

Maike Möllers

Einfluss von Abrasiva auf die Effektivität experimenteller
Sn/F- sowie Sn/F/Chitosan-Zahnpasten auf den erosiv
und erosiv/abrasiv bedingten Zahnhartsubstanzverlust
im Schmelz

- eine In-vitro-Studie -



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



édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt.

Die rechtliche Verantwortung für den gesamten Inhalt dieses Buches liegt ausschließlich bei den Autoren dieses Werkes.

Jede Verwertung ist ohne schriftliche Zustimmung der Autoren oder des Verlages unzulässig. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in und Verarbeitung durch elektronische Systeme.

1. Auflage 2016

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the Authors or the Publisher.

1st Edition 2016

© 2016 by VVB LAUFERSWEILER VERLAG, Giessen
Printed in Germany



édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

STAUFENBERGRING 15, D-35396 GIESSEN
Tel: 0641-5599888 Fax: 0641-5599890
email: redaktion@doktorverlag.de

www.doktorverlag.de

**Einfluss von Abrasiva auf die Effektivität experimenteller
Sn/F- sowie Sn/F/Chitosan- Zahnpasten auf den erosiv und
erosiv/abrasiv bedingten Zahnhartsubstanzverlust im Schmelz
- eine In-vitro-Studie -**

INAUGURALDISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin

des Fachbereichs Medizin

der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von

Maike Möllers

aus Oldenburg in Holstein

Gießen 2015

Aus dem Medizinischen Zentrum der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

Poliklinik für Zahnerhaltungskunde und Präventive Zahnheilkunde

der Justus-Liebig-Universität Gießen

Kommissarischer Direktor: Prof. Dr. Bernd Wöstmann

Betreuer: Prof. Dr. Carolina Ganß

Gutachter: Prof. Dr. Dr. Knut Stieger

Prüfungsvorsitz: Prof. Dr. John Ziebuhr

Prüfungsmittglied: Prof. Dr. Andreas Böning

Tag der Disputation: 14.06.2016

Meiner Großmutter gewidmet

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Material und Methode	10
2.1 Lösungen/Produkte	10
2.2 Probenherstellung	12
2.3 Versuchsdurchführung.....	15
2.4 Profilometrie	18
2.5 Statistik	20
2.6 Schematische Übersicht des Versuchsablaufs	22
2.7 Materialien- und Chemiekalienliste.....	23
2.7.1 Materialien	23
2.7.2 Chemikalien	24
3 Ergebnisse	25
3.1 Allgemeines	25
3.2 Ergebnisse der ersten Versuchsreihe (ohne Chitosan).....	27
3.3 Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe (mit Chitosan)	32
3.4 Vergleich des Substanzverlustes zwischen erster und zweiter Versuchsreihe	37
4 Diskussion	41
4.1 Diskussion der Methode	41
4.1.1 Erzeugung erosiver Demineralisation.....	41
4.1.2 Erzeugung der Abrasion	46
4.1.3 Simulation von Speichereffekten	49
4.1.4 Betrachtung der Messmethodik	54
4.2 Diskussion der Ergebnisse.....	56
4.2.1 Wirkungsmechanismus von Sn/F bei Erosionen	56

Inhaltsverzeichnis

4.2.2 Effekte der Slurry-Gruppen	59
4.2.3 Abrasion auf gesunden und erodierten Schmelzoberflächen.....	62
4.2.4 Effekte der Slurry-Bürst-Gruppen	68
4.2.5 Wirkung von Chitosan	73
4.3 Schlussfolgerung	81
5 Zusammenfassung	82
6 Summary	84
7 Literaturverzeichnis.....	86
8 Anhang	96
8.1 Publikation.....	96
8.2 Ehrenwörtliche Erklärung.....	98
8.3 Danksagung	99
8.4 Lebenslauf	100

1 Einleitung

Dentale Erosionen und der damit verbundene Verlust von Zahnhartsubstanz gewinnen klinisch zunehmend an Bedeutung. Der Begriff "Erosion" stammt aus dem Lateinischen und bedeutet so viel wie "abnagen". Auch in der Geologie ist diese Bezeichnung zu finden, dort beschreibt sie das Abtragen von Gestein und Boden durch Gewässer und Wind.

In der Zahnmedizin werden Erosionen als pathologische, chronische, lokalisierte, schmerzlose Verluste von Schmelz und Dentin definiert, die infolge einer schichtweisen Abätzung der Oberfläche durch Säuren und/oder Chelatoren ohne klinisch erkennbare Erweichung sowie ohne Beteiligung von Mikroorganismen entstehen [Imfeld, 1996].

Prävalenz, Ätiologie, Abgrenzung

Angaben zur Prävalenz von Erosionen unterscheiden sich deutlich in einer Vielzahl von Studien und reichen von 6 – 50% bei Vorschulkindern, 11 – 100% bei 9 – 17-jährigen Jugendlichen und 4 – 82% bei Erwachsenen [Jaeggi und Lussi, 2006]. Die differierenden Ergebnisse spiegeln zum einen Unterschiede zwischen untersuchten Bevölkerungsgruppen wider, hauptsächlich aber die Variationsbreite an Diagnosekriterien bzw. Studiendesigns [Huysmans et al., 2011a].

Erosionen können sowohl durch exogene als auch durch endogene Faktoren verursacht werden und multifaktoriell bedingt sein. Zu den exogenen Ursachen zählen der häufige Konsum säurehaltiger Lebensmittel oder eine berufsbedingte Säureexposition, wie sie u. a. bei Weinverkostern oder Fabrikarbeitern der Batterieindustrie besteht [Lussi und Jaeggi, 2009]. Zu weiteren Risikogruppen zählen Rohköstler sowie Vegetarier mit einer vorwiegend säurehaltigen Ernährung [Ganss et al., 1999; Järvinen et al., 1991; Lussi und Jaeggi, 2008]. In Einzelfällen zeigen auch Extremsportler mit einem erhöhten Konsum an Sportlergetränken mit niedrigem pH-Wert ein erhöhtes Risiko. Im Allgemeinen wird der Konsum von Sportlergetränken jedoch eher als Ko-Faktor bei der Entstehung dentaler Erosionen angesehen [Lussi und Jaeggi, 2009].

Die wichtigsten endogenen Ursachen sind Anorexia, häufiges Erbrechen wie bei Bulimia

nervosa oder chronische Magen-Darm-Störungen wie gastroösophagealer Reflux [Lussi und Jaeggi, 2009].

Erosionen sind von anderen nicht kariesbedingten Zahnhartsubstanzdefekten wie Abrasionen, Attritionen und Abfraktionen (keilförmige Defekte) abzugrenzen.

Abrasionen werden als Hartsubstanzverluste durch mechanische Prozesse beschrieben [Levitch et al., 1994]. Es kommt zu einem Fremdkörperabrieb, wie z. B. durch Nahrungsbestandteile oder Staub. Auch intensive Mundhygienemaßnahmen und die Verwendung von Zahnpasten mit stark abrasiven Putzkörpern führen zu Abrasionen [Hellwig et al., 2009].

Attritionen werden als Zahnhartsubstanzverluste durch physiologische oder pathologische okklusale Kontakte bei Parafunktionen definiert [Lussi und Jaeggi, 2002]. Die Ätiologie der Abfraktionen ist bisher nicht eindeutig geklärt. Sie sind meistens in der Nähe der Schmelz-Zement-Grenze lokalisiert. Als mögliche Ursache werden ein mechanisch-abrasiver Vorgang sowie Fehlbelastungen mit der Folge von mikroskopisch und makroskopisch sichtbaren Schmelzaussprengungen angegeben [Hellwig et al., 2009]. Eine eindeutige Abgrenzung der jeweiligen Läsionstypen ist mitunter schwierig, da erosive und abrasive Prozesse häufig simultan auftreten und sich überlagern [Lussi et al., 2005].

Pathohistologische und chemische Aspekte

Pathohistologisch kommt es im Schmelz zunächst zu Auflösungserscheinungen im Bereich der Prismenzentren und -peripherien. Im weiteren Verlauf wird auch interprismatische Substanz herausgelöst, wobei ein charakteristisches Ätzmuster entsteht [Meurman und Frank, 1991b]. Des Weiteren ist ein Verlust der Mikrohärtigkeit zu verzeichnen [Lussi et al., 1995; Maupome et al., 1998].

Im Dentin liegt aufgrund des hohen Anteils organischer Bestandteile eine komplexere Pathohistologie vor. Nach einer kurzen Säureapplikation kommt es zunächst zu einer Demineralisation an der Grenzfläche zwischen inter- und tubulärem Dentin. Eine andauernde Säureexposition führt zu einer Erweiterung der Tubuli mit rauem und porösem peritubulärem Dentin bis hin zur vollständigen Demineralisation des peritubulären Dentins [Meurman et al., 1991a].

Erosionen werden durch Säuren unterhalb des kritischen pH-Wertes hervorgerufen. Von einem kritischen pH-Wert wird gesprochen, wenn die Umgebung in Bezug auf Zahnminerale gerade noch gesättigt ist. Ist die den Zahn angrenzende Lösung nur geringfügig untersättigt, kommt es zum Auftreten einer initialen Oberflächendemineralisation. Dies führt zu einer lokalen pH-Wert-Anhebung sowie einer erhöhten Ionen-Konzentration der angrenzenden Lösung. Die Lösung ist somit gesättigt und die Demineralisation gestoppt [Lussi et al., 2011].

Bei dynamischen Verhältnissen an der Grenzfläche zwischen flüssiger und fester Phase (z. B. wenn der Patient mit einem sauren Getränk spült) wird der Demineralisationsprozess beschleunigt, weil die den Zahn umgebende Lösung konstant erneuert wird, ohne einen Grad an Sättigung zu erreichen [Lussi et al., 2011].

Die Erosivität wird somit nicht allein durch den pH-Wert bestimmt, sondern auch durch andere Faktoren wie Kalzium- und Phosphatgehalt sowie Pufferkapazität und Chelatoreigenschaften [Lussi et al., 2005]. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass Orangensaft mit einem pH-Wert von 4, welcher mit Kalzium und Phosphat angereichert wurde, kein erosives Potenzial hat [Larsen und Nyvad, 1999].

Klinische Diagnose

Die klinische Diagnose erosiver Zahnhartsubstanzverluste ist in frühen Stadien häufig erschwert. Im Anfangsstadium kommt es zum Verlust der Perikymatien, die Oberfläche im Glattflächenbereich erscheint dabei glatt, seidenglänzend und matt [Lussi et al., 2011]. Im weiteren Verlauf entstehen Dellen- und Stufenbildungen, wobei die marginale Schmelzleiste zunächst persistiert. Der Erhalt dieser Schmelzleiste wird einerseits durch Plaqueanlagerungen begründet, welche eine Diffusionsbarriere gegen den Säureangriff darstellen. Andererseits scheint auch der neutralisierende Effekt des Sulkus-Fluids eine Rolle zu spielen [Lussi und Jaeggi, 2009].

Im Okklusalebene führen fortschreitende Erosionen zu abgerundeten und eingedellten Höckern. In schweren Fällen kommt es zum vollständigen Verlust der ursprünglichen okklusalen Morphologie. Weiterhin können Füllungsänderer über das Niveau der angrenzenden Zahnhartsubstanz hinausragen.

Charakteristisch für Erosionen der Glattflächen ist eine flächenhafte Entkalkung der Zahnhartsubstanz. Ein progredienter Schmelzverlust führt schließlich zur Freilegung von

Dentin [Lussi und Jaeggi, 2009; Lussi et al., 2011]. Temperaturempfindlichkeiten, Farbveränderungen und Verlust der Bisshöhe können die Folge sein [Lussi und Jaeggi, 2009].

Zur klinischen Beurteilung des Schweregrads der Erosion eignet sich die von Bartlett, Ganß und Lussi entwickelte "Basic Erosive Wear Examination" (BEWE). Bei diesem Bewertungssystem wird die am stärksten betroffene Zahnfläche in allen Sextanten klassifiziert. Der dabei hervorgehende Summenwert liefert eine Empfehlung zur weiteren Therapie [Bartlett et al., 2008].

Prävention und Therapie

Im Rahmen der Prävention von dentalen Erosionen zeigen Fluoride einen gewissen protektiven Effekt. Bereits in der Kariesforschung konnte die positive Wirkung fluoridhaltiger Präparate in zahlreichen Studien nachgewiesen werden [Marinho, 2009]. Im Prozess der Kariesentstehung kommt es zum Herauslösen von Mineralien unterhalb einer pseudointakten Oberflächenschicht. Es entsteht der sogenannte Läsionskörper [Meyer-Lückel et al., 2012]. Im Gegensatz zu Karies handelt es sich bei Erosionen eher um ein Oberflächenphänomen. Es findet ein direkter, schichtweiser Mineralverlust an der Zahnoberfläche statt [Lussi et al., 2011]. Dentale Erosionen erfordern somit eine andere Intervention.

Das positive Potenzial konventioneller monovalenter Fluoridverbindungen, wie z. B. Natriumfluorid (NaF) und Aminfluorid (AmF), ist größtenteils auf die Bildung von Kalziumfluorid (CaF₂)-ähnlichen Präzipitaten auf der Schmelzoberfläche zurückzuführen. Es wird vermutet, dass dieses Präzipitat als Mineralreservoir vor einem Säureangriff schützt oder als physikalische Barriere den Kontakt zwischen Säure und Schmelzoberfläche verhindert. Das Mineralreservoir führt bei einem Säureangriff zur Freisetzung von Kalzium und Fluorid und somit zur Sättigung der an die Zahnoberfläche angrenzenden Lösung [Magalhaes et al., 2011].

Die Bildung sowie der erosionsinhibierende Effekt des CaF₂-ähnlichen Präzipitats hängen vom pH-Wert, der Fluoridkonzentration und der Häufigkeit der Applikation ab. So steigt die Präzipitation mit erhöhter Fluoridkonzentration und Applikationshäufigkeit sowie sinkendem pH-Wert des verwendeten Präparats [Magalhaes et al., 2011]. Fluoridhaltige, leicht saure Mundhygieneprodukte zeigen keine erosive Wirkung,

sondern fördern die Bildung des CaF_2 -ähnlichen Präzipitats [Lussi und Jaeggi, 2009]. Der Nachteil des CaF_2 -ähnlichen Präzipitats liegt in der leichten Löslichkeit durch Säuren. Daher besteht die Forderung nach Präparaten, deren Präzipitate sich von dem vorgenannten CaF_2 -ähnlichen Präzipitat durch eine höhere Säureresistenz unterscheiden [Ganss et al., 2013].

Fluoridpräparate mit polyvalenten Metallkationen, wie Zinn (Sn)- oder Titanionen (Ti), zeigen vielversprechende erosionsinhibierende Eigenschaften [Magalhaes et al., 2011]. Mehrere In-vitro-Studien zeigen einen protektiven Effekt von sauren konzentrierten TiF_4 -Lösungen oder -Lacken. Dieser Effekt wird auf die Bildung einer säureresistenten Oberflächendeckschicht sowie den Einbau von Titanionen in die Kristallgitterstruktur des Hydroxylapatits zurückgeführt. Die glaserähnliche Oberflächendeckschicht fungiert vermutlich hauptsächlich als Diffusionsbarriere [Magalhaes et al., 2011].

Zinnfluorid (SnF_2) oder Zinnchlorid (SnCl_2) in Kombination mit Fluoriden werden stark erosionsinhibierende Eigenschaften zuerkannt [Ganss et al., 2012a].

Die Verwendung von SnF_2 -haltigen Lösungen führt zur Bildung eines säurestabilen Präzipitats auf der Schmelzoberfläche. Des Weiteren sind strukturelle Veränderungen durch die Inkorporation von Sn-Ionen oder einer Kombination von Sn- und F-Ionen in oberflächliche Schmelzschichten erkennbar. Nach Applikation hochkonzentrierter Präparate ist eine Sn-Aufnahme bis zu einer Tiefe von 20 μm nachweisbar [Schlueter et al., 2009].

Die Verwendung von Mundspüllösungen wird häufig als zusätzliche Mundhygienemaßnahme angesehen. Von viel größerer Relevanz sind Zahnpasten. Sie sind unverzichtbarer Bestandteil der täglichen Mundhygiene. Die repräsentative Erhebung der Vierten Deutschen Mundgesundheitsstudie (DMS IV) zeigt, dass die Zahnreinigung bei 74,2% der Kinder, 73,4% der Jugendlichen, 72,8% der Erwachsenen und 60,6% der Senioren zweimal täglich erfolgt. Hauptsächlich kommen hierbei Zahnbürsten und Zahnpasten zum Einsatz [Micheelis und Schiffner, 2006].

Es stellt sich somit die Frage, ob im Rahmen der Erosionsprävention auch mit Zahnpasten ähnliche Effekte wie bei den vorgenannten Mundspüllösungen zu erzielen sind. In den letzten Jahren geriet die Forderung nach erosionsinhibierenden Zahnpasten immer mehr in den Fokus der Wissenschaft.

Zahnpasten dienen dem Säubern und Polieren der Zahnoberfläche sowie dem Einbringen prophylaktisch oder therapeutisch wirksamer Substanzen [Hellwig et al., 2009]. Zur effektiven Beseitigung exogener Verfärbungen müssen Zahnpasten eine gewisse Abrasivität aufweisen. Zahnpasten enthalten als zentrales Element Putzkörper, sogenannte Abrasiva. Daneben sind Tenside, Geschmacksstoffe, verschiedene Wirkstoffe wie Kariostatika, plaquehemmende Wirkstoffe, Zahnsteininhibitoren und pflanzliche Extrakte sowie Hilfsstoffe wie Feuchthaltemittel, Bindemittel und Konservierungsstoffe beigefügt [Hellwig et al., 2009]. Dies macht Formulierungen sehr kompliziert.

Abrasiva sind wasserunlösliche anorganische oder organische Stoffe. Sie werden der Zahnpaste in partikulärer Form in unterschiedlicher Konzentration und Korngröße beigesetzt [Domsch, 1994; Zantner und Kielbassa, 2002]. Eine Vielzahl unterschiedlicher Abrasiva findet hierbei Anwendung, wie beispielsweise Silica, Kalziumkarbonat, Kalziumpyrophosphat, Dikalziumphosphat-Dihydrat, Dikalziumphosphatanhydrit, Trikalziumphosphat, Natriummetaphosphat [Domsch, 1994], Aluminiumoxid, Aluminiumoxidtrihydrat [Zantner und Kielbassa, 2002] und Polyethylenkörper [Scherge et al., 2013]. Am häufigsten werden Silica als Abrasiva in Zahnpasten eingesetzt. Die Struktur der Abrasiva kann entweder amorph und abgerundet oder kristallin und scharf sein [König, 2002]. Größe, Form, Härte und Menge der Abrasiva bestimmen wesentlich die Abrasivität einer Zahnpaste [Zantner und Kielbassa, 2002].

Die Abrasivität von Zahnpasten wird durch den RDA-Wert (Relative Dentin Abrasion) beziehungsweise den REA-Wert (Relative Schmelz Abrasion) beschrieben. Hierbei wird der Abrieb von radioaktiv markierten gesunden Dentin- beziehungsweise Schmelzproben in einem genau definierten Standardverfahren bestimmt. Beide Werte stehen in keinem rationalen Verhältnis zueinander. Diese Laborparameter sind aufgrund von Reliabilitäts- und Validitätsproblemen umstritten und erlauben keine Rückschlüsse auf Risiken für Zahnhartsubstanzverluste unter klinischen Bedingungen [Dörfer, 2011].

Über die Wirkung von Abrasiva auf erodierten Schmelzoberflächen ist bislang nur wenig bekannt. Gesunder Schmelz zeigt eine relativ hohe Resistenz gegenüber physikalischen Einwirkungen. Unter erosiven Bedingungen ist Schmelz weniger widerstandsfähig und zeigt bei zusätzlicher Bürstabrasion signifikant höhere Substanzverluste [Ganss et al., 2013]. Es wird vermutet, dass der Großteil des Zahnhartsubstanzverlustes auf den

Einfluss von Abrasiva zurückgeht. Die Art der Zahnbürste scheint eine eher untergeordnete Rolle zu spielen [Voronets und Lussi, 2010].

Neben Abrasiva enthalten Zahnpasten verschiedene erosionsinhibierende Wirkstoffe mit dem Ziel, die Säureresistenz der Zahnoberfläche oder Pellikel zu erhöhen. Es wird jedoch vermutet, dass Abrasiva den Effekt dieser Wirkstoffe stören [Ganss et al., 2013].

NaF-haltige Zahnpasten konnten den erosiven Zahnhartsubstanzverlust in mehreren Studien signifikant reduzieren. Gegenüber der alleinigen Applikation der Slurries führt die zusätzliche Bürstabrasion zu deutlich höheren Substanzverlusten [Ganss et al., 2011; Magalhaes et al., 2007; Moretto et al., 2010; Rios et al., 2008].

Die Verwendung NaF-haltiger Zahnpasten scheint Personen mit durchschnittlicher Säureexposition ausreichenden Erosions- sowie Abrasionsschutz zu bieten. Für Patienten mit erhöhtem Erosionsrisiko oder klinisch manifesten Läsionen sind allerdings effektivere Formulierungen notwendig [Ganss et al., 2012b].

Bislang liegen keine Informationen darüber vor, ob TiF_4 auch als Inhaltstoffe von Zahnpasten im Rahmen der Erosionsprävention geeignet sind [Ganss et al., 2013].

Es bestehen Hinweise, dass Sn-haltige Zahnpasten eine stärkere oder zumindest gleich starke anti-erosive Wirkung wie konventionelle NaF Zahnpasten besitzen [Hooper et al., 2007; Young et al., 2006; Ganss et al., 2012b].

Es konnte gezeigt werden, dass durch die Applikation von Zahnpasta-Slurries der Substanzverlust im Vergleich zur Placebogruppe um 55 – 95% reduziert werden kann. Die zusätzliche Bürstabrasion führt jedoch zu deutlich höheren Substanzverlusten und zeigt ähnliche Ergebnisse wie konventionelle NaF-haltige Zahnpasten. Entsprechende Ergebnisse zeigen Untersuchungen mit verschiedenen Zinnverbindungen (SnF_2 oder $SnCl_2$), Wirkstoffkombinationen mit verschiedenen Fluoriden (AmF, NaF oder einer Kombination von beiden) sowie unterschiedlicher Sn-Konzentration [Ganss et al., 2013].

Im Gegensatz zu organischen Polyethylenkörpern können anorganische Silica-Partikel aufgrund ihrer negativen Oberflächenladung freie Sn-Ionen adsorbieren [Magalhaes et al., 2014]. Es besteht die Frage, ob die Zinnverfügbarkeit an der Schmelzoberfläche durch die Anwesenheit der Silica-Partikel abnimmt. Die Effekte der Wirkstoffe werden hierdurch möglicherweise reduziert [Magalhaes et al., 2014].

Neben anorganischen Wirkstoffen bestätigen mehrere Studien eine protektive Wirkung organischer Moleküle. Es wird angenommen, dass Polymere, wie Muzin oder Carboxymethylcellulose, eine schützende Schicht auf der Zahnoberfläche bilden oder die Schutzwirkung der Pellikel erhöhen [Ganss et al., 2013].

Beispielsweise zeigt Chitosan ein vielversprechendes erosionsinhibierendes Potenzial [Ganss et al., 2011; Ganss et al., 2012b; Schlueter et al., 2013; Schlueter et al., 2014]. Chitosan ist ein natürlich vorkommendes kationisches Polysaccharid, welches durch Deacetylierung aus Chitin gewonnen wird. Große Anwendung findet dieses Biopolymer in industriellen und biomedizinischen Bereichen [Kumar et al., 2004]. Chitosan werden antibakterielle [Decker et al., 2005; Verkaik et al., 2011] sowie gewebshelende Eigenschaften zuerkannt [Kumar et al., 2004]. Chitosan besitzt eine stark positive Ladung bei niedrigem pH-Wert [Li et al., 1992] und die Fähigkeit, sich an Strukturen mit negativem Zeta-Potenzial, wie beispielsweise Schmelz, zu binden [Guo and Gemeinhart, 2008; Young et al., 1997].

Trotz einiger Hinweise auf den erosionsinhibierenden Effekt von Chitosan [Ganss et al., 2011; Ganss et al., 2012b] existieren bislang nur wenige Kenntnisse über die positive Wirkungskraft.

Ziel der Studie

Die Wechselwirkung von speziellen Wirkstoffen wie Chitosan und Zinn mit Abrasiva konnte bislang nicht aufgeklärt werden. Art und Menge der Abrasiva scheinen den Substanzverlust und die Effektivität experimenteller Zahnpasten zu beeinflussen. Es wird erwartet, dass mit steigender Konzentration an Abrasiva gleichen Typs der Substanzverlust zunimmt. Des Weiteren wird vermutet, dass Chitosan die Wirksamkeit experimenteller Zahnpasten unabhängig von Art und Menge der Abrasiva erhöht.

Ziel der vorliegenden In-vitro-Studie war es, den Einfluss

1. der **Art** der Abrasiva (Silica versus Polyethylen)
2. und der **Menge** der Silica-Partikel

auf die Wirksamkeit **Sn/F**-haltiger sowie **Sn/F/Chitosan**-haltiger Zahnpasten gegen erosiven und abrasiv-erosiven Substanzverlust bei humanem Schmelz zu untersuchen.

Die vorliegende In-vitro-Studie wurde in zwei Versuchsreihen durchgeführt. In der ersten Versuchsreihe wurden experimentelle Sn/F-haltige Zahnpasten mit einem variierenden Gehalt an Silica oder Polyethylen verwendet. Die Zahnpasten der zweiten Versuchsreihe enthielten zusätzlich Chitosan bei ansonsten gleicher Formulierung.

2 Material und Methode

2.1 Lösungen/Produkte

Im Folgenden wird die Herstellung der für die Versuche benötigten Lösungen beschrieben. Die In-vitro-Studie wurde in zwei Versuchsreihen durchgeführt.

Demineralisationslösung

Für die Herstellung der 0,5%-igen Zitronensäure wurden 5 g Zitronensäuremonohydrat ($C_6H_8O_7 \times H_2O$) (Chem. 1) in 1 Liter destilliertem Wasser gelöst. Die Lösung wurde für jeden Versuchstag neu angesetzt. Die Überprüfung des pH-Wertes erfolgte während des Versuchs täglich morgens und abends mit einer ionensensitiven pH-Elektrode (Mat. 1) bei Raumtemperatur. Der pH-Wert der frisch angesetzten Lösung lag bei 2,4.

Remineralisationslösung

Die Remineralisationslösung wurde nach Vorgabe des Rezeptes von Gerrard und Winter (1986) angesetzt, indem 0,4 g Orthophosphorsäure (H_3PO_4) (Chem. 2) in 40 ml destilliertem Wasser, 1,5 g Kaliumchlorid (KCL) (Chem. 3) in 100 ml destilliertem Wasser und 1 g Natriumbicarbonat ($NaHCO_3$) (Chem. 4) in 100 ml destilliertem Wasser gelöst wurden. Im Anschluss wurden die Lösungen zusammengegeben und bis zu 600 ml mit destilliertem Wasser ergänzt. Nachfolgend wurden 0,2 g Kalziumchlorid ($CaCl_2$) (Chem. 5) in 100 ml destilliertem Wasser gelöst und unter Rühren hinzugegeben. Der Ansatz wurde mit destilliertem Wasser zu einem Volumen von 1 Liter ergänzt.

Testprodukte

Für jede Versuchsreihe wurden sieben verblindete Testprodukte, darunter eine Placebopaste, zugestellt.¹ Erst nach Abschluss der Versuchsdurchführung und anschließender Auswertung wurden die Produkte entblindet.

Alle experimentellen Zahnpasten enthielten als Basisformulierung 1400 ppm Fluorid (700 ppm AmF und 700 ppm NaF) und 3500 ppm Zinn ($SnCl_2$) sowie 2% hochabrasive Silica (SiO_2) und 0,7% Aluminiumoxid (Al_2O_3). Niedrigabrasive Silica (SiO_2) wurde folgendermaßen variiert: 0, 5, 10, 15 und 20% Silica, oder 20% Polyethylen anstatt Silica.

¹ Die Testprodukte wurden von GABA International AG (Therwil, Schweiz) zur Verfügung gestellt und mit freundlicher Genehmigung verwendet.

Die Testprodukte der zweiten Versuchsreihe enthielten zusätzlich 0,5% Chitosan bei ansonsten gleicher Formulierung. Die Placebopaste enthielt 2% hochabrasive Silica, 0,7% Aluminiumoxid und 20% niedrigabrasive Silica, allerdings keine Wirkstoffe. Alle übrigen Bestandteile der Formulierung blieben weitestgehend konstant, wodurch die Viskosität der Zahnpasten bedeutend variieren konnte. Durch den konstanten Gehalt hochabrasiver Putzkörper sollte die Abrasion der Testpasten nur unwesentlich variieren (RDA:56-81).²

Die Testpasten wurden täglich morgens frisch zu einer Slurry zubereitet. Dazu wurden Zahnpaste und Remineralisationslösung im Verhältnis von 1:3 sorgfältig mit einem Magnetrührer gemischt. Die Zahnpaste ließ sich nach und nach in kleinen Portionen homogen auflösen. Der pH-Wert der Slurries wurde am Anfang des Versuchs einmalig bestimmt (Tab. 1).

Tab. 1: pH-Werte der Slurries. In beiden Versuchsreihen (V1 ohne Chitosan; V2 mit Chitosan) wurden die pH-Werte zu Beginn des Experiments bestimmt.

	Placebo	0% Silica	5% Silica	10% Silica	15% Silica	20% Silica	20% Polyethylen
V1 (ohne Chitosan)	pH 6,89	pH 5,37	pH 5,23	pH 5,31	pH 5,25	pH 5,21	pH 5,28
V2 (mit Chitosan)	pH 6,92	pH 5,46	pH 5,26	pH 5,27	pH 5,21	pH 5,17	pH 5,28

² Die Bestimmung des RDA-Wertes wurde im Oral Health Research Institute, Indiana University School of Dentistry, 415 Lansing Street, Indianapolis, Indiana 46202-2876 nach Standardverfahren durchgeführt. Dazu wurden Dentinproben mit Neutronen bestrahlt, um radioaktives Phosphor zu erzeugen. Anschließend wurden die Proben mit Slurries der Testzahnpasten (25 g in 40 ml Wasser) gebürstet (1500 Striche, 150 g Auflagegewicht) und die Zählrate der gebrauchten Slurries relativ zum Referenzmaterial (10 g Ca₂P₂O₇ in 50 ml 0,5% Carboxymethylzellulose; RDA definitionsgemäß 100) bestimmt.

2.2 Probenherstellung

Ein positives Ethik-Votum für die Verwendung menschlicher Weisheitszähne liegt vor (Aktenzeichen 143/09).

Für die Versuchsdurchführung wurden Schmelzproben aus menschlichen, vollständig impaktierten dritten Molaren gewonnen. Die Zähne wurden unmittelbar nach Entfernung durch Osteotomie bis zur Weiterverarbeitung in einer wässrigen, gesättigten Thymollösung (Chem. 6) aufbewahrt, um ein Austrocknen zu verhindern und eine Desinfektion zu gewährleisten. Nur kariesfreie Zähne mit einer homogenen Schmelzoberfläche wurden verwendet.

Zunächst wurden die den Zähnen anhaftenden Weichgewebsreste mit einem Einmalskalpell (Mat. 2) entfernt und die Wurzeln abgetrennt. Hierfür wurden die Zähne mit der Okklusalfäche mit lichthärtendem Kunststoff (Mat. 3) und einer Polymerisationslampe (Mat. 4) auf Plexiglasobjektträgern fixiert. Das Abtrennen der Wurzeln erfolgte knapp unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze mit einer diamantierten Bandsäge (Mat. 5) bei konstanter Sägeschwindigkeit (Stufe 5, ca. 20 m/min) und einer Belastung des Schlittens von 50 g. Die verbliebenen Zahnkronen wurden von der Kunststoffschicht befreit und für weitere Schnitte an den Glattflächen erneut mit lichthärtendem Kunststoff (Mat. 3) auf die Plexiglasobjektträger geklebt. Im Idealfall ließen sich mit Hilfe der Bandsäge (Mat. 5) bis zu vier longitudinale Schmelzschnitte von etwa 1 mm Dicke präparieren (Abb. 1 und 2).

Anschließend wurden die Schmelzschnitte mit der dem Dentin zugewandten Seite mit lichthärtendem Kunststoff auf den Objektträgern fixiert. Die äußere natürliche Oberfläche der Schmelzproben wurde mit Diamantschleifscheiben der Körnung 30 und 15 μm plangeschliffen (Mat. 6 und 7), sodass eine Versuchsoberfläche von mindestens 3 mm x 3 mm entstand. Der Abtrag betrug 200 – 300 μm . Das Versuchsfeld jeder Schmelzprobe wurde mit Diamantschleifpapier der Körnung 3 μm (Mat. 8) einheitlich poliert. Alle Trenn- und Schleifprozeduren wurden unter ausreichender Wasserkühlung durchgeführt. Die Oberflächen der Schmelzproben wurden unter einem Auflichtmikroskop (Mat. 9) auf Unversehrtheit und exponierte Dentinareale hin überprüft. Anschließend wurden die Schmelzproben vorsichtig mit einem Einmalskalpell (Mat. 2) von den Objektträgern gelöst und in kleinen, mit Wasser gefüllten Kunststoffbehältern aufbewahrt.

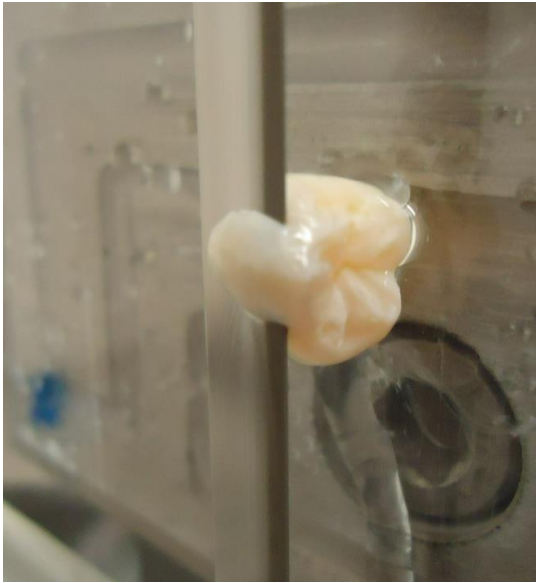


Abb. 1: Präparation eines Schmelzschnittes von etwa 1 mm Dicke

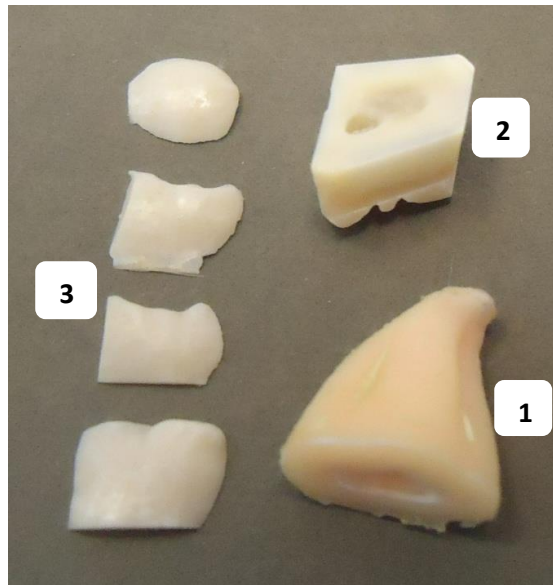


Abb. 2: Trennung des Zahnes in Wurzel (1) und Krone (2) sowie Präparation von vier longitudinalen Schmelzschnitten (3)

Insgesamt wurden 450 Schmelzproben, 225 für jede Versuchsreihe, präpariert und in beiden Versuchsreihen auf jeweils 15 Gruppen (sieben Slurry+Bürst-Gruppen, eine Negativkontrollgruppe und sieben Slurry-Gruppen) aufgeteilt ($n = 15$ pro Gruppe). Nachdem die Größe der Schmelzproben mit einer Trennscheibe (Mat. 10) angepasst wurde, erfolgte das Fixieren der Schmelzproben mit lichthärtendem Kunststoff (Mat. 3) auf Probenträgern (Mat. 11; Abb. 3) für den Bürstsimulator (Mat. 12; Abb. 4).

Die Probenträger wurden zuvor auf Schleifpapier manuell plan geschliffen und mit einem wasserfesten Stift markiert (1A, 1B, 1C, 2A etc.). Das Bürstareal wurde mit Bleistift eingezeichnet. Eine Punktmarkierung an der Stirnseite diente einer erleichterten Positionierung im Bürstsimulator. Bei der Fixierung der Schmelzproben auf den Probenträgern wurde darauf geachtet, dass die koronale Seite zentral innerhalb der Bleistiftmarkierung lag, die zervikale Seite war zum Rand des Probenträgers ausgerichtet. Die zervikale Hälfte der polierten Probenoberflächen wurde mit lichthärtendem Kunststoff (Mat. 3) abgedeckt, um die Probenoberfläche in eine Referenz- (= mit Kunststoff abgedeckte Fläche) sowie eine Versuchsoberfläche (= freigebliebene Fläche)

zu teilen (Abb. 3). Die fixierten Proben wurden einmalig mit Ethanol 70% und Watterollen gereinigt.

Das nicht abgedeckte Areal, die Versuchsfläche, wurde sorgfältig auf Verunreinigungen bzw. Fremdpartikel kontrolliert. Die Probenträger mit den fertigen Schmelzproben wurden bis zur weiteren Verwendung in einer feuchten Kammer bei 100% Luftfeuchtigkeit im Kühlschrank aufbewahrt. Hierfür kleidete ein feuchtes, zweilagiges, mit Thymolpulver beschicktes Zellstofftuch den Boden der Kammer aus.

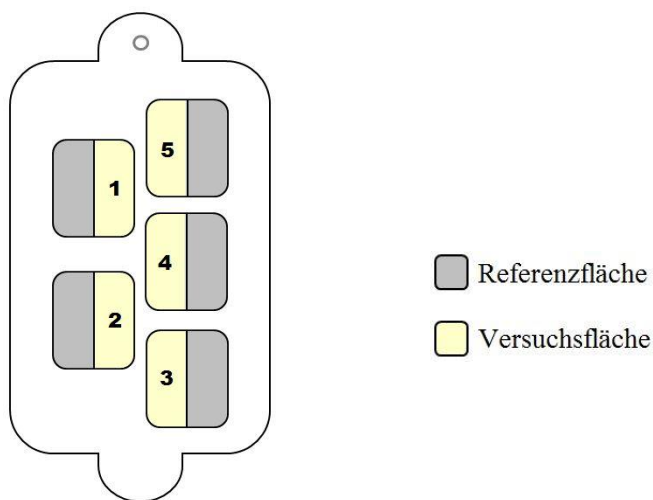


Abb. 3: Probenträger für den Bürstsimulator. Die Probenträger wurden seitlich markiert (A, B, C, usw.), die Schmelzproben wurden bei der Auswertung anhand ihrer Position (Probenträger A = 1 – 5, B = 6 – 10, usw.) dargestellt.

2.3 Versuchsdurchführung

Beide Versuchsreihen wurden jeweils in einem Zeitraum von zehn Tagen (2 x 5 Wochentagen) durchgeführt.

Die Probenträger aller Gruppen wurden in markierte Kunststoffhalterungen gesetzt. Mit Hilfe dieser Kunststoffhalterungen konnten alle Proben einer Gruppe problemlos und gleichzeitig in die Re- und Demineralisationslösung umgesetzt werden.

Die Re- und Demineralisationslösung sowie die Slurries wurden jeden Tag vor Versuchsbeginn frisch angesetzt und in die vorgesehenen Färbegefäße gefüllt. Die Hälfte der jeweiligen Slurry wurde für den ersten Durchgang des Versuchstags genutzt, die andere Hälfte diente dem letzten Durchgang und wurde kurz vor Durchführung erneut mit Magnetrührern vermischt. Die erosive Demineralisation wurde ebenso wie das Bürsten und die Behandlung mit Slurry bei Raumtemperatur durchgeführt, die Remineralisation erfolgte temperiert bei 25° C. Alle Zeiten wurden mit Hilfe einer digitalen Stoppuhr genau eingehalten.

Die erosive Demineralisation erfolgte täglich für 6 x 2 Minuten in 250 ml 0,5%-iger Zitronensäure und wurde jeweils in einem Abstand von einer Stunde durchgeführt. Die Färbekästen mit Zitronensäure befanden sich dabei auf einer Schwenkplatte (Mat. 13), um eine optimale Umspülung der Schmelzproben zu gewährleisten. Die Schwenkplatte wurde hierfür auf 35 Pendelbewegungen pro Minute eingestellt. Nach jeder Demineralisation wurden alle Proben für 30 Sekunden unter fließendem Wasser abgespült, um Säurerückstände auszuschließen.

Die Proben der Gruppen 1 – 7 wurden im Anschluss an die erste und letzte erosive Demineralisation eines Versuchstages für 2 Minuten mit der jeweiligen Slurry behandelt und für 15 Sekunden mit einer Referenzzahnbürste der American Dental Association (ADA) (Mat. 14) im Bürstsimulator gebürstet (Abb. 4 und 5). Die ADA-Referenzzahnbürsten besaßen ein planes 27 mm x 10 mm großes Borstenfeld mit einem Borstendurchmesser von 0,2 mm. Es wurde der Verfahrensweg sechs mit Zick-Zack-Modus mit einer Geschwindigkeit von 60 mm/s sowie einem Auflagegewicht von 200 g gewählt. Die Proben der Gruppe 8 (Negativ-Kontrollgruppe) wurden nur erodiert und unmittelbar nach dem Abspülen mit Wasser in die Remineralisationslösung zurückgesetzt. Die Schmelzproben der Gruppen 9 – 15 wurden ebenfalls der Slurry ausgesetzt, aber nicht

gebürstet. Nach der Bürstsimulation bzw. der Behandlung mit Slurry wurden die Schmelzproben erneut für 1 Minute unter fließendem Wasser abgespült. Nach Kontrolle der mit Kunststoff bedeckten Referenzflächen aller Proben wurden diese in die Remineralisationslösung zurückgesetzt.

Um ein problemloses Einsetzen und Entnehmen aus den mit Slurry gefüllten Gefäßen des Bürstsimmers zu gewährleisten, erfolgte das Umsetzen der Probenträger mit Hilfe einer chirurgischen Pinzette. Beim zweiten Bürstvorgang eines Versuchstages wurden die Probenträger um 180° gedreht in den Bürstsimulator eingesetzt, um ein gleichmäßiges Bürsten zu gewährleisten.

Am Wochenende verblieben die Probenträger mit den Schmelzproben bei 100% Luftfeuchtigkeit im Kühlschrank.

Nach Durchführung des letzten Versuchstages wurde bei allen Schmelzproben die Kunststoffabdeckung der Referenzfläche entfernt. Dabei wurde mit einem Einmalskalpell (Mat. 2) vorsichtig der Grenzbereich zwischen Probenträger und aufgebrachtem Kunststoff gelöst. Noch eventuell anhaftende Kunststoffteilchen wurden ebenso vorsichtig und sorgfältig entfernt und alle Schmelzproben auf Unversehrtheit überprüft. Bis zur profilometrischen Auswertung wurden alle Probenträger in einer feuchten Kammer bei 100% Luftfeuchtigkeit im Kühlschrank aufbewahrt.



Abb. 4: Bürstsimulator

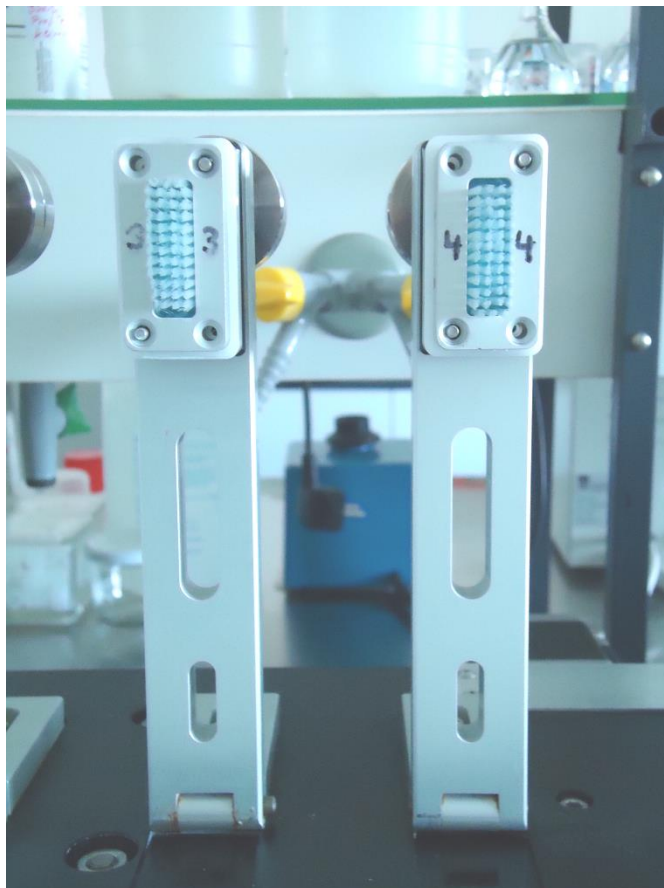


Abb. 5: Referenzzahnbürsten im Bürstsimulator

2.4 Profilometrie

Zur Messung des Substanzverlustes jeder Probe wurde das optische, berührungslose Profilometer MicroProf (Mat. 15) verwendet. Der integrierte Weißlicht-Sensor FRT CWL arbeitet hierbei nach dem Prinzip der chromatischen Abstandsmessung. Weißlicht (LED) wird auf die Probenoberfläche fokussiert. Aus der spektralen Verteilung des an der Oberfläche reflektierten Lichtes wird der Abstand zwischen Probenoberfläche und Sensor bestimmt. Die vertikale Auflösung beträgt dabei 10 nm mit einem lateralen Auflösungsvermögen von 1 – 2 μm . Der maximale Höhenmessbereich liegt bei 300 μm .

Die Messungen erfolgten unter Umgebungsbedingungen. Das System war vor jeder Messung nach Herstellerangaben zu kalibrieren. Um ein Austrocknen der Schmelzproben zu verhindern, wurde jeweils ein Probenträger zur Zeit aus der feuchten Kammer entnommen, vorsichtig mit einem Luftpüster von Wasserperlen auf der Oberfläche befreit und unmittelbar nach der Messung in die feuchte Kammer zurückgesetzt. Pro Probe wurden drei Profilschriebe in einem jeweiligen Abstand von 0,2 mm aufgezeichnet (Abb. 6). Die Messstrecke wurde mit 2 mm bei 200 Messpunkten angegeben. Die Messrate betrug 32 Hz.

Die Auswertung der Profilschriebe erfolgte mit der dazugehörigen Auswertungs-Software FRT Mark III (Mat. 16). Hierfür musste der aufgezeichnete Profilschrieb zunächst ausgerichtet werden. Auf der Referenzfläche wurde eine Ausgleichsgerade von 0,5 mm Länge festgelegt, mit Hilfe derer der Profilschrieb in einem x-y-Koordinatensystem angeordnet werden konnte. Im Anschluss wurde auf der Versuchsfläche eine zweite, parallele Ausgleichsgerade von 0,5 mm Länge festgelegt. Der vertikale Abstand der beiden Ausgleichsgeraden entsprach dem Substanzverlust und wurde in μm beschrieben (Abb. 7). Für jede Probe wurde der Substanzverlust als Mittelwert aus den drei Profilschrieben angegeben.

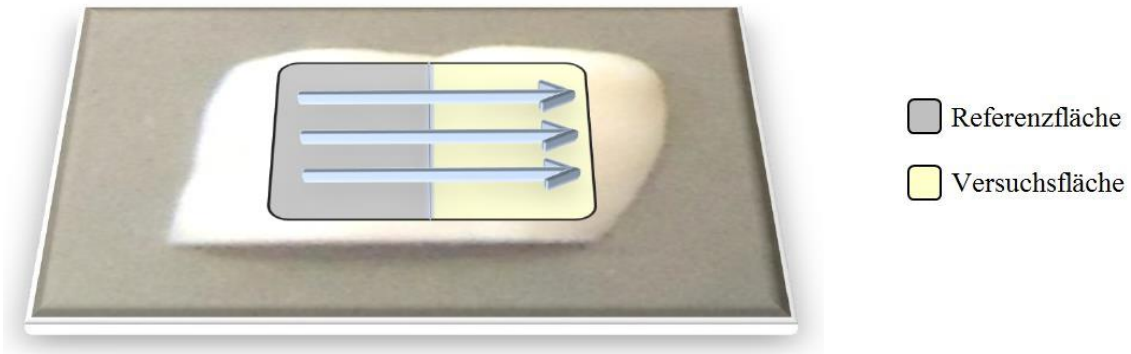


Abb. 6: Messfläche einer Schmelzprobe. Je Probe wurden drei Profilschriebe in einem jeweiligen Abstand von 0,2 mm gemessen.

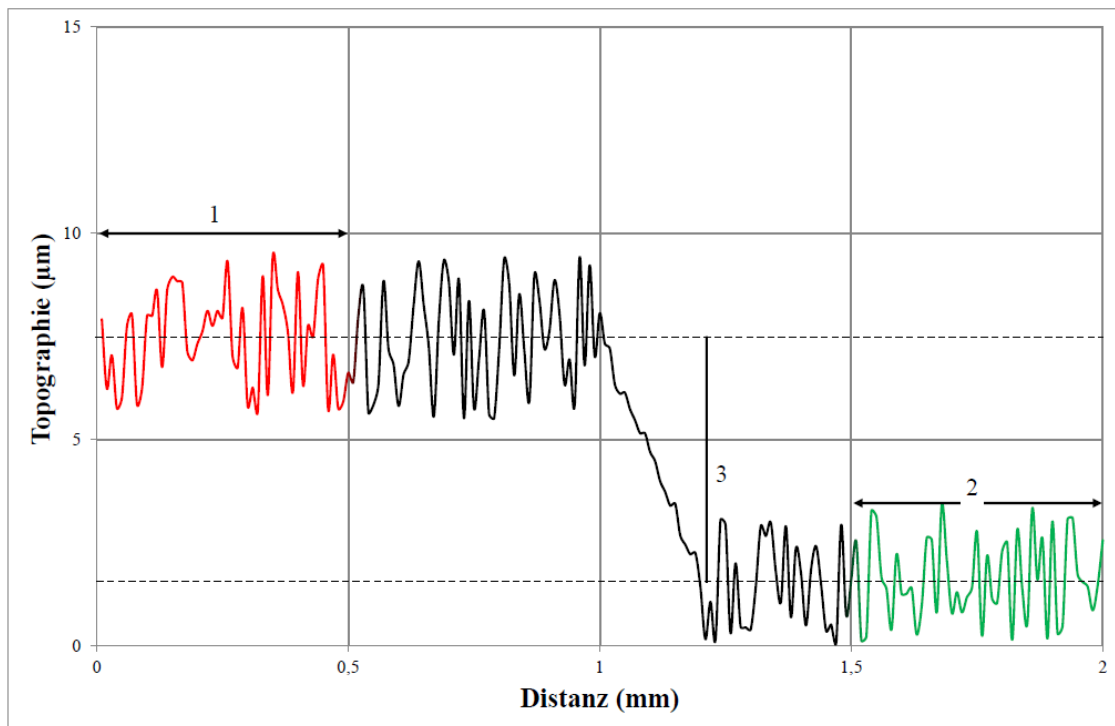


Abb. 7: Schematische Darstellung eines ausgewerteten Profilschriebs. 1 = Referenzfläche (rot dargestellt), 2 = Versuchsfläche (grün dargestellt), 3 = Abstand der beiden Ausgleichsgeraden (gestrichelte Linien) entspricht dem Substanzverlust der Probe in µm.

2.5 Statistik

Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit Statistical Package for Social Science (SPSS) Version 17.0 (SPSS GmbH, München, Deutschland) für Windows. Alle Daten wurden mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test im Hinblick auf eine Abweichung von der Gauss-Verteilung sowie Varianzhomogenität überprüft. Für den Vergleich des Substanzverlustes unter den jeweiligen Gruppen wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Anschlussstest nach Tukey oder Tamhane durchgeführt. Die Daten der Slurry-Bürst-Gruppen (im Folgenden SB-Gruppen genannt) aus der ersten und zweiten Versuchsreihe (V1; V2) wiesen eine Varianzhomogenität auf. Hier wurde das Verfahren nach Tukey (Tukey-HDS) gewählt. Bei den Daten der Slurry-Gruppen (im Folgenden S-Gruppen genannt) (V1; V2) lag keine Varianzhomogenität vor. Es wurde somit der Tamhane-T2 Test durchgeführt.

Der Vergleich der beiden Versuchsreihen miteinander erfolgte mit dem t-Test für unabhängige Stichproben. Das Signifikanzniveau wurde dabei auf $p \leq 0,05$ festgesetzt.

Zur graphischen Darstellung der Ergebnisse wurden Box-and-Whisker-Plots (Abb. 8) verwendet.

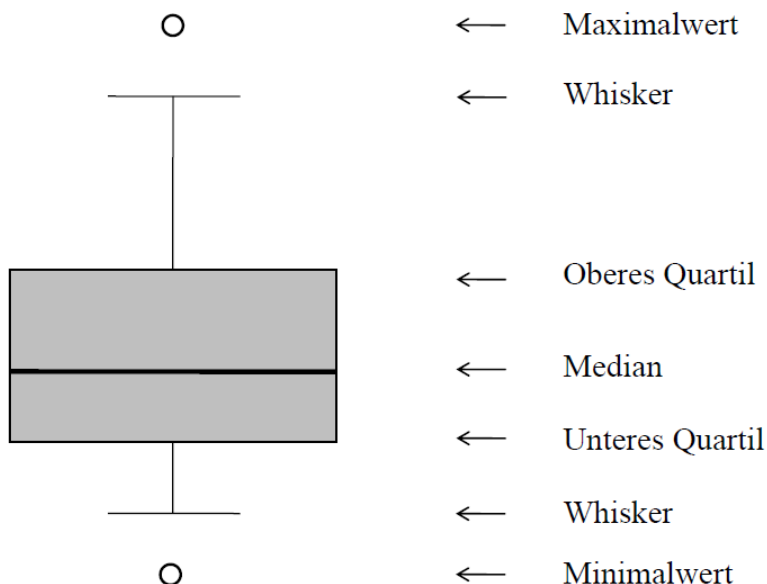
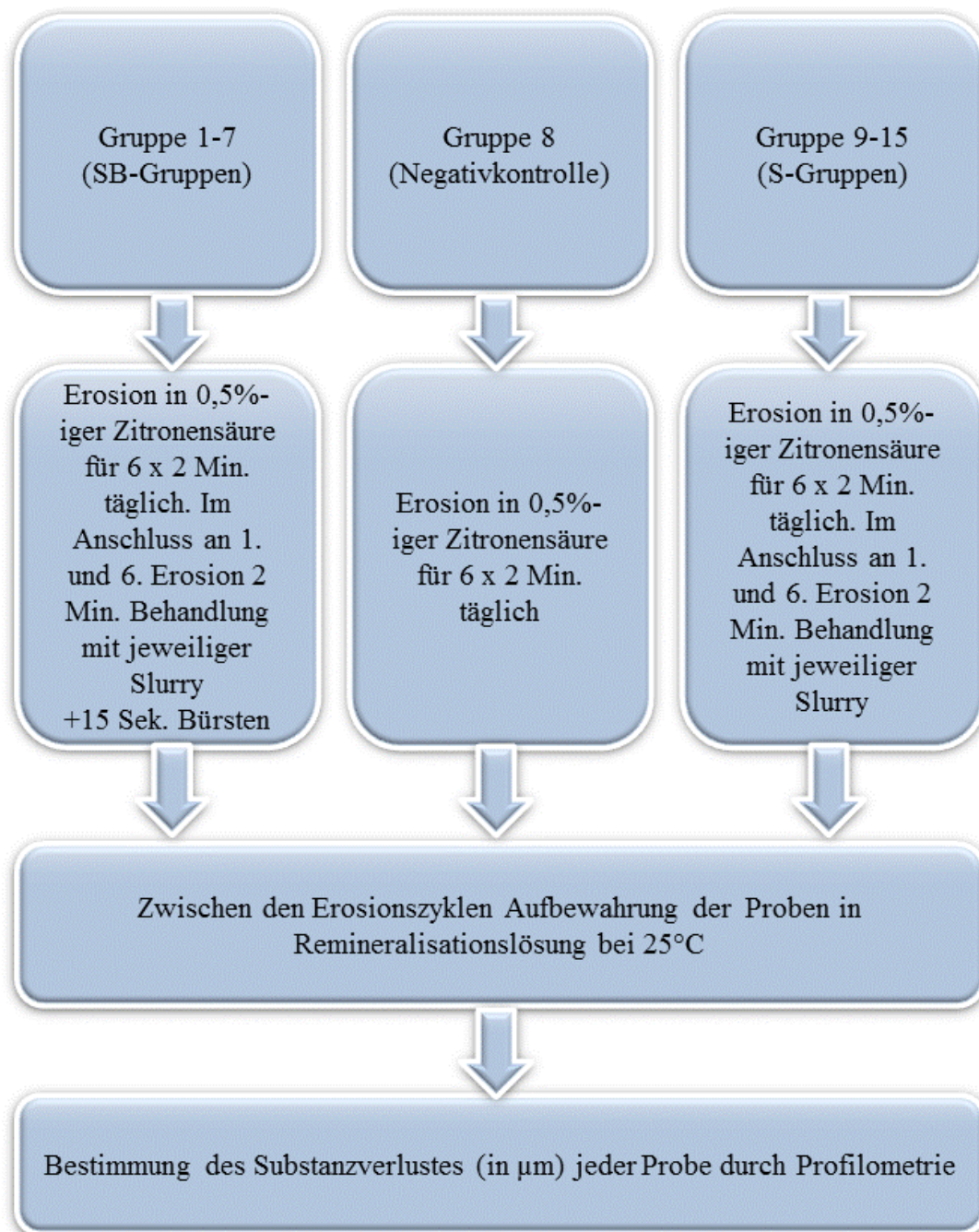


Abb. 8: Schema eines Box-and-Whisker-Plots (OriginPro Version 9.1G, OriginLab Corporation, Northampton, USA)

Bei der Darstellung der Ergebnisse gelten folgende Abkürzungen:

n	=	Anzahl der Messwerte
\bar{x}	=	arithmetischer Mittelwert
s	=	Standardabweichung
MIN	=	Minimalwert
MAX	=	Maximalwert
p	=	Irrtumswahrscheinlichkeit
n.s.	=	nicht signifikant
*	=	signifikant ($p < 0,05$)
**	=	hoch signifikant ($p < 0,01$)
***	=	höchst signifikant ($p < 0,001$)

2.6 Schematische Übersicht des Versuchsablaufs



2.7 Materialien- und Chemiekalienliste

2.7.1 Materialien

- Mat. 1: pH-Meter 761 Calimatic
 Knick, Berlin, Deutschland
- Mat. 2: Einmalskalpell, Feather disposable Scalpel No. 15
 Feather Safety Razor Co, Osaka, Japan
- Mat. 3: Lichthärtender Kunststoff, Technovit 7230 VLC
 Heraeus Kulzer GmbH, Wehrheim, Deutschland
- Mat. 4: Polymerisationslichtgerät Translux CL
 Heraeus Kulzer GmbH, Wehrheim, Deutschland
- Mat. 5: Exact Trennschleifsystem
 Exakt Apparatebau, Norderstedt, Deutschland
- Mat. 6: Diamantschleifscheiben der Körnung 30 μm und 15 μm
 Bühler GmbH, Düsseldorf, Deutschland
- Mat. 7: Exact Mikroschleifsystem
 Exakt Apparatebau, Norderstedt, Deutschland
- Mat. 8: Diamantschleifscheiben der Körnung 3 μm
 Bühler GmbH, Düsseldorf, Deutschland
- Mat. 9: Auflichtmikroskop Nikon SMZ-2T
 Nikon, Tokyo, Japan
- Mat. 10: COWA Trennscheibe Metall
 Plura Dent, Offenbach, Deutschland
- Mat. 11: Kunststoff-Probenräger für Zahnbürst-Simulator ZM-3
 SD Mechatronic GmbH, Feldkirchen-Westerham, Deutschland
- Mat. 12: Zahnbürst-Simulator ZM-3
 SD Mechatronic GmbH, Feldkirchen-Westerham, Deutschland

- Mat. 13: Schwenkplatte 3306
GFL, Burgwedel, Deutschland
- Mat. 14: ADA Referenzzahnbürste
ADA American Dental Association, Chicago, USA
- Mat. 15: Optisches Profilometer MicroProf
Fries Research&Technology GmbH, Bergisch-Gladbach, Deutschland
- Mat. 16: Auswertungs-Software, „FRT Mark III“, Version 3.9.2.2
Fries Research&Technology, Bergisch- Gladbach, Deutschland

2.7.2 Chemikalien

- Chem.1: Zitronensäure-Monohydrat, Art.-Nr. 3958.1
Carl Roth GmbH, Karlsruhe, Deutschland
- Chem. 2: Orthophosphorsäure 99% , Art.Nr. K41230365 037
Merck, Darmstadt, Deutschland
- Chem. 3: Kaliumchlorid reinst., Art.-Nr. 12636-250G
Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Steinheim, Deutschland
- Chem. 4: Natriumbicarbonat, Art.-Nr. K41326329 046
Merck, Darmstadt, Deutschland
- Chem. 5: Kalziumchlorid, Art.-Nr. 2388
Merck, Darmstadt, Deutschland
- Chem. 6: Thymol Pulver, Art.-Nr. T0501-100G
Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Steinheim, Deutschland

3 Ergebnisse

3.1 Allgemeines

Von 450 Schmelzproben konnte eine Probe der zweiten Versuchsreihe (S-Gruppe: 10% Silica) aufgrund einer Beschädigung beim Entfernen des Referenzareals nicht ausgewertet werden. Nach Durchführung der beiden Versuchsreihen zeigten alle Schmelzproben makroskopische Veränderungen. Die erodierte/abradierte Versuchsfläche war deutlich von der polierten Referenzfläche zu unterscheiden und erschien kreidig matt. An der Grenzlinie zwischen Versuchs- und Referenzfläche war bei vielen Proben eine Stufenbildung erkennbar.

Eine Übersicht der ermittelten Werte des Substanzverlustes findet sich in der folgenden Tabelle 2:

3 Ergebnisse

Tab. 2: Substanzverlust (μm) nach Erosion in 0,5%-iger Zitronensäure für 6 x 2 Min. täglich und Einwirkung von Slurry für 2 x 2 Min. täglich oder zusätzlichem Bürsten für 2 x 15 Sek. täglich innerhalb der Einwirkungszeit (n = 15 pro Gruppe)

		Versuchsreihe 1 ohne Chitosan		Versuchsreihe 2 mit Chitosan	
Negativ- kontrolle	\bar{x}	11,7		11,0	
	s	3,2		2,5	
	MIN	7,4		7,7	
	MAX	17,5		17,4	
		Slurry+ Bürsten	Slurry	Slurry+ Bürsten	Slurry
Placebo	\bar{x}	13,2	9,6	14,7	9,1
	s	3,9	2,3	1,8	2,6
	MIN	6,7	6,2	11,1	4,0
	MAX	22,6	16,3	18,8	13,6
0% Silica	\bar{x}	6,1	2,1	3,1	2,0
	s	3,3	1,5	1,5	1,0
	MIN	1,2	-1,3	0,6	0,5
	MAX	14,5	6,0	7,0	4,6
5% Silica	\bar{x}	11,5	1,7	4,2	1,9
	s	2,3	1,7	2,0	0,6
	MIN	7,7	-1,8	0,6	0,3
	MAX	16,7	6,1	9,6	3,8
10% Silica	\bar{x}	10,3	2,8	7,7	1,8
	s	3,3	1,4	1,6	1,4
	MIN	4,0	0,3	4,4	-0,5
	MAX	16,9	6,5	11,1	5,6
15% Silica	\bar{x}	7,9	2,1	5,6	1,3
	s	3,1	1,4	1,2	2,0
	MIN	2,7	-0,4	3,8	-2,2
	MAX	15,1	6,2	8,8	8,2
20% Silica	\bar{x}	8,6	2,8	4,0	-1,1
	s	3,9	1,5	1,6	3,0
	MIN	2,6	0,0	0,8	-8,1
	MAX	17,7	6,3	7,4	15,0
20% Polyethylen	\bar{x}	6,1	4,7	2,4	2,8
	s	2,8	2,0	1,0	1,8
	MIN	1,2	1,6	0,7	0,4
	MAX	13,4	10,0	5,2	9,7

3.2 Ergebnisse der ersten Versuchsreihe (ohne Chitosan)

Der höchste Substanzverlust wurde in der Placebo-Gruppe mit Bürstabrasion gemessen ($13,2 \pm 3,9 \mu\text{m}$). Der Substanzverlust der Placebo-Gruppe ohne Bürstabrasion betrug $9,6 \pm 2,3 \mu\text{m}$ (Abb. 9a und Tab. 2).

Im Vergleich zur Placebo-Gruppe mit Bürstabrasion zeigten alle SB-Gruppen, mit Ausnahme der Formulierungen mit 5% und 10% Silica, eine signifikante Reduktion des Substanzverlustes von 35 – 54% (Abb. 9a und Tab. 2 + 3a). Die S-Gruppen konnten den Substanzverlust im Vergleich zur Placebo-Gruppe ohne Bürstabrasion signifikant um 51 – 82% vermindern (Abb. 9a und Tab. 2 + 3b).

Der Vergleich zwischen SB- und S-Gruppen zeigte deutliche Unterschiede in der Höhe des Substanzverlustes. Gegenüber der Applikation der Slurries erhöhte die zusätzliche Bürstabrasion den Substanzverlust um 23 – 85% (Abb. 9a und Tab. 2).

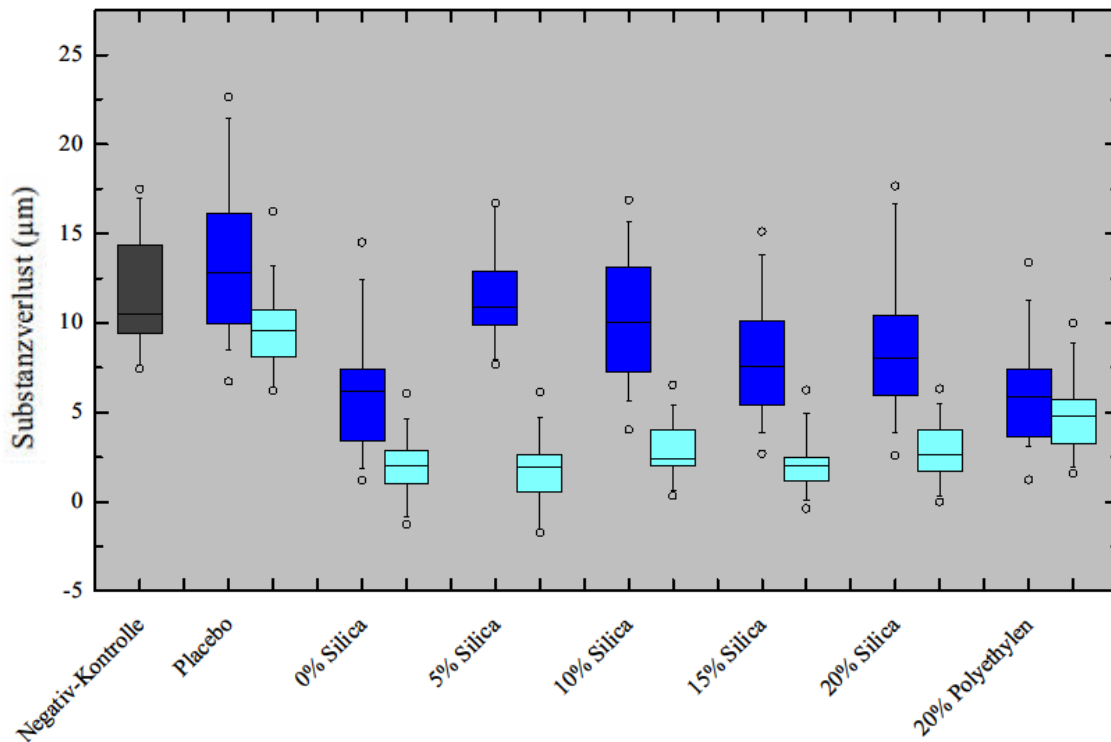


Abb. 9a: Substanzverlust (μm , $\bar{x} \pm s$) nach Erosion in 0,5%-iger Zitronensäure für 6 x 2 Min. täglich und Einwirkung von Slurry für 2 x 2 Min. täglich mit (dunkelblau) oder ohne (hellblau) Bürstabrasion

Der Substanzverlust der **SB-Gruppen** verhielt sich nicht proportional zum Silica-Gehalt. Es waren keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den SB-Gruppen mit 5% – 20% Silica feststellbar (Abb. 9b und Tab. 3a).

Im Vergleich zur Formulierung mit 0% Silica zeigten die Formulierungen mit 5% und 10% Silica einen signifikant höheren Substanzverlust (Abb. 9b und Tab. 3a).

Die Verwendung der Formulierung mit 20% Polyethylen zeigte im Vergleich zur Formulierung mit 20% Silica keinen signifikanten Unterschied (Tab. 3a).

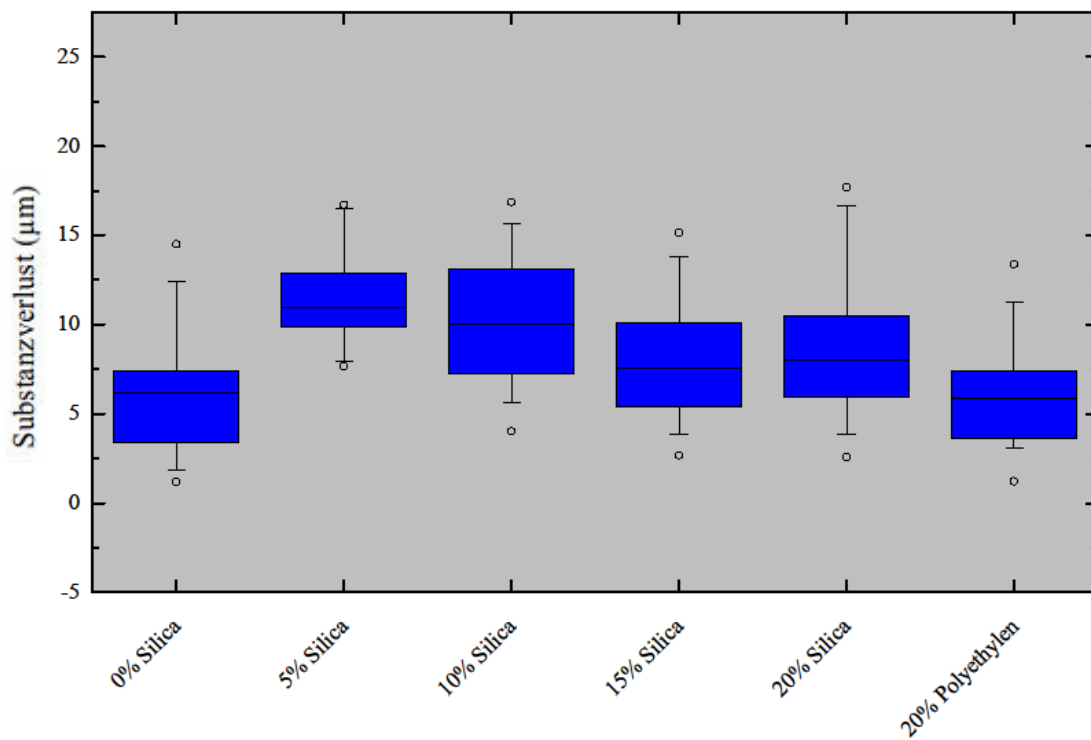


Abb. 9b: Substanzverlust (μm , $\bar{X} \pm s$) der SB-Gruppen ohne Chitosan in Abhängigkeit vom Abrasiva-Gehalt

Tab. 3a Mehrfachvergleich: Vergleich der einzelnen **SB-Gruppen ohne Chitosan**. Es sind die Signifikanzklassen dargestellt (n.s. = nicht signifikantes Ergebnis, n = 15 pro Gruppe)

	Placebo	0% Silica	5% Silica	10% Silica	15% Silica	20% Silica	20% Polyethylen
Negativ-Kontrolle	n.s.	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	***
20% Polyethylen	***	n.s.	***	**	n.s.	n.s.	-
20% Silica	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-	
15% Silica	***	n.s.	n.s.	n.s.	-		
10% Silica	n.s.	**	n.s.	-			
5% Silica	n.s.	***	-				
0% Silica	***	-					

Zwischen den **S-Gruppen** mit 0% – 20% Silica war kein statistisch signifikanter Unterschied feststellbar (Abb. 9c und Tab. 3b).

Die Formulierung mit 20% Polyethylen zeigte einen signifikant höheren Substanzverlust im Vergleich zu den Formulierungen ohne Abrasiva, mit 5% und 15% Silica (Abb. 9c und Tab. 3b).

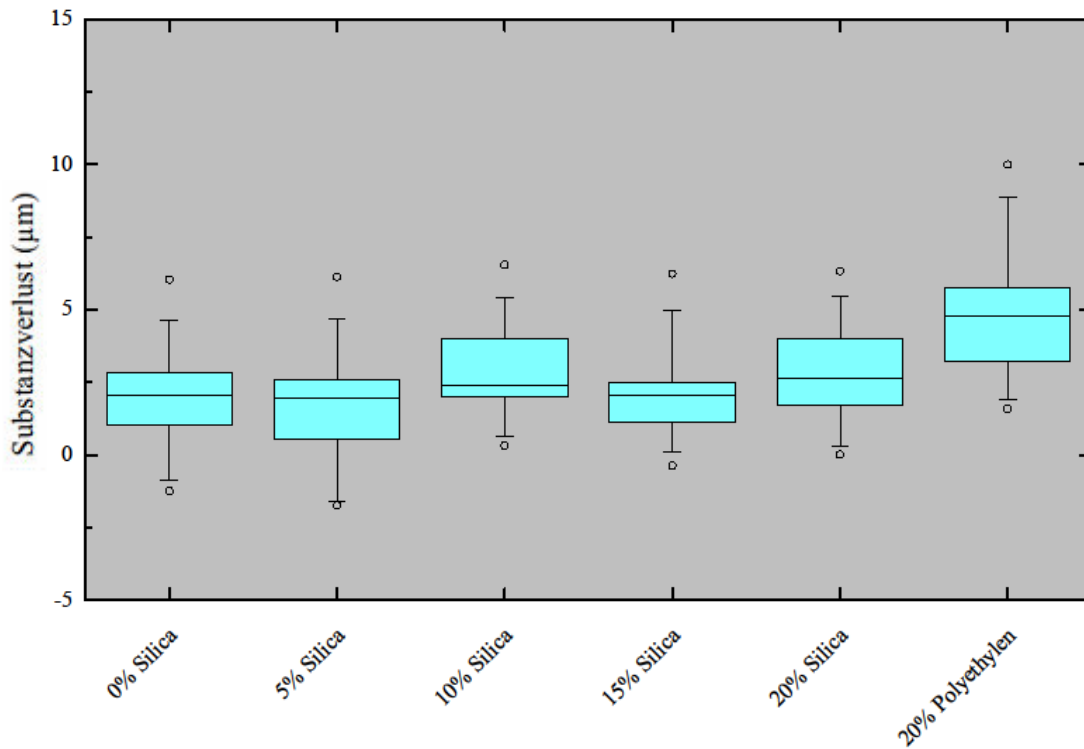


Abb. 9c: Substanzverlust (μm , $\bar{X} \pm s$) der S-Gruppen ohne Chitosan in Abhängigkeit vom Abrasiva-Gehalt

Tab. 3b Mehrfachvergleich: Vergleich der einzelnen **S-Gruppen ohne Chitosan**. Es sind die Signifikanzklassen dargestellt (n.s. = nicht signifikantes Ergebnis, n = 15 pro Gruppe)

	Placebo	0% Silica	5% Silica	10% Silica	15% Silica	20% Silica	20% Polyethylen
Negativ-Kontrolle	n.s.	***	***	***	***	***	***
20% Polyethylen	***	**	**	n.s.	**	n.s.	-
20% Silica	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-	
15% Silica	***	n.s.	n.s.	n.s.	-		
10% Silica	***	n.s.	n.s.	-			
5% Silica	***	n.s.	-				
0% Silica	***	-					

3.3 Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe (mit Chitosan)

Auch in der zweiten Versuchsreihe mit Chitosan wurde der höchste Substanzverlust in der Placebo-Gruppe mit Bürstabrasion ermittelt ($14,7 \pm 1,8 \mu\text{m}$). Der Substanzverlust der Placebo-Gruppe ohne Bürstabrasion betrug $9,1 \pm 2,6 \mu\text{m}$ (Abb. 10a und Tab. 2).

Die SB-Gruppen zeigten im Vergleich zur Placebo-Gruppe mit Bürstabrasion eine signifikante Reduktion des Substanzverlustes von 48 – 84% (Abb. 10a und Tab. 2 + 4a).

Die S-Gruppen konnten den Substanzverlust, verglichen mit der Placebo-Gruppe ohne Bürstabrasion, um 69% bis nahezu 100% mindern (Abb. 10a und Tab. 2 + 4b).

Im Vergleich zwischen SB- und S-Gruppen der zweiten Versuchsreihe waren ebenso deutliche Unterschiede in der Höhe des Substanzverlustes erkennbar. Die zusätzliche Bürstabrasion erhöhte den Substanzverlust bei den Formulierungen mit 0% bis 15% Silica um 35 – 77%. Die Formulierung mit 20% Silica zeigte ohne Bürstabrasion keinen Substanzverlust, sondern einen Substanzgewinn. Die Formulierung mit 20% Polyethylen zeigte bei Bürstabrasion einen geringeren Substanzverlust im Vergleich zur S-Gruppe (Abb. 10a und Tab. 2).

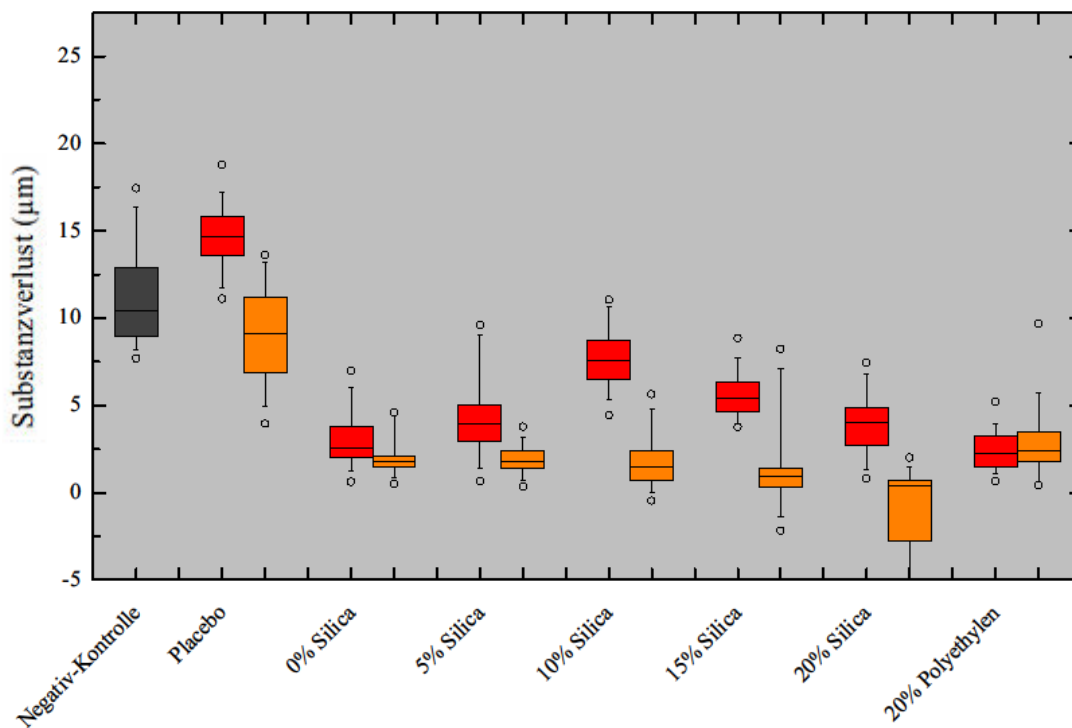


Abb. 10a: Substanzverlust (μm , $\bar{X} \pm s$) nach Erosion in 0,5%-iger Zitronensäure für 6 x 2 Min.

täglich und Einwirkung von Slurry für 2 x 2 Min. täglich mit (rot) oder ohne (orange) Bürstabrasion

Bei den **SB-Gruppen** bestand kein proportionaler Zusammenhang zwischen Substanzverlust und Silica-Gehalt. Mit zunehmendem Silica-Gehalt bis 10% nahm die Wirksamkeit der Formulierungen signifikant ab. Mit weiter steigendem Silica-Gehalt bis 20% nahm die Wirksamkeit wieder signifikant zu (Abb. 10b und Tab. 4a).

Die Formulierungen mit 0% Silica und mit Polyethylen zeigten die besten Ergebnisse und reduzierten den Substanzverlust im Vergleich zur SB-Placebo-Gruppe um 79% und 84% (Abb. 10b und Tab. 4a).

Die Verwendung der Formulierungen mit 0% Silica und 20% Polyethylen zeigten im Vergleich zur Formulierung mit 20% Silica keinen statistisch signifikanten Unterschied (Abb. 10b und Tab. 4a).

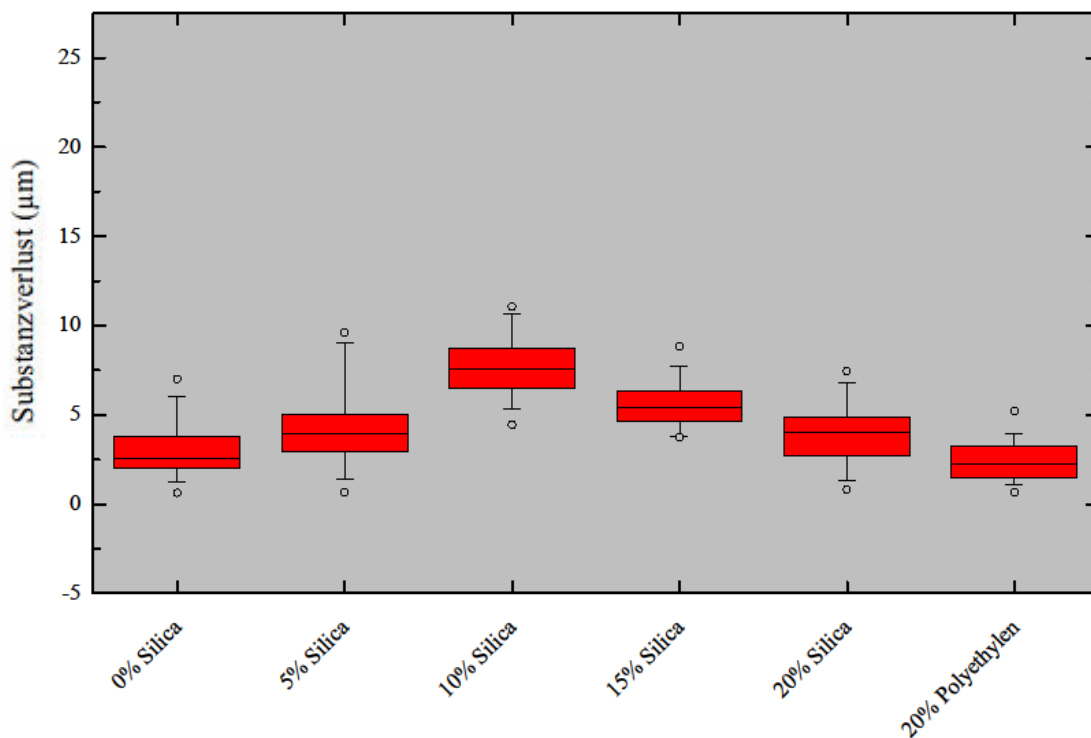


Abb. 10b: Substanzverlust (μm , $\bar{x} \pm s$) der SB-Gruppen mit Chitosan in Abhängigkeit vom Abrasiva-Gehalt

Tab. 4a Mehrfachvergleich: Vergleich der einzelnen **SB-Gruppen mit Chitosan**. Es sind die Signifikanzklassen dargestellt (n.s. = nicht signifikantes Ergebnis, n = 15 pro Gruppe)

	Placebo	0% Silica	5% Silica	10% Silica	15% Silica	20% Silica	20% Polyethylen
Negativ-Kontrolle	***	***	***	***	***	***	***
20% Polyethylen	***	n.s.	n.s.	***	***	n.s.	-
20% Silica	***	n.s.	n.s.	***	n.s.	-	
15% Silica	***	**	n.s.	**	-		
10% Silica	***	***	***	-			
5% Silica	***	n.s.	-				
0% Silica	***	-					

Bei den **S-Gruppen** wurde zwischen der Formulierung mit 20% Silica und der Formulierung mit 20% Polyethylen, mit 0% und 5% Silica ein signifikanter Unterschied ermittelt. Die Formulierung mit 20% Silica zeigte im Vergleich zu den übrigen S-Gruppen keinen Substanzverlust, sondern einen Substanzgewinn (Abb. 10c und Tab. 4b). Zwischen den weiteren Formulierungen war kein statistisch signifikanter Unterschied feststellbar (Abb. 10c und Tab. 4b).

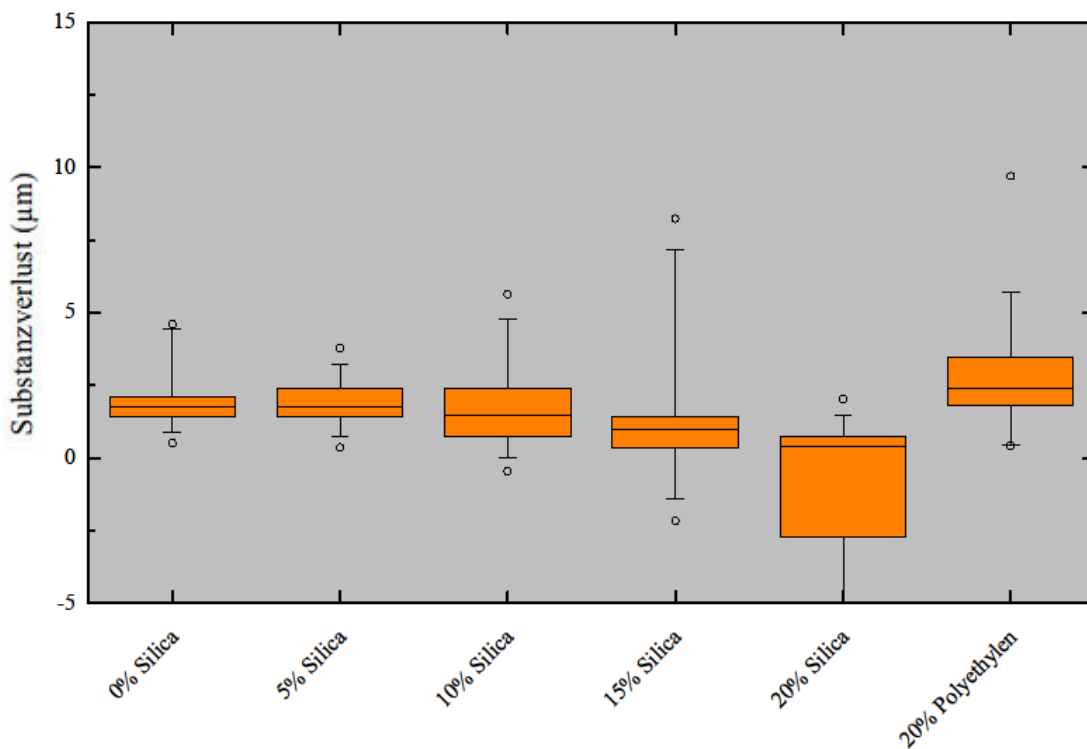


Abb. 10c: Substanzverlust (μm , $\bar{x} \pm s$) der S-Gruppen mit Chitosan in Abhängigkeit vom Abrasiva-Gehalt

Tab. 4b Mehrfachvergleich: Vergleich der einzelnen **S-Gruppen mit Chitosan**. Es sind die Signifikanzklassen dargestellt (n.s. = nicht signifikantes Ergebnis, n = 15 pro Gruppe)

	Placebo	0% Silica	5% Silica	10% Silica	15% Silica	20% Silica	20% Polyethylen
Negativ-Kontrolle	n.s.	***	***	***	***	***	***
20% Polyethylen	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	**	-
20% Silica	***	*	*	n.s.	n.s.	-	
15% Silica	***	n.s.	n.s.	n.s.	-		
10% Silica	***	n.s.	n.s.	-			
5% Silica	***	n.s.	-				
0% Silica	***	-					

3.4 Vergleich des Substanzverlustes zwischen erster und zweiter Versuchsreihe

Die Verwendung von Chitosan-haltigen Formulierungen konnte den durch Abrasion und Erosion bedingten Substanzverlust unabhängig von Art und Menge der Abrasiva deutlich reduzieren (Abb. 11a und Tab. 2 + 5a/b).

Bei Betrachtung der **SB-Gruppen** beider Versuchsreihen bewirkten die Chitosan-haltigen Formulierungen eine zusätzliche signifikante Reduktion des Substanzverlustes von 25 – 63% (Abb. 11a und Tab. 2 + 5a).

Besonders die Formulierung mit Chitosan und 5% Silica zeigte einen deutlichen Effekt und verminderte den Substanzverlust im Vergleich zur Formulierung ohne Chitosan um 63% (Abb. 11a und Tab. 2 + 5a).

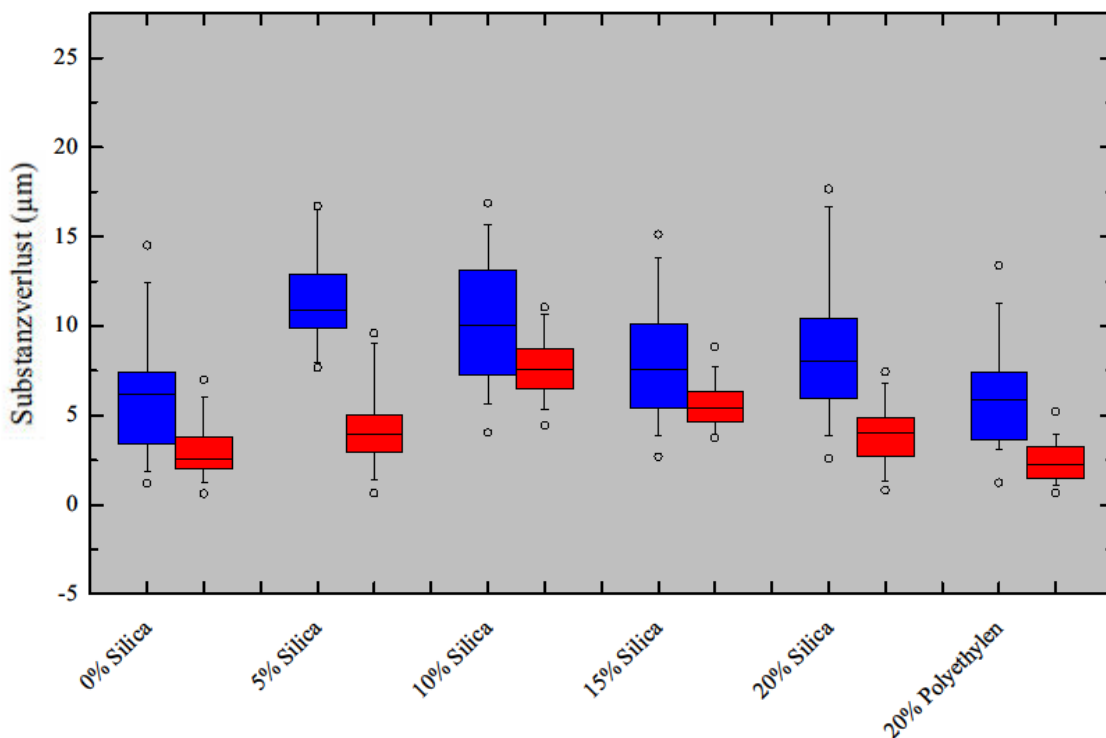


Abb. 11a: Vergleich des Substanzverlust (μm , $\bar{X} \pm s$) der SB-Gruppen von erster (ohne Chitosan, dunkelblau) und zweiter (mit Chitosan, rot) Versuchsreihe

Tab. 5a: Vergleich des Substanzverlustes in Abhängigkeit von Chitosan zwischen den **SB-Gruppen** aus Versuchsreihe 1 und 2 mit gleichem Abrasiva-Gehalt. Es sind die Signifikanzklassen dargestellt (n = 15 pro Gruppe)

Gruppe	Signifikanz
0% Silica	**
5% Silica	***
10% Silica	**
15% Silica	**
20% Silica	***
20% Polyethylen	***

Der Vergleich der **S-Gruppen** aus erster und zweiter Versuchsreihe zeigte bei den Formulierungen mit 20% Polyethylen, mit 20% und 10% Silica eine signifikante Reduktion des Substanzverlustes durch Chitosan-haltige Formulierungen.

Die übrigen Formulierungen wiesen keinen signifikanten Unterschied auf (Abb. 11b und Tab. 2 + 5b).

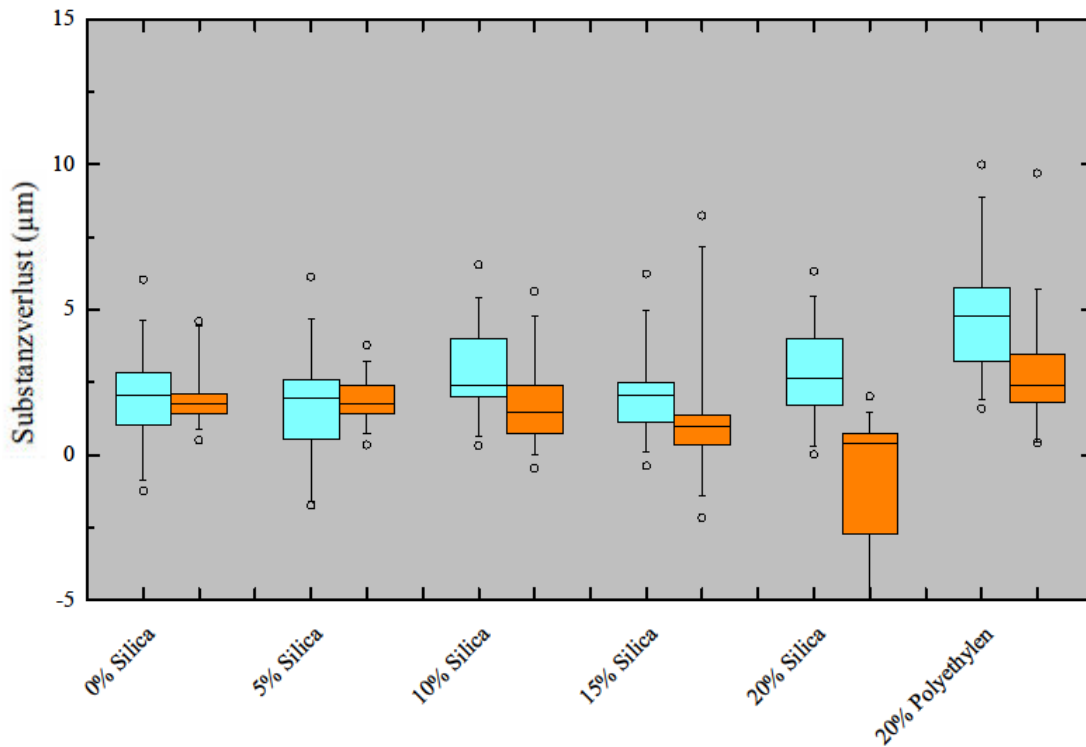


Abb. 11b: Vergleich des Substanzverlust (μm , $\bar{x} \pm s$) der S-Gruppen von erster (ohne Chitosan, hellblau) und zweiter (mit Chitosan, orange) Versuchsreihe

Tab. 5b: Vergleich des Substanzverlustes in Abhängigkeit von Chitosan zwischen den **S-Gruppen** aus Versuchsreihe 1 und 2 mit gleichem Abrasiva-Gehalt. Es sind die Signifikanzklassen dargestellt (n.s. = nicht signifikantes Ergebnis, n = 15 pro Gruppe)

Gruppe	Signifikanz
0% Silica	n.s.
5% Silica	n.s.
10% Silica	*
15% Silica	n.s.
20% Silica	***
20% Polyethylen	* *

Im Anschluss an die vorliegende In-vitro-Studie wurden die Schmelzproben in einer Nachfolgerstudie im Rahmen der Dissertation von Herrn Dr. Jung [Jung, 2014] weiterführend zur Aufklärung des Wirkungsmechanismus in Bezug auf die Sn-Aufnahme im Schmelz, die Wechselwirkung von Sn mit Abrasiva sowie die Oberflächenmorphologie untersucht. Auf die Ergebnisse dieser Nachfolgerstudie wird mit freundlicher Genehmigung des Urhebers in der Diskussion eingegangen und ist im Folgenden stets gekennzeichnet.

Zusätzlich wurden Daten aus Laborversuchen von GABA International AG (Therwil, Schweiz) zur Verfügung gestellt und mit freundlicher Genehmigung innerhalb der Diskussion verwendet. Die Verwendung dieser Daten ist ebenso stets angezeigt.

4 Diskussion

4.1 Diskussion der Methode

4.1.1 Erzeugung erosiver Demineralisation

Die Ergebnisse zahlreicher Studien sind aufgrund verschiedener erosiver Medien sowie Unterschiede der angewendeten Messmethoden wie auch der hergestellten Proben nur bedingt miteinander vergleichbar [Lussi et al., 2012]. Die Zusammenstellungen von Studienergebnissen zeigen eine Variationsbreite an Studiendesigns und experimentellen Parametern [Wiegand und Attin, 2011]. Bislang existiert kein allgemein etabliertes Modell.

Zur Erzeugung von Erosionen wird in der Literatur eine Vielzahl erosiver Medien eingesetzt. Häufig Anwendung finden Erfrischungsgetränke, Fruchtsäfte und einfache Säurelösungen wie Zitronensäure oder Salzsäurelösungen mit bestimmter Konzentration sowie definiertem pH-Wert [Shellis et al., 2011].

Erfrischungsgetränke simulieren zwar eine realistische Situation, enthalten aber häufig zusätzliche Bestandteile wie Zucker oder Polyphenole [Shellis et al., 2011]. Viele Fruchtsäfte enthalten u. a. Proteine, Kalzium, Phosphor oder Fluorid, welche ebenso das erosive Potenzial beeinflussen können [Lussi et al., 1993; Lussi et al., 1993]. Ferner existieren für Erfrischungsgetränke sowie Fruchtsäfte verschiedene Chargen sowie länderspezifische Unterschiede in den Rezepturen desselben Produkts. Insbesondere bei Fruchtsäften handelt es sich um Naturprodukte, die natürlichen, jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen. Die erosive Demineralisation ist bei Anwendung dieser Medien nicht reproduzierbar.

Einfache Säurelösungen hingegen ermöglichen reproduzierbare Ergebnisse und sind kostengünstig. Die am häufigsten konsumierten Säuren sind Phosphorsäure und Fruchtsäuren (wie Zitronensäure und Apfelsäure) [West et al., 2001]. Sie werden häufig zur Simulation von Säureexpositionen durch Erfrischungsgetränke eingesetzt, aber auch andere Säuren wie Essig- oder Milchsäure können abhängig von der Hypothese der Studie

geeignet sein [Shellis et al., 2011]. Wichtig ist, dass der pH-Wert des erosiven Mediums je nach Ziel der Studie im klinisch relevanten zu untersuchenden Bereich liegt [Shellis et al., 2011].

In der vorliegenden In-vitro-Studie wurde 0,5%-ige Zitronensäure für die Erosionserzeugung angewendet. Zitronensäure ist stabil, leicht herzustellen und relativ kostengünstig. Es handelt sich um eine dreiwertige Säure mit komplexbildenden Eigenschaften, welche ein hohes erosives Potenzial aufweist [Featherstone und Lussi, 2006; West et al., 2001]; pH-Wert und Konzentration der Zitronensäure entsprechen den Werten vieler Erfrischungsgetränke. Zitronensäure ist ein häufiger Bestandteil säurehaltiger Getränke und wird oft als Säuerungsmittel, Geschmacks- und Konservierungsstoff eingesetzt.

Die Relevanz wird besonders beim Vergleich des Pro-Kopf-Verbrauchs von Erfrischungsgetränken im Zeitraum von 2009 bis 2013 deutlich. So zeigt die statistische Erhebung der Wirtschaftsvereinigung Alkoholfreie Getränke e. V. einen Anstieg des durchschnittlichen Pro-Kopf-Verbrauchs in Deutschland von 117,0 Liter im Jahre 2009, über 120,1 Liter im Jahre 2011 auf 125,5 Liter im Jahre 2013 [Wirtschaftsvereinigung Alkoholfreie Getränke e.V., 2013].

Im Rahmen der Säureexposition binden Wasserstoff-Ionen der Zitronensäure an Karbonat- oder Phosphat-Ionen, lösen sie aus der Kristallstruktur des Schmelzes heraus und führen somit zur erosiven Demineralisation [Featherstone und Lussi, 2006]. Zitronensäure ist zudem ein guter Chelator und kann mit Kalzium-Ionen Komplexe bilden. Die Komplexbildung mit Kalzium-Ionen des Speichels führt zur Untersättigung der an die Schmelzoberfläche angrenzenden Lösung und somit zu einer Verschiebung des Ionengleichgewichts. Dies bewirkt ein gesteigertes Herauslösen von Kalzium aus dem Kristallgitter, wodurch der Demineralisationsprozess weiter verstärkt wird. Die Demineralisation durch Zitronensäure kann durch die komplexbildenden Eigenschaften in fast neutralem Milieu erfolgen [Featherstone und Lussi, 2006]. Beispielsweise verursacht Zitronensäure im Vergleich zur Salzsäurelösung bei gleichem pH-Wert einen stärkeren Substanzverlust [West et al., 2001].

Die Erosivität eines Getränkes wird somit nicht ausschließlich durch den pH-Wert bestimmt, sondern auch durch Chelatoreneigenschaften sowie seine Pufferkapazität [Lussi und Jaeggi, 2009; West et al., 2001], seine Kalzium-, Phosphat- oder

Fluoridkonzentration und die Adhäsionsfähigkeit der Flüssigkeit auf der Zahnoberfläche [Lussi und Jaeggi, 2009].

Ein weiterer entscheidender Faktor ist die Frequenz der Säureexposition. Die Frequenz der Erosionen lag innerhalb der Studie bei sechs Durchgängen pro Versuchstag und sollte drei Haupt- und drei Zwischenmahlzeiten simulieren. Damit wurden zwar extreme Ernährungsgewohnheiten nachgeahmt, allerdings ist insbesondere bei Rohkostlern bzw. Personen mit einem hohen Obst-Konsum mit mehrfachen Säureangriffen im Verlauf des Tages zu rechnen.

In einer Studie mit Rohkostlern konnte anhand von Ernährungsprotokollen eine mittlere Häufigkeit von 4,8 Aufnahmen von Zitrusfrüchten pro Tag nachgewiesen werden. Das Maximum lag sogar bei 16,1 Aufnahmen täglich [Ganss et al., 1999].

Neben der Frequenz und der Art der Säure spielt ebenso die Dauer der Säureexposition eine Rolle bei der Entwicklung dentaler Erosionen. Die Dauer der Erosion variiert in den meisten Studien zwischen 15 Sekunden und 40 Minuten (in vitro) sowie 40 Sekunden und 20 Minuten (in situ), während in der Regel eine Dauer zwischen 1 und 5 Minuten pro Zyklus gewählt wird [Wiegand und Attin, 2011].

In der vorliegenden In-vitro-Studie betrug die Verweildauer im erosiven Medium sechs Mal täglich zwei Minuten. Aufgrund verschiedener Faktoren innerhalb der Mundhöhle, wie z. B. Speichelverdünnung oder -Interaktion, befindet sich der pH-Wert auf der Zahnoberfläche nach dem Säureangriff nur eine kurze Zeitspanne von ungefähr zwei Minuten unterhalb des kritischen Wertes [Millward et al., 1997]. Wiegand und Attin empfehlen daher, im Rahmen der Säureeinwirkung bei Studien mit extraoraler Erosion ohne Speichelinteraktion zwei Minuten pro Zyklus nicht zu überschreiten [Wiegand und Attin, 2011].

Hinsichtlich der pH-Wert-Veränderungen auf der Zahnoberfläche stellt sich die Frage, ob Personen mit dentalen Erosionen im Vergleich zu gesunden Personen möglicherweise eine geringere Kapazität zur Neutralisation von Säuren und somit eine längere Erosionsdauer aufweisen.

In einer klinischen Studie wurde angenommen, dass sich die individuelle Speichelzusammensetzung von Probanden mit dentalen Erosionen und gesunden Probanden ohne Erosionen unterscheidet. Bei beiden Probandengruppen wurde die Neutralisation von Säuren nach einer standardisierten und unter Aufsicht durchgeführten

Säureexposition untersucht sowie Speichelanalysen durchgeführt. Hierbei wurden die pH-Werte zweier definierter Zahnoberflächen von Probanden mit und ohne Erosionen nach dem Konsum von Orangensaft (pH 3,6) oder Wasser gemessen und miteinander verglichen [Lussi et al., 2012].

Nach initialer pH-Wert-Messung an der Zahnoberfläche tranken die Probanden innerhalb einer Minute 100 ml Wasser. 1, 3, 7, 10, 15 und 20 Minuten später wurde der pH-Wert erneut gemessen. Nachfolgend wurden 100 ml Orangensaft konsumiert und ebenso pH-Wert-Messungen in oben beschriebener zeitlicher Abfolge durchgeführt. Abschließend wurden erneut 100 ml Wasser getrunken und nach 1, 3 und 5 Minuten die pH-Werte gemessen [Lussi et al., 2012].

Zu Beginn des Experiments war kein signifikanter Unterschied zwischen Probanden mit dentalen Erosionen und gesunden Probanden zu beobachten. Unmittelbar nach dem Konsum von Orangensaft sank der pH-Wert bei Probanden mit Erosionen jedoch signifikant stärker ab im Vergleich zu gesunden Probanden, neutrale pH-Werte wurden bei Probanden mit Erosionen deutlich verzögert erreicht. In Bezug auf die Speichelsekretion waren keine Unterschiede festzustellen, jedoch war die Pufferkapazität bei Probanden mit dentalen Erosionen geringer als bei gesunden Probanden [Lussi et al., 2012].

Aus den Erkenntnissen dieser Studie wurde abgeleitet, dass Personen mit dentalen Erosionen im Vergleich zu gesunden Personen nach der Säureexposition einen deutlich stärkeren pH-Wert-Abfall an der Zahnoberfläche sowie eine geminderte Fähigkeit zur Neutralisation von Säuren aufweisen. Somit liegt der pH-Wert bei Personen mit dentalen Erosionen für eine längere Zeitspanne unterhalb des kritischen Wertes. Es wird daher vermutet, dass diese Personen ein höheres Risiko für zunehmenden erosiven Zahnhartsubstanzverlust aufweisen als gesunde Personen ohne Erosionen [Lussi et al., 2012].

Um eine Differenzierung von Interaktionen zu erlauben, müssen Standardströmungsverhältnisse vorliegen. Die erosive Demineralisation erfolgte auf einer Schwenkplatte, um definierte dynamische Verhältnisse darzustellen. Die Strömungsgeschwindigkeit auf der Probenoberfläche war dadurch weitestgehend gleichmäßig und reproduzierbar [Shellis et al., 2011].

Da die Löslichkeit von Sättigungsphänomenen abhängt, sind dynamische Verhältnisse an der Grenzfläche zwischen fester und flüssiger Phase entscheidend für den

Substanzverlust. Bei statischen Verhältnissen beziehungsweise ruhender Lösung wird eine schnelle Sättigung der an die Schmelzprobe angrenzenden Lösung erreicht. Die Erosionserzeugung ist zu mild, es kommt vorwiegend zur Bildung von Präzipitaten auf der Probenoberfläche. Bei dynamischen Verhältnissen wird die angrenzende Lösung konstant erneuert. Da keine Sättigung der Lösung erreicht wird, gehen kontinuierlich Ionen in Lösung. Bei zu hoher Schwenkfrequenz in Verbindung mit zu stark konzentrierter Säurelösung ist die Erosionserzeugung zu intensiv. Wirkungseffekte sind nicht mehr messbar.

Vorherige Experimente zeigen, dass das vorliegende Versuchsmodell einen Substanzverlust in einer bestimmten Dimension erzeugt [Ganss et al., 2012b]. Die Einstellung der Schwenkplatte mit 35 Pendelbewegungen pro Minute in Verbindung mit der erosiven Demineralisation von 6 x 2 Minuten täglich in 0,5%-iger Zitronensäure wurde gewählt, um einen Substanzverlust zwischen 10 – 14 µm innerhalb der Negativkontrollgruppe zu erzielen. Ein Substanzverlust in dieser Dimension ist geeignet, um eine deutliche Differenzierung von Wirkungseffekten zu erlauben. Dieses Studiendesign wurde innerhalb der Arbeitsgruppe bereits oft erprobt, erzeugt reproduzierbare Ergebnisse und ermöglicht den Vergleich mit vorangegangenen Studienergebnissen.

4.1.2 Erzeugung der Abrasion

Die Simulation des physikalischen Substanzverlustes erfolgte in einem Bürstsimulator mit Referenzzahnbürsten der American Dental Association (ADA). Durch das plane Borstenfeld der Referenzzahnbürsten konnte auf der gesamten Probenoberfläche der gleiche Druck erzeugt werden. Druckunterschiede, wie sie bei manueller Abrasionserzeugung auftreten, wurden somit weitestgehend vermieden.

Für das Auflagegewicht der Zahnbürsten sind in der Literatur sehr unterschiedliche Werte zu finden. Das in dieser In-vitro-Studie angewendete Auflagegewicht lag bei 200 g (~ 2N). Unter Berücksichtigung jüngerer Literatur empfehlen Wiegand und Attin ein Gewicht von 200 – 300 g (~ 2-3 N) [Wiegand und Attin, 2011]. Dieser empfohlene Wert deckt sich mit den Ergebnissen einer klinischen Studie mit erwachsenen Probanden, in der ein durchschnittliches Auflagegewicht von 2,3 N ermittelt wurde [Ganss et al., 2009].

In Bezug auf die Häufigkeit der Einwirkung zeigt die Erhebung der Vierten Deutschen Mundgesundheitsstudie (DMS IV), dass ein Großteil der Bevölkerung zweimal täglich die Zähne putzt [Micheelis und Schiffner, 2006]. Somit wurde die Abrasionserzeugung in der vorliegenden Studie auf zweimal pro Versuchstag festgesetzt. Die Zahnreinigung erfolgt bei den meisten Personen häufig morgens nach dem Frühstück und abends nach der letzten Mahlzeit. Um die klinische Situation nachzuahmen, wurde die Abrasion im Anschluss an die erste und letzte erosive Demineralisation des Versuchstages durchgeführt. Die Schmelzproben wurden hierbei für 2 Minuten mit Slurry behandelt und für 15 Sekunden im Bürstsimulator gebürstet.

In vorgenannter klinischer Studie von Ganss et al. wurde eine durchschnittliche Bürstdauer von 96,6 Sekunden nachgewiesen, was einer ungefähren Bürstdauer von 24 Sekunden pro Quadrant entspricht [Ganss et al., 2009]. Die Bürstdauer der Schmelzproben von 15 Sekunden liegt somit im Vergleich zur genannten Studie etwas höher, spiegelt aber eine sehr sorgfältige Mundhygiene wider.

Zur Beseitigung exogener Verfärbungen auf Zahnoberflächen werden Zahnpasten Abrasiva zugefügt. Abrasiva sind gesundheitlich unbedenkliche anorganische oder organische Stoffe, sie werden der Zahnpaste in partikulärer Form in unterschiedlicher Korngröße beigefügt. Unterschiedliche Kornhärte, Kornform und Korngröße der Abrasiva führen zu unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften. Insbesondere Silica

zeigt aufgrund stark variierender Korngröße und Härte ein unterschiedliches Abrasionsverhalten [Zantner und Kielbassa, 2002].

In der vorliegenden In-vitro-Studie wurden zwei grundsätzlich unterschiedliche Abrasivsysteme verwendet. Untersucht wurden Silica als anorganisches und Polyethylen als organisches Abrasivmittel.

Bei dem häufig in Zahnpasten als Abrasivmittel eingesetzten Silica handelt es sich um eine Form des Siliziumdioxids. Synonyme Bezeichnungen für Siliziumdioxid sind Kieselsäure, Silicagel oder Xerogel. Laut der Internationalen Nomenklatur für kosmetische Inhaltsstoffe (INCI) wird zwischen Silica und hydrated Silica unterschieden [Domsch, 1994].

Siliziumdioxid besteht aus einem Netzwerk kovalenter Silizium-/Sauerstoff-Bindungen, welches sich über den ganzen Kristall erstreckt [Binnewies et al., 2010]. Siliziumdioxid wird als sehr reaktionsträge beschrieben und reagiert nur mit Flusssäure sowie geschmolzenen Alkalihydroxiden oder Karbonaten [Binnewies et al., 2010]. Eine Reaktivität mit weiteren Bestandteilen der Formulierungen besteht nicht. Somit ist Siliziumdioxid insbesondere mit Fluoridionen kompatibel [Domsch, 1994].

Bei hydratisiertem Silica (nach INCI-Bezeichnung im Folgenden hydrated Silica genannt) handelt es sich um eine amorphe wasserhaltige Form des Siliziumdioxids, chemische Formel $\text{SiO}_2 \cdot x \text{H}_2\text{O}$. Hydrated Silica ist ein mikroporöses Material in Form von Pulvern, Granulaten und Perlen. Mit einer spezifischen Oberfläche von ungefähr $700 \text{ m}^2/\text{g}$ ist Kieselgel ein gutes Adsorptionsmittel [Binnewies et al., 2010]. Der durchschnittliche Teilchendurchmesser liegt zwischen 10 bis $50 \mu\text{m}$. In Abhängigkeit vom Durchmesser ergeben sich mehr verdickende oder mehr abrasive Eigenschaften [Domsch, 1994].

Silica sind synthetische, amorphe Teilchen aus Siliziumdioxid mit einer von OH-Gruppen bedeckten Oberfläche [Binnewies et al., 2010]. Hinsichtlich des guten Wasserbindungsvermögens werden Silica als Additive mit thixotropen Eigenschaften verwendet [Binnewies et al., 2010; Domsch, 1994]. Die Steuerung des Fließverhaltens durch Silica hat sich in Zahnpasten bewährt [Binnewies et al., 2010]. Bei geringem Teilchendurchmesser erfolgt kein Beitrag zur Abrasivität [Domsch, 1994].

Durch die entsprechende Kombination von Silica und hydrated Silica lassen sich Viskosität und Abrasivität der Formulierung variieren [Domsch, 1994].

Polyethylen wird in Form eines feinkörnigen Pulvers als Abrasivmittel verwendet und wirkt besonders schonend auf Zahnoberflächen. Speziell bei Personen mit freiliegenden, schmerzempfindlichen Zähnen kann somit Schutz vor Abrasion und Schmerzempfindlichkeit geboten werden (Herstellerangaben GABA International AG, Therwil, Schweiz).

Polyethylen gehört zu den synthetischen Polymeren und entsteht durch radikalische oder koordinative Polymerisation von Ethen [Hart et al., 2007]. Mit einer Dichte von 0,9 – 0,96 g/cm³ ist Polyethylen ein sehr leichter teilkristalliner Thermoplast aus der Klasse der Polyolefine. Zugfestigkeit, Oberflächenhärte sowie E-Modul zeigen niedrige Werte, welche vom LDPE (low density polyethylene) zum HDPE (high density polyethylene) ansteigen. Polyethylen wird als hydrophob, zäh sowie physiologisch unbedenklich beschrieben. Es besitzt eine unpolare Oberfläche und weist eine gute chemische Beständigkeit gegenüber Säuren auf (Herstellerangaben 3D-plastic Hans Kintra GmbH, Mönchengladbach, Deutschland).

4.1.3 Simulation von Speicheleffekten

Speichel ist ein wichtiger biologischer Faktor im Rahmen der Prävention dentaler Erosionen. Zu den schützenden Eigenschaften zählen Pufferkapazität, Säureverdünnung, Säureneutralisation, Verminderung der Demineralisation durch den hohen Gehalt an Kalzium- und Phosphationen sowie die Pellikelbildung [Buzalaf et al., 2012].

In den meisten In-vitro-Experimenten wird künstlicher Speichel zur Simulation von Speicheleffekten genutzt, während menschlicher Speichel seltener verwendet wird [Kelly und Smith, 1988; Attin et al., 2001; Hara et al., 2008].

Menschlicher Speichel kann entweder von mehreren Spendern [Attin et al., 2001; Hara et al., 2008] oder nur einer Einzelperson [Kelly und Smith, 1988] gewonnen werden. Die Speichelzusammensetzung variiert nicht nur interindividuell, sondern unterliegt auch Schwankungen in Bezug auf Art und Ausmaß der Stimulation, der Stimulationsdauer und der Tageszeit [Shellis et al., 2011]. Problematisch ist auch, dass es unter In-vitro-Bedingungen schnell zur Veränderung der Speichelzusammensetzung kommen kann. Zudem werden in der Regel sehr große Mengen an Speichel benötigt [Wiegand und Attin, 2011]. Menschlicher Speichel ist nicht nur aufwendig zu sammeln, sondern birgt ebenso das Risiko der Infektionsübertragung [Shellis et al., 2011].

In der Literatur wird eine Vielzahl von unterschiedlichen Speichelersatzmitteln eingesetzt. Grundsätzlich bietet künstlicher Speichel den Vorteil, in ausreichender Menge und stets gleichbleibender Zusammensetzung hergestellt werden zu können [Wiegand und Attin, 2011]. Weiterhin können individuell beeinflussende Umgebungsfaktoren ausgeschlossen werden. Die Proben werden unter gleichwertigen Bedingungen behandelt, was zu einem hohen Maß an Standardisierung führt [Wiegand und Attin, 2011].

In der vorliegenden In-vitro-Studie wurde daher künstlicher Speichel zur Simulation der Speicheleffekte verwendet. Der künstliche Speichel wurde nach Vorgabe der Rezeptur von Gerrard und Winter [Gerrard und Winter, 1986] angesetzt und entspricht in Bezug auf die Konzentration von Kalzium und Phosphat natürlichem Speichel. Neben der Lagerung der Proben wurden die Zahnpasten mit künstlichem Speichel verdünnt, um In-vivo-Verhältnisse nachzuahmen.

Es ist unklar, ob für die *in vitro* stattfindende Remineralisation menschlicher oder künstlicher Speichel sinnvoller ist. Zu dieser Fragestellung liegen bisher kaum Studien vor.

In einer der wenigen Studien zu dieser Thematik wurde die Wirkung von zwei künstlichen Speichelersatzmitteln (künstlicher Speichel = AS; künstlicher Speichel mit Muzinzusatz = AS+M), menschlichem Speichel (HS) sowie deionisiertem Wasser (Negativkontrolle) verglichen. Die künstlichen Speichel enthielten einen mit menschlichem Speichel zu vergleichenden Ca- und PO₄-Gehalt, wobei einem künstlichen Speichel zusätzlich das Speichelprotein Muzin hinzugefügt wurde (AS+M) [Hara et al., 2008].

In dieser Erosions-/Abrasionsstudie wurden Schmelzproben über einen Zeitraum von drei Tagen zyklisch de- und remineralisiert. Die erosive Demineralisation erfolgte täglich für 3 x 5 Minuten in 1%-iger Zitronensäure (pH 3,75). Im Anschluss an jede Demineralisation wurden die Proben für 30 Minuten der jeweiligen Testlösung ausgesetzt. Danach wurden die Proben in NaF-haltige Zahnpasten-Slurry getaucht und mit 500 Bürststrichen im Simulator gebürstet [Hara et al., 2008].

Im Vergleich zur Negativkontrollgruppe konnten alle Testlösungen (AS; AS+M; HS) den Substanzverlust reduzieren. In künstlichem Speichel mit Muzinzusatz (AS+M) gelagerte Schmelzproben zeigten einen ähnlichen Substanzverlust wie in menschlichem Speichel (HS) gelagerte Proben (AS+M= $2,74 \pm 0,36 \mu\text{m}$; HS= $2,71 \pm 0,44 \mu\text{m}$). Künstlicher Speichel mit Muzin scheint somit innerhalb von *In-vitro*-Studien ein geeigneter Ersatz für menschlichen Speichel zu sein [Hara et al., 2008].

Allerdings zeigten beide Gruppen (AS+M; HS) einen um ungefähr 31% höheren Substanzverlust im Vergleich zur Gruppe mit künstlichem Speichel ohne Muzin (AS= $2,08 \pm 0,36 \mu\text{m}$). Dieses interessante Ergebnis lässt eine Behinderung der Remineralisation durch organische Bestandteile vermuten. Innerhalb der Gruppe mit menschlichem Speichel (HS) könnte dieses hypothetisch durch Ca-bindende Proteine, wie z. B. Statherine, Cystatine und saure prolinreiche Proteine, begründet sein. In der Gruppe mit künstlichem Speichel mit Muzinzusatz (AS+M) könnte eine Muzinablagerung als entscheidender Faktor für die reduzierte Remineralisation angenommen werden [Hara et al., 2008].

Im Laborversuch scheint die Remineralisationskapazität von künstlichem Speichel ohne Muzin (AS) größer zu sein als die von menschlichem Speichel (HS) oder künstlichem Speichel mit Muzinzusatz (AS + M) [Hara et al., 2008]. Das führt zu der Fragestellung,

welchen Einfluss organische Bestandteile unter erosiven Bedingungen im oralen System auf schützende Speichereffekte wie Pellikelbildung, Remineralisation und Lubrikation nehmen. Zu dieser Thematik sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Aufgrund histologischer Eigenschaften wird deutlich, dass die Remineralisation nicht das primäre Ziel sein kann. Remineralisationsprozesse auf erosiv veränderter Zahnhartsubstanz sind nicht mit denen initialer kariöser Läsionen vergleichbar. Bei initialen kariösen Läsionen kommt es zum Herauslösen von Mineralien unterhalb einer pseudointakten Oberflächenschicht, was zur Entstehung des Läsionskörpers führt [Meyer-Lückel et al., 2012]. Aufgrund dieser strukturellen Gegebenheiten sind Remineralisationsprozesse grundsätzlich möglich.

Bei Erosionen findet hingegen ein direkter, schichtweiser Mineralverlust an der Zahnoberfläche statt. Es verbleibt eine teilweise demineralisierte Oberflächenschicht mit erhöhter Rauigkeit sowie verminderter Mikrohärtigkeit [Nekrashevych und Stösser, 2003], die einem Ätzmuster ähnelt [Eisenburger et al., 2004]. Remineralisierbare Strukturen stehen nur sehr begrenzt zur Verfügung. Trotzdem sind mineralische Präzipitationen auf der teilweise demineralisierten Oberflächenschicht denkbar [Lussi et al., 2011]. Anstatt Remineralisation müssten in diesem Zusammenhang somit eher die Begriffe Mineralniederschlag und Mineralsalzlösung verwendet werden.

Attin et al. zeigten in einer In-vitro-Studie, dass die Abrasionsresistenz mit zunehmender Remineralisationsdauer signifikant ansteigt [Attin et al., 2000]. Auch Eisenburger et al. zeigten geringere Substanzverluste bei verlängerter Remineralisationszeit bis zu sechs Stunden. Darüber hinaus war keine weitere signifikante Reduktion des Substanzverlustes nachzuweisen [Eisenburger et al., 2001].

In-situ-Studien zeigten eine deutlich geringere Zunahme der Mikrohärtigkeit von innerhalb der Mundhöhle getragenen erodierten Proben. Srinivasan et al. wiesen nach, dass die erosive Demineralisation mit Coca-Cola von acht Minuten zu einer Reduzierung der Mikrohärtigkeit um 24,54% führte. Nach zwei Tagen in situ war lediglich ein Anstieg der Mikrohärtigkeit um 2,98% zu verzeichnen [Srinivasan et al., 2010].

Eine weitere In-situ-Studie zeigte ebenso eine Reduzierung der Mikrohärtigkeit um 25,69% nach der erosiven Demineralisation in Sprite Light von zwei Minuten. Nach vier Stunden

in situ war nur eine Zunahme der Mikrohärtigkeit um 7,34% nachzuweisen [Wegehaupt et al., 2012].

Die stärkere Zunahme der Mikrohärtigkeit in den Laborstudien wird durch den künstlichen Speichel begründet. Innerhalb des übersättigten künstlichen Speichels kommt es leicht zu einer Präzipitation von Mineralien auf der Probenoberfläche [Ganss et al., 2012a].

Es besteht somit die Frage, ob und in welchem Maß eine Präzipitation auch in der Mundhöhle stattfindet. In der Mundhöhle tritt die Präzipitation von Mineralien in der Plaque oder, wie bereits erwähnt, im Läsionskörper initialer kariöser Läsionen auf. Aufgrund spezifischer hemmender Speichelproteine sind derartige Präzipitationen normalerweise nicht auf sauberen, gesunden Zahnoberflächen zu finden. Dementsprechend zeigen innerhalb der Mundhöhle getragene erodierte Proben auch nach einer Dauer von 24 Stunden deutliche Ätzmuster und keine Anzeichen einer Präzipitation von Mineralien [Ganss et al., 2012a].

Ein weiterer wichtiger, schützender Speichелеffekt ist die Pellikelbildung. Unter klinischen Bedingungen sind die Zahnoberflächen in der Mundhöhle gewöhnlich von einem erworbenen Schmelzoberhäutchen, der sogenannten "acquired pellicle" bedeckt. Die Pellikel ist ein organischer, azellulärer, aus Speichelproteinen bestehender Film. Glykoproteine, Proteine und verschiedene Enzyme konnten bereits innerhalb des Filmes nachgewiesen werden [Buzalaf et al., 2012]. Auf sauberen Schmelzoberflächen entsteht durch selektive Adsorption bestimmter Proteine, wie z. B. prolinreiche Proteine, Statherine und Histatine [Schübach et al., 2001], ein homogen erscheinender, fein granulärer, 10 – 20 nm dünner Film. Durch weitere Adsorption und Integration von Molekülen kommt es zur Reifung und Dickenzunahme bis zu 1300 nm [Hannig, 1999a].

Vermutlich schützt die Pellikel als Diffusionsbarriere und semipermeable Membran die Schmelzoberfläche vor Säureangriffen, indem ein direkter Kontakt zwischen Säure und Zahnoberfläche vermieden wird [Buzalaf et al., 2012]. Es wurde gezeigt, dass zumindest eine dünne basale Schicht auch nach relativ starker Säureexposition von 1,0%-iger Zitronensäure bestehen bleibt [Hannig und Balz, 1999b].

Wetton et al. konnten in einer In-vitro-Studie nachweisen, dass die Pellikel-Bildung auf der Schmelzoberfläche mindestens einer Stunde oder länger bedarf, bevor die Pellikel gegenüber Erosionen eine gewisse Schutzwirkung bietet [Wetton et al., 2006]. Es ist allerdings fraglich, ob die unter Laborbedingungen entwickelte Pellikel mit einer unter

natürlichen Bedingungen in der Mundhöhle gebildeten Pellikel wirklich vergleichbar ist. Möglicherweise erfordert die Pellikel-Reifung innerhalb der Mundhöhle eine längere Zeitdauer, bevor der Schmelz vor einem Säureangriff geschützt ist.

Die In-vivo-Studie von Hannig et al. zeigte, dass intraoral getragene Schmelzproben innerhalb von 24 Stunden Pellikel mit erosionsinhibierenden Eigenschaften aufweisen. Im Vergleich dazu zeigten sieben Tage innerhalb der Mundhöhle getragene Proben keinen stärkeren Erosionsschutz, sondern vergleichbare Ergebnisse [Hannig und Balz, 1999b].

Eine weitere Funktion der Pellikel ist die Lubrikationswirkung langkettiger organischer Moleküle. Durch die Bildung eines Gleitfilmes zwischen Zahnhartsubstanz und den umliegenden oralen Geweben wird die Friktion zwischen sich bewegenden Oberflächen vermindert [Aguirre et al., 1989]. Für den Lubrikations-Effekt spielen Glykoproteine wie Muzin eine wichtige Rolle [Tabak, 1995]. Überdies ist Statherin als Lubrikant von großer Bedeutung und bietet Schutz vor sowohl langsam gleitenden als auch starken okklusalen Kontakten wie sie beispielsweise im Rahmen des Kauvorganges oder Bruxismus auftreten [Douglas et al., 1991]. Zu dieser Thematik sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig.

Trotz der Problematik von unterschiedlichen Studientypen, wird bei Betrachtung von In-vitro- und In-situ-Studien innerhalb der Arbeitsgruppe insgesamt deutlich, dass In-vitro- und In-situ-Studien gut miteinander zu vergleichen sind. Innerhalb von In-vitro-Studien sind trotz der Schwierigkeiten Effekte zu erzielen, die auch innerhalb der Mundhöhle erzeugt werden.

4.1.4 Betrachtung der Messmethodik

Zur Bestimmung erosiv bedingter Substanzverluste wurde eine Vielzahl von Methoden entwickelt. Die Wahl der Untersuchungsmethode ist hauptsächlich vom Schweregrad der erosiven Läsion, den zu erwartenden strukturellen Veränderung im Rahmen der Versuchsdurchführung sowie der zu untersuchenden Zahnhartsubstanz abhängig. Auch die Oberflächenbeschaffenheit der Proben, das Studiendesign und die Notwendigkeit von Mehrfachmessungen spielen eine Rolle [Schlueter et al., 2011]. In Abhängigkeit von der Fragestellung der Studie sind somit unterschiedliche Messmethoden geeignet.

Für die Beurteilung initialer Erosionen werden häufig chemische Analysen zur Bestimmung des Kalzium- und Phosphatgehalts in demineralisierenden Lösungen sowie Mikrohärtemessungen durchgeführt. Zur Untersuchung fortgeschrittener Erosionen zählen Mikroradiographie sowie Oberflächenprofilometrie zu den etablierten Messmethoden. Morphologische Veränderungen von erodierter Hartsubstanz werden gewöhnlich durch Rasterelektronenmikroskopie (SEM) dargestellt [Schlueter et al., 2011].

Die Profilometrie gilt inzwischen als Standardverfahren zur Beurteilung erosiver, abrasiver sowie kombiniert erosiv-abrasiver Substanzverluste. Bei der Profilometrie wird der Substanzverlust als vertikaler Höhenunterschied zwischen einer unbehandelten Referenz- und einer behandelten Versuchsfläche gemessen. Es handelt sich sowohl um eine quantitative als auch eine qualitative Methode, die vor allem für die Erfassung fortgeschrittener Erosionen geeignet ist [Schlueter et al., 2011]. Sie ist nicht destruktiv und findet innerhalb von In-vitro-, In-situ-, aber auch In-vivo-Studien Anwendung. Die Profilometrie ist ein etabliertes, robustes und wenig fehleranfälliges Verfahren.

In Hinblick auf die hohe Anzahl von 1350 angefertigten Profilschrieben sind die einfache Durchführung sowie der geringe zeitliche Aufwand als großer Vorteil dieser Messmethode zu nennen. Auch Mehrfachmessungen sind möglich [Ganss et al., 2005].

Ein Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, dass keine Informationen über demineralisierte Bereiche unterhalb der Oberfläche gewonnen werden. Die Erfassung des Mineralverlustes in der erweichten Oberflächenschicht bleibt somit aus [Ganss, 2005]. Auch Remineralisationsprozesse in der partiell demineralisierten Schmelzschicht bleiben

unberücksichtigt. Angesichts der Dimension der innerhalb dieser Studie durchgeführten Messungen sind diese Faktoren für die vorliegende Fragestellung jedoch nicht relevant.

Bei der Profilometrie erfolgt eine zwei- oder dreidimensionale Vermessung der Probenoberfläche. Dabei wird die Oberfläche entweder mit einem Taster mit Diamant- oder Stahlspitze mechanisch [Hammadeh und Rees, 2001; Ganss et al., 2000; Schlueter et al., 2005] oder mit einem Laser optisch [Attin et al., 2003] abgetastet.

In der vorliegenden Studie wurde der entstandene Substanzverlust mit einem optischen chromatischen Profilometer bestimmt. Optische, berührungslose Methoden erfassen fragile Oberflächenstrukturen. Im Vergleich zu mechanischen Tastsystemen sind sie jedoch empfindlicher gegenüber Verunreinigungen auf der Probenoberfläche [Zhang et al., 2000]. Abhängig vom gewählten System variiert die Vertikaldimension eines kontaktlosen Profilometers zwischen 300 μm und 10 nm. Dies ermöglicht auch die Untersuchung besonders tiefer erosiver Läsionen und sogar gewölbter natürlicher Oberflächen [Schlueter et al., 2011]. Die Möglichkeit auch natürliche Zahnoberflächen zu untersuchen, macht die Profilometrie auch für In-vivo-Studien einsetzbar. Für maximale Sensitivität und Reproduzierbarkeit sind jedoch plane Proben erforderlich. Mit geglätteten, polierten Proben können durch optische Profilometrie erosive Läsionen mit einer Tiefe von ungefähr 0,5 μm gemessen werden [Schlueter et al., 2011].

4.2 Diskussion der Ergebnisse

4.2.1 Wirkungsmechanismus von Sn/F bei Erosionen

Die Wirksamkeit von Fluoriden ist im Rahmen der Therapie von dentalen Erosionen weitestgehend auf die Bildung von CaF_2 -ähnlichen Präzipitaten auf der Zahnoberfläche zurückzuführen [Magalhaes et al., 2011]. Ein großer Nachteil dieser CaF_2 -ähnlichen Präzipitate liegt jedoch in der leichten Säurelöslichkeit. Somit besteht die Forderung nach Formulierungen, deren Präzipitate eine höhere Säureresistenz aufweisen [Ganss et al., 2013].

Fluoridpräparate mit polyvalenten Metallkationen wie Sn-Ionen zeigen ein vielversprechendes erosionsinhibierendes Potenzial [Ganss et al., 2008; Hove et al., 2006; Hove et al., 2008; Schlueter et al., 2009; Willumsen et al., 2004; Young et al., 2006]. Es stellt sich die Frage, ob verschiedene Kationen in Fluoridverbindungen einen unterschiedlichen Einfluss auf das antierosive Potenzial besitzen. In einer grundlegenden Studie zu dieser Fragestellung wurde die Wirksamkeit von Fluorid- und Sn-Verbindungen bei gleicher Wirkstoffkonzentration und eingestelltem pH-Wert untersucht. Humane Schmelzproben wurden über einen Zeitraum von 10 Tagen zyklisch de- und remineralisiert. Die erosive Demineralisation erfolgte in 0,05 molarer Zitronensäure (pH 2,3). Als Testlösungen wurden SnCl_2 , NaF, SnF_2 , AmF, AmF/NaF und AmF/ SnF_2 verwendet. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede der untersuchten Fluorid- und Sn-Verbindungen und bestätigen insbesondere die stark protektive Wirkung Sn-haltiger Testlösungen. Testlösungen mit AmF/ SnF_2 und SnF_2 konnten den erosiven Substanzverlust nahezu vollständig verhindern. Die Testlösung mit SnCl_2 reduzierte den Substanzverlust ebenso, wenn auch in einem geringeren Ausmaß [Ganss et al., 2008].

Dieses Ergebnis bestätigt die Annahme, dass Sn-Verbindungen auch unabhängig von der Anwesenheit von Fluoriden eine antierosive Wirkung besitzen und unterstreicht die allgemeine Bedeutung des Wirkstoffes Zinn für die Erosionsprävention.

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen typische prismatische Ätzmuster auf Schmelzproben, welche mit den Testlösungen NaF, AmF und AmF/NaF behandelt wurden. Im Kontrast hierzu führte die Applikation von SnCl_2 , SnF_2 und AmF/ SnF_2 zu deutlichen Präzipitaten auf der Probenoberfläche. Da mit SnF_2 und AmF/ SnF_2 behandelte

Proben eine deutlich stärkere Säureresistenz im Vergleich zu mit SnCl_2 behandelte Proben zeigten, wird ein unterschiedliches Lösungsverhalten der verschiedenen Präzipitate vermutet [Ganss et al., 2008].

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zeigten zudem strukturelle Unterschiede der Präzipitate und erhärten diese Vermutung. Präzipitate nach Applikation von SnF_2 und SnCl_2 zeigten zwar ein ähnliches Erscheinungsbild, Präzipitate mit SnF_2 waren jedoch fein und dichtgepackt, Präzipitate mit SnCl_2 etwas grobkörniger und strukturell ausgeprägter. Nach Applikation von AmF/SnF_2 zeigten sich hingegen glatte und kontinuierliche Präzipitate mit wenigen aufgelagerten sphäroidalen Strukturen [Ganss et al., 2008].

Bislang ist nicht eindeutig geklärt, welche Reaktionsprodukte auf der Schmelzoberfläche entstehen [Schlueter et al., 2009]. Es ist bekannt, dass SnF_2 mit Hydroxylapatit reagiert. Röntgenanalysen konnten in diesem Zusammenhang verschiedene Verbindungen, wie $\text{Sn}_2(\text{PO}_4)\text{OH}$, $\text{Sn}_3\text{F}_3\text{PO}_4$, $\text{Ca}(\text{SnF}_3)_2$ sowie CaF_2 -Salz nachweisen [Babcock et al., 1978].

Schlueter et al. vermuten hingegen, dass die Wirksamkeit von Sn/F-Lösungen nicht nur auf der geringeren Säurelöslichkeit des Oberflächenpräzipitats, sondern ebenso auf dem Einbau von Sn- und gegebenenfalls F-Ionen in oberflächliche Schmelzschichten beruht. In dieser Studie wurde die Wirksamkeit von Sn/F-Testlösungen in unterschiedlicher Sn-Konzentration auf gesunde und erodierte humane Schmelzproben untersucht und miteinander verglichen. Durch energiedispersive Röntgenspektroskopie und Rasterelektronenmikroskopie wurde die Sn-Aufnahme auf der Schmelzoberfläche sowie der Sn-Einbau in drei Schichten unterhalb der Oberfläche (in jeweils 10 μm Schritten) gemessen [Schlueter et al., 2009].

Gesunde Proben zeigten aufgrund der fehlenden Säureexposition eine deutlich höhere Sn-Aufnahme auf der Probenoberfläche. Hierbei scheint die Sn-Aufnahme einem Sättigungsprinzip zu folgen. Unabhängig von der Sn-Konzentration der verwendeten Lösung wurden bei gesunden Proben weder ein Einbau von Sn-Ionen noch strukturelle Veränderungen innerhalb des oberflächlichen Schmelzes nachgewiesen. Vielmehr war auf der Probenoberfläche ein amorphes Präzipitat mit einer Schichtdicke von ungefähr 500 nm erkennbar [Schlueter et al., 2009].

Bei erodierten Proben waren ein Einbau von Sn-Ionen sowie strukturelle Veränderungen im oberflächlichen Schmelz nachweisbar. Sowohl Einbau als auch strukturelle Veränderungen scheinen dabei einem Sättigungsprinzip zu folgen. Nach Applikation

hochkonzentrierter Sn/F-Lösungen (1400 und 2100 ppm Sn²⁺ + 1500 ppm F⁻) war der Sn-Einbau bis zu einer Tiefe von 20 µm deutlich nachweisbar. Bei Verwendung geringkonzentrierter Produkte (400 ppm Sn²⁺ + 1500 ppm F⁻) zeigte sich ein geringerer Sn-Einbau in den äußeren 10 µm [Schlueter et al., 2009].

Insgesamt konnten alle Sn/F-Lösungen den erosiven Substanzverlust deutlich reduzieren. Dabei erscheinen Sn-Aufnahme und Sn-Einbau der äußeren Schicht bis zum Erreichen des Scheitelpunkts negativ exponentiell zum Substanzverlust. Im Vergleich zur geringkonzentrierten Sn-haltigen Lösung führte die Verwendung der höherkonzentrierten Lösung zu einer gesteigerten Sn-Aufnahme auf der Probenfläche, einem höheren Sn-Einbau und einem reduziertem Substanzverlust. Bei weiterer Konzentrationssteigerung war keine weitere Reduzierung des Substanzverlustes messbar [Schlueter et al., 2009].

Es ist bislang unklar, ob ein Einbau von Sn-Ionen oder einer Kombination von Sn- und F-Ionen vorliegt [Schlueter et al., 2009]. Die Studie von Ganss et al. ergab, dass Sn-haltige Lösungen ohne Fluorid (SnCl₂) einen geringeren erosionsinhibierenden Effekt zeigten als Sn-haltige Lösungen mit Fluorid (SnF₂, AmF/ SnF₂) [Ganss et al., 2008]. Dieses Ergebnis deutet auf einen Einbau von verschiedenen Zinnfluoriden hin [Schlueter et al., 2009].

4.2.2 Effekte der Slurry-Gruppen

Mehrere Studien bestätigen das vielversprechende erosionsinhibierende Potenzial von Sn/F-Zahnpasten. Die alleinige Applikation von Sn/F-Slurries ohne Bürstabrasion zeigt sowohl innerhalb von In-vitro- als auch innerhalb von In-situ-Studien eine gute Wirksamkeit und reduziert den Substanzverlust im Vergleich zu konventionellen NaF-Formulierungen deutlich [Faller et al., 2011; Ganss et al., 2011; Hooper et al., 2007; Young et al., 2006].

In beiden Versuchsreihen (V1; V2) zeigten alle S-Gruppen einen signifikant geringeren Substanzverlust im Vergleich zur wirkstofffreien Placebo-Gruppe. Dies verdeutlicht insgesamt die positive Wirksamkeit von Sn/F-Formulierungen.

Es wurde erwartet, dass Abrasiva Sn-Ionen adsorbieren und die Verfügbarkeit von Sn-Ionen innerhalb der Zahnpastenslurry verringern. Somit bestand die Annahme, dass mit steigendem Silica-Gehalt die Verfügbarkeit von Sn-Ionen abnimmt und die Wirksamkeit der Formulierungen reduziert wird.

In V1 (ohne Chitosan) ist zwischen den Gruppen mit 0 – 20% Silica jedoch kein signifikanter Unterschied nachweisbar. Lediglich die Gruppe mit 20% Polyethylen zeigte einen signifikant höheren Substanzverlust im Vergleich zu den Gruppen mit 0%, 5% und 15% Silica.

In V2 (mit Chitosan) ist zwischen den untersuchten Gruppen ebenso kein signifikanter Unterschied zu verzeichnen. Unterschiede im Vergleich zur Gruppe mit 20% Silica sind aufgrund von Auflagerungen innerhalb dieser Gruppe zu vernachlässigen. Insgesamt besteht in beiden Versuchsreihen zunächst die Vermutung, dass Abrasiva die Effektivität der Wirkstoffe offenbar nicht beeinflussen.

Um tieferen Einblick in die Wechselwirkung von Sn und Abrasiva zu erhalten, wurde in der Nachfolgerstudie die Sn-Aufnahme auf der Oberfläche der Abrasiva gemessen. Hierbei wurde nachgewiesen, dass Sn an Abrasiva adsorbiert. Dabei ließ sich ein deutlicher Unterschied zwischen den verschiedenen Typen von Abrasiva belegen. Während Silica eine deutliche Sn-Aufnahme zeigte, lag die Sn-Aufnahme bei Polyethylen deutlich unterhalb der Nachweisgrenze. Zwischen den entsprechenden Abrasiva der Formulierungen mit und ohne Chitosan konnte kaum ein Unterschied festgestellt werden [Jung, 2014].

Diese Ergebnisse decken sich mit von GABA International AG (Therwil, Schweiz) durchgeführten Messungen. Hierbei wurde die Konzentration von Sn-Ionen im Überstand der mit dem entsprechenden Formulierungs-Ansatz hergestellten Suspension ermittelt. Für jeden Ansatz wurden hierbei drei Messungen durchgeführt (Abb. 12).

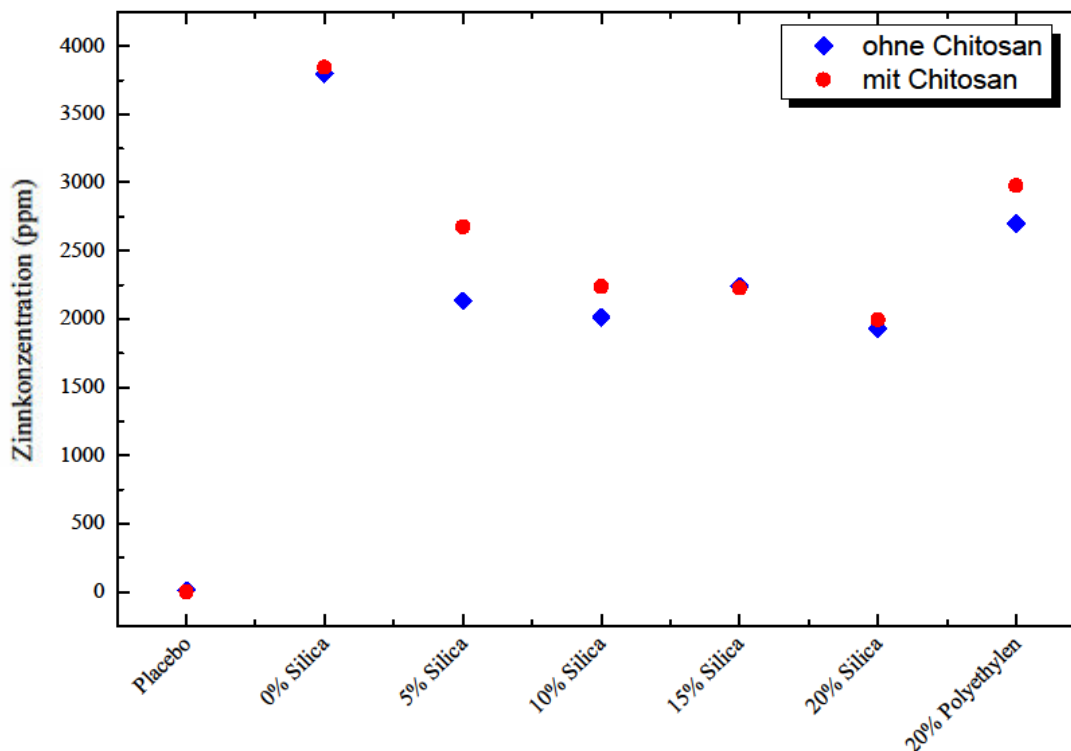


Abb. 12: Zinnkonzentration (Mittelwert aus 3 Messungen) im Überstand der im Versuch verwendeten Formulierungen. Die Daten wurden von GABA International AG (Therwil, Schweiz) zur Verfügung gestellt und werden mit freundlicher Genehmigung verwendet. Überstände der Formulierungen aus erster Versuchsreihe ohne Chitosan sind blau, Überstände der Formulierungen aus zweiter Versuchsreihe mit Chitosan sind rot dargestellt.

In der Gruppe mit 0% Abrasiva wurde eine vollständige Sn-Konzentration im Überstand nachgewiesen. Bei Anwesenheit von Silica war die Verfügbarkeit von Sn-Ionen grundsätzlich verringert (Daten GABA International AG, Therwil, Schweiz), was durch die Sn-Adsorption an Silica begründet wird [Jung, 2014].

Vergleichbare Ergebnisse lieferte die Studie von Ganss et al. In der Gruppe eines abrasivfreien Gels wurde eine vollständige Verfügbarkeit von Sn-Ionen nachgewiesen,

während Slurrygruppen mit Silica als Abrasivmittel eine in ähnlicher Dimension reduzierte Sn-Verfügbarkeit zeigten [Ganss et al., 2012b].

Die Abnahme der Verfügbarkeit von Sn-Ionen verhält sich jedoch nicht, wie erwartet, proportional zur Silica-Konzentration. Auch bei steigender Silica-Konzentration erscheint die Verfügbarkeit von Sn-Ionen weitestgehend konstant (Daten GABA International AG, Therwil, Schweiz). Dieses Ergebnis liefert möglicherweise die Erklärung dafür, dass zwischen S-Gruppen mit unterschiedlicher Silica-Konzentration keine signifikanten Unterschiede in ihrer Wirksamkeit messbar waren. Insgesamt wurde die Verfügbarkeit von Sn-Ionen trotz der Adsorption als ausreichend beschrieben [Jung, 2014].

Die Sn-Adsorption von Polyethylen lag unterhalb der Nachweisgrenze. Es kann davon ausgegangen werden, dass Polyethylen kaum beziehungsweise keine Sn-Ionen adsorbiert und die Verfügbarkeit von Sn-Ionen innerhalb der Zahnpasten-Slurry nicht reduziert (Daten GABA International AG, Therwil, Schweiz). Trotzdem war die Sn-Verfügbarkeit der Polyethylen-Gruppen insgesamt leicht vermindert. Diese Reduzierung wird jedoch auf die ebenfalls enthaltenen Silica-Partikel zurückgeführt, welche der Basisformulierung zur Einstellung der Abrasivität beigefügt waren.

Der Vergleich von Silica und Polyethylen lässt vermuten, dass die Sn-Adsorption an Abrasiva wahrscheinlich keinen entscheidenden Einfluss auf die Effektivität der Formulierung hat. Vielmehr scheint die Sn-Verfügbarkeit innerhalb der Zahnpastenslurry eine Rolle zu spielen, welche in allen Formulierungen ausreichend war [Jung, 2014].

4.2.3 Abrasion auf gesunden und erodierten Schmelzoberflächen

Gesunder Schmelz besitzt aufgrund seiner enormen Härte sowie Prismenstruktur eine starke Widerstandskraft gegenüber physikalischen Einwirkungen. Ein großer Substanzverlust durch Bürstabrasion erscheint ohne vorherige Erosion unwahrscheinlich [Voronets und Lussi, 2010].

Dentin weist im Vergleich zu Schmelz histologische Unterschiede in Struktur und Aufbau auf und besitzt eine geringere Härte. Dentin zeigt somit eine geringere Abrasionsresistenz [Lussi et al., 2011].

Studien mit Dentinproben zeigten, dass die Abrasivität von Zahnpasten von verschiedenen Faktoren abhängt. Der Bürstentyp [Harte und Manly, 1975; Manly et al., 1974], die Härte der Bürste, die Abrasivkonzentration [Harte und Manly, 1975; Harte und Manly, 1976] sowie die angewendete Kraft [Manly et al., 1974] beeinflussen den Substanzverlust von humanen Dentinproben. Das Ausmaß des Einflusses hängt von der Art der Abrasiva ab [Harte und Manly, 1975; Harte und Manly, 1976]. Auch das Verdünnungsmedium, das Ausmaß der Verdünnung sowie die Temperatur spielen hierbei eine Rolle [Harte und Manly, 1976].

Die In-vitro-Studie von Parry et al. zeigte, dass Faktoren wie Bürstdruck, Temperatur und Bürstgeschwindigkeit den Substanzverlust von gesunden Schmelzproben beeinflussen [Parry et al., 2008].

Mit steigendem Bürstdruck war tendenziell ein erhöhter Substanzverlust erkennbar. Auch bei ansteigender Temperatur war bei Anwesenheit von Abrasiva wie Silica und Kalziumkarbonat ein erhöhter Substanzverlust zu verzeichnen. Die erhöhte Abrasivität bei steigender Temperatur wird hierbei auf die abnehmende Viskosität der Slurry sowie die veränderte Abrasiva-Verteilung innerhalb der Slurry zurückgeführt [Parry et al., 2008].

Bei geringer Bürstgeschwindigkeit war der Substanzverlust nur leicht reduziert. Insgesamt erschien die Bedeutung der Bürstgeschwindigkeit eher unwesentlich [Parry et al., 2008].

In der Literatur finden sich wenige Erkenntnisse über die Effekte von Abrasiva auf erodierten Schmelzoberflächen. Während gesunder Schmelz sehr widerstandsfähig ist,

tritt bei säureexponierten Schmelzoberflächen ein signifikanter Substanzverlust auf [Voronets und Lussi, 2010; Vieira et al., 2006]. Die erosive Demineralisation bewirkt einen Verlust der Mikrohärtigkeit und führt zu einer erhöhten Empfindlichkeit der Zahnhartsubstanz gegenüber physikalischen Einwirkungen [Attin et al., 1997; Turssi et al., 2005].

Viele homogene Studienergebnisse zeigen, dass Bürstabrasion den Substanzverlust erodierter Schmelzoberflächen allgemein erhöht [Ganss et al., 2013]. Es besteht die Frage, welche Faktoren hierbei eine Rolle spielen. Es wird vermutet, dass der Großteil des Zahnhartsubstanzverlustes auf den Einfluss von Abrasiva zurückgeht. Die Art der Zahnbürste scheint eine eher untergeordnete Rolle zu spielen [Voronets und Lussi, 2010].

Voronets und Lussi untersuchten in einer In-vitro-Studie die durch Bürsten abradierete Schichtdicke des demineralisierten Schmelzes. In abrasivhaltiger Slurry gebürstete erodierte Schmelzproben zeigten deutlich höhere Substanzverluste im Vergleich zu in künstlichem Speichel gebürstete Proben. Mit steigender Anzahl an Bürststrichen war bei den in Slurry gebürsteten Proben ein zunehmender Substanzverlust messbar. Nach 240 Bürststrichen zeigte sich keine weitere signifikante Erhöhung des Substanzverlustes. Daraus wurde gefolgert, dass die demineralisierte oberflächliche Schicht nahezu vollständig abradieret wurde. Die Schichtdicke der demineralisierten Oberfläche betrug in Abhängigkeit von der verwendeten Säure 254 – 323 nm. In künstlichem Speichel ohne Abrasiva gebürstete Proben zeigten dagegen einen vernachlässigbaren Substanzverlust. Bürsten ohne Zahnpasta-Slurry beziehungsweise ohne Abrasiva führt somit zu keinem signifikanten Substanzverlust [Voronets und Lussi, 2010].

Diese Schlussfolgerung deckt sich mit den Ergebnissen der Abrasionsstudie von Lippert et al. In dieser In-vitro-Studie wurden Schmelzproben in Trinkwasser gebürstet. Auf die Verwendung von abrasivhaltigen Zahnpasten wurde verzichtet. Es konnte nachgewiesen werden, dass typische prismatische Muster der erosiven Demineralisation trotz Bürstabrasion auf der Schmelzoberfläche persistieren [Lippert et al., 2004].

Auch Wiegand et al. vermuten, dass der Substanzverlust hauptsächlich auf der Wirkung der Abrasiva als auf dem Einfluss der Zahnbürste beruht [Wiegand et al., 2008].

In dieser Studie wurde die Wirkung von Slurries mit unterschiedlichen REA-Werten (REA: 2, 6, 9) unter Verwendung von Zahnbürsten mit unterschiedlicher Härte (Filament-Durchmesser: 0,15; 0,20; 0,25 mm) auf bovinen Schmelzproben untersucht. Um

ausschließlich die Wirkung der Abrasiva bzw. Zahnbürsten zu analysieren, wurde in dieser Studie auf Wirkstoffe wie beispielsweise Fluoride verzichtet. Um eine Wechselwirkung verschiedener Abrasiva mit der erodierten Schmelzoberfläche zu vermeiden, wurde lediglich ein Abrasivmittel (Kalziumpyrophosphat) eingesetzt. Der Vergleich zwischen Abrasiva-freier Kontrollgruppe (REA: 2) und Abrasiva-haltigen Slurries (REA: 6 und 9) zeigt, dass die Anwesenheit der Abrasiva zu deutlich höheren Zahnhartsubstanzen führt [Wiegand et al., 2008].

Auch der Filament-Durchmesser der Zahnbürsten beeinflusste den Substanzverlust, jedoch in einem deutlich geringeren Ausmaß im Vergleich zur Wirkung der Abrasiva. Lediglich Gruppen, die mit der Slurry des REA-Wertes 6 behandelt wurden, zeigten signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Filament-Durchmessern. In dieser Gruppe erzeugte die Bürste mit einem Filamentdurchmesser von 0,2 mm einen größeren Substanzverlust als die Bürste mit einem Durchmesser von 0,15 oder 0,25 mm [Wiegand et al., 2008].

Wie bereits für gesunde Zahnhartsubstanz beschrieben, wird hier die Komplexität der Interaktion von abrasiven Partikeln und Festkörperoberflächen nochmal bestätigt.

Vergleichbare Ergebnisse wurden in der Studie von Hara et al. nachgewiesen. In dieser In-vitro-Studie wurden fluoridfreie Zahnpasten mit unterschiedlichen REA-Werten (low, medium, high) und Silica als Abrasivmittel untersucht. Schmelzproben zeigten tendenziell einen steigenden Substanzverlust mit zunehmendem REA-Wert. Formulierungen mit einem niedrigen REA-Wert zeigten deutlich geringere Substanzverluste im Vergleich zu Formulierungen mit einem mittleren und hohen REA-Wert. Zwischen Formulierungen mit mittlerem und hohem REA-Wert war kein signifikanter Unterschied nachweisbar. Auch in dieser Studie wurde deutlich, dass die Abrasivität ein wichtiger Einflussfaktor für das Ausmaß des Substanzverlustes ist [Hara et al., 2009].

Grundsätzlich ermöglichen RDA- und REA-Messungen zwar die Bestimmung des abrasiven Potenzials von Zahnpasten in Labortests, jedoch keine Vorhersage des tatsächlichen Zahnhartsubstanzverlusts in der Mundhöhle. Bei diesen Messwerten handelt es sich lediglich um relative Vergleichswerte [Dörfer, 2011]. Diese unterliegen starken methodischen Problemen sowie einer sehr hohen Variabilität in Hinblick auf die durchführenden Laboratorien. Beispielsweise kann der RDA-Wert derselben Zahnpaste bei Messungen in verschiedenen Laboratorien bis zu 240% variieren [Dörfer, 2011].

Insgesamt wird deutlich, dass der durch Bürstabrasion bedingte klinische Zahnhartsubstanzverlust relativ unabhängig vom RDA- und REA-Wert erscheint.

Ein weiterer wichtiger Faktor im Rahmen des Substanzverlustes durch Bürstabrasion ist der erosionsbedingte Mikrohärteverlust. In einer Studie mit bovinen Schmelzproben wurde geschlussfolgert, dass die Abrasionsempfindlichkeit erodierter Schmelzproben mit den Werten der Mikrohärte korreliert. Steigende Demineralisationsdauer führt zu abnehmender Mikrohärte und zu einem überproportionalen Anstieg des Substanzverlustes durch Bürstabrasion. Das Ausmaß des Substanzverlustes hängt somit davon ab, wie stark enthärtet die Schmelzoberfläche ist [Attin et al., 1997].

Die vorgenannte Abrasionsstudie von Lippert et. al zeigte ebenso eine verminderte Mikrohärte bei zunehmender Demineralisationsdauer. Der Substanzverlust durch Bürstabrasion war jedoch unabhängig von der Demineralisationsdauer [Lippert et al., 2004]. Die Mikrohärte der erodierten Schmelzoberfläche ist nach dem Bürsten wieder erhöht, erreicht aber bei Weitem nicht das Maß an Mikrohärte von gesundem Schmelz [Lippert et al., 2004].

Der Vergleich dieser beiden Studien macht deutlich, dass auch das Ausmaß der Erosionserzeugