et al., 2009b]. Unter erosiven Bedingungen ist Zinn nach Verwendung zinnhaltiger Präparate zusätzlich in der oberflächlichen Schmelzschicht in das Hydroxylapatitgitter eingebunden [Schlueter et al., 2009b; Yu et al., 2010]. Bei diesem Vorgang ist es wichtig, dass das Gegenion zum Fluorid polyvalent ist. Zum einen dienen sie als Träger für die Fluoridionen, zum anderen bevorzugen sie die Hydroxylgruppen der gelösten Zahnhartsubstanz als Liganden. Dadurch wird der Austausch von Hydroxylgruppen aus der Zahnhartsubstanz gegen Ionen aus Mundhygieneprodukten begünstigt [Rolla et al., 2013]. Die Inkorporation von Metallionen in das Hydroxylapatitgitter wird umso stärker begünstigt, je geringer der pH-Wert der Lösung [Yu et al., 2010] oder je höher die vorliegende Zinnkonzentration ist. Allerdings ist ab einer entsprechend hohen Konzentration von Zinn-Ionen eine weitere Steigerung der Einbindung nicht mehr möglich, so dass eine Art Sättigungsplateau erreicht wird [Schlueter et al., 2009b]. Die Inkorporation von Zinn in die Schmelzoberfläche scheint größeren Anteil an der guten antierosiven Wirkung von zinnhaltigen Produkten zu haben als die Ausfällung von zinnhaltigen Präzipitaten [Schlueter et al., 2009b; Wegehaupt et al., 2012]. Auch andere Studien zeigen die überlegene Wirkung eines zinnhaltigen Geles sogar unter stark erosiven Einflüssen mit Reduzierungen der Substanzverluste um 68% beziehungsweise 78% unter rein erosiven, nicht abrasiven Bedingungen [Ganss et al., 2012; Ganss et al., 2011].

In der vorliegenden Arbeit konnte die konstant gute Wirksamkeit von Zinnfluorid bestätigt werden.

NaF/ SnF₂ mit HMP - Natrium- und Zinnfluorid mit Hexametaphosphat

Nach Anwendung der NaF/SnF₂-haltigen Zahnpaste hätte ein Effekt zwischen NaF und SnF₂ erwartet werden können. Auch in einer in situ-Studie wurde die antierosive Wirkung eines HMP-haltigen Fluoridgels nachgewiesen [Conceicao et al., 2015]. Jedoch wurden in der vorliegenden Arbeit in allen Gruppen, in denen eine NaF/SnF₂/HMP-haltige Suspension verwendet wurde, Substanzverluste und keine Auflagerungen dargestellt werden. Damit unterscheiden sich die Messergebnisse dieser Gruppen besonders unter den milden Erosionsbedingungen mit 0,3%iger Säure von allen anderen Gruppen. Im Unterschied zu den anderen Produkten ist in der SnF₂/NaF-haltigen Formulierung als Stabilisator für die Zinnverbindungen Natriumhexametaphosphat (HMP) enthalten. HMP gehört zu den Polyphosphaten, welche in der Lebensmittelindustrie als Zusatzstoff E 452 zugelassen sind und als Komplexbildner und Stabilisatoren eingesetzt werden. Auch in Produkten zur Wasserenthärtung sind Polyphosphate enthalten [Chirkunov und Kuznetsov, 2015]. Bei steigender Temperatur, Verringerung des pH-Wertes oder unter Vorhandensein von Kationen kommt es zur Hydrolyse von HMP zu Natriumtrimetaphosphat (TMP) und Natriumorthophosphat [Becke-Goehring, 1958]. Sowohl HMP als auch TMP sind in einigen Mundhygieneprodukten enthalten und ähneln sich in ihrem Reaktionsverhalten in Bezug zu Kalzium-Ionen sehr [Andress und Wüst, 1938].

HMP findet als Wirkstoff gegen die Bildung von Zahnstein in Zahnpasten Anwendung, da er als Komplexbildner Kalzium aus dem Zahnstein bindet und zusätzlich das Kristallwachstum hemmt [van Loveren und Duckworth, 2013]. Folglich kann man vermuten, dass in den Versuchen der vorliegenden Arbeit die so gebundenen Kalzium-Ionen nicht mehr zur Ausbildung einer schützenden Schicht aus Fluoridverbindungen zur Verfügung stehen und die Lösung eventuell untersättigt ist in Bezug auf mögliche kalziumhaltige Zinn- oder Fluoridverbindungen. Dadurch lässt sich die in der vorliegenden Arbeit

(teilweise signifikant) schlechtere Wirkung der SnF₂/NaF-haltigen Suspension im Vergleich mit der NaF-haltigen sowie mit der SnF₂-haltigen Suspension erklären. Unter den meisten Demineralisationsbedingungen ist kein signifikanter Unterschied zwischen den Substanzverlusten der SnF₂/NaF-Gruppen mit den Substanzverlusten der entsprechenden Kontrollgruppen darstellbar. Lediglich die mit 1%iger Säure im Wasserbad demineralisierten Proben weisen einen signifikant geringeren Substanzverlust auf als die entsprechende Kontrollgruppe. Auch in einer anderen Studie der eigenen Arbeitsgruppe führte die reine Slurrybehandlung von mit 1% Zitronensäure demineralisierten Schmelzproben mit SnF₂/NaF-haltiger Suspension zu einer signifikanten Verringerung der Substanzverluste um 55% im Vergleich mit der Negativkontrolle [Ganss et al., 2011]. Allerdings ist insgesamt über die kombinierten Wirkmechanismen von NaF/SnF₂/HMP-haltigen Produkten in Erosions- oder Erosions-Abrasions-Studien sowohl in vitro als auch in situ wenig bekannt, sodass weitere Studien über den Mechanismus von HMP Aufschluss geben müssen.

Abrasion - Einfluss auf die Wirkstoffeffekte

Wie auch in den Kontrollgruppen führt das Bürsten während der Slurrybehandlung in fast allen Gruppen zu einem signifikanten Anstieg der Substanzverluste (Abb. 7).

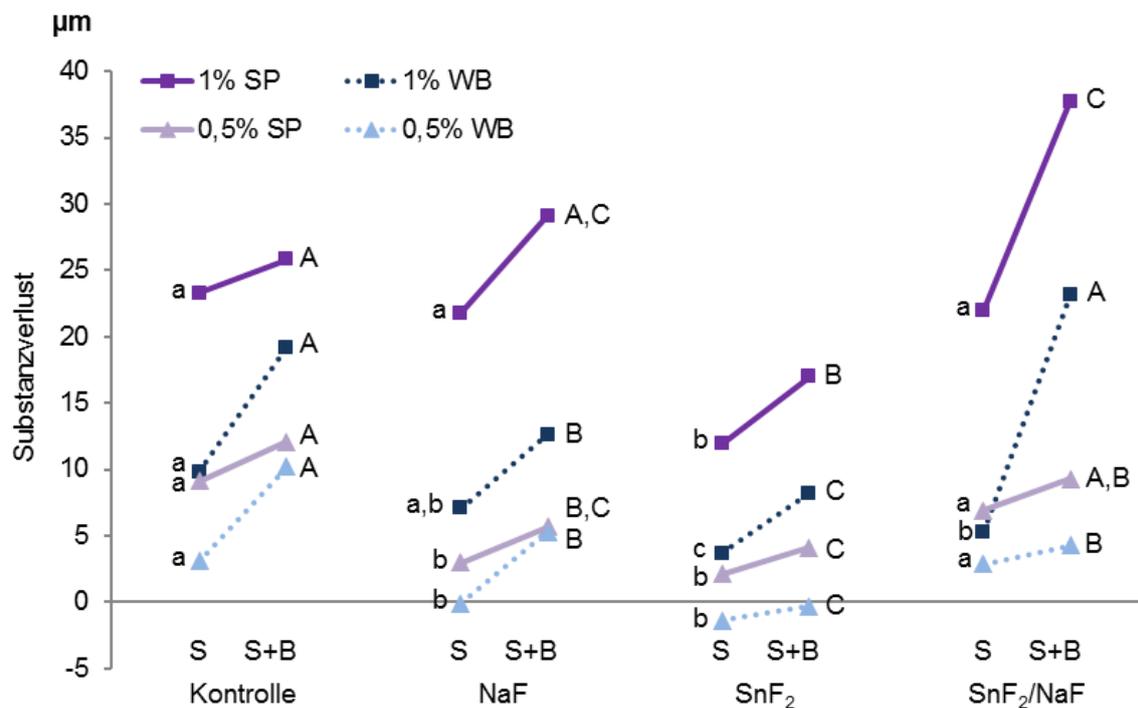


Abb. 7: Das Diagramm zeigt die absoluten Substanzverluste der Gruppen, die mit 1%iger (Quadrate, dunkelblau beziehungsweise dunkelviolet) oder 0,5%iger (Dreiecke, hellblau beziehungsweise hellviolett) Zitronensäure auf der Schüttelplatte (SP, violett, durchgezogene Linie) oder im Wasserbad (WB, blau, gepunktete Linie) demineralisiert wurden. Dabei zeigen die Linien den Anstieg zwischen den unter ansonsten gleichen Bedingungen behandelten Gruppen von der jeweiligen Slurry- zur dazugehörigen Bürstgruppe (S und S+B). Innerhalb einer Demineralisationsgruppe werden statistisch signifikant unterschiedliche Substanzverluste für die Slurrygruppen durch Kleinbuchstaben und für die Bürstgruppen durch Großbuchstaben dargestellt. Das Signifikanzniveau liegt bei $p \leq 0,05$. Auf die Darstellung der Standardabweichung wurde der Übersichtlichkeit halber verzichtet.

Im Vergleich zu den jeweiligen Bürstkontrollen zeigt NaF in den Bürstgruppen eine überwiegend gute Wirkung. Nur unter stärker erosiven Bedingungen kann die kalziumfluorid-ähnliche Deckschicht, die sich potentiell gebildet hat, keinen ausreichenden Schutz gegen erosiv-abrasive Einflüsse bieten. Allgemein zeigen Ausfällungen aus monovalenten Fluoridverbindungen eine gute mechanische Stabilität [Wegehaupt et al., 2009], so dass teilweise selbst nach 500 Bürststrichen kein signifikanter Verlust von Kalzium aus den Auflagerungen resultiert [Wiegand et al., 2014]. Unter erosiven in vitro Bedingungen entstehen jedoch signifikant mehr kalziumfluoridähnliche Präzipitate [Wegehaupt et al., 2012] als unter neutralen Bedingungen, jedoch wird Kalziumfluorid auf gesundem Schmelz bereits unter neutralen Bedingungen in wenigen Tagen

durch Nahrungsmittel und Zahnbürsten abradert oder im Speichel gelöst [Larsen und Richards, 2001]. Unter sauren Bedingungen findet der Verlust an Kalziumfluorid sogar deutlich schneller statt.

Die mit SnF₂-haltiger Suspension gebürsteten Proben weisen sogar in allen Gruppen signifikant geringere Substanzverluste auf als die jeweils entsprechenden Bürstkontrollen. Auch sind die Substanzverluste der SnF₂-Bürstgruppen geringer als die entsprechenden Substanzverluste der Slurrykontrollgruppen. Dadurch zeigt sich die sehr gute antierosive Wirkung dieser Suspension auch unter erosiv-abrasiven Bedingungen. Im Vergleich mit den anderen wirkstoffhaltigen Suspensionen sind die Substanzverluste der Bürstgruppen signifikant geringer. Lediglich eine mit NaF-haltiger Suspension gebürstete Gruppe zeigt keinen signifikanten Unterschied in der Höhe der Substanzverluste zu der entsprechenden SnF₂-Bürstgruppe. Die Studien in der Literatur, in denen die Proben während der Slurrybehandlung gebürstet wurden, stellten ebenfalls entweder eine überlegene Wirkung [Ganss et al., 2012; Ganss et al., 2011; Hara et al., 2013] oder keinen signifikanten Unterschied in der Wirksamkeit von zinnhaltigen Produkten im Vergleich mit konventionellen Fluoridpräparaten dar [Ganss et al., 2012; Ganss et al., 2011; Sales-Peres et al., 2007]. Dies liegt daran, dass sowohl die Präzipitate als auch die durch das inkorporierte Zinn modifizierte oberflächliche Zahnhartsubstanz scheinbar sehr stabil gegenüber mechanischen Einflüssen ist [Carvalho und Lussi, 2014].

Die mit SnF₂/NaF/HMP-haltiger Suspension gebürsteten Proben weisen in den mit 1%iger Säure demineralisierten Gruppen einen sehr großen Anstieg des Substanzverlustes durch den mechanischen Einfluss auf. Diese Steigerung des Substanzverlustes ist in keiner anderen Gruppe messbar und scheint einerseits durch die komplexbildende Eigenschaft des HMP bedingt zu sein. Durch die Bindung der Kalziumionen an das HMP kann es sein, dass es nicht zu der Bildung einer fluoridhaltigen Deckschicht kommt und dass die teilweise demineralisierte Schicht durch die mechanischen Einflüsse immer komplett entfernt wird. Eventuell kommt es sogar zu einer dickeren teilweise demineralisierten Schicht, wenn die bereits verfügbaren Kalziumionen gebunden

werden und dadurch das Herauslösen weiterer Ionen begünstigt wird. Andererseits hat möglicherweise der höhere RDA-Wert des SnF₂/NaF/HMP-haltigen Marktproduktes einen zusätzlichen Einfluss auf den hohen Anstieg des Substanzverlustes. Denn für die Einbringung von Natriumhexametaphosphat in die Formulierung von Zahnpasten werden zusätzlich Silica als Transportmedium benötigt, wodurch die höhere notwendige Konzentration an Abrasivstoffen in der SnF₂/NaF-haltigen Paste bedingt ist [van Loveren und Duckworth, 2013]. Dann müsste jedoch der abrasive Substanzverlust auch in den Gruppen, die mit 0,5%iger Zitronensäure demineralisiert wurden, größer sein. Die in der vorliegenden Arbeit gewonnenen Daten scheinen zu zeigen, dass der RDA-Wert auch auf erodierten Schmelzflächen *in vitro* einen untergeordneten Einfluss auf den Substanzverlust hat. Wichtiger scheinen die erosiven Bedingungen und die zur Verfügung stehenden Wirkstoffe zu sein. In einer Erosions/Abrasions-Studie wurde eine bessere Wirkung von Kombinationspräparaten mit Metallionen und Natriumfluorid gegenüber Produkten, die entweder Natriumfluorid oder Metallionen enthielten, dargestellt [Comar et al., 2012]. Allerdings ist zur Demineralisation eine handelsübliche Limonade (Sprite Zero) verwendet worden. Zudem ist nicht bekannt, ob das verwendete Präparat frei von HMP und dadurch in der antierosiven Wirkung überlegen war.

In den Gruppen mit den wirkstoffhaltigen Suspensionen führt das Bürsten bei allen im Wasserbad demineralisierten Gruppen zu einem größeren relativen Anstieg der Substanzverluste in Bezug zu der entsprechenden Slurrygruppe als bei den auf der Schüttelplatte demineralisierten Gruppen (s. Abb. 5 und 7). In den Modellen, in denen die Demineralisation auf der Schüttelplatte stattfand, scheinen zusätzliche abrasive Einflüsse weniger gut dargestellt werden zu können. Werden die absoluten Werte betrachtet, zeigt sich dagegen bei den Gruppen mit den wirkstoffhaltigen Suspensionen eher eine Abhängigkeit des zusätzlichen abrasiven Substanzverlustes von der Säurekonzentration als von der Art der Säurebewegung (s. Abb. 7). Wie bereits beschrieben, könnte es sein, dass es auf der Schüttelplatte zu einer geringeren teilweise

demineralisierten Schicht als im Wasserbad kommt. Dadurch wäre der zusätzliche abrasive Substanzverlust zunächst im Wasserbad größer. Doch durch die größere teilweise demineralisierte Schicht ist das Angebot der verfügbaren Kalziumionen größer. Dadurch könnte es bei den Wasserbad-Gruppen zur Ausbildung einer dickeren kalziumfluorid-ähnlichen beziehungsweise zinnfluorid-haltigen Schicht gekommen sein. Das bedeutet, dass bei den auf der Schüttelplatte demineralisierten Gruppen die Wirkungseffekte der Suspensionen einflussreicher sind als die Abrasionseffekte. Dagegen scheinen bei den im Wasserbad demineralisierten Gruppen die Abrasionseffekte größeren Einfluss auf die Substanzverluste zu haben im Vergleich mit den Wirkungseffekten.

4.6 Einfluss der Mineralsalzkonzentration in den Zahnpastensuspensionen

Die Suspensionen bestanden zu einem Teil aus dem jeweils entsprechenden Marktprodukt und aus drei Teilen einer verdünnenden Lösung. In den Versuchen 1 und 2 wurde eine identische Mineralsalzlösung (MSL) verwendet. In dem Versuch 3 wurde diese MSL mit destilliertem Wasser im Verhältnis 1:1 verdünnt oder durch destilliertes Wasser ersetzt. Zur Betrachtung von möglichen Effekten der Mineralsalzkonzentration in den Zahnpastensuspensionen auf die Höhe von Auflagerungen oder Zahnhartsubstanzverlusten wurde das Modell mit 0,3%iger Zitronensäure mit nativem pH-Wert auf der Schüttelplatte gewählt (s. Abb. 6), da in diesem Modell sowohl Auflagerungen als auch Substanzverluste dargestellt werden konnten. Somit konnte der Einfluss der Mineralsalzkonzentration sowohl auf die Höhe der Verluste als auch auf die Dicke der Präzipitate untersucht werden.

In den Studien der eigenen Literaturrecherche wurden, soweit vorhanden, die Suspensionen entweder mit Mineralsalzlösung, künstlichem Speichel oder Wasser angemischt. Dabei lag das Mischungsverhältnis von der Paste oder dem Gel zu der Lösung bei 2:1 bis 1:10, wobei die Verhältnisse von 1:3 oder 1:5 am häufigsten zu finden sind (s. Anhang Tab. 9.1.2). In keiner der gefundenen Studien wurde der Einfluss der Mineralsalzkonzentration in den Suspensionen untersucht, so dass ein direkter Vergleich mit einer einzelnen Studie in der Literatur nicht möglich ist.

Alle Effekte, die bereits in den vorangegangenen Abschnitten diskutiert wurden, finden auch hier in Teilen Anwendung. Allerdings ist es nicht auszuschließen, dass ein Teil der Effekte durch die Lagerung in der Mineralsalzlösung, die zwischen den Demineralisationen sowie den Suspensionsbehandlungen stattfand, überlagert wird. Für diesen Aspekt könnten weitere Studien aufschlussreich sein.

Wie bereits zuvor erwähnt präzipitiert ohne Fluorid aus Mineralsalzlösungen überwiegend Oktakalziumphosphat, während das Vorhandensein von Fluorid

zur Bildung von kalziumfluoridähnlichen Präzipitaten und unter günstigen Bedingungen auch zur Bildung von fluoridiertem Hydroxylapatit führen kann [Fan et al., 2009]. Das bedeutet, dass durch die zyklische Lagerung in der MSL in allen Gruppen wahrscheinlich Oktakalziumphosphat präzipitiert.

Die wirkstoffbedingten Auflagerungen dagegen entstehen durch Präzipitation von Fluorid aus den Zahnpasten mit Kalzium und Phosphat aus der Mineralsalzlösung [Larsen et al., 1993a] oder aus dem Probensubstrat [Larsen und Richards, 2001]. So werden auch bei Lagerung in destilliertem Wasser durch Reaktion der Fluoridionen mit der Schmelzoberfläche kalziumfluoridähnliche Präzipitate gebildet [Petzold, 2001]. Jedoch ist diese Schicht dicker bei Vorhandensein von Speichel [Larsen und Richards, 2001] oder einer anderen mineralhaltigen Lösung. Die Präzipitation von Kalziumfluorid kann nur stattfinden, wenn eine Übersättigung der Lösung in Bezug zu seinen Bestandteilen vorliegt [Larsen und Jensen, 1994].

Bei den Versuchen der vorliegenden Arbeit ist sowohl in den Slurry- als auch in den Bürstkontrollgruppen der Substanzverlust in den Gruppen, die mit einer Suspension mit MSL behandelt wurden signifikant geringer als in den Gruppen mit verdünnter MSL beziehungsweise mit destilliertem Wasser. In der Placebo-Paste ist kein Wirkstoff enthalten, der präzipitieren kann. Daher müsste in der Gruppe mit einer Suspension aus der Mineralsalzlösung Oktakalziumphosphat ausfallen, bei verdünnter Mineralsalzlösung würden weniger und bei destilliertem Wasser keine Präzipitate entstehen. Dann wäre zu erwarten, dass mit Abnahme der Mineralkonzentration der Substanzverlust ansteigt. Allerdings gibt es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Proben, die mit den Suspensionen aus verdünnter Mineralsalzlösung oder destilliertem Wasser behandelt wurden. Daher kann vermutet werden, dass für die fluoridfreie Suspension unter einer bestimmten Mineralkonzentration keine Präzipitate entstehen.

In den wirkstoffhaltigen Suspensionen bleibt der Wirkstoffgehalt konstant, jedoch ist das Angebot an verfügbaren Kalzium- und Phosphat-Ionen aus der

Mineralsalzlösung entweder entsprechend geringer oder bei der Mischung mit destilliertem Wasser nicht mehr vorhanden. Dadurch ist die Lösung nicht mehr übersättigt. Theoretisch kommt es proportional mit der Abnahme der Mineralkonzentration zu einer Abnahme der Präzipitate, also zu weniger Auflagerungen und weniger Schutz vor dem nächsten erosiven Einfluss. Die Substanzverluste würden entsprechend proportional höher respektive die Auflagerungen geringer werden. In anderen Studien, in denen die Suspensionen mit destilliertem Wasser angemischt wurden, divergierten die Ergebnisse zwischen antierosiven Effekten [Comar et al., 2012] und geringen [Moretto et al., 2010] beziehungsweise keinen Wirkungseffekten der Suspensionen [Rios et al., 2008b].

In den NaF-Gruppen sind die Auflagerungen in den Slurrygruppen höher als in den mit den anderen Wirkstoffen behandelten Gruppen. In den Slurrygruppen, die entweder mit NaF- oder mit SnF₂-haltiger Suspension behandelt wurden, führt die Suspension mit Mineralsalzlösung zu deutlich höheren Auflagerungen als die Suspensionen mit verdünnter MSL oder destilliertem Wasser. Zwischen letzteren gibt es jedoch kaum einen Unterschied in der Höhe. Vielleicht kommt es ab einer bestimmten Mineralkonzentration zusätzlich zu den kalziumfluorid-ähnlichen Ausfällungen auch zu einer Präzipitation von Oktakalziumphosphat, welches auch in den wirkstofffreien Gruppen ausfällt. Dadurch wären die in der Gruppe mit der Mineralsalz-Suspension höheren Auflagerungen im Vergleich mit den Auflagerungen der anderen Slurrygruppen zu erklären. In den Bürstgruppen scheint kein Zusammenhang zwischen der Höhe der Auflagerungen oder des Substanzverlustes und der Mineralkonzentration vorzuliegen.

Für die mit SnF₂/NaF-haltiger Suspension behandelten Slurrygruppen nimmt der Substanzverlust mit abnehmender Mineralkonzentration leicht zu. Es ist jedoch kein so großer Unterschied in der Höhe der Substanzverluste abhängig vom Mineralgehalt darstellbar, wie in den Gruppen mit NaF-haltiger, SnF₂-haltiger oder fluoridfreier Suspension. Durch das in der SnF₂/NaF-haltigen

Suspension vorliegende HMP werden die Kalziumionen grundsätzlich gebunden und Präzipitate fallen prinzipiell nicht. Eine Reduktion der Kalziumkonzentration in der Lösung zum Anmischen der Suspension hat daher nur wenig Effekt.

Es ist auffällig, dass es bei der Suspension mit destilliertem Wasser keinen signifikanten Unterschied zwischen der Slurry- und der Bürstgruppe gab. Dies könnte bedeuten, dass es bei Verwendung von mineralsalzfreier Suspension zu keinen zusätzlichen abrasiven Effekten käme und daher unter diesen Bedingungen kein Unterschied bestünde zwischen den Wirkstoff- und den kombinierten Wirkstoff-Abrasionseffekten. Vielleicht bewirkt das HMP in Ermangelung von Kalzium-Ionen in der Slurry durch Bindung an die Zahnhartsubstanz auch einen anderen Effekt. Weitere Studien dazu könnten Aufschluss geben.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

In vitro Studien sind für die Entwicklung und Untersuchung von Mundhygieneprodukten unerlässlich. Die Ergebnisse aus in vitro Studien lassen sich zwar nicht direkt auf die in vivo Situation übertragen, jedoch weisen sie die Richtung [Hooper et al., 2007], ob ein Produkt grundsätzlich eine antierosive oder erosionsprophylaktische Wirkung aufweist. Bei in vitro Studien werden höhere erosive Substanzverluste als in vivo erzeugt [West et al., 1998]. Ein Grund für die geringere intraorale Demineralisation ist das auf der natürlichen Zahnoberfläche vorhandene Pellikel, das als Diffusionsbarriere wirkt.

In der Mundhöhle kommt es zwischen der Zuführung erosiver Nahrungsmittel zu längeren Zeiträumen, in denen die Zahnoberflächen von Speichel umgeben sind. Dies soll durch die zyklische Zwischenlagerung der Proben in der Mineralsalzlösung nachgestellt werden. Es wurde überlegt, ob die Art des Speichels Einfluss auf die Remineralisationsrate haben könnte. Stimulierter Speichel weist neben einer erhöhten Fließrate und eines leicht basischeren pH-Wertes erhöhte Konzentrationen an Natrium, Kalzium und anorganischem Phosphat auf [Dawes und Dong, 1995]. Bei einem erhöhten Mineralangebot könnte die Einlagerung von Kalzium- und Phosphatverbindungen in die Schmelzoberfläche begünstigt sein. Die verwendete Mineralsalzlösung ist in Bezug zu den Zahnhartsubstanzen übersättigt, so dass die Einlagerung von den entsprechenden Verbindungen in die Probenoberfläche gefördert wird. Diese Einlagerung ist jedoch nicht als Reparatur im Sinne von Wiederherstellung der Prismenstruktur zu verstehen, sondern ein Auffüllen der demineralisierten porösen Anteile mit Mineralausfällungen [Eisenburger et al., 2001]. Wie bereits erwähnt handelt es sich also nicht um eine Remineralisation im eigentlichen Sinn, sondern um eine Repräzipitation. Diese Ausfällungen sind jedoch nur in in vitro Studien möglich und als Artefakte der in vitro Bedingungen anzusehen. In vivo ist eine Repräzipitation bei erosiven Defekten ebenso wenig wie eine Remineralisation möglich, da die im Speichel enthaltenen Statherine dies verhindern [Moreno et al., 1979; Hay et al., 1984]. Es kann klinisch also

nicht an den erhöhten Mineralkonzentrationen oder irgendwelchen Remineralisationsvorgängen liegen, sollte ein erosionsprophylaktischer Effekt von stimuliertem Speichel im Vergleich mit Ruhespeichel feststellbar sein. Vielmehr ist die gesteigerte Fließrate dafür verantwortlich [Borges et al., 2014], die zu einer gesteigerten Spülfunktion des Speichels führt und die erosive Lösung von der Zahnoberfläche entfernt. Einen erosionsprophylaktischen Einfluss hat Speichel also dadurch, dass demineralisierende Lösung abgespült, verdünnt und abgepuffert wird [Buzalaf et al., 2012] und es unter Anwesenheit von Speichel zur Bildung einer Pellikel und damit zu einer Barriere kommt. Diese Barriere in Form der Pellikel bedeckt die Zahnoberfläche jedoch nicht komplett, es gibt weniger dichte Anteile, durch die eine Lösung dringen kann [Hannig et al., 2009].

So kann die Demineralisation durch das Vorhandensein der Pellikel etwas reduziert werden [Moazzez et al., 2014; Wiegand et al., 2008a; Wiegand et al., 2008c; Vukosavljevic et al., 2014]. Es scheint jedoch auch modifizierenden Einfluss auf die Wirksamkeit von wirkstoffhaltigen Produkten zu haben.

Es steht zur Frage, ob in situ Studien sinnhafter für die Entwicklung von Mundhygieneprodukten sind. Dadurch wäre die klinische Situation sehr viel besser dargestellt. Allerdings sind in situ Studien nicht nur teurer und aufwändiger, sondern, und das ist viel entscheidender, stellen sie eine Belastung für Probanden dar. Zudem gestaltet sich die Standardisierung erheblich schwieriger als bei in vitro Studien. Dem Finden eines optimalen in vitro Studiendesigns kommt daher eine besondere Bedeutung zu und darf in der Planung von Studien nicht unterschätzt werden.

Da der Mineralverlust in der oberflächlichen Schicht nach einer Säureeinwirkung knapp 40% der Kalzium- und Phosphationen beträgt, weist die Oberfläche eine hohe Anfälligkeit für mechanische Einflüsse auf [Eisenburger, 2009]. Da es zu keiner Remineralisation im eigentlichen Sinn kommen kann, wird das Vorbeugen oder zumindest das Vermindern des erosiven beziehungsweise des erosiv-abrasiven Substanzverlustes mit geeigneten Mundhygienemitteln angestrebt. Dazu ist es nötig und, wie in der vorliegenden

Arbeit gezeigt wurde, auch möglich Modelle zu entwickeln, mit denen zwischen Wirkstoff- und kombinierten Abrasions-Wirkstoffeffekten differenziert werden kann. Durch Anwendung definierter Parameter kann zudem die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Studien miteinander verbessert und die Vorhersagbarkeit für die in situ oder sogar in vivo Situation erhöht werden.

Das Modell, bei dem die Proben mit 1%iger Zitronensäure auf der Schüttelplatte demineralisiert wurden, ist für die Darstellung von Wirkstoffeffekten nur bedingt geeignet. Die Bedingungen dieses Modells scheinen zu erosiv zu sein, um überhaupt eine Wirksamkeit von einigen Produkten darzustellen. Lediglich das zinnhaltige Gel zeigte eine Wirkung. Es können also nur Effekte von sehr wirksamen Produkten gezeigt werden. Für die Darstellung von Abrasionseffekten ist dieses Modell eher geeignet. Für den kombinierten Wirkstoff-Abrasionseffekt gilt das gleiche wie für den reinen Wirkstoffeffekt. Lediglich die Wirksamkeit eines sehr effektiven Produktes kann dargestellt werden.

In dem Modell, bei dem die Proben mit 0,5%iger Zitronensäure auf der Schüttelplatte demineralisiert wurden, können die Wirkstoffeffekte gut dargestellt werden. Jedoch scheinen die zusätzlichen Substanzverluste durch die Bürstabrasion unabhängig von den verwendeten Produkten zu sein. Insgesamt ist der Unterschied zwischen den Suspensionsgruppen und den Gruppen, die mit Suspension und Bürsten behandelt wurden, relativ gering, so dass dieser Effekt nur unzureichend dargestellt werden kann.

In dem Modell, bei dem die Proben mit 1%iger Zitronensäure im Wasserbad demineralisiert wurden, können sowohl die Wirkstoffeffekte als auch die kombinierten Effekte unter erosiv-abrasiven Bedingungen gut dargestellt werden. Sowohl die antierosive Wirkung der Fluoridverbindungen, als auch die gegensätzliche Wirkung des Hexametaphosphates insbesondere unter abrasiven Bedingungen, werden gut abgebildet.

Das Modell, bei dem die Proben mit 0,5%iger Zitronensäure im Wasserbad demineralisiert wurden, ist weder für die Darstellung von Wirkstoffeffekten noch für die Darstellung von Effekten unter erosiv-abrasiven Bedingungen geeignet.

In diesem Modell sind die erosiven Bedingungen zu mild, da es zu Auflagerungen in einigen Gruppen kommt.

Die Modelle mit den milden Erosionsbedingungen (0,3%ige Zitronensäuren auf der Schüttelplatte oder im Wasserbad) sind weder zur Darstellung von Wirkungseffekten noch zur Darstellung von Effekten unter erosiv-abrasiven Bedingungen geeignet. Auch in diesen Modellen kommt es zu Auflagerungen in den meisten Gruppen. Durch das Ausbleiben von Präzipitaten in den SnF₂/NaF-Gruppen wird unter diesen milden Bedingungen lediglich die potentielle Komplexbildung des Hexametaphosphates gezeigt.

Die Mineralsalzkonzentration in den Suspensionen hat einen Einfluss auf die Wirksamkeit von fluoridhaltigen Produkten. Allerdings kommt es auch bei der wirkstofffreien Suspension unter entsprechend milden Bedingungen zu Auflagerungen. So können auch andere wirkstoffhaltige, fluoridfreie Produkte zu Auflagerungen führen, die nicht pauschal als erosionsprophylaktische Effekte gedeutet werden dürfen, sondern teilweise als Artefakte der milden in vitro Bedingungen anzusehen sind. Ob sich aus den Ergebnissen in der vorliegenden Arbeit zu erosiv-abrasiven Effekten Regeln zur Vorhersagbarkeit von Studienmodellen ableiten lassen können, müsste durch weitere Untersuchungen validiert werden. Insbesondere die Auflagerungen und geringen Substanzverluste bei den Kontrollgruppen in den Modellen mit den milden erosiven Bedingungen könnten die Reproduzierbarkeit erschweren.

In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass die Ergebnisse von unterschiedlichen bereits vorhandenen Studien nicht in absoluten Werten direkt miteinander verglichen werden können. Bei der Betrachtung verschiedener Studien können voneinander abweichende Ergebnisse bereits durch die Veränderung von einzelnen Parametern hervorgerufen werden. An dem Vergleich der Studienlage bezüglich der Bewegungsform der Demineralisationslösung (s.a. 4.5.1 Bewegung) wird deutlich, wie unzureichend die Standardisierung von Studienmodellen bisher ist und wie kritisch Studienergebnisse zu sehen sind. Entsprechend erschwert wird der Vergleich

von den Ergebnissen nach Veränderungen mehrerer Parameter in Kombination. Die vorliegende Arbeit zeigt deutlich, wie wichtig aber auch wie schwierig eine gute Standardisierung von Studienmodellen ist. In dieser Arbeit wurden nur einige Parameter untersucht, die besonders in Kombination einen starken Einfluss auf die Ergebnisse von Erosions- Abrasions- Studien haben. Weiterführende Arbeiten über den Einfluss anderer Parameter besonders in Kombination wären für eine bessere Standardisierung und ein besseres Verständnis sinnvoll.

Beispielsweise wird in der Literatur diskutiert, welchen Einfluss die Art der Abrasiva auf die Höhe des Substanzverlustes haben kann. Abrasiva sollen härter als die zu entfernenden Beläge sein, ohne Defekte auf gesundem Schmelz verursachen zu können [Gonzalez-Cabezas et al., 2013; Lippert, 2013]. Die am häufigsten in Zahnpasten verwendeten Abrasiva sind hydratisierte Kieselsäure („hydrated silica“) oder Kalziumkarbonat [Lippert, 2013]. Neben diesen beiden gibt es noch einige andere Abrasivstoffe, wie beispielsweise Kalziumpyrophosphat, Brushit, Kalziumhydrogenphosphat, Nano-Hydroxylapatit, Natriumbikarbonat oder Aluminiumoxid [Lippert, 2013].

Sowohl das in der eigenen Arbeit verwendete NaF-haltige als auch das NaF/SnF₂-haltige Präparat enthalten „hydrated silica“ als Abrasivstoff, die Abrasiva der fluoridfreien Zahnpaste sind Kalziumhydrogenphosphat und Brushit. Das SnF₂-haltige Gel ist abrasivstofffrei. Über den Einfluss der Art der Abrasiva ebenso wie über die Rolle des RDA-Wertes insbesondere auf erodierten Flächen ist bisher nur wenig bekannt. Auch damit ergibt sich ein weites Feld der zu kombinierenden Parameter für Erosions-Abrasions-Studien, deren Einfluss genauer untersucht werden sollte.

6 Zusammenfassung

In vitro Studien sind die häufigsten Studienmodelle für Erosions- und / oder Abrasionsstudien. Sie helfen, ein besseres Verständnis für die Wirkungsmechanismen von Präparaten zur Prävention oder Therapie von Erosionen zu entwickeln.

Es gibt viele Parameter, die Einfluss auf die Ergebnisse dieser Studien haben. Da selbst scheinbar irrelevante Faktoren in der Modellation des Versuchsaufbaus großen Einfluss auf die Ergebnisse haben können, ist die Standardisierung von Studienmodellen notwendig, kann aber mitunter sehr schwierig sein.

Eine eigene Literaturrecherche hat gezeigt, dass schon bei Studien, die vom Grundsatz her ähnliche Modelle anwenden, eine große Variationsbreite bei vielen Parametern, wie etwa dem Wirkstoff oder der Konzentration der Säure sowie der Bewegungsform der Demineralisationslösung, vorliegt. Durch diese Vielzahl an unterschiedlichen Modellvarianten sind viele Studien nur schwer miteinander vergleichbar.

In den meisten in der Literaturrecherche gefundenen Arbeiten wurde untersucht, welche Auswirkung das Verändern eines einzelnen Parameters oder einiger in Zusammenhang stehender Parameter (beispielsweise verschiedene in Konzentration oder pH-Wert adjustierte Säuren) auf die Ergebnisse von Erosions- oder Erosions-Abrasions-Studien hat. Jedoch wurde das Zusammenwirken von Veränderungen unterschiedlicher Parameter und deren gegenseitige Beeinflussung bisher nicht näher betrachtet.

Daher war das Ziel dieser Studie, die Effekte von Studienmodellveränderungen sowohl auf die Dimension des Substanzverlustes als auch auf die Wirksamkeit von Zahnpasten mit unterschiedlichen Wirkstoffen als antierosives / antiabrasives Präparat darzustellen.

In der vorliegenden Arbeit wurden insgesamt 1760 planpolierte humane Schmelzproben einer zyklischen De- und Remineralisation über 10 Versuchstage unterzogen. Die Proben wurden mit vier verschiedenen

Zitronensäuren (1%, 0,5% und 0,3% mit nativem pH-Wert sowie 0,3% mit adjustiertem pH-Wert 3,6) sechsmal am Tag für zwei Minuten entweder auf einer Schüttelplatte (Experiment 1) oder in einem Wasserbad (Experiment 2) demineralisiert. Es wurden vier verschiedene Mundhygieneprodukte zweimal am Tag für zwei Minuten verwendet. Dabei handelte es sich um ein Zinnfluorid (SnF_2)-haltiges Gel, eine Natriumfluorid (NaF)- und eine SnF_2/NaF /Hexametaphosphat (HMP; Stabilisator und Komplexbildner)-haltige sowie eine fluoridfreie Zahnpaste. Die Produkte wurden in Form von Suspensionen (Slurries), gemischt aus Paste beziehungsweise Gel und Mineralsalzlösung (1:3), angewendet. Zusätzlich wurde die Hälfte der Proben während der zweimal am Tag stattfindenden Behandlung mit diesen Suspensionen für jeweils 15 Sekunden mit einem Auflagegewicht von 200g gebürstet. Als Kontrolle diente neben der Anwendung des fluoridfreien Präparates eine Gruppe, die nur demineralisiert, aber nicht mit Zahnpasten behandelt oder gebürstet wurde. Insgesamt wurden 72 Gruppen mit je 20 Proben in Experiment 1 und 2 behandelt.

In einem weiteren Experiment (Experiment 3) wurde untersucht, ob die Mineralsalzkonzentration in der Lösung zum Anmischen der Suspensionen einen Einfluss auf die Wirksamkeit unter erosiven sowie erosiv-abrasiven Bedingungen aufweist. Zur Betrachtung von möglichen Effekten der Mineralsalzkonzentration in den Zahnpastensuspensionen auf die Höhe von Auflagerungen oder Zahnhartsubstanzverlusten wurde ein Modell gewählt, in dem in den vorigen Experimenten sowohl Auflagerungen als auch Substanzverluste dargestellt wurden. Somit konnte der Einfluss der Suspensions-Präparation auf die Präzipitationsneigung untersucht werden. Es wurden zur Herstellung der Suspension entweder destilliertes Wasser oder eine im Verhältnis 1:1 mit destilliertem Wasser verdünnte Mineralsalzlösung verwendet. Die Proben wurden mit 0,3%iger Zitronensäure mit nativem pH-Wert auf der Schüttelplatte aufgeteilt auf 16 Gruppen je 20 Proben demineralisiert.

Die Proben wurden während der Experimente zur Hälfte mit Kunststoff abgedeckt, um eine Referenzfläche zu generieren. Der Substanzverlust wurde am Ende von jedem Experiment mit einem optischen Profilometer bestimmt.

Es sollte anhand dieser Reihe von Experimenten gezeigt werden, welchen Einfluss die Parameter Säurekonzentration, Wirkstoff eines Marktproduktes, Lösung zum Anmischen der Suspensionen sowie Schüttelart der Demineralisationslösung auf die Darstellung von Effekten verschiedener Marktprodukte unter erosiven und erosiv-abrasiven Bedingungen haben.

Von den vier Faktoren Zahnpaste (Wirkstoff), Säurekonzentration, Art der Behandlung (in der Suspension mit oder ohne Bürsten) und Art der Bewegung (Wasserbad oder Schüttelplatte) zeigte jeder einzelne Parameter sowie die meisten Kombinationen einen signifikanten Einfluss auf die Höhe der Substanzverluste. Lediglich die Kombinationen der beiden Parameter Art der Behandlung und der Bewegung, der drei Parameter Säurekonzentration, Art der Behandlung und der Bewegung sowie aller vier Parameter zeigten keinen signifikanten Einfluss. Das zinnhaltige Produkt zeigte bessere Effekte als das Produkt mit Natriumfluorid. Im Produkt, das die Kombination aus NaF und SnF₂ enthielt, wurde der Wirkungseffekt vermutlich durch die Anwesenheit von HMP reduziert.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, durch veränderte Versuchsbedingungen die Wirkungseffekte und die Abrasionseffekte deutlich differenziert darzustellen. Allerdings können durch zu aggressive oder zu milde in vitro-Modelle entweder die Effekte maskiert werden oder Effekte auftreten, die unter klinischen Bedingungen nicht darstellbar sind.

Durch die Entwicklung geeigneter in vitro-Versuche könnte die Voraussage von in situ-Wirkungseffekten verbessert werden. Dies könnte zur Entwicklung von Modellen führen, die zwischen verschiedenen Effekten diskriminieren und zu genaueren Vorhersagewerten für die Wirkung in situ oder sogar in der klinischen Situation führen und dadurch unnötige Belastungen für Probanden vermeiden können. Dennoch sind weitere Studien zum Einfluss anderer Parameter, besonders in Kombination, notwendig, um eine möglichst gute Standardisierung von Studienmodellen anzustreben und um eine Über- oder Unterschätzung von Effekten zu vermeiden.

7 Summary

Most common models for erosion and / or abrasion are in vitro studies which help develop our understanding of the mode of action of compounds.

There are many parameters which influence the results of these studies and even apparently irrelevant factors in modelling of the experimental set-up may have great influence on the results so standardization of the models can be difficult.

An extensive search through relevant literature showed that although the models were similar, there was a wide range of parameters used. Due to this wide range of parameters, many of the studies are not comparable with each other.

Most studies investigated the impact of an individual parameter or a few related parameters with regard to results of erosion or erosion-abrasion studies. The interrelation of different modified parameters and the mutual influence have not been investigated yet.

The aim of this study was to illustrate the effects that modifying of either erosive or abrasive conditions have on the results of erosion and erosion-abrasion studies.

In this study plane-polished enamel specimens were treated in a cyclic de- and remineralisation procedure for 10 days. Demineralisation was performed six times a day for 2 minutes and specimens were demineralized either on a shaking plate (Experiment 1) or in a shaking water bath (Experiment 2) with citric acid (1%, 0.5% and 0.3% with native pH or 0.3% with adjusted pH 3.6). Four oral hygiene products (SnF₂ gel, NaF paste, SnF₂/NaF/Hexametaphosphate (HMP) toothpaste and fluoride-free toothpaste) were mixed with mineralsalt-solution (1:3). The specimens were immersed in one of the four suspensions twice a day for 2 minutes, half of them brushed for 15 seconds during this immersion time.

In a follow up experiment (Experiment 3) the impact of the concentration of the mineralsalt-solution used to mix the suspension with regard to the effect of the

active agent under erosive and erosive-abrasive condition was investigated. In this experiment demineralization was performed with 0.3% citric acid on the shaking plate, the model in which in the previous experiments both substance loss and precipitates were found. In this model the tendency to form precipitates of the suspensions was investigated. For this purpose either a mineral salt solution diluted 1:1 with distilled water or distilled water were used for preparation of suspensions. A total of 16 groups (n=20 each) was treated.

Half of each specimen surface was covered with light curing acrylic to generate a reference area. Substance loss was measured at the end of each experiment with an optical profilometer.

The purpose of this series of experiments was to illustrate the influence of the parameters acid concentration, active agent of commercial available products, solution to mix suspension and type of agitation with regard to the effects of different products under erosive and erosive-abrasive conditions.

Of the four factors toothpaste (active agent), acid concentration, type of treatment (suspension only or suspension + brushing) and type of movement (shaking plate or water bath) each parameter as well as the most combinations of which showed a significant impact on dimension of tissue loss. Only the combination of the two parameter type of treatment and movement type, of the three parameter acid concentration, type of treatment and movement type as well as the combination of all parameters showed no significant impact.

The stannous fluoride containing products showed better effects than the sodium fluoride containing product. The effect of the product with the combination between NaF and SnF₂ was partly impaired probably due to the presence of HMP.

In summary it is possible to differentiate between the effects of active agents and effects of abrasiveness by modifying the test conditions. However, the use of too aggressive or too mild in vitro models can lead to a masking of effects or to the formation of artifacts, which can not be shown under clinical conditions.

Thus by development of appropriate in vitro study models, the prediction of in situ results can be improved. This could help to develop models that not only

discriminate different effects but also can predict effects in situ or even in clinical situations in order to avoid any unnecessary burden for study participants. Nonetheless there is need for further investigation of different parameters especially combined so that there will be better standardization in study models and to avoid any under- or over-estimation of effects of active agents.

8 Literaturverzeichnis

1. Addy M, Shellis RP: Interaction between attrition, abrasion and erosion in tooth wear; in Lussi A (ed): Dental Erosion: From Diagnosis to therapy. Basel, Karger, 2006 pp 17-31.
2. Amaechi BT, Higham SM, Edgar WM: Influence of abrasion in clinical manifestation of human dental erosion. *J Oral Rehab* 2003;30:407-413.
3. Andress KR, Wüst K: Über Natriumpolyphosphate. *Z Anorg Allg Chem* 1938;237:113-131.
4. Arends J, Jongebloed WL: Crystallites dimensions of enamel. *J Biol Buccale* 1978;6:161-171.
5. Attin T: Methods for assessment of dental erosion. *Monogr Oral Sci* 2006;20:152-172.
6. Attin T, Becker K, Roos M, Attin R, Paqué F: Impact of storage conditions on profilometry of eroded dental hard tissue. *Clin Oral Invest* 2009;13:473-478.
7. Attin T, Becker K, Wiegand A, Taubock TT, Wegehaupt FJ: Impact of laminar flow velocity of different acids on enamel calcium loss. *Clin Oral Invest* 2012.
8. Attin T, Buchalla W, Gollner M, Hellwig E: Use of variable remineralization periods to improve the abrasion resistance of previously eroded enamel. *Caries Res* 2000;34:48-52.
9. Attin T, Deifuss H, Hellwig E: Influence of acidified fluoride gel on abrasion resistance of eroded enamel. *Caries Res* 1999;33:135-139.
10. Attin T, Knofel S, Buchalla W, Tütüncü R: In situ evaluation of different remineralization periods to decrease brushing abrasion of demineralized enamel. *Caries Res* 2001;35:216-222.
11. Attin T, Koidl U, Buchalla W, Schaller HG, Kielbassa AM, Hellwig E: Correlation of microhardness and wear in differently eroded bovine dental enamel. *Arch Oral Biol* 1997;42:243-250.
12. Attin T, Wegehaupt F, Gries D, Wiegand A: The potential of deciduous and permanent bovine enamel as substitute for deciduous and permanent human enamel: Erosion-abrasion experiments. *J Dent* 2007;35:773-777.

13. Attin T, Wegehaupt FJ: Methods for assessment of dental erosion. *Monogr Oral Sci* 2014;25:123-142.
14. Attin T, Weiss K, Becker K, Buchalla W, Wiegand A: Impact of modified acidic soft drinks on enamel erosion. *Oral Diseases* 2005;11:7-12.
15. Austin RS, Stenhagen KS, Hove LH, Dunne S, Moazzez R, Bartlett DW, Tveit AB: A qualitative and quantitative investigation into the effect of fluoride formulations on enamel erosion and erosion-abrasion in vitro. *J Dent* 2011;39:648-655.
16. Azadi-Schossig P, Becker K, Attin T: Chelating effect of citric acid is negligible for development of enamel erosions. *Clin Oral Investig* 2015.
17. Babcock FD, King JC, Jordan TH: The reaction of stannous fluoride and hydroxyapatite. *J Dent Res* 1978;57:933-938.
18. Barbour ME, Finke M, Parker DM, Hughes JA, Allen GC, Addy M: The relationship between enamel softening and erosion caused by soft drinks at a range of temperatures. *J Dent* 2006;34:207-213.
19. Barbour ME, Lussi A, Shellis RP: Screening and prediction of erosive potential. *Caries Res* 2011;45 Suppl 1:24-32.
20. Barbour ME, Parker DM, Allen GC, Jandt KD: Human enamel dissolution in citric acid as a function of pH in the range $2.30 \leq \text{pH} \leq 6.30$ - a nanoindentation study. *Eur J Oral Sci* 2003;111:258-262.
21. Barbour ME, Parker DM, Allen GC, Jandt KD: Human enamel erosion in constant composition citric acid solutions as a function of degree of saturation with respect to hydroxyapatite. *J Oral Rehabil* 2005;32:16-21.
22. Barbour ME, Rees JS: The laboratory assessment of enamel erosion: a review. *J Dent* 2004;32:591-602.
23. Barbour ME, Shellis RP: An investigation using atomic force microscopy nanoindentation of dental enamel demineralization as a function of undissociated acid concentration and differential buffer capacity. *Phys Med Biol* 2007;52:899-910.
24. Bartlett D, Sundaram G, Moazzez R: Trial of protective effect of fissure sealants, in vivo, on the palatal surfaces of anterior teeth, in patients suffering from erosion. *J Dent* 2011;39:26-29.
25. Bartlett DW, Smith BG, Wilson RF: Comparison of the effect of fluoride and non-fluoride toothpaste on tooth wear in vitro and the influence of enamel fluoride concentration and hardness of enamel. *Br Dent J* 1994;176:346-348.

26. Becke-Goehring M: Phosphorus and its Compounds. New York-London, J. R. Van Wazer, 1958.
27. Betke H, Schick U, Buchalla W, Hellwig E, Attin T: Influence of the buffer capacity of amine fluoride-containing toothpastes and gels in enamel erosion. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 2003;113:1158-1164.
28. Borges AB, Scaramucci T, Lippert F, Zero DT, Hara AT: Erosion protection by calcium lactate/sodium fluoride rinses under different salivary flows in vitro. *Caries Res* 2014;48:193-199.
29. Bundesinstitut für Risikobewertung. Hohe Gehalte an Zitronensäure in Süßwaren und Getränken erhöhen das Risiko für Zahnschäden Aktualisierte Stellungnahme Nr. 006/2005 des BfR vom 09.01.2004. 24-2-2005.
30. Buzalaf MA, Hannas AR, Kato MT: Saliva and dental erosion. *J Appl Oral Sci* 2012;20:493-502.
31. Cairns AM, Watson M, Creanor SL, Foye RH: The pH and titratable acidity of a range of diluting drinks and their potential effect on dental erosion. *J Dent* 2002;30:313-317.
32. Carvalho TS, Lussi A: Combined effect of a fluoride-, stannous- and chitosan-containing toothpaste and stannous-containing rinse on the prevention of initial enamel erosion-abrasion. *J Dent* 2014;42:450-459.
33. Cheng ZJ, Wang XM, Cui FZ, Ge J, Yan JX: The enamel softening and loss during early erosion studied by AFM, SEM and nanoindentation. *Biomed Mater* 2009;4:015020.
34. Chirkunov A, Kuznetsov Y: Mineral Scales and Deposits: Scientific and Technological Approaches. 2015.
35. Cochrane NJ, Yuan Y, Walker GD, Shen P, Chang CH, Reynolds C, Reynolds EC: Erosive potential of sports beverages. *Aust Dent J* 2012;57:359-364.
36. Comar LP, Gomes MF, Ito N, Salomao PA, Grizzo LT, Magalhaes AC: Effect of NaF, SnF(2), and TiF(4) Toothpastes on Bovine Enamel and Dentin Erosion-Abrasion In Vitro. *Int J Dent* 2012;2012:134350.
37. Conceicao JM, Delbem AC, Danelon M, da Camara DM, Wiegand A, Pessan JP: Fluoride gel supplemented with sodium hexametaphosphate reduces enamel erosive wear in situ. *J Dent* 2015;43:1255-1260.
38. Creanor S, Creanor S, Alharthy N: A comparison of in vitro erosion-like mineral loss between continuous and intermittent acidic exposure with and without human saliva. *Arch Oral Biol* 2011;56:703-708.

39. Cross SE, Kreth J, Wali RP, Sullivan R, Shi W, Gimzewski JK: Evaluation of bacteria-induced enamel demineralization using optical profilometry. *Dent Mater* 2009;25:1517-1526.
40. Davis WB, Winter PJ: The effect of abrasion on enamel and dentine and exposure to dietary acid. *Br Dent J* 1980;148:253-256.
41. Dawes C, Dong C: The flow rate and electrolyte composition of whole saliva elicited by the use of sucrose-containing and sugar-free chewing-gums. *Arch Oral Biol* 1995;40:699-705.
42. de Josselin de Jong E, van der Linden AH, ten Bosch JJ: Longitudinal microradiography: a non-destructive automated quantitative method to follow mineral changes in mineralised tissue slices. *Phys Med Biol* 1987;32:1209-1220.
43. Dörfer CE: [Abrasivity of dentifrices and its clinical relevance]. *Oralprophylaxe & Kinderzahnheilkunde* 2011;33:2-6.
44. Eisenburger M: Degree of mineral loss in softened human enamel after acid erosion measured by chemical analysis. *J Dent* 2009;37:491-494.
45. Eisenburger M, Addy M: Evaluation of pH and erosion time on demineralisation. *Clin Oral Invest* 2001;5:108-111.
46. Eisenburger M, Addy M: Influence of liquid temperature and flow rate on enamel erosion and surface softening. *J Oral Rehab* 2003;30:1076-1080.
47. Eisenburger M, Addy M, Hughes JA, Shellis RP: Effect of time on the remineralisation of enamel by synthetic saliva after citric acid erosion. *Caries Res* 2001;35:211-215.
48. Eisenburger M, Hughes J, West NX, Jandt KD, Addy M: Ultrasonication as a method to study enamel demineralisation during acid erosion. *Caries Res* 2000;34:289-294.
49. Eisenburger M, Shellis RP, Addy M: Comparative study of wear of enamel induced by alternating and simultaneous combinations of abrasion and erosion in vitro. *Caries Res* 2003;37:450-455.
50. Eisenburger M, Shellis RP, Addy M: Scanning electron microscopy of softened enamel. *Caries Res* 2004;38:67-74.
51. Esteves-Oliveira M, Pasaporti C, Heussen N, Eduardo CP, Lampert F, Apel C: Prevention of toothbrushing abrasion of acid-softened enamel by CO(2) laser irradiation. *J Dent* 2011;39:604-611.

52. Esteves-Oliveira M, Yu H, de Paula EC, Meister J, Lampert F, Attin T, Wiegand A: Screening of CO(2) laser (10.6 μm) parameters for prevention of enamel erosion. *Photomed Laser Surg* 2012;30:331-338.
53. Fan Y, Sun Z, Moradian-Oldak J: Effect of fluoride on the morphology of calcium phosphate crystals grown on acid-etched human enamel. *Caries Res* 2009;43:132-136.
54. Featherstone JD: Consensus conference on intra-oral models: evaluation techniques. *J Dent Res* 1992;71 Spec No:955-956.
55. Featherstone JDB, Lussi A: Understanding the chemistry of dental erosion; in Lussi A (ed): *Dental Erosion*. Basel, Karger, 2006 pp 66-76.
56. Field J, Waterhouse P, German M: Quantifying and qualifying surface changes on dental hard tissues in vitro. *J Dent* 2010;38:182-190.
57. Franzo D, Philpotts CJ, Cox TF, Joiner A: The effect of toothpaste concentration on enamel and dentine wear in vitro. *J Dent* 2010;38:974-979.
58. Ganss C, Hardt M, Lussi A, Cocks A-K, Klimek J, Schlueter N: Mechanism of action of tin-containing fluoride solutions as anti-erosive agents in dentine - An in vitro tin-uptake, tissue loss and SEM-study -. *Eur J Oral Sci* 2010;118:376-384.
59. Ganss C, Klimek J, Borkowski N: Characteristics of tooth wear in relation to different nutritional patterns including contemporary and medieval subjects. *Eur J Oral Sci* 2002;110:54-60.
60. Ganss C, Klimek J, Giese K: Dental erosion in children and adolescents - a cross-sectional and longitudinal investigation using study models. *Community Dent Oral Epidemiol* 2001;29:264-271.
61. 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 demineralisation. *Arch Oral Biol* 2000;45:897-902.
62. Ganss C, Lussi A, Grunau O, Klimek J, Schlueter N: Conventional and anti-erosion fluoride toothpastes: effect on enamel erosion and erosion-abrasion. *Caries Res* 2011;45:581-589.
63. Ganss C, Lussi A, Klimek J: Comparison of calcium/phosphorus analysis, longitudinal microradiography and profilometry for the quantitative assessment of erosive demineralisation. *Caries Res* 2005;39:178-184.
64. Ganss C, Lussi A, Scharmann I, Weigelt T, Hardt M, Klimek J, Schlueter N: Comparison of Calcium Analysis, Longitudinal Microradiography and

- Profilometry for the Quantitative Assessment of Erosion in Dentine. *Caries Res* 2009;43:422-429.
65. Ganss C, Schlueter N, Friedrich D, Klimek J: Efficacy of waiting periods and topical fluoride treatment on toothbrush abrasion of eroded enamel in situ. *Caries Res* 2007a;41:146-151.
66. 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 Res* 2008;42:2-7.
67. 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. *Arch Oral Biol* 2007b;52:9-14.
68. Ganss C, von HJ, Tolle A, Schulze K, Klimek J, Schlueter N: Efficacy of the stannous ion and a biopolymer in toothpastes on enamel erosion/abrasion. *J Dent* 2012;40:1036-1043.
69. Gerrard WA, Winter PJ: Evaluation of toothpastes by their ability to assist rehardening of enamel in vitro. *Caries Res* 1986;20:209-216.
70. Giles A, Claydon NC, Addy M, Hughes N, Sufi F, West NX: Clinical in situ study investigating abrasive effects of two commercially available toothpastes. *J Oral Rehabil* 2009;36:498-507.
71. Gonzalez-Cabezas C, Hara AT, Hefferren J, Lippert F: Abrasivity testing of dentifrices - challenges and current state of the art. *Monogr Oral Sci* 2013;23:100-107.
72. Gregg T, Mace S, West NX, Addy M: A study in vitro of the abrasive effect of the tongue on enamel and dentine softened by acid erosion. *Caries Res* 2004;38:557-560.
73. Grenby TH: Methods of assessing erosion and erosive potential. *Eur J Oral Sci* 1996;104:207-214.
74. Hannig C, Becker K, Yankeu-Ngalene VE, Attin T: Applicability of common methods for short time erosion analysis in vitro. *Oral Health Prev Dent* 2008;accepted.
75. Hannig C, Berndt D, Hoth-Hannig W, Hannig M: The effect of acidic beverages on the ultrastructure of the acquired pellicle - An in situ study. *Arch Oral Biol* 2009;54:518-526.
76. Hara AT, Gonzalez-Cabezas C, Creeth J, Parmar M, Eckert GJ, Zero DT: Interplay between fluoride and abrasivity of dentifrices on dental erosion-abrasion. *J Dent* 2009;37:781-785.

77. Hara AT, Gonzalez-Cabezas C, Creeth J, Zero DT: The effect of human saliva substitutes in an erosion-abrasion cycling model. *Eur J Oral Sci* 2008;116:552-556.
78. Hara AT, Lippert F, Zero DT: Interplay between experimental dental pellicles and stannous-containing toothpaste on dental erosion-abrasion. *Caries Res* 2013;47:325-329.
79. Hay DI, Smith DJ, Schluckebier SK, Moreno EC: Relationship between concentration of human salivary statherin and inhibition of calcium phosphate precipitation in stimulated human parotid saliva. *J Dent Res* 1984;63:857-863.
80. Hemingway CA, Parker DM, Addy M, Barbour ME: Erosion of enamel by non-carbonated soft drinks with and without toothbrushing abrasion. *Br Dent J* 2006;201:447-450.
81. Hercules DM, Craig NL: Fluorine and tin uptake by enamel studied by x-ray photoelectron spectroscopy (ESCA). *J Dent Res* 1978;57:296-305.
82. Hjortsjo C, Jonski G, Young A, Saxegaard E: Effect of acidic fluoride treatments on early enamel erosion lesions--a comparison of calcium and profilometric analyses. *Arch Oral Biol* 2010;55:229-234.
83. Hooper S, West NX, Pickles MJ, Joiner A, Newcombe RG, Addy M: Investigation of erosion and abrasion on enamel and dentine: a model in situ using toothpastes of different abrasivity. *J Clin Periodontol* 2003;30:802-808.
84. Hooper SM, Newcombe RG, Faller R, Eversole S, Addy M, West NX: The protective effects of toothpaste against erosion by orange juice: studies in situ and in vitro. *J Dent* 2007;35:476-481.
85. Hove L, Holme B, Ogaard B, Willumsen T, Tveit AB: The protective effect of TiF(4), SnF(2) and NaF on erosion of enamel by hydrochloric acid in vitro measured by white light interferometry. *Caries Res* 2006;40:440-443.
86. Hove LH, Holme B, Young A, Tveit AB: The erosion-inhibiting effect of TiF4, SnF2, and NaF solutions on pellicle-covered enamel in vitro. *Acta Odontol Scand* 2007;65:259-264.
87. Hove LH, Holme B, Young A, Tveit AB: The protective effect of TiF(4), SnF(2) and NaF against erosion-like lesions in situ. *Caries Res* 2008;42:68-72.
88. Hughes JA, West NX, Parker DM, van den Braak MH, Addy M: Effects of pH and concentration of citric, malic and lactic acids on enamel, in vitro. *J Dent* 2000;28:147-152.

89. Hunter ML, Addy M, Pickles MJ, Joiner A: The role of toothpastes and toothbrushes in the aetiology of tooth wear. *Int Dent J* 2002;52.
90. Huysmans MC, Chew HP, Ellwood RP: Clinical studies of dental erosion and erosive wear. *Caries Res* 2011;45 Suppl 1:60-68.
91. Jaeggi T, Lussi A: Toothbrush abrasion of erosively altered enamel after intraoral exposure to saliva: An in situ study. *Caries Res* 1999;33:455-461.
92. Jain P, Nihill P, Sobkowski J, Agustin MZ: Commercial soft drinks: pH and in vitro dissolution of enamel. *Gen Dent* 2007;55:150-154.
93. Jordan TH, Wei SHY, Bromberger SH, King JC: Sn(3)F(3)PO(4): The product of the reaction between stannous fluoride and hydroxyapatite. *Arch Oral Biol* 1971;16:241-246.
94. Kelly MP, Smith BG: The effect of remineralizing solutions on tooth wear in vitro. *J Dent* 1988;16:147-149.
95. Krutchkoff DJ, Jordan TH, Wei SHY, Nordquist WD: Surface characterization of the stannous fluoride-enamel interaction. *Arch Oral Biol* 1972;17:923-930.
96. Kuroiwa M, Kodaka T, Abe M: Brushing-induced effects with and without a non-fluoride abrasive dentifrice on remineralization of enamel surfaces etched with phosphoric acid. *Caries Res* 1994;28:309-314.
97. Lagerweij MD, Buchalla W, Kohnke S, Becker K, Lennon AM, Attin T: Prevention of erosion and abrasion by a high fluoride concentration gel applied at high frequencies. *Caries Res* 2006;40:148-153.
98. Larsen MJ, Jensen SJ: Experiments on the initiation of calcium fluoride formation with reference to the solubility of dental enamel and brushite. *Arch Oral Biol* 1994;39:23-27.
99. Larsen MJ, Nyvad B: Enamel erosion by some soft drinks and orange juices relative to their pH, buffering effect and contents of calcium phosphate. *Caries Res* 1999;33:81-87.
100. Larsen MJ, Pearce EI: Saturation of human saliva with respect to calcium salts. *Arch Oral Biol* 2003;48:317-322.
101. Larsen MJ, Pearce EI, Jensen SJ: Defluoridation of water at high pH with use of brushite, calcium hydroxide, and bone char. *J Dent Res* 1993a;72:1519-1525.

102. Larsen MJ, Pearce EI, Jensen SJ: Notes on the dissolution of human dental enamel in dilute acid solutions at high solid/solution ratio. *Caries Res* 1993b;27:87-95.
103. Larsen MJ, Richards A: The influence of saliva on the formation of calcium fluoride-like material on human dental enamel. *Caries Res* 2001;35:57-60.
104. Laurance-Young P, Bozec L, Gracia L, Rees G, Lippert F, Lynch RJ, Knowles JC: A review of the structure of human and bovine dental hard tissues and their physicochemical behaviour in relation to erosive challenge and remineralisation. *J Dent* 2011;39:266-272.
105. Levy FM, Magalhaes AC, Gomes MF, Comar LP, Rios D, Buzalaf MA: The erosion and abrasion-inhibiting effect of TiF(4) and NaF varnishes and solutions on enamel in vitro. *Int J Paediatr Dent* 2012;22:11-16.
106. Levy FM, Rios D, Buzalaf MA, Magalhaes AC: Efficacy of TiF and NaF varnish and solution: a randomized in situ study on enamel erosive-abrasive wear. *Clin Oral Investig* 2013.
107. Lippert F: An introduction to toothpaste - its purpose, history and ingredients. *Monogr Oral Sci* 2013;23:1-14.
108. Lussi A, Bossen A, Hoschele C, Beyeler B, Megert B, Meier C, Rakhmatullina E: Effects of enamel abrasion, salivary pellicle, and measurement angle on the optical assessment of dental erosion. *J Biomed Opt* 2012;17:97009-1.
109. Lussi A, Jaeggi T: Erosion—diagnosis and risk factors. *Clin Oral Invest* 2008;12:S5-S13.
110. Lussi A, Jaeggi T, Gerber C, Megert B: Effect of amine/sodium fluoride rinsing on toothbrush abrasion of softened enamel in situ. *Caries Res* 2004;38:567-571.
111. Lussi A, Jaeggi T: Prävalenz, Inzidenz und Lokalisation der Erosionen; in Lussi A, Jaeggi T (eds): *Dentale Erosionen Von der Diagnose zur Therapie*. Berlin, 2009 pp 19-35.
112. Lussi A, Schlueter N, Rakhmatullina E, Ganss C: Dental erosion--an overview with emphasis on chemical and histopathological aspects. *Caries Res* 2011;45 Suppl 1:2-12.
113. Macdonald E, North A, Maggio B, Sufi F, Mason S, Moore C, Addy M, West NX: Clinical study investigating abrasive effects of three toothpastes and water in an in situ model. *J Dent* 2010;38:509-516.

114. Magalhaes AC, Rios D, Delbem AC, Buzalaf MA, Machado MA: Influence of fluoride dentifrice on brushing abrasion of eroded human enamel: an in situ/ex vivo study. *Caries Res* 2007;41:77-79.
115. Magalhaes AC, Rios D, Martinhon CCR, Delbem AC, Buzalaf MA, Machado MA: The influence of residual salivary fluoride from dentifrice on enamel erosion: an in situ study. *Braz Oral Res* 2008;22:67-71.
116. Mahoney E, Beattie J, Swain M, Kilpatrick N: Preliminary in vitro assessment of erosive potential using the ultra-micro-indentation system. *Caries Res* 2003;37:218-224.
117. Meurman JH, Frank RM: Progression and surface ultrastructure of in vitro caused erosive lesions in human and bovine enamel. *Caries Res* 1991;25:81-87.
118. Meurman JH, tenCate JM: Pathogenesis and modifying factors of dental erosion. *Eur J Oral Sci* 1996;104:199-206.
119. Moazzez RV, Austin RS, Rojas-Serrano M, Carpenter G, Cotroneo E, Proctor G, Zaidel L, Bartlett DW: Comparison of the possible protective effect of the salivary pellicle of individuals with and without erosion. *Caries Res* 2014;48:57-62.
120. Moreno EC, Varughese K, Hay DI: Effect of human salivary proteins on the precipitation kinetics of calcium phosphate. *Calcif Tissue Int* 1979;28:7-16.
121. Moretto MJ, Delbem AC, Manarelli MM, Pessan JP, Martinhon CC: Effect of fluoride varnish supplemented with sodium trimetaphosphate on enamel erosion and abrasion: an in situ/ex vivo study. *J Dent* 2013;41:1302-1306.
122. Moretto MJ, Magalhaes AC, Sasaki KT, Delbem AC, Martinhon CC: Effect of different fluoride concentrations of experimental dentifrices on enamel erosion and abrasion. *Caries Res* 2010;44:135-140.
123. Moron BM, Miyazaki SS, Ito N, Wiegand A, Vilhena F, Buzalaf MA, Magalhaes AC: Impact of different fluoride concentrations and pH of dentifrices on tooth erosion/abrasion in vitro. *Aust Dent J* 2013;58:106-111.
124. Nekrashevych Y, Stösser L: Protective influence of experimentally formed salivary pellicle on enamel erosion. An in vitro study. *Caries Res* 2003;37:225-231.
125. Nelson KG, Bainbridge CA: SnHPO₄ from the reaction of stannous fluoride and hydroxyapatite at a low pH. *J Dent Res* 1973;52:318-321.

126. Orchardson R, Collins WJ: Clinical features of hypersensitive teeth. *Br Dent J* 1987;162:253-256.
127. Parry J, Harrington E, Rees GD, McNab R, Smith AJ: Control of brushing variables for the in vitro assessment of toothpaste abrasivity using a novel laboratory model. *J Dent* 2008;36:117-124.
128. Passos VF, Melo MA, Vasconcellos AA, Rodrigues LK, Santiago SL: Comparison of methods for quantifying dental wear caused by erosion and abrasion. *Microsc Res Tech* 2013;76:178-183.
129. Petzold M: The influence of different fluoride compounds and treatment conditions on dental enamel: a descriptive in vitro study of the CaF₂ precipitation and microstructure. *Caries Res* 2001;35:45-51.
130. Pindborg, J. J. Pathology of the dental hard tissues. Copenhagen, Munksgaard, 1970. 1970.
131. Pretty IA, Edgar WM, Higham SM: The validation of quantitative light-induced fluorescence to quantify acid erosion of human enamel. *Arch Oral Biol* 2004;49:285-294.
132. Radlanski: Schmelz; in Quintessenz Verlag (ed): *Orale Struktur- und Entwicklungsbiologie*. Berlin, 2011 pp 199-256.
133. Ranjitkar S, Rodriguez JM, Kaidonis JA, Richards LC, Townsend GC, Bartlett DW: The effect of casein phosphopeptide-amorphous calcium phosphate on erosive enamel and dentine wear by toothbrush abrasion. *J Dent* 2009;37:250-254.
134. Rios D, Honorio HM, Magalhaes AC, Buzalaf MA, Palma-Dibb RG, Machado MA, da Silva SM: Influence of toothbrushing on enamel softening and abrasive wear of eroded bovine enamel: an in situ study. *Braz Oral Res* 2006a;20:148-154.
135. Rios D, Honório HM, Magalhaes AC, daSilva SMB, Delbem AC, Machado MA, Buzalaf MA: Scanning electron microscopic study of the in situ effect of salivary stimulation on erosion and abrasion in human and bovine enamel. *Braz Oral Res* 2008a;22:132-138.
136. Rios D, Honório HM, Magalhaes AC, Delbern ACB, Machado MAAM, Silva SMB, Buzalaf MAR: Effect of salivary stimulation on erosion of human and bovine enamel subjected or not to subsequent abrasion: an in situ/ex vivo study. *Caries Res* 2006b;40:218-223.
137. Rios D, Magalhaes AC, Polo RO, Wiegand A, Attin T, Buzalaf MA: The efficacy of a highly concentrated fluoride dentifrice on bovine enamel subjected to erosion and abrasion. *J Am Dent Assoc* 2008b;139:1652-1656.

138. Rios D, Santos FC, Honorio HM, Magalhaes AC, Wang L, de Andrade Moreira Machado MA, Buzalaf MA: An in situ/ex vivo comparison of the ability of regular and light colas to induce enamel wear when erosion is combined with abrasion. *Quintessence Int* 2011;42:e44-e50.
139. Rochel ID, Souza JG, Silva TC, Pereira AF, Rios D, Buzalaf MA, Magalhaes AC: Effect of experimental xylitol and fluoride-containing dentifrices on enamel erosion with or without abrasion in vitro. *J Oral Sci* 2011;53:163-168.
140. Rodriguez JM, Bartlett DW: A comparison of two-dimensional and three-dimensional measurements of wear in a laboratory investigation. *Dent Mater* 2010;26:e221-e225.
141. Rolla G, Jonski G, Saxegaard E: On inhibition of dental erosion. *Acta Odontol Scand* 2013;71:1508-1512.
142. Sales-Peres SH, Pessan JP, Buzalaf MA: Effect of an iron mouthrinse on enamel and dentine erosion subjected or not to abrasion: an in situ/ex vivo study. *Arch Oral Biol* 2007;52:128-132.
143. Saxegaard E, Rolla G: Fluoride acquisition on and in human enamel during topical application in vitro. *Scand J Dent Res* 1988;96:523-535.
144. Scheutzel P: Etiology of dental erosion- intrinsic factors. *Eur J Oral Sci* 1996;104:178-190.
145. Schlueter N, Duran A, Klimek J, Ganss C: Investigation of the effect of various fluoride compounds and preparations thereof on erosive tissue loss in enamel in vitro. *Caries Res* 2009a;43:10-16.
146. Schlueter N, Ganss C, Mueller U, Klimek J: Effect of titanium tetrafluoride and sodium fluoride on erosion progression in enamel and dentine in vitro. *Caries Res* 2007;41:141-145.
147. Schlueter N, Hara A, Shellis RP, Ganss C: Methods for the measurement and characterization of erosion in enamel and dentine. *Caries Res* 2011;45 Suppl 1:13-23.
148. 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. *Eur J Oral Sci* 2009b;117:427-434.
149. Schlueter N, Klimek J, Ganss C: Effect of stannous and fluoride concentration in a mouth rinse on erosive tissue loss in enamel in vitro. *Arch Oral Biol* 2009c;54:432-436.

150. Schlueter N, Neutard L, von Hinckeldey J, Klimek J, Ganss C: Tin and fluoride as anti-erosive agents in enamel and dentine in vitro. *Acta Odontol Scand* 2010;E-Pub.
151. Schweizer-Hirt CM, Schait A, Schmid R, Imfeld T, Lutz F, Muhlemann HR: Erosion und Abrasion des Schmelzes. Eine experimentelle Studie. *Schweiz Monatsschr Zahnheilkd* 1978;88:497-529.
152. Shellis RP, Barbour ME, Jones SB, Addy M: Effects of pH and acid concentration on erosive dissolution of enamel, dentine, and compressed hydroxyapatite. *Eur J Oral Sci* 2010;118:475-482.
153. Shellis RP, Featherstone JD, Lussi A: Understanding the chemistry of dental erosion. *Monogr Oral Sci* 2014;25:163-179.
154. Shellis RP, Finke M, Eisenburger M, Parker DM, Addy M: Relationship between enamel erosion and liquid flow rate. *Eur J Oral Sci* 2005;113:232-238.
155. Sobral MA, Lachowski KM, de RW, Braga SR, Ramalho KM: Effect of Nd:YAG laser and acidulated phosphate fluoride on bovine and human enamel submitted to erosion/abrasion or erosion only: an in vitro preliminary study. *Photomed Laser Surg* 2009;27:709-713.
156. Stenhagen KR, Hove LH, Holme B, Taxt-Lamolle S, Tveit AB: Comparing different methods to assess erosive lesion depths and progression in vitro. *Caries Res* 2010;44:555-561.
157. Sundaram G, Wilson R, Watson TF, Bartlett D: Clinical measurement of palatal tooth wear following coating by a resin sealing system. *Oper Dent* 2007;32:539-543.
158. Turssi CP, Faraoni JJ, Rodrigues Jr AL, Serra MC: An in situ investigation into the abrasion of eroded dental hard tissues by a whitening dentifrice. *Caries Res* 2004;38:473-477.
159. Turssi CP, Messias DC, de MM, Hara AT, Serra MC: Role of dentifrices on abrasion of enamel exposed to an acidic drink. *Am J Dent* 2005;18:251-255.
160. van Loveren C, Duckworth RM: Anti-calculus and whitening toothpastes. *Monogr Oral Sci* 2013;23:61-74.
161. Vieira A, Jager DHJ, Ruben JL, Huysmans MC: Inhibition of erosive wear by fluoride varnish. *Caries Res* 2007;41:61-67.
162. Vieira A, Lugtenborg M, Ruben JL, Huysmans MC: Brushing abrasion of eroded bovine enamel pretreated with topical fluorides. *Caries Res* 2006a;40:224-230.

163. Vieira A, Overweg E, Ruben JL, Huysmans MC: Toothbrush abrasion, simulated tongue friction and attrition of eroded bovine enamel in vitro. *J Dent* 2006b;34:336-342.
164. Voronets J, Jaeggi T, Buergin W, Lussi A: Controlled toothbrush abrasion of softened human enamel. *Caries Res* 2008;42:286-290.
165. Voronets J, Lussi A: Thickness of softened human enamel removed by toothbrush abrasion: an in vitro study. *Clin Oral Investig* 2010;14:251-256.
166. Vukosavljevic D, Custodio W, Buzalaf MA, Hara AT, Siqueira WL: Acquired pellicle as a modulator for dental erosion. *Arch Oral Biol* 2014;59:631-638.
167. Wang X, Megert B, Hellwig E, Neuhaus KW, Lussi A: Preventing erosion with novel agents. *J Dent* 2011;39:163-170.
168. Wegehaupt F, Gunthart N, Sener B, Attin T: Prevention of erosive/abrasive enamel wear due to orange juice modified with dietary supplements. *Oral Dis* 2011.
169. Wegehaupt FJ, Schneiders V, Wiegand A, Schmidlin PR, Attin T: Influence of two different fluoride compounds and an in vitro pellicle on the amount of KOH-soluble fluoride and its retention after toothbrushing. *Acta Odontol Scand* 2009;67:355-359.
170. Wegehaupt FJ, Taubock TT, Sener B, Attin T: Retention of KOH-soluble fluoride formed after application of a SnCl(2)/AmF/NaF containing mouth rinse under erosive conditions. *Acta Odontol Scand* 2012;70:272-278.
171. West NX, Davies M, Amaechi BT: In vitro and in situ erosion models for evaluating tooth substance loss. *Caries Res* 2011;45 Suppl 1:43-52.
172. West NX, Hughes JA, Addy M: Erosion of dentine and enamel in vitro by dietary acids: the effect of temperature, acid character, concentration and exposure time. *J Oral Rehab* 2000;27:875-880.
173. West NX, Hughes JA, Addy M: The effect of pH on the erosion of dentine and enamel by dietary acids in vitro. *J Oral Rehab* 2001;28:860-864.
174. West NX, Maxwell A, Hughes JA, Parker DM, Newcombe RG, Addy M: A method to measure clinical erosion: the effect of orange juice consumption on erosion of enamel. *J Dent* 1998;26:329-335.
175. White AJ, Yorath C, ten H, V, Leary SD, Huysmans MC, Barbour ME: Human and bovine enamel erosion under 'single-drink' conditions. *Eur J Oral Sci* 2010;118:604-609.

176. Wiegand A, Attin T: Design of erosion/abrasion studies--insights and rational concepts. *Caries Res* 2011;45 Suppl 1:53-59.
177. Wiegand A, Begic M, Attin T: In vitro evaluation of abrasion of eroded enamel by different manual, power and sonic toothbrushes. *Caries Res* 2006a;40:60-65.
178. Wiegand A, Bliggenstorfer S, Magalhaes AC, Sener B, Attin T: Impact of the in situ formed salivary pellicle on enamel and dentine erosion induced by different acids. *Acta Odontol Scand* 2008a;66:225-230.
179. Wiegand A, Egert S, Attin T: Toothbrushing before or after an acidic challenge to minimize tooth wear? An in situ/ex vivo study. *Am J Dent* 2008b;21:13-16.
180. Wiegand A, Hiestand B, Sener B, Magalhaes AC, Roos M, Attin T: Effect of TiF₄, ZrF₄, HfF₄ and AmF on erosion and erosion/abrasion of enamel and dentin in situ. *Arch Oral Biol* 2010;55:223-228.
181. Wiegand A, Meier W, Sutter E, Magalhaes AC, Becker K, Roos M, Attin T: Protective Effect of Different Tetrafluorides on Erosion of Pellicle-Free and Pellicle-Covered Enamel and Dentine. *Caries Res* 2008c;42:247-254.
182. Wiegand A, Müller J, Werner C, Attin T: Prevalence of erosive tooth wear and associated risk factors in 2-7-year-old German kindergarten children. *Oral Diseases* 2006b;12:117-124.
183. Wiegand A, Schneider S, Sener B, Roos M, Attin T: Stability against brushing abrasion and the erosion-protective effect of different fluoride compounds. *Caries Res* 2014;48:154-162.
184. Wiegand A, Schwerzmann M, Sener B, Magalhaes 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 Odontol Scand* 2008d;66:231-235.
185. Wiegand A, Stock A, Attin R, Werner C, Attin T: Impact of the acid flow rate on dentin erosion. *J Dent* 2007a;35:21-27.
186. Wiegand A, Wegehaupt F, Werner C, Attin T: Susceptibility of acid-softened enamel to mechanical wear--ultrasonication versus toothbrushing abrasion. *Caries Res* 2007b;41:56-60.
187. Young A, Tenuta LM: Initial erosion models. *Caries Res* 2011;45 Suppl 1:33-42.
188. Yu H, Attin T, Wiegand A, Buchalla W: Effects of various fluoride solutions on enamel erosion in vitro. *Caries Res* 2010;44:390-401.

189. Yu H, Wegehaupt FJ, Wiegand A, Roos M, Attin T, Buchalla W: Erosion and abrasion of tooth-colored restorative materials and human enamel. *J Dent* 2009;37:913-922.
190. Zero DT: Etiology of dental erosion- extrinsic factors. *Eur J Oral Sci* 1996;104:162-177.
191. Zero DT, Hara AT, Kelly SA, Gonzalez-Cabezas C, Eckert GJ, Barlow AP, Mason SC: Evaluation of a desensitizing test dentifrice using an in situ erosion remineralization model. *J Clin Dent* 2006;17:112-116.

9 Anhang

9.1 Übersicht zur Literaturrecherche

9.1.1 Übersicht über Studiendesign, Substrat, Behandlung, erosives Medium und Schüttelbewegung

Tab. Anhang 1: Bei einer PubMed-Suche vom Oktober 2013 mit den Suchbegriffen „dental“, „erosion“, „abrasion“ und „enamel“ sowie optional zusätzlich mit dem Suchbegriff „in vitro“ wurden insgesamt 226 Artikel gefunden. Von diesen wurden 62 in vitro, in situ und kombinierte (v, s, k) in vitro/in situ Studien, die den Schwerpunkt Erosion, Abrasion oder Abrasionen in Kombination mit Erosionen untersuchen, erfasst. In der Tabelle aufgelistet sind die Parameter Studiendesign (in situ, in vitro oder kombiniert), Substrat (Schmelz, Dentin; human, bovin), Behandlung (Erosion, Erosion/Abrasion mit Angabe der Dauer oder Anzahl der Bürststriche (BS) pro abrasivem Ereignis), erosives Medium (Demineralisationslösung mit Angabe von Konzentration, pH-Wert und Dauer) sowie Schüttelbewegung (Frequenz und Art; Temperatur).

	in vitro / in situ / kombiniert	Schmelz	Dentin	Erosion	Erosion/ Abrasion	erosives Medium (Konz.)	Schüttelbew. (Frequenz)
1% Zitr.sre							
Interplay between fluoride and abrasivity of dentifrices on dental erosion-abrasion [Hara et al., 2009]	v	x	x (Wurzeldentin)		x	Zitronensäure (1%, 120 ml; 2 min)	keine (statische Aufbewahrung) Raumtemp.
The effect of human saliva substitutes in an erosion-abrasion cycling model [Hara et al., 2008]	v	x	x		x (Schmelz 500 BS, Dentin 150 BS)	Zitronensäure (1%; pH 3,75; 5 min)	keine (statische Aufbewahrung)
The potential of deciduous and permanent bovine enamel as substitute for deciduous and permanent human enamel: Erosion-abrasion experiments [Attin et al., 2007]	v	x (bovin, human)		x	x (100 BS)	Zitronensäure (1%, pH 2,3; 1 min)	

Prevention of erosion and abrasion by a high fluoride concentration gel applied at high frequencies [Lagerweij et al., 2006]	v	x (bovin)			x (60 BS / 15 sek)	Zitronensäure (1%; pH 2,3; 30 sek)	5 ml/min / Probe
In vitro Evaluation of Abrasion of Eroded Enamel by Different Manual, Power and Sonic Toothbrushes [Wiegand et al., 2006a]	v	x (bovin)			x (20 or 80 BS/min; 10 min)	Zitronensäure (1%; pH 2,3; 5 min)	
Einfluss der Pufferkapazität aminfluoridhaltiger Zahnpasten und Gele bei Schmelzerosionen [Betke et al., 2003]	v	x			x (2000 BS)	Zitronensäure (1%; pH 2,28; 5 min)	
0,5% Zitr.sre							
Efficacy of the stannous ion and a biopolymer in toothpastes on enamel erosion/abrasion [Ganss et al., 2012]	v	x			x (15 sek)	Zitronensäure (0,5%; nativer pH 2,5; 2 min)	Schüttelplatte 35/min
0,3% Zitr.sre							
Interplay between Experimental Dental Pellicles and Stannous-Containing Toothpaste on Dental Erosion-Abrasion [Hara et al., 2013]	v	x	x (Wurzeldentin)		x (45 BS, 15 sek)	Zitronensäure (0,3%; pH 2,6; 5 min)	keine (statische Aufbewahrung)
The effect of casein phosphopeptide-amorphous calcium phosphate on erosive enamel and dentine wear by toothbrush abrasion [Ranjitkar et al., 2009]	v	x	x		x	Zitronensäure (0,3%; pH 3,2; 10 min)	

A study in vitro of the abrasive effect of the tongue on enamel and dentine softened by acid erosion [Gregg et al., 2004]	v	×	×	x	x (60 sek)	Zitronensäure (0,3%; pH 3,2; 10 min) Fruchtsaft (10 min)	konstante Bewegung
Comparative study of wear of enamel induced by alternating and simultaneous combinations of abrasion and erosion in vitro [Eisenburger et al., 2003]	v	×			x (12 / 500 BS)	Zitronensäure (0,3%; pH 3,2; 10 min)	rührend, 270 U/min; 35°C
pH 3,6/3,5 Zitrsäure							
Effects of enamel abrasion, salivary pellicle, and measurement angle on the optical assessment of dental erosion [Lussi et al., 2012]	v	×			x	Zitronensäure (0,65%; pH 3,6; 30 sek - 15 min) bzw. (1%; pH 3,6; 1 min)	70 U/min 30°C
Thickness of softened human enamel removed by toothbrush abrasion: an in vitro study [Voronets und Lussi, 2010]	v	×			x	Orangensaft Zitronensäure (0,65%; pH 3,6; 3 min)	75 U/min; 37°C; Kreisschüttler
Effect of amine/sodium fluoride rinsing on toothbrush abrasion of softened enamel in situ [Lussi et al., 2004]	s	×			x (30 sek)	Zitronensäure (0,1 M; pH 3,5; 3 min)	konstante Bewegung
Toothbrush abrasion of erosively altered enamel after intraoral exposure to saliva: an in situ study [Jaeggi und Lussi, 1999]	s	×			x	Zitronensäure (0,1 M; pH 3,5; 3 min)	konstante Bewegung 20°C

Comparison of the effect of fluoride and non-fluoride toothpaste on tooth wear in vitro and the influence of enamel fluoride concentration and hardness of enamel [Bartlett et al., 1994]	v	x			x (200 BS)	Zitronensäure (6%, pH 3,5; 5 min)	keine (statische Aufbewahrung)
Zitr.sre anderer/ unbekannter Konz./ pH							
Effect of fluoride varnish supplemented with sodium trimetaphosphate on enamel erosion and abrasion: An in situ/ex vivo study [Moretto et al., 2013]	k	x		x	x (15 sek)	Zitronensäure (0,05 M; pH 3,2; 5 min)	
Conventional and Anti-Erosion Fluoride Toothpastes: Effect on Enamel Erosion and Erosion-Abrasion [Ganss et al., 2011]	v	x		x	x (15 sek)	Zitronensäure (0,05 M; nativer pH 2,4; 2 min)	Schüttelplatte 35/min 25°C
Prevention of toothbrushing abrasion of acid-softened enamel by CO ₂ laser irradiation [Esteves-Oliveira et al., 2011]	v	x			x	Sprite light Zitronensäure (pH 2,84; 90 sek)	Schüttel- wasserbad
Erosion and abrasion of tooth-colored restorative materials and human enamel [Yu et al., 2009]	v	x		x	x	Zitronensäure (pH 2,3; 1 min)	
Effect of Nd:YAG laser and acidulated phosphate fluoride on bovine and human enamel submitted to erosion/abrasion or erosion only: an in vitro preliminary study [Sobral et al., 2009]	v	x (bovin, human)		x	x (5000 BS)	Zitronensäure (2%; pH 2,6; bovin 30 min; human 90 min)	

Efficacy of waiting periods and topical fluoride treatment on toothbrush abrasion of eroded enamel in situ [Ganss et al., 2007a]	k	x			x (30 sek)	Zitronensäure (0,05 M; pH 2,3; 20 min)	
Brushing Abrasion of Eroded Bovine Enamel Pretreated with Topical Fluorides [Vieira et al., 2006a]	v	x (bovin)		x	x (200 BS, 1 min)	Zitronensäure (50 mM; pH 3; 10 min)	100 rpm
Toothbrush abrasion, simulated tongue friction and attrition of eroded bovine enamel in vitro [Vieira et al., 2006b]	v	x (bovin)		x	x (1 min)	Zitronensäure (50 mM; pH 3; 10 min)	milde Bewegung
Limonaden							
Efficacy of TiF ₄ and NaF varnish and solution: a randomized in situ study on enamel erosive-abrasive wear [Levy et al., 2013]	k	x		x	x (10 sek)	Cola (pH 2,6; 90 sek)	
Comparison of Methods for Quantifying Wear Caused by Erosion and Abrasion [Passos et al., 2013]	v	x	x	x	x (150 BS)	Cola (1 min)	keine (statische Aufbewahrung)
Impact of different fluoride concentrations and pH of dentifrices on tooth erosion/abrasion in vitro [Moron et al., 2013]	v	x (bovin)	x (bovin)		x (15 sek 166 Osz/sek)	Sprite Zero (pH 2,6; 90 sek)	keine (statische Aufbewahrung) 25°C
Effect of NaF, SnF ₂ , and TiF ₄ Toothpastes on Bovine Enamel and Dentin Erosion-Abrasion In Vitro [Comar et al., 2012]	v	x (bovin)	x (bovin)		x (15 sek 166 Osz/sek)	Sprite Zero (pH 2,6; 90 sek)	keine (statische Aufbewahrung) 25°C

The erosion and abrasion-inhibiting effect of TiF ₄ and NaF varnishes and solutions on enamel in vitro [Levy et al., 2012]	v	x (bovin)		x	x	Sprite Zero (pH 2,6; 90 sek)	keine (statische Aufbewahrung) 25°C
Effect of experimental xylitol and fluoride-containing dentifrices on enamel erosion with or without abrasion in vitro [Rochel et al., 2011]	v	x (bovin)		x	x	Cola (pH 2,3; 2 min)	keine (statische Aufbewahrung) 25°C
An in situ/ex vivo comparison of the ability of regular and light colas to induce enamel wear when erosion is combined with abrasion [Rios et al., 2011]	k	x (bovin)		x	x (30 sek 166 Osz/sek)	Cola (pH 2,6; 5 min) Cola light (pH 3,0; 5 min)	
Effect of Different Fluoride Concentrations of Experimental Dentifrices on Enamel Erosion and Abrasion [Moretto et al., 2010]	v	x (bovin)		x	x (40 Rotationen)	Sprite (pH 2,8; 5 min)	keine (statische Aufbewahrung)
Effect of TiF ₄ , ZrF ₄ , HfF ₄ and AmF on erosion and abrasion of enamel and dentin in situ [Wiegand et al., 2010]	s	x (bovin)	x (bovin)	x	x	Sprite (90 sek)	
The efficacy of a highly concentrated fluoride dentifrice on bovine enamel subjected to erosion and abrasion [Rios et al., 2008b]	k	x (bovin)		x	x (30 sek 166 Osz/sek)	Cola (pH 2,6; 1 min)	n.a. Raum- temperatur
Scanning electron microscopic study of the in situ effect of salivary stimulation on erosion and abrasion in human and bovine enamel [Rios et al., 2008a]	s	x (bovin, human)		x	x (30 BS)	Cola (5 min)	

<p>Toothbrushing before or after an acidic challenge to minimize tooth wear? An in situ/ex vivo study [Wiegand et al., 2008b]</p>	k	x	x		x (16 BS / 20 sek)	Cola light (40 sek)	
<p>The influence of residual salivary fluoride from dentifrice on enamel erosion: an in situ study [Magalhaes et al., 2008]</p>	s	x		x		Cola (pH 2,5; 5 min)	
<p>Influence of fluoride dentifrice on brushing abrasion of eroded human enamel: an in situ/ex vivo study [Magalhaes et al., 2007]</p>	k	x			x (30 BS)	Cola (5 min)	keine (statische Aufbewahrung)
<p>Inhibition of erosive wear by fluoride varnish [Vieira et al., 2007]</p>	k	x		x	x (5 sek)	Sprite (pH 2,81; 5 min)	100 U/min
<p>Effect of an iron mouthrinse on enamel and dentine erosion subjected or not to abrasion: an in situ/ex vivo study [Sales-Peres et al., 2007]</p>	k	x	x	x	x (10 BS)	Cola (5 min)	
<p>Influence of toothbrushing on enamel softening and abrasive wear of eroded bovine enamel: an in situ study [Rios et al., 2006a]</p>	k	x (bovin)		x	x (30 BS)	Cola (pH 2,8; 10 min)	
<p>Effect of salivary stimulation on erosion of human and bovine enamel subjected or not to subsequent abrasion: an in situ/ex vivo study [Rios et al., 2006b]</p>	k	x (bovin, human)		x	x (30 BS)	Cola (5 min)	

Role of dentifrices on abrasion of enamel exposed to an acidic drink [Turssi et al., 2005]	v	x (bovin)			x (5000 BS)	Sprite Diet (pH 2,73; 5 min)	
An in situ investigation into the abrasion of eroded dental hard tissues by a whitening dentifrice [Turssi et al., 2004]	k	x	x		x (40 BS)	Sprite light (90 sek)	
In situ evaluation of different remineralization periods to decrease brushing abrasion of demineralized enamel [Attin et al., 2001]	k	x			x (15 sek)	Sprite light (90 sek; pH 2,91)	milde Bewegung extraoral per Hand
Use of variable remineralization periods to improve the abrasion resistance of previously eroded enamel [Attin et al., 2000]	v	x (bovin)			x (100 BS)	Sprite light (1 min)	konstante Bewegung
Influence of Acidified Fluoride Gel on Abrasion Resistance of Eroded Enamel [Attin et al., 1999]	v	x (bovin)			x (2000 BS)	Sprite Light (pH 2,8 - 2,9; 5 min)	
Correlation of microhardness and wear in differently eroded bovine dental enamel [Attin et al., 1997]	v	x (bovin)			x (8000 BS)	Sprite light (pH 2,91; 0, 1, 5 oder 15 min)	
Säfte							
Prevention of erosive/ abrasive enamel wear due to orange juice modified with dietary supplements [Wegehaupt et al., 2011]	v	x (bovin)			x (40 BS)	Kontrolle (Wasser) Orangensaft (oj) Wasser + Ca ²⁺ oj + Ca ²⁺ Wasser + 0,75 g Basenpulver (bp) Wasser + 0,375 g bp oj + 0,75 g bp oj + 0,375 g bp (2 min)	

A comparison of two-dimensional and three-dimensional measurements of wear in a laboratory investigation [Rodriguez und Bartlett, 2010]	v	x			x (200 BS)	saure Fruchtgetränke oder destilliertes Wasser (10 min)	milde Bewegung 20 °C
Evaluation of a desensitizing test dentifrice using an in situ erosion remineralization model [Zero et al., 2006]	k	x (bovin)		x		Grapefruitsaft (pH 7; 25 min in vitro)	keine (statische Aufbewahrung)
Erosion of enamel by non-carbonated soft drinks with and without toothbrushing abrasion [Hemingway et al., 2006]	v	x		x	x (25 BS)	Apfelsaft (pH 3,6) Orangensaft (pH 3,95) Apfelgetränk (pH 2,74) Orangengetränk (pH 3,18) Cranberrygetränk (pH 2,88) 'zahnfreundliches' Johannisbeergetränk (pH 3,69) '(10 min)	110 U/min
Investigation of erosion and abrasion on enamel and dentine: a model in situ using toothpastes of different abrasivity [Hooper et al., 2003]	s	x	x	x	x (1 min)	Orangensaft (250 ml / 10 min)	trinken
Influence of abrasion in clinical manifestation of human dental erosion [Amaechi et al., 2003]	s	x		x		Orangensaft (pH 3,85; 10 min)	langsam rührend
The effect of remineralizing solutions on tooth wear in vitro [Kelly und Smith, 1988]	v	x			x (200 BS)	Zitronensaft (50% verdünnt; pH 2,23; 5 min)	
The effect of abrasion on enamel and dentine and exposure to dietary acid [Davis und Winter, 1980]	s + v	x	x		x	Grapefruit/Speichel (pH 3,5; 45 sek / 3 min)	

Erosion and abrasion of the dental enamel. Experimental study [Schweizer-Hirt et al., 1978]	v	x			x (5 min)	Orangensaft (pH 3,4; 5 min)	
Salz-/ Phosphorsäure							
Screening of CO ₂ laser (10,6µm) parameters for prevention of enamel erosion [Esteves-Oliveira et al., 2012]	v	x		x		Salzsäure (pH 2,6; 15 min)	kontinuierlicher Fluß (60 µl/min)
A qualitative and quantitative investigation into the effect of fluoride formulations on enamel erosion and erosion-abrasion in vitro [Austin et al., 2011]	v	x		x	x (120 BS)	Salzsäure (0,01 M; pH 2,2; 2 min)	50 U/min 21°C
Impact of toothpaste slurry abrasivity and toothbrush filament stiffness on abrasion of eroded enamel - an in vitro study [Wiegand et al., 2008d]	v	x (bovin)			x	Salzsäure (0,0025 M; pH 2,6; 15 sek)	keine (statische Aufbewahrung)
Susceptibility of acid-softened enamel to mechanical wear--ultrasonication versus toothbrushing abrasion [Wiegand et al., 2007b]	v	x (bovin)			x (350 BS oder 120 sek US)	Salzsäure (pH 2,1; 60 sek)	langsam rührend
Brushing-induced effects with and without a non-fluoride abrasive dentifrice on remineralization of enamel surfaces etched with phosphoric acid [Kuroiwa et al., 1994]	k	x			x (1 min)	Phosphorsäure (30%; pH 1,4; 1 min)	

9.1.2 Übersicht über Produkte, Wirkstoff, Abrasivität, Slurry, Putzdruck

Tab. Anhang 2: In der Tabelle aufgelistet sind für die bereits in Tab. 9.1.1 erfassten Studien die Parameter Markt- oder Testprodukte mit Angabe von Wirkstoff und Abrasivität, Mischungsverhältnis der Slurries (Produkt:Lösung) sowie Putzdruck.

	Marktprodukte/ Testprodukte	Wirkstoff	Abrasivität	Slurry (Lösung)	Gewicht / Putzdruck
1% Zitrus.sre					
[Hara et al., 2009]	exp. ZP mit unterschied- lichen RDA/ REA-Werten u. F-Gehalten Crest Cavity Protection	1100 ppm F (NaF)	hoch (~160) mittel (~90) niedrig	1:3 ZP : künstl. Speichel	200 g
[Hara et al., 2008]		NaF	REA 6,5 RDA 106	1:3 F-TP : Lösung zur Proben- aufbewahrung	200 g
[Attin et al., 2007]	Elmex	1250 ppm F (AmF)	RDA 38	1:3 ZP : künstl. Speichel	300 g
[Lagerweij et al., 2006]	Elmex Placebo-ZP Elmex gelee	1250 ppm F (AmF) F-frei 12500 ppm F (AmF)		1:3 ZP : künstl. Speichel	250 g
[Wiegand et al., 2006a]	Elmex	1250 ppm F (AmF)	RDA 77	1:3 ZP : künstl. Speichel	250 g
[Betke et al., 2003]	Elmex exp. ZP (2 Stk.) exp. Gel Elmex gelee	ZP: 1250 ppm F Gel: 12500 ppm F	RDA 77 129 125 7 21	1:5 ZP/Gel : künstl. Speichel	270 g
0,5% Zitrus.sre					
[Ganss et al., 2012]		NaF (3 Stk.) NaF/SnCl ₂ AmF/SnF ₂ AmF/NaF/SnCl ₂ +/- Chitosan SnF ₂ -Gel Placebo		1:3 TP/Gel : Remin	200 g

0,3% Zittr.sre					
[Hara et al., 2013]	exp. ZP (2 Stk.)	1100 ppm F (NaF) 1100 ppm F (NaF) + 3500 ppm Sn (SnCl ₂)		1:3 ZP : deionisiertes Wasser pH 4,5	150 g
[Ranjitkar et al., 2009]	ToothMouse Gr.1 mit CPP- ACP Gr.2 ohne CPP-ACP	CPP-ACP		1:3 F-freie ZP : künstl. Speichel	200g
[Gregg et al., 2004]					
[Eisenburger et al., 2003]				2,5% silica in Suspension in Aqua dest. (pH 7,0) oder in 0,3%iger Säure	200 g
pH 3,6 Zittr.sre					
[Lussi et al., 2012]				deionisiertes Wasser	
[Voronets und Lussi, 2010]	Sensodyne Pro Schmelz	1450 ppm F (NaF)	RDA 30-40	1:3 ZP : Mineralsalz- lösung oder künstl. Speichel (mit Mucin)	150 g
[Lussi et al., 2004]	Elmex MSL experiment. MSL Elmex ZP	100 ppm F (Olaflur) + 150 ppm F (NaF) 250 ppm F (Dectaflur) 1250 ppm F (AmF)	 RDA 77	 800 mg ZP intraoral	
[Jaeggi und Lussi, 1999]	Elmex	F	REA 4,5 RDA 77	durch Speichel	
[Bartlett et al., 1994]	F- freie und F- haltige ZP	ohne Wirkstoff 1236 ppm F (0,94% NaMFP)	RDA 62		20 g

Zitr.sre anderer/ unbekannter Konz./ pH					
[Moretto et al., 2013]	exper. Lacke: Placebo Positivktr. ohne TMP mit 5% TMP	ohne Wirkstoff 5% NaF 2,5% NaF 2,5% NaF + 5% TMP		Placebo-ZP	
[Ganss et al., 2011]	8 NaF-ZP 4 Anti-Erosion 2 Sn-ZP Sn-MSL Placebo-ZP		RDA: Hersteller: 30 - 150 bestimmt: 60 - 119	1:3 ZP/Gel : Remin MSL unverdünnt	
[Esteves-Oliveira et al., 2011]	Elmex gelee	F (AmF / NaF)	REA 4,2 +/- 0,3	0,3 g ZP	
[Yu et al., 2009]	verschiedene Füllungs- materialien	NaF		1:3 ZP : künstl. Speichel	250 g
[Sobral et al., 2009]	APF (acidulated phosphate fluoride)	1,23% NaF		1:10 ZP : deionisiertes Wasser (Colgate, 1500 ppm F)	200 g
[Ganss et al., 2007a]	Elmex Placebo-ZP Meridol MSL Elmex gelee	1250 ppm F (AmF) F-frei 250 ppm F (AmF/SnF ₂) 12500 ppm F (AmF/NaF)			200 g
[Vieira et al., 2006a]	exp. Lacke	4% TiF ₄ 1% AmF 0,1% Difluoro- silane	RDA 51 (Sensodyne für Slurry)	1:5 ZP : künstl. Speichel (Sensodyne, 1450 ppm F)	150 g
[Vieira et al., 2006b]				1:5 ZP : künstl. Speichel (Sensodyne, 1450 ppm F)	150 g

Limonaden					
[Levy et al., 2013]	exper. Lacke und Lösungen	2,45% F (NaF) 2,45% F (TiF ₄) F-frei		1:3 F-freie ZP : Wasser	150 g
[Passos et al., 2013]	Colgate Total 12 Clean Mint	1450 ppm F (NaF)		1:3 ZP : künstl. Speichel	200 g
[Moron et al., 2013]	exp. Flüssige ZP mit pH 4,5 und 7 handelsübliche ZP mit pH 7	0, 550, 1100 oder 5000 ppm F (NaF) 550, 1100, 5000 ppm F (NaF)	RD 47 - 72 77/100		150 g
[Comar et al., 2012]	Placebo-ZP exp. ZP (6 Stk.) Crest	ohne Wirkstoff 1450 ppm F (NaF; TiF ₄ ; SnF ₂ ; SnF ₂ +NaF; TiF ₄ +NaF SnF ₂ +NaF) NaF (1500ppm)		1:3 TP : deionisiertes Wasser	150 g
[Levy et al., 2012]	exp. Lacke (2 Stk.) Duraphatlack Placebo-ZP exp. MSL (2 Stk.)	TiF ₄ (2,45% F-) NaF (2,45% F-) NaF (2,26% F-) F-frei NaF (2,26% F-) TiF ₄ (2,45% F-)		1:3 F-freie ZP : Wasser 25 °C	150 g
[Rochel et al., 2011]	exp. Produkte	10% Xylitol 10% Xylitol + 1030 ppm F (NaF) 1030 ppm F (NaF) F-frei		1:3 ZP : Wasser 25 °C	150 g
[Rios et al., 2011]	Crest	1100 ppm F (NaF)		1:3 ZP : Wasser	
[Moretto et al., 2010]	exp. ZP	5000 ppm F 1100 ppm F 500 ppm F + 3% TMP (Trimeta- phosphate) F-frei		1:3 ZP : Wasser	30 g
[Wiegand et al., 2010]	exp. Produkte	1,55% TiF ₄ 2,09% ZrF ₄ 3,18% HfF ₄ 13,43% AmF		Puder mit Aqua dest.	120 g

[Rios et al., 2008b]	Duraphat ZP Crest exp. ZP	5000 ppm F 1100 ppm F F-frei	RDA 77 100 ~ 77	1:3 ZP : deionisiertes Wasser	
[Rios et al., 2008a]	Crest	1100 ppm F (NaF)		0,3 g ZP	
[Wiegand et al., 2008b]	Elmex	1250 ppm F (AmF)	RDA 77	2:1 ZP : künstl. Speichel	200 g
[Magalhaes et al., 2008]	exp. ZP mit ohne F	F ohne Wirkstoff			
[Magalhaes et al., 2007]	Crest Placebo-ZP	1098 ppm F F-frei			
[Vieira et al., 2007]	Fluoridlack Fluor Protector	0,1% F (Difluorosilane)		1:5 ZP : künstl. Speichel (Sensodyne, 1450 ppm F)	
[Sales-Peres et al., 2007]	Crest MSL	1030 ppm F (NaF) Eisensulfatlg.		0,3 g ZP intraoral	
[Rios et al., 2006a]	Crest F-frei	F-frei		0,3 g ZP extraoral	
[Rios et al., 2006b]	Crest	1100 ppm F (NaF)		0,3 g ZP extraoral	
[Turssi et al., 2005]	Colgate (4Stk): regular baking soda tartar control whitening	1100 - 1500 ppm F (NaF)	RDA: 68 53 165 124	1:2 ZP: Aqua dest	
[Turssi et al., 2004]	Aquafresh Whitening Aquafresh Fluoride Protection	1500 ppm F (NaF) 1500 ppm F (NaMFP)		1:3 ZP : Aqua dest	
[Attin et al., 2001]	Elmex	1,23% F (AmF)	REA 4,2 RDA 77		
[Attin et al., 2000]	Sensodyne classic		RDA 50,8	1:5 ZP : künstl. Speichel	400 g

[Attin et al., 1999]	exp. Gele (3 Stk.) Elmex gelee	F-frei (2 Stk.) 12500 ppm F 12500 ppm F		1:5 Gel : künstl. Speichel	250 g
[Attin et al., 1997]	Placebo-ZP	F-frei	REA 4,2	1:5 ZP : künstl. Speichel	275 g
Säfte					
[Wegehaupt et al., 2011]	Elmex	1400 ppm F (AmF)		1:3 ZP : künstl. Speichel	250 g
[Rodriguez und Bartlett, 2010]	Placebo	F-frei		1:3 ZP : künstl. Speichel	
[Zero et al., 2006]	Placebo Kontroll-ZP Standard-ZP Test-ZP	ohne Wirkstoff 250 ppm F 1100 ppm F 1150 ppm F + 5% KNO ₃		ZP-Speichel- Slurry durch intraorales Bürsten der Zähne, nicht der Proben	keiner
[Hemingway et al., 2006]	Placebo-ZP	F-frei		1:3 ZP : Leitungswasser	200 g
[Hooper et al., 2003]	exp. ZP (2 Stk.)	F	RDA 189 RDA 85		
[Amaechi et al., 2003]					
[Kelly und Smith, 1988]	Placebo-ZP	F-frei	82		
[Davis und Winter, 1980]	CaCO ₃ -ZP	CaCO ₃		2:1 ZP : Aqua dest	200 g
[Schweizer-Hirt et al., 1978]	Colgate Dentagard Mentadent Parodontax Sensodyne Settima Pepsodent exp. Paste			3 g ZP	

Salz-/ Phosphorsäure					
[Esteves-Oliveira et al., 2012]					200 g
[Austin et al., 2011]	exp. Produkt exp. Produkt Bifluorid 10 deion. Wasser	9500 ppm F (NaF) 9500 ppm F (SnF ₂) 45200 ppm F (NaF 5%, CaF ₂ 5%)		1:3 F-freie ZP : künstl. Speichel	200 g
[Wiegand et al., 2008d]	exp. Slurries		REA 2 6 9	Speichelersatz- mittel mit ZP und Kalzium- pyrophosphat (zum Anpassen des REA)	250 g
[Wiegand et al., 2007b]	Elmex Aqua dest Ultraschall	0,125% AmF ohne Wirkstoff ohne Wirkstoff	RDA 77	1:3 ZP : künstl. Speichel	250 g
[Kuroiwa et al., 1994]	Placebo-ZP	F-frei		Leitungswasser oder F-freie ZP	

9.1.3 Übersicht über Probenlagerung, Messmethode und Referenzfläche

Tab. Anhang 3: In der Tabelle aufgelistet sind für die bereits in Tab. 9.1.1 und Tab. 9.1.2 erfassten Studien die Parameter Probenlagerung (mit Angaben zu Temperatur, Bewegung, Dauer o.ä.), Messmethoden und dazu notwendige Referenzflächen.

	Proben- lagerung	Messmethode(n)	Referenzfläche
1% Zitrus			
[Hara et al., 2009]	künstl. Speichel (mit Muzin und Puffer), 60 min, 100 U/min, Raumtemperatur	optische Profilometrie	mit PVC-Band abgedeckt, Fenster freigelassen
[Hara et al., 2008]	je Lösung 30 min bei 100 U/min: - Deionisiertes Wasser - künstl. Speichel - künstl. Speichel mit Muzin - gepoolter stimulierter Speichel	optische Profilometrie	mit PVC-Band abgedeckt, Fenster freigelassen
[Attin et al., 2007]	künstl. Speichel	Profilometrie	mit Tesa-Band abgedeckt, Fenster freigelassen
[Lagerweij et al., 2006]	künstl. Speichel (nach Klimek)	mechanische Profilometrie (nach 7 und 14 d)	mit Tesa-Band abgedeckt, Fenster freigelassen
[Wiegand et al., 2006a]	künstl. Speichel (nach Klimek) 15 min bzw. 8 h	mechanische Profilometrie	mit Tesa-Band abgedeckt, Fenster freigelassen
[Betke et al., 2003]	künstlicher Speichel (nach Klimek) 1 min; über Nacht in gepooltem Speichel	optische Profilometrie	mit Klebestreifen abgedeckt, Streifen freigelassen

0,5% Zittr.sre			
[Ganss et al., 2012]	Remin; 25°C; 35 Bewegungen/min; pH 6,7	- EDX von ZP-Überstand (Sn auf Abrasiva) - optische Profilometrie - EDX von 5 Proben pro Gruppe nach Versuch	zur Hälfte mit lichthärtendem Kunststoff abgedeckt
0,3% Zittr.sre			
[Hara et al., 2013]	5 Sorten künstl. Speichel (pH 7), Mischspeichel; 150 U/min	optische Profilometrie	mit PVC-Band abgedeckt, Fenster freigelassen
[Ranjitkar et al., 2009]	2h zwischen Behandlungen in künstl. Speichel	- optische Profilometrie - Impressionen vor und nach Versuch	rostfreier Stahlring
[Gregg et al., 2004]		mechanische Profilometrie	mit Klebeband abgedeckte Fläche
[Eisenburger et al., 2003]		mechanische Profilometrie	mit PVC-Band abgedeckt, Fenster freigelassen
pH 3,6 Zittr.sre			
[Lussi et al., 2012]	gepoolter stimulierter Speichel bzw. Remin	spektral aufgelöstes Reflektometer (Reflektionsintensität 400 - 800 nm)	
[Voronets und Lussi, 2010]	Remin	- Oberflächenhärte - Länge der Indentationen	Indentationen vor und nach Erosion vermessen
[Lussi et al., 2004]		- Oberflächenhärte - Messen der Indentation	Indentation vor Versuch gemessen
[Jaeggi und Lussi, 1999]	0, 30 oder 60 min intraoral	- Sekretionsrate, Pufferkapazität und pH des Speichels - Oberflächenhärte	Indentationen vermessen und berechnet
[Bartlett et al., 1994]		digitales bildgebendes System (Seescan)	Baseline-Scan

Zitr.sre anderer/ unbekannter Konz./ pH			
[Moretto et al., 2013]	intraoral	- Profilometrie - Härtebestimmung auf der Oberfläche und auf Querschnitten	zur Hälfte mit Nagellack abgedeckt
[Ganss et al., 2011]	Remin; 25°C; 35 Bewegungen/min	- Profilometrie - RDA - Fluoridanalyse	zur Hälfte mit lichthärtendem Kunststoff abgedeckt
[Esteves- Oliveira et al., 2011]	übersättigte Remin, 4 h	- mechanische Profilometrie - REM	mit Lack abgedeckt, mittiger Streifen frei
[Yu et al., 2009]	künstl. Speichel	- mechanische Profilometrie - REM	Keramikform
[Sobral et al., 2009]		- Oberflächenhärte - Länge der Indentationen	Indentationen
[Ganss et al., 2007a]	intraoral	mechanische Profilometrie	zur Hälfte mit lichthärtendem Kunststoff abgedeckt
[Vieira et al., 2006a]	2 h künstl. Speichel (mit Muzin, Xylitol) kommerziell erwerblich	- optische Profilometrie (Volumenverlust) - REM von Querschnitten	mit PVC-Band abgedeckt, Fenster freigelassen
[Vieira et al., 2006b]	2 h künstl. Speichel (mit Muzin, Xylitol) kommerziell erwerblich	optische Profilometrie (Volumenverlust)	mit PVC-Band abgedeckt, Fenster freigelassen
Limonaden			
[Levy et al., 2013]	intraoral	mechanische Profilometrie	mit Nagellack abgedeckt, Fenster freigelassen
[Passos et al., 2013]	Remin mit Schweinemuzin 60 min (100 U/min) und über Nacht, 37°C	- mechanische Profilometrie - Oberflächenhärte - Fokus Variation 3D Mikroskopie	zur Hälfte mit Nagellack abgedeckt

[Moron et al., 2013]	zwischen den Behandlungen 2h sowie über Nacht künstl. Speichel (mit Glukose, Ascorbinsäure, Urea, pH 6,8, 25°C, statisch)	mechanische Profilometrie	2/3 mit Nagellack abgedeckt
[Comar et al., 2012]	zwischen den Behandlungen 2h sowie über Nacht künstl. Speichel (mit Glukose, Ascorbinsäure, Urea, pH 6,8, 25°C, statisch)	mechanische Profilometrie	2/3 mit Nagellack abgedeckt
[Levy et al., 2012]	künstl. Speichel mit Glukose, Ascorbinsäure, Urea, pH 6,8; statisch, 25 °C; 2 h und nachts	mechanische Profilometrie	2/3 mit Nagellack abgedeckt
[Rochel et al., 2011]	künstl. Speichel mit Glukose, Ascorbinsäure, Urea, pH 6,8; statisch, 25 °C; 2 h und nachts	mechanische Profilometrie	2/3 mit Nagellack abgedeckt
[Rios et al., 2011]	intraoral	Profilometrie	zur Hälfte mit Nagellack abgedeckt
[Moretto et al., 2010]	künstl. Speichel mit Trispuffer, 0,03 ppm F, pH 7, Raumtemperatur, statisch	- Profilometrie - Oberflächenhärte	zur Hälfte mit Nagellack abgedeckt
[Wiegand et al., 2010]	intraoral	mechanische Profilometrie	Keramikform
[Rios et al., 2008b]	intraoral	mechanische Profilometrie Mikrohärte	zur Hälfte mit Nagellack abgedeckt
[Rios et al., 2008a]	intraoral (stimulierter oder unstimulierter Speichel)	REM	mit Nagellack abgedeckte Probenhälfte
[Wiegand et al., 2008b]	intraoral	mechanische Profilometrie	Keramikring

[Magalhaes et al., 2008]	intraoral	- Profilometrie - Mikrohärtete - F-Analyse	zur Hälfte mit Nagellack abgedeckt
[Magalhaes et al., 2007]	intraoral	- Profilometrie (zur Bestimmung der Rauheit) - Oberflächenhärtete	zur Hälfte mit Nagellack abgedeckt
[Vieira et al., 2007]	intraoral; über Nacht und am Wochenende in Speichel bei Raumtemp.	optische Profilometrie (Tag 5, 10, 15)	umgebender Kunststoff
[Sales-Peres et al., 2007]	intraoral	- Mikrohärtete - Profilometrie	zur Hälfte mit Nagellack abgedeckt
[Rios et al., 2006a]	intraoral	- Profilometrie - Oberflächenhärtete	zur Hälfte mit Nagellack abgedeckt
[Rios et al., 2006b]	intraoral	- Profilometrie - Oberflächenhärtete	zur Hälfte mit Nagellack abgedeckt
[Turssi et al., 2005]		Profilometrie	mit Klebeband abgedeckt, Fenster freigelassen
[Turssi et al., 2004]	intraoral	mechanische Profilometrie	mit Wachs abgedeckte Fläche, mittig 1 mm breiter Streifen frei
[Attin et al., 2001]	intraoral (während Mahlzeiten und Mundhygiene in künstl. Speichel)	optische Profilometrie	Amalgamfüllungen beidseits der Versuchsfläche
[Attin et al., 2000]	künstl. Speichel (nach Klimek)	optische Profilometrie	mit Tesa-Band abgedeckt
[Attin et al., 1999]	künstl. Speichel 1 min bzw 8 h	Profilometrie	mit Tesa-Band abgedeckt, Fenster freigelassen

[Attin et al., 1997]		- Oberflächenhärte - mechanische Profilometrie - REM - transversale Mikroradiographie	mit Tesa-Band abgedeckt, Fenster freigelassen
Säfte			
[Wegehaupt et al., 2011]		- mechanische Profilometrie (Baseline, 20, 40 Zyklen) - Bestimmung der Ionenkonzentration und Kalkulation des Sättigungsgrades	zwei Einkerbungen als Referenzpunkte vor und nach Versuch
[Rodriguez und Bartlett, 2010]	künstl. Speichel mit HEPES-Puffer, pH 7	optische Profilometrie	Silikonabformung vor und nach Versuch
[Zero et al., 2006]	5 min vor und 4 h nach Slurrybehandlung intraoral	Oberflächenhärte	Referenz-indentationen
[Hemingway et al., 2006]	30 min Lufttrocknung zwischen Abrasion und nächster Erosion	optisches Profilometer	mit PVC-Band abgedeckt, Fenster freigelassen
[Hooper et al., 2003]	tagsüber intraoral	Profilometrie	mit Tesa-Band abgedeckt
[Amaechi et al., 2003]	introral	transversale Mikroradiographie	mit Nagellack abgedeckt, Fenster freigelassen
[Kelly und Smith, 1988]	- Speichel - Kalziumlösung - MSL (0,05% NaF) - deionisiertes Wasser	Messmikroskop	Probe mittig in rostfreie Stahlunterlegscheibe eingeklebt
[Davis und Winter, 1980]		Profilometrie	mit PVC-Band abgedeckt, Fenster freigelassen
[Schweizer-Hirt et al., 1978]		- Oberflächenhärte - REM von Modellen	für Ero zur Hälfte mit Xantopren Blau abgedeckt, dann Indentationen, Modelle für REM, Abr über ganze Fläche, Goldbed.

Salz-/ Phosphorsäure			
[Esteves-Oliveira et al., 2012]		- REM - Kalzium- und Phosphatkontrolle	
[Austin et al., 2011]	künstl. Speichel mit Puffer	- Mikrohärtigkeit (Baseline, 3, 6, 9 Zyklen) - EDX und REM (vor und nach Versuch)	mit PVC-Band abgedeckt, mittleres Drittel frei
[Wiegand et al., 2008d]	künstl. Speichel 3 h bzw. 15 h über Nacht	mechanische Profilometrie	Keramikform
[Wiegand et al., 2007b]		- Oberflächenhärtigkeit - Ausmaß der Indentationen vor und nach mechanischer Einwirkung	Länge der Indentation vor mechanischer Einwirkung gemessen
[Kuroiwa et al., 1994]	intraoral	REM (nach Kritisch-Punkt-Trocknung)	

9.1.4 Übersicht über Substanzverluste, Zyklus, Gesamterosion sowie Gesamtabrasion

Tab. Anhang 4: In der Tabelle aufgelistet sind für die bereits in Tab. 9.1.1 – Tab. 9.1.3 erfassten Studien die Parameter Substanzverluste von soweit vorhandenen Kontrollgruppen und untersuchten Gruppen, Zyklus, Gesamterosionszeit sowie Gesamtabrasion (als Anzahl der Bürststriche (BS) oder Gesamtdauer der abrasiven Ereignisse).

	Substanzverluste		Zyklus	Gesamterosionszeit (min)	Gesamtabrasion (Bürststriche oder Zeit)
	Kontrollgr.	untersuchte Gruppen			
1% Zitrus					
[Hara et al., 2009]	Schmelz: Wasser 0,3 µm Referenz-ZP 1,5 µm	mit F 0,75 - 1,5 µm ohne F 1,2 - 2,5 µm	3 d, 3/d: - Erosion (2 min) - Abrasion (150 bzw. 500 BS) - Remin (1 h)	18	1350 - 4500
[Hara et al., 2008]	F-frei: Schmelz 5,42 - 7,36 µm Dentin 16,38 - 18,01 µm ohne Bürsten: Schmelz 0,56 - 1,58 µm Dentin 4,74 - 6,96 µm	nach 3 d Schmelz: 2,08 - 3,29 µm Dentin: 12,67 - 15,83 µm	3 d, 3/d: - Erosion (5 min) - Remin (30 min) - Abrasion (150 bzw. 500 BS) - nach jedem Tag messen	45	1350 - 4500
[Attin et al., 2007]	human Erosion: 2 µm Abrasion: 0,5 µm Ero+ Abr: 5 µm		20 d: - Erosion (1 min) - Remin (15 min) - Abrasion (100 BS)	20	2000
[Lagerweij et al., 2006]			14 d: - Erosion (6/d, 30 sek) - Abrasion (2/d, 15 sek) - F-Gel (2/d bzw 8/d, 2 min)	42	1680 (7 min)

[Wiegand et al., 2006a]	4,97 µm	ca. 5,4 - 11,4 µm	5 d, 1/d: - Erosion (5 min) - Remin (15 min) - Abrasion (10 min, 20 bzw. 80 BS/min) - Lagerung (8 h)	25	1000 - 4000 (50 min)
[Betke et al., 2003]	Elmex gelee 0,83 µm	ZP 6,76 - 8,28 µm gel 4,19 µm	3 d, 1/d: - Erosion (5 min) - Remin (1 min) - Abrasion (2000 BS) - Lagerung (8 h)	15	6000
0,5% Zitrs.e					
[Ganss et al., 2012]	Erosion 14,4 µm Placebo 20,2 µm Positivktr 4,6 µm	12,4 - 16,5 µm (F-ZP +/- Sn) 6,6 µm (ZP mit Chitosan)	10 d: - Erosion 6/d (2 min) - Abrasion 2/d (15 sek) - Remin (1 h)	120	5 min
0,3% Zitrs.e					
[Hara et al., 2013]		Schmelz: ZP: 9,6 - 14,6 µm ZP+Sn: 1,6 - 4,3 µm Dentin: ZP: 6,0 - 12,5 µm ZP+Sn: 4,7 - 8,5 µm	5 d: - Erosion (4/d, 5 min) - Remin - Abrasion (2/d, 15 sek)	100	450 (2:30 min)
[Ranjitkar et al., 2009]	Schmelz 3,48 µm Dentin 10,29 µm	Schmelz mit/ohne CPP-ACP 1,26 µm / 2,41 µm Dentin mit/ohne CPP-ACP 2,16 µm / 5,75 µm	10 Zyklen: - ZP-Behandlung (auftragen, verdünnen, abspülen; 7 min) - Erosion (10 min) - Abrasion (200 BS) - Remin (2 h)	100	2000

[Gregg et al., 2004]	Ero + Wasser: Schmelz: 36,33 µm Dentin: 23,99 µm	Ero + Zunge: Schmelz: 42,34 µm Dentin: 26,04 µm Ero + US: Schmelz: 41,58 µm Dentin: 26,37 µm	15 Zyklen: - Erosion (10 min) - Wasser (1 min) oder US (30 sek) oder lecken (1 min)	150	15 min
[Eisenburger et al., 2003]	Erosion (und Lagerung in Saline): 40 min: 7,9 µm 80 min: 16,0 µm		2 x 4 Zyklen: - Erosion (10 min) - Abrasion (12 bzw. 500 BS) - oder Abrasion während Erosion (1000 BS)	40-80	48 - 4000
pH 3,6 Zitr.sre					
[Lussi et al., 2012]				0:30 - 15	20
[Voronets und Lussi, 2010]	Abrasion 0,028 µm	Zitr.sre + Slurry 0,339 µm Zitr.sre + art.sal. 0,016 µm Saft + Slurry 0,268 µm Saft + art.sal. 0,014 µm		3	
[Lussi et al., 2004]	keine Ero, keine MSL: 0,03 µm Ero, keine MSL: 0,25 µm	Ero, Elmex MSL: 0,20 µm Elmex MSL, Ero: 0,28 µm Ero, exper. MSL: 0,27 µm		3	0:30 min
[Jaeggi und Lussi, 1999]		0,195 - 0,258 µm		3	0:30 min
[Bartlett et al., 1994]	F-frei: 3,21 mm ²	F-ZP: 1,89 mm ²	720 Zyklen: - Erosion (5 min) - Abrasion (200 BS)	3600	144000

Zitr.sre anderer/ unbekannter Konz./ pH					
[Moretto et al., 2013]	Ero / Ero+Abr: Placebo: 3,42 / 4,14 µm Positiv: 1,97 / 2,94 µm	Ero / Ero+Abr: 2,5% NaF: 2,36 / 3,39 µm 2,5% NaF + TMP: 1,2 / 2,68 µm	Vorbehandlung; 5 d, 4/d: - Erosion (5 min) - Slurry (15 sek) oder Abrasion (15 sek)	100	5 min
[Ganss et al., 2011]	Neg Ero: 37,1 / 19,3 Neg Ero+Abr: - / 24,9 Pos Ero: 8,2 µm Pos Ero+Abr: 9,5 µm	17,2 - 32,7 µm (F-ZP) 15,7 - 34,2 µm (Antierosion) 6,3 - 19,2 µm (Sn)	10 d: - Erosion 6/d (2 min) - Abrasion 2/d (15 sek) - Remin (1 h)	120	5 min
[Esteves-Oliveira et al., 2011]	5,1 µm	2,3 - 5,2 µm (Laser +/- F)	25 d; 2/d - Erosion (90 sek) - Abrasion (5 sek) - Remin (4 h)	01:30	4:10 min
[Yu et al., 2009]	Kontrolle 0,21 µm Ero 16,62 µm Abr 0,61 µm Ero+Abr 32,74 µm		10 d, 6/d: - Erosion (1 min) - Abrasion (100 BS) - Remin (30 min)	60	6000
[Sobral et al., 2009]				30-90	5000
[Ganss et al., 2007a]	Erosion: 45,2 µm F-frei: 79,3 µm 2 h Wartezeit: 81,7 µm Abr vor Ero: 69,7	F: 51,5 µm F+: 41,2 µm	5 d, 2/d: - Erosion (20 min) - Abrasion (30 sek)	200	5 min
[Vieira et al., 2006a]	Erosion: 4,4 µm Abrasion: - Ero+Abr: 6,81 µm	Ero+Abr: 4,14 - 6,94 µm	3 Zyklen: - Erosion (10 min) und/oder - Abrasion (1 min, 200 BS) - Remin (2 h)	30	600 (3 min)

[Vieira et al., 2006b]	Abrasion: 0 µm Zunge: 0 µm Attrition: 2 µm	Erosion: 4,4 µm Ero+Abr: 6,8 µm Ero+Zunge: 9,0 µm Ero+Attrition: 15,4 µm	3 Zyklen: - Erosion (10 min) und/oder - Abrasion, Zunge oder Attrition (1 min) - Remin (2 h)	30	3 min
Limonaden					
[Levy et al., 2013]	Lack / Lösung: Erosion: 1,8 / 1,8 µm Ero+Abr: 2,1 / 2,2 µm	Lack / Lösung: Erosion: NaF: 1,1 / 1,3 µm TiF ₄ : 1,2 / 1,2 µm Ero+Abr: NaF: 1,5 / 1,6 µm TiF ₄ : 1,2 / 1,5 µm	Vorbehandlung; 5 d, 4/d: - Erosion (90 sek) - Abrasion (10 sek)	30	3:20 min
[Passos et al., 2013]	Profilometer 0,78 / 1,22 µm	FVM (3D) 2,53 / 4,44 µm	5 d; 3/d: - Erosion (1 min) - Abrasion (150 BS) - Remin (1 h)	15	2250
[Moron et al., 2013]	Placebo: pH 4,5 / 7,0 Schmelz: 9,6 / 9,8 µm Dentin: 5,6 / 5,3 µm	Schmelz pH 4,5 / 7 / gekauft 550 ppm: 5,6 / 6,4 / 9,3 µm 1100 ppm: 5,5 / 5,5 / 8,8 µm 5000 ppm: 5,5 / 5,7 / 9,8 µm	7 d: - Erosion (4/d, 90 sek) - Abrasion (2/d, 15 sek)	42	3:30 min
[Comar et al., 2012]	Schmelz/Dentin: Placebo: 5,0 / 10,8 µm ohne ZP: 4,1 / 7,7 µm only erosion: 3,1 / 9,7 µm	Schmelz/Dentin: NaF: 2,9 / 5,6 µm TiF ₄ : 2,3 / 2,9 µm SnF ₂ : 2,8 / 3,9 µm SnF ₂ +NaF: 1,7 / 2,3 µm TiF ₄ +NaF: 1,5 / 3,2 µm Pro Health: 2,9 / 4,6 µm Crest: 4,1 / 7,1 µm	7 d: - Erosion (4/d, 90 sek) - Abrasion (2/d, 15 sek)	42	3:30 min
[Levy et al., 2012]	Placebo 3,2 µm Kontrolle 3,01 µm	F-Lacke 0,53 - 1,74 µm F-Lösungen 2,4 - 4,1 µm	5 d: - Erosion 4/d (90 sek) - Abrasion 2/d (10 sek) - Remin (2 h)	30	1:40 min

[Rochel et al., 2011]	Placebo Ero 5,1 μm Ero+Abr 7,3 μm	Ero 3,1 - 4,9 μm Ero+Abr 3,9 - 4,9 μm (Xylitol +/- F)	7 d: - Erosion 4/d (2 min) - Arasion 2/d (15 sek) - Remin (2 h)	56	3:30 min
[Rios et al., 2011]	Cola Ero: 0,72 μm Light Ero: 0,36 μm	Cola Ero+Abr: 0,95 μm Light Ero+Abr: 0,39 μm	7 d; 4/d: - Erosion (5 min) - Abrasion (30 sek) - intraoral (4 h)	140	14 min
[Moretto et al., 2010]	Placebo: Erosion 3,36 μm Ero+Abr 4,63 μm	Erosion 1,29 - 2,46 μm Ero+Abr 2,18 - 3,43 μm	7 d, 4/d: - Erosion (5 min) - Remin (2 h) - Abrasion (15 sek)	140	7 min 1120 Rotationen
[Wiegand et al., 2010]	Schmelz unfluoridiert Erosion 0,8-1,0 μm Ero+Abr 1,2-1,3 μm	Schmelz Erosion / Ero+Abr TiF ₄ 0,5 / 0,8 μm ZrF ₄ 0,5 / 0,8 μm HfF ₄ 0,5 / 1,0 μm AmF 0,4 / 0,9 μm	3 d: - Vorbehandlung (2 h intraoral, 1 min F, 2 h intraoral) - Erosion (4/d, 90 sek) - bzw Erosion (2/d, 90 sek) + Abrasion (2/d, 30 sek) - 3 h intraoral	9-18	3 min
[Rios et al., 2008b]	F-frei: Ero: 4,25 μm Abr: 5,09 μm	1100 / 5000 ppm F Ero: 3,70 / 3,45 μm Abr: 4,40 / 4,26 μm	je 7 d 4/d: - Erosion (1 min) - Abrasion (30 sek)	28	14 min
[Rios et al., 2008a]			je 7 d 4/d: - Erosion (5 min) - Abrasion (30 BS)	140	
[Wiegand et al., 2008b]	vor: Schmelz 2,3 Dentin 4,1 μm nach: Schmelz 6,4 μm Dentin 15,3 μm		14 d, 3/d: - Abrasion (20 sek) - Remin (5 min) - Erosion (40 sek) (bzw Erosion, Remin, Abrasion)	28	672 (14 min)
[Magalhaes et al., 2008]	3,63 μm	3,54 μm	je 7 d Erosion 4/d	140	

[Magalhaes et al., 2007]	n.a.	n.a.	7 d, 4/d: - Erosion (5 min) - Abrasion (30 BS)	140	840
[Vieira et al., 2007]	Ero: 5,53 µm Ero+Abr: 5,7 µm	Ero: 0,79 µm Ero+Abr: 2,76 µm	15 d: - Erosion (3/d, 5 min) - Abrasion (1/d, 5 sek)	225	1:15 min
[Sales-Peres et al., 2007]	nur Ero: Schmelz: 9,3 µm Dentin: 8,0 µm nur Ero + MSL: Schmelz: 8,6 µm Dentin: 5,1 µm	nach 1 min / 30 min: Schm: 10,7 / 10,3 µm Dentin: 6,8 / 6,1 µm nach 1 min/30 min + MSL: Schm: 7,1 / 6,8 µm Dentin: 5,7 / 3,4 µm	5 d, 4/d: - Erosion (5 min) - MSL (1 min) - Abrasion (10 BS)	100	200
[Rios et al., 2006a]	Erosion: 2,77 µm	Ero+Abr: 3,8 µm	5 d, 4/d: - Erosion (10 min) - Abrasion (30 BS)	200	600
[Rios et al., 2006b]	Ero: 6,4 µm	Abr 0 min: 17,3 µm Abr 60 min: 14,2 µm	7 d, 4/d: - Erosion (5 min) - Abrasion (direkt oder nach 1 h; 30 BS)	140	840
[Turssi et al., 2005]	2,30 µm	regulär: 2,26 µm baking soda: 2,43 µm tartar ctr.: 2,36 µm whitening: 2,49 µm	5 Zyklen: - Erosion (5 min) - Remin (1 min) - Abrasion (5000 BS)	25	25000
[Turssi et al., 2004]	Schmelz/Dentin (gesund) Whitening: 2,14 / 2,69 µm reguläre ZP: 1,31 / 1,85 µm	Schmelz/Dentin (erodiert) Whitening: 2,91 / 4,36 µm reguläre ZP: 2,56 / 3,12 µm	3 d, 2/d: - Erosion (90 sek) - Abrasion (40 BS)	9	240

[Attin et al., 2001]	Erosion: 0,66 µm	4,78 - 6,78 µm	21 d; 2/d: - Erosion (90 sek) - Remin (0 - 60 min) - Abrasion (15 sek) - Remin (> 4 h)	63	10:30 min
[Attin et al., 2000]	Ero+Remin: 0,81 µm Ero: 1,04 µm Abr: 0,22 µm	1,11 - 5,16 µm	10 Zyklen: - Erosion (1 min) - Remin (0, 10, 60, 240 min) - Abrasion (100 BS, 30 sek)	10	1000 (5 min)
[Attin et al., 1999]	Elmex gelee 0,25 µm	0,71 - 1,58 µm	2 d, 2/d: - Erosion (5 min) - Remin (1 min) - Abrasion (2000 BS) - Remin (1 min)	20	8000
[Attin et al., 1997]	Abr: 0,17 µm Ero 15 min: 75 nm	Ero 1 min + Abr: 0,63 µm Ero 5 min + Abr: 1,19 µm Ero 15 min + Abr: 2,22 µm		1-15	8000
Säfte					
[Wegehaupt et al., 2011]	Kontrolle < 0,2 µm	Orangensaft 0,605 µm (20 Zyklen) 1,375 µm (40 Zyklen) alle anderen Gruppen ~ Kontrollgruppe	2 x 20 Zyklen: - Erosion (2 min) - Abrasion (40 BS)	80	1600
[Rodriguez und Bartlett, 2010]	2D: Wasser: 10,0 µm	2D: saure Getränke: 22,4 - 32,5 µm	10 Zyklen: - Remin (2 h) - Erosion (10 min) - Abrasion (200 BS)	100	2000
[Zero et al., 2006]	kein signifikanter Substanzverlust	kein signifikanter Substanzverlust		25	
[Hemingway et al., 2006]			6 Zyklen: - Erosion (10 min) - Abrasion (25 BS)	60	150

[Hooper et al., 2003]	Schmelz/Dentin: Erosion: 0,78 / 13,34 µm Wasser + ZP RDA 189: 0,48 / 50,0 µm Wasser + ZP RDA 85: 0,69 / 42,63 µm	Schmelz/Dentin: Saft + ZP RDA 189: 2,43 / 50,0 µm Saft + ZP RDA 85: 1,57 / 49,96 µm	10 d; 4/d: - Erosion (250 ml in 10 min) - Abrasion (1 min)	400	40 min
[Amaechi et al., 2003]	Ero+ abgedeckt: ca 48 µm	Ero + geschützt: ca 36 µm Ero + ungeschützt: ca 61 µm	Erosion (10 min) 28 d: - Speichel- stimulation (4/d, 20 min) - Mundhygiene (2/d)	10	
[Kelly und Smith, 1988]	Erosion: 200 µm Abrasion: 37 µm Kontrolle: 300 µm	257 - 281 µm	60 Zyklen: - Erosion (5 min) - Remin (2 min, MSL 1 min) - Abrasion (200 BS)	300	12000
[Davis und Winter, 1980]	Schmelz, Abr 5000 BS: 1,36 µm Schmelz, Ero 45 sek: 0,30 µm Dentin Abr 50 BS: 0,10 µm 1000 BS: 1,85 µm	Ero+Abr Schmelz: 20 BS: 0,067 µm 50 BS: 0,09 µm 5000 BS: 0,19 µm Ero+Abr Dentin: 50 BS: 0,4 µm 1000 BS: 2,5 µm		0:45-3	20 - 1000
[Schweizer-Hirt et al., 1978]				5	5 min
Salz-/ Phosphorsäure					
[Esteves- Oliveira et al., 2012]				15	
[Austin et al., 2011]			3 d; 3/d: - Erosion (2 min) - Remin (1 h)	18	1080

[Wiegand et al., 2008d]	REA 2: 0 - 0,2 μm REA 6: 2,1 - 3,3 μm REA 9: 2,9 - 3,7 μm		60 d, 4/d: - Erosion (15 sek) - Abrasion (40 BS) - Remin (3 h)	60	9600
[Wiegand et al., 2007b]	350 BS mit Aqua dest: 437 nm 120 sek US: 235 nm	350 BS mit ZP- Slurry 563 nm		1	120 - 350
[Kuroiwa et al., 1994]			Erosion (1 min) 56 d: Abrasion (1 min)	1	56 min

9.1.5 Übersicht über zusätzliche Informationen und Ergebnisse

Tab. Anhang 5: In der Tabelle aufgelistet sind für die bereits in Tab. 9.1.1 – Tab. 9.1.4 erfassten Studien zusätzliche Informationen (Sonstiges) und Ergebnisse.

	Sonstiges	Ergebnis
1% Zitrus		
[Hara et al., 2009]	RDA / REA wurden bestimmt	Schmelz: fluoridhaltige Zahnpasten (bei gleichem REA-Wert) geringere Substanzverluste als fluoridfreie ZP, je höher REA-Wert, desto höher Substanzverluste Bei Schmelz zeigt Fluorid einen höheren Einfluss, bei Dentin ist die Abrasivität ausschlaggebend
[Hara et al., 2008]	Zusatzversuche: Test 1 ohne Abr; Test 2 F-freie ZP	Schmelz: Substanzverlust für künstl. Speichel signifikant geringer, als für künstl. Speichel mit Muzin oder humanen Speichel (kein Unterschied), deionisiertes Wasser höchste Substanzverluste Test 1: ohne Bürsten geringere Substanzverluste Test 2: bei Schmelz fluoridfreie Suspension höhere Verluste als mit Fluorid, bei Dentin kaum Unterschiede
[Attin et al., 2007]	3 Gruppen: nur Ero nur Abr Ero+Abr	Schmelzproben aus Milchzähnen, Weisheitszähnen, Kälber- und Rinderzähnen nur Abr kein Unterschied; kein Unterschied zwischen Milch- und Weisheitszähnen für Ero und Ero+Abr; kein Unterschied zwischen Kälber- und Rinderzähnen bei Ero, mit Abr bei Kälberzähnen höhere Substanzverluste humane Proben weniger Substanzverluste als bovine Proben
[Lagerweij et al., 2006]		F-ZP vermindert Substanzverlust um 8%, mit F-Gel 8/d ist der Verlust bis zu 63% geringer es zeigt sich ein dosisabhängiges Verhältnis für Fluorid und Substanzverluste sowohl für Ero als auch für Ero+Abr
[Wiegand et al., 2006a]	vor Versuchsbeginn 24 h Lagerung in künstl. Speichel	bei 20 oder 80 BS/min ausgeschaltet sind die Substanzverluste für alle Zahnbürsten (Hand, Sonic, Power) nicht signifikant unterschiedlich zur Kontrolle manuell bei 100 BS/min signifikant höher, ebenso bei zwei sonic- und der power- Zahnbürste eingeschaltet bei 20 BS/min (nicht bei Ultrasonic)
[Bette et al., 2003]	Formulierungen auf Basis Elmex (ZP bzw. Gelee) unterschiedliche Pufferkapazität; vor dem Versuch Pellikelbildung durch gepoolten Speichel (zentrifugiert)	bei den ZP macht die Pufferkapazität keinen signifikanten Unterschied im Substanzverlust aus bei ansonsten gleicher Formulierung bei den fluoridhaltigen Gelen ist ein signifikant geringerer Substanzverlust bei dem Gel mit hoher Pufferkapazität festzustellen im Vergleich mit dem Gel mit geringer PK

0,5% Zittr.sre		
[Ganss et al., 2012]	pH + Fluoridanalyse an Lösung 1:3 (ZP : bidest. Wasser) (dreifache Analyse, Überstand nach Zentrifuge 1:1 mit TISAB II) Sn-Analyse außer Haus	Sn-Gel (Positivkontrolle) am besten, dann Chitosan- Produkt alle Produkte reduzierten Substanzverlust (außer: saure NaF-ZP sowie Placebo) Sn-haltige ZP ließen 1-3 Gew.% Zinn auf der Probenoberfläche
0,3% Zittr.sre		
[Hara et al., 2013]	Dentinproben wurden vor dem Messen 5 min getrocknet	ZP mit Sn verursachte signifikant niedrigere Substanzverluste Humaner Speichel die höchsten Substanzverluste, besonders bei Wurzelentin
[Ranjitkar et al., 2009]		im Schmelz kein signifikanter Unterschied zwischen Tooth Mousse mit und ohne CPP-ACP im Dentin mit CPP-ACP signifikant geringerer Substanzverlust als ohne CPP-ACP jeweils signifikant besser als Kontrollgruppe
[Gregg et al., 2004]	nach 5, 10 und 15 Zyklen Profilometrie	auf erodierten Zahnflächen kann die Zunge einen zusätzlichen Substanzverlust bewirken
[Eisenburger et al., 2003]	Abrasion (nach Erosion): 12 bzw. 500 BS in Saline oder Säure mit/ohne Silica bzw Abrasion während Erosion für 4 0x 1000 BS	alternierend Erosion/Abrasion: alle sowohl nach 4 als auch nach 8 Zyklen signifikant größerer Substanzverlust als Neg.ktr aber keine signifikanten Unterschiede untereinander (10,7 und 11,8 bzw 21,0 und 22,7 µm) simultane Erosion/Abrasion: Speichel mit und ohne Bürsten sowie Silica/Wasser-Suspension ungebürstet zeigten keinen messbaren Substanzverlust, mit Silica/Wasser-Suspension gebürstet zeigt sehr geringe Verluste, alle Gruppen mit Zitronensäure zeigten deutliche Substanzverluste, mit Silica jeweils höher als ohne und gebürstet sehr viel höher als ungebürstet (15,7 ohne und 18,3 mit Silica nach 40 min, 29,7 ohne und 34,9 mit nach 80 min)

pH 3,6 Zittr.sre		
[Lussi et al., 2012]	zusätzlich: - Ca ²⁺ -Analyse - exponierte Fläche berechnet - Oberflächen- rauhigkeit - REM	Reflexion nimmt mit Erosionszeit ab -> Rauigkeit wird größer (nur Erosion weniger Reflexion als mit Abrasion) abhängig vom Einfallswinkel (45° besser als 60°) Reminlösung wichtig für Wahl der Messmethode (durch Speichelproteine verfälscht glattere Oberfläche als bei Remin) Speichelpellikel mit 3% NaOCl vor dem Messen entfernen
[Voronets und Lussi, 2010]		vernachlässigbare Unterschiede zwischen Gruppe 2 (Säure, art.sal.), 4 (Saft, art.sal.) und 5 (keine Erosion, ZP) 1 (Säure, ZP) und 3 (Saft, ZP) schon nach 30 BS signifikanter Substanzverlust, nach 240 Plateau erreicht ('softened layer' entfernt) (bis 590 kaum noch Verluste) 250 - 320 µm kalkulierte Dicke von erweichtem Schmelz
[Lussi et al., 2004]		alle Gruppen mit Erosion zeigten einen signifikant größeren Substanzverlust als die Kontrollgruppe ohne Erosion ein einmaliges Anwenden einer MSL für 30 sec hat keinen statistisch signifikanten Effekt zur Prävention von Bürstabrasion bei erodiertem Schmelz
[Jaeggi und Lussi, 1999]		statistisch signifikante Unterschiede zwischen 0 und 60 min sowie zwischen 30 und 60 min keine Unterschiede zwischen Speichelsekretionsrate mit oder ohne Apparatur (stimuliert und unstimuliert)
[Bartlett et al., 1994]		keine signifikanten Unterschiede bei unterschiedlicher Trinkwasserfluoridierung oder Oberflächenhärte des Schmelzes signifikant geringere Werte bei Anwendung einer F-haltigen ZP gegenüber einer F-freien ZP
Zitr.sre anderer/ unbekannter Konz./ pH		
[Moretto et al., 2013]	Vorbehandlung: 2 h intraoral, Lack, 6 h Intraoral, Lack entfernen	Zusammenhang zwischen Dosis und Wirkung von NaF sowohl bei Erosion als auch Erosion mit Abrasion. Mit Abrasion jeweils signifikant höhere Substanzverluste. Durch Zusatz von 5% TMP zum Lack mit niedrig dosiertem NaF niedrigste Substanzverluste und höchste Oberflächenhärte.

[Ganss et al., 2011]		NaF reduziert den Substanzverlust Anti-Erosions-Produkte waren nicht besser, teilweise weniger effektiv Sn-ZP zeigte antierosives Potential Chitosan war ähnlich wirksam wie NaF Probenposition (horizontal vs. vertikal) hat großen Einfluss auf die Höhe des Substanzverlustes
[Esteves-Oliveira et al., 2011]	vor Versuchsbeginn Erosion/Abrasion; in SEM-Bildern sichtbar: erosiv veränderte Schicht (Kontrollgruppe) fehlt bei Laserbehandlung	CO2-Laser mit den "richtigen" Einstellungen wirksam gegen Erosion/Abrasion, sowohl mit als auch ohne F einmalige F-Applikation keine Wirksamkeit (verglichen mit der Kontrollgruppe)
[Yu et al., 2009]	vor Versuchsbeginn Lagerung aller Proben für 7 Tage in dest. Wasser	Komposit ist resistenter gegen Erosion und/oder Abrasion als GIZ, Compomer und Schmelz Ero+Abr verursachen mehr Verlust als Ero oder Abr allein, bei GIZ, Compomer und Schmelz sogar mehr als Ero und Abr zusammen (synergistisch)
[Sobral et al., 2009]	Erosion nach 24 Stunden Wartezeit	sowohl im bovinen Schmelz für Ero+Abr als auch im humanen Schmelz für Ero zeigten die Gruppen, die mit Laser und APF kombiniert behandelt wurden signifikant geringere Substanzverluste im Vergleich mit den anderen Gruppen
[Ganss et al., 2007a]	6 Behandlungen: - Ero - Ero, Abr F-frei - Ero, 2 h warten, Abr F-frei - Abr F-frei, Ero - Ero, Abr F-haltig - Ero, Abr F + MSL + 2/Woche F-Gel	Wartezeit bringt keinen signifikanten Unterschied, Abrasionsdefekt bei Verwendung F-haltiger ZP geringer, durch Intensivfluoridierung kein signifikanter Unterschied zu Ero only
[Vieira et al., 2006a]	Vorbehandlung (über Nacht in art.sal.), 3 Lacke unbehandelt F-freier Lack F-Lack (vor Versuch entfernt)	Lacke sind gut bei Abr/Remin und Ero/Remin, bei dem F-freien evtl. Diffusion der Zitronensäure und Erosion der Oberfläche unter der Lackschicht AmF vermindert Substanzverluste, TiF ₄ etwa wie Neg.ktr.

[Vieira et al., 2006b]	Abrasion, Zunge und Attrition je 1 min (selbst hergestellte Maschine zur Erzeugung von Substanzverlusten)	Abrasion und Zunge zeigten keinen Substanzverlust, Attrition < Erosion < Ero+Abr < Ero+Zunge < Ero+Attrition
Limonaden		
[Levy et al., 2013]	Vorbehandlung: 2 h intraoral, Lack, 6 h Intraoral, Lack entfernen	Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen Erosion und Erosion + Abrasion. Alle F-haltigen Lacke und Lösungen reduzierten den Substanzverlust signifikant im Vergleich zur Placebo-Gruppe.
[Passos et al., 2013]	Proben 10 min trocken vor Profilometrie	Schmelz: signifikante Unterschiede zwischen Erosion mit und ohne Abrasion, keine Unterschiede bei Erosion + Abrasion zwischen den Messmethoden Dentin: keine signifikanten Unterschiede, keine Korrelation zwischen den Messmethoden Profilometrie für initiale Läsionen nicht geeignet optische Profilometrie von geometrischen und chemischen Änderungen beeinflusst
[Moron et al., 2013]	Profilometrie unter feuchten Bedingungen Dentin pH4,5 / 7 / gekauft 550 ppm: 5,4 / 5,3 / 5,2 µm 1100 ppm: 4,8 / 4,8 / 5,8 µm 5000 ppm: 4,8 / 4,6 / 6,4 µm	Schmelz: kein Unterschied zwischen den pH-Werten, aber zwischen den Konsistenzen, daher kein signifikanter Unterschied zwischen Placebo-ZP und den kommerziellen ZP Dentin: kein Unterschied zwischen pH-Werten, 1100 und 5000 ppm F haltige, flüssige ZP signifikant geringere Verluste als Placebo-ZP
[Comar et al., 2012]	Profilometrie unter feuchten Bedingungen	Schmelz: Kombinationspräparate am effektivsten, alle ZP mit F reduzieren Substanzverluste außer Crest (NaF-haltig) Dentin: Die ZP mit Metal-Ionen reduzierten den Substanzverlust signifikant zu Erosion

[Levy et al., 2012]	einmalige Anwendung vor Versuchsbeginn	TiF ₄ - Lack am effektivsten Lösungen und Placebolack kein signifikanten Unterschied zur Kontrolle F-haltige Lacke signifikant effektiver als Placebolack Lösungen nicht signifikant besser als Placebolack
[Rochel et al., 2011]		Erosion: Xylitol und F-haltige Zahnpasten gleich gut Erosion + Abrasion: Kombination Xylitol + F beste Wirksamkeit
[Rios et al., 2011]	1 d intraoral zur Pellikelbildung	Cola Light erzeugte signifikant weniger Substanzverlust für beide Konditionen (Ero mit und ohne Abr) im Vergleich mit Cola. Zwischen Ero und Ero+Abr zeigte sich bei Cola Light kein signifikanter Unterschied. Cola Ero+Abr hatte einen signifikant größeren Substanzverlust als Cola Ero.
[Moretto et al., 2010]	alles bei Raumtemperatur	es zeigte sich ein größerer Schutz mit 5000 ppm F- und mit 500 ppm F + 3% TMP für beide Konditionen
[Wiegand et al., 2010]		für alle Fluorid-Gruppen sind die Substanzverluste signifikant geringer im Vergleich mit den Kontrollproben Abrasion erhöhte den Substanzverlust es liegt kein signifikanter Unterschied zwischen den mit den unterschiedlichen F-Verbindungen behandelten Gruppen vor
[Rios et al., 2008b]	12 Stunden vor Versuch Pellikelbildung Abrasion extraoral	Erosion mit Abrasion größere Substanzverluste als Erosion allein kein signifikanter Unterschied zwischen den ZP
[Rios et al., 2008a]	in situ Studie: humaner und boviner Schmelz, stimulierter und unstimulierter Speichel, nur Erosion, Abrasion direkt bzw. 1 h nach Erosion	bei Erosion ist das Schmelz-Ätzmuster deutlich zu erkennen, bei Erosion + Abrasion ist die Oberfläche homogener, sowohl bei stimuliertem und unstimuliertem Speichel als auch bei direktem und zeitlich verzögertem Bürsten
[Wiegand et al., 2008b]	in situ / ex vivo Studie	vor einem erosiven Ereignis putzen verursacht einen geringeren Substanzverlust als danach zu putzen
[Magalhaes et al., 2008]	in situ Studie die Fluoridierung erfolgt über den Speichel (durch Zähneputzen zugeführtes Fluorid)	der F-Gehalt der ZP ist nicht ausreichend um den Schmelz vor Erosion zu schützen

[Magalhaes et al., 2007]	12 h intraoral zur Pellikelbildung	durch Fluorid-ZP Reduktion des Substanzverlustes um 5,38 bzw 6,84 µm im Vergleich mit der fluoridfreien ZP
[Vieira et al., 2007]		Die Kontrollgruppen und die mit Fluoridlack behandelte Ero+Abr-Gruppe zeigen einen Anstieg der Substanzverluste über die Dauer des Versuchs. Die ungebürstete Gruppe mit Lack zeigt keinen signifikanten Unterschied der Substanzverluste zwischen Tag 5 und Tag 15. Die mit F-Lack vorbehandelten Gruppen weisen signifikant niedrigere Substanzverluste auf als die Kontrollgruppen
[Sales-Peres et al., 2007]	1 d intraoral zur Pellikelbildung 2 x 3 Gruppen: mit bzw ohne MSL: nur Ero Ero + Abr nach 1 min Ero + Abr nach 30 min	Die Substanzverluste an Dentin sind signifikant unterschiedlich zwischen den Gruppen mit und ohne MSL-Behandlung. Die MSL verringert die Substanzverluste auch an Schmelz, allerdings nicht signifikant. Es gibt keine signifikanten Unterschiede zwischen den jeweiligen Gruppen Abrasion nach 1 Minute und Abrasion nach 30 Minuten.
[Rios et al., 2006a]	12 h intraoral zur Pellikelbildung	ohne Abrasion signifikant größerer Verlust von Hartsubstanz und geringerer Verlust von Oberflächenhärte REM-Bilder der Versuchsflächen zeigen mit Abrasion ein ähnliches Erscheinungsbild wie die Kontrollflächen
[Rios et al., 2006b]	1 d vor Beginn intraoral zur Pellikelbildung	die Faktoren Schmelz (human bzw bovin), Speichel (stimuliert bzw nicht stimuliert) und Zeit (direkt oder nach 60 min Abrasion) zeigten signifikante Effekte humaner Schmelz, Speichelstimulation und 60 min bis zur Abrasion zeigten signifikant geringere Substanzverluste als boviner Schmelz, keine Speichelstimulation und direkte Abrasion
[Turssi et al., 2005]		weder Substanzverlust noch Rauigkeit zeigten signifikante Unterschiede zwischen gesundem und erodierten Schmelz die mit unterschiedlichen ZP behandelten Gruppen zeigten keinen signifikanten Unterschied in der Höhe der Substanzverluste Die mit tartar control gebürsteten Proben zeigten eine signifikant höhere Rauigkeit im Vergleich mit der Kontrollgruppe und den mit whitening ZP behandelten Proben

[Turssi et al., 2004]	1d zur Pellikelbildung	sowohl für Schmelz als auch für Dentin ist der Substanzverlust signifikant höher für erodierte im Vergleich mit gesunden Zahnhartsubstanzen für gesunden Schmelz, gesundes Dentin und erodiertes Dentin ist der Substanzverlust bei Abrasion mit der Whitening ZP signifikant höher als bei Abrasion mit regulärer ZP es liegt kein signifikanter Unterschied zwischen den Pasten bei erodiertem Schmelz vor
[Attin et al., 2001]	vor extraoralem Bürsten 0, 10, 20, 30, 60 min tragen, Kontrolle ungebürstet	kein statistisch signifikanter Unterschied von 0 bis 20 min sowie von 10 bis 60 min alles signifikant höher als ohne Abrasion, individuell stark variierend
[Attin et al., 2000]	3 Kontrollgruppen: - Erosion + Remin (240 min, keine Abrasion) - Erosion (keine Remin, keine Abrasion) - Abrasion (keine Erosion, keine Remin)	ohne Erosion geringste Verluste, signifikante Verluste mit Erosion, je länger die Remin-Zeit, desto geringer (signifikant) zwischen 240 min Remin und den beiden ungebürsteten Kontrollgruppen kein signifikanter Unterschied
[Attin et al., 1999]		alle Gruppen zeigten statistisch signifikante Unterschiede Substanzverlust pH 4,5 + F < pH 7 + F < pH 7 - F < pH 4,5 - F
[Attin et al., 1997]		mit zunehmender Erosionsdauer nimmt die Oberflächenhärte ab und der abrasive Substanzverlust zu zwischen den Gruppen sind die Substanzverluste signifikant unterschiedlich
Säfte		
[Wegehaupt et al., 2011]		alle Kombination führen zu einem signifikant geringeren Substanzverlust verglichen mit 100% Orangensaft es lag kein signifikanter Unterschied zur Wasser-Kontrollgruppe vor
[Rodriguez und Bartlett, 2010]	3D 0,46 - 0,99 $\mu\text{m}/\text{mm}^2$ 0,39 $\mu\text{m}/\text{mm}^2$	2D und 3D Messung haben eine starke positive Korrelation, 3D zeigte mehr signifikante Unterschiede zwischen den Säften

[Zero et al., 2006]		die Regenerationsrate der Mikrohärtigkeit war bei der Test-ZP signifikant höher im Vergleich mit der Placebo- und der niedrigdosierten (500 ppm F) ZP, es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen der Standard-ZP (1100 ppm F) und der Test-ZP
[Hemingway et al., 2006]	nach jeder Behandlung Messung	die Substanzverluste sind abhängig vom pH-Wert der verwendeten Getränke unterschiedlich, wobei das 'zahnfreundliche' Johannesbeergetränk (höchste Kalziumkonzentration) die geringsten Substanzverluste verursacht, obwohl der Orangensaft einen höheren pH-Wert aufweist Bürsten erhöht den Substanzverlust signifikant zum erosiven Substanzverlust
[Hooper et al., 2003]		das Limit des Profilometers beträgt 50 µm Substanzverlust, einige Dentinproben haben bereits nach 5 d diese Substanzverluste erreicht, nach 10 d die meisten Dentinproben Dentin zeigt signifikant höhere Substanzverluste als Schmelz Schmelz zeigt keinen signifikanten Unterschied zwischen den ZP Dentin zeigt bereits nach 5 d einen signifikant höheren Substanzverlust bei ZP RDA 189 gegenüber ZP RDA 85
[Amaechi et al., 2003]	natürliche Oberfläche (nicht poliert) eine Probe vor Weichgewebe geschützt, eine ungeschützt, eine mit Nagellack abgedeckt	die ungeschützten Proben zeigen einen signifikant höheren Substanzverlust als die Kontrollgruppe (erodiert und abgedeckt), die geschützten Proben einen signifikant geringeren Substanzverlust als die Kontrollgruppe
[Kelly und Smith, 1988]		keine signifikanten Unterschiede zwischen den vier Gruppen, aber zwischen Erosion, Abrasion und Erosion + Abrasion
[Davis und Winter, 1980]	10 unterschiedl. Behandlungen: nur Abr mit Wasser, mit Slurry, nur Ero (Schmelz 45 sek, Dentin 3 min), Ero und Abr; zusätzlicher Test: unterschiedliche Demin-Lsg. mit unterschiedlichen pH-Werten (3 min)	die Höhe des Substanzverlustes ist abhängig vom pH-Wert (logarithmisch), Ausnahme EDTA (höherer Verlust als erwartet) Dentin zeigt weniger Effekte von erosiven Ereignissen auf darauffolgende Abrasionen als Schmelz

[Schweizer-Hirt et al., 1978]	<p>Graduierung nach Aussehen der Indentationen (0-IV)</p> <p>auf die Wirkstoffe der Pasten wurde nicht eingegangen, bedingt auf die Art der Abrasionskörper</p>	<p>Härteabnahme durch O-Saft und Abrasion um durchschnittlich 17%</p> <p>durch O-Saft erodierte Flächen leichter abradierbar</p>
Salz-/ Phosphorsäure		
[Esteves-Oliveira et al., 2012]	<p>Laser Variationen: Fluenz (0,1-0,9 J/cm²) Impulsdauer (80-400 µs) Wiederholfrequenz (180-700 Hz)</p>	<p>Ca²⁺ mit Phosphat reduziert den Verlust bis zu 20%</p> <p>klinisch nicht geeignet, da alle Varianten Oberflächensprünge verursachten</p>
[Austin et al., 2011]	<p>einmalige F-Applikation vor Beginn</p>	<p>nach Applikation der Produkte F- auf der Oberfläche CaF₂-ähnliche Deckschicht nach NaF, weniger CaF₂-ähnlich bei SnF₂</p> <p>sowohl nach Erosion als auch nach Erosion + Abrasion kein F-, nur bei Bifluorid in Spuren (0,1 bzw 0,2 wt%) bei Bifluorid nach 3 und 6 Zyklen weniger Härteverlust bei allen Gruppen: nach 9 x Erosion Ätzmuster, nach Ero+Abr "Schmierschicht"</p>
[Wiegand et al., 2008d]	<p>Filament-Durchmesser von 0,15 0,2 und 0,25 mm 40 Strokes</p>	<p>Substanzverlust abhängig von REA und bedingt von Filament-Durchmesser (signifikant bei REA 6 ist 0,2 schlechter als 0,15 und 0,25)</p> <p>bei REA 2 und 9 Durchmesser nicht signifikant</p> <p>REA 6 und 9 kein signifikanter Unterschied zueinander aber zu REA 2 (egal ob mittel oder hoch abrasiv, wenn dann gering abrasiv empfehlenswert)</p>
[Wiegand et al., 2007b]	<p>Messung alle 50 BS bzw. alle 30 sek</p>	<p>mit Ultraschall: steigender Substanzverlust bis 60 sek, danach kein signifikanter Unterschied mehr</p> <p>Abrasion mit Aqua dest: Anstieg des Substanzverlustes bis 250 BS, danach kein signifikanter Unterschied</p> <p>Abrasion mit F-haltiger ZP: Anstieg des Substanzverlustes bis 300 BS, danach kein signifikanter Unterschied</p> <p>signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen: Abrasion mit ZP > Abrasion mit Aqua dest > Ultraschall</p>

[Kuroiwa et al., 1994]	nach 56 d: - NaOCl 10% (30 min) - EDTA 2,5%, pH 7,2 (20 min) oder - unbehandelt	Kontrolle: Erosion zeigt deutliches Ätzmuster mit ZP gebürstet: Ätzmuster deutlich, aber "abgerundet" mit Wasser gebürstet: Ätzmuster "erahnbare", glatte Oberfläche, im Querschnitt Tag-ähnliche Strukturen aufgelagert (resistent gegen EDTA und NaOCl)
------------------------	--	---

9.1.6 Verzeichnis der in der Übersicht zur Literaturrecherche verwendeten Abkürzungen

Anhang 6: Abkürzungsverzeichnis der Übersicht zur Literaturrecherche

Abr	Abrasion
Aqua dest.	Aqua destillata (destilliertes Wasser)
BS	Bürststriche
deion.	deionisiert
Ero	Erosion
Ero+Abr	Erosion und Abrasion
exp.	experimentell
Konz.	Konzentration
künstl.	künstlich
MSL	Mineralsalzlösung
MuSpLö	Mundspüllösung
n.a.	nicht angegeben
Neg	Negativkontrolle
Osz/sek	Oszillationen in der Sekunde
Pos	Positivkontrolle
REM	Rasterelektronenmikroskopie
Remin	Remineralisation
Stk.	Stück
U/min	Umdrehungen in der Minute
US	Ultraschall
Zitr.sre	Zitronensäure
ZP	Zahnpaste

9.2 Erklärung zur Dissertation

„Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig 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 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.“

Ort, Datum

Unterschrift

9.3 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. Nadine Schlüter, Inhaberin der Professur für Kariesforschung an der Klinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie des Departments für Zahn-, Mund- u. Kieferheilkunde des Universitätsklinikums Freiburg, für die Überlassung des Dissertationsthemas. Auch möchte ich ihr danken für die stets freundliche, kompetente und kritische Betreuung sowie für ihre Geduld, Motivation und Unterstützung in allen Abschnitten auf dem Weg dieser Dissertation.

Frau Birgit Meier danke ich für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung, für die Bereitstellung der Geräte und die wertvollen Tipps und Anregungen in allen praktischen Belangen.

Für die Korrekturen des Abstracts danke ich meinem Cousin Christian Tolle, der sich trotz Unkenntnis über die Materie durch mein Schulenglisch gearbeitet hat.

Ein besonderer Dank gebührt meiner Freundin und Kollegin Frau Dr. Katja Jung für ihren Rückhalt, auf den ich mich immer verlassen kann. Ihre moralische Unterstützung besonders in den schwierigen Zeiten half mir sehr beim Durchhalten.

Von ganzem Herzen möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, ohne die ich nicht wäre, was und wo ich heute bin. Meinen Eltern danke ich für die Begleitung auf meinem Lebens- und Berufsweg und dafür, jederzeit mein emotionales und finanzielles Sicherheitsnetz zu sein. Meiner Schwester Katharina danke ich für die anpeitschenden Worte, wenn alles andere versagt.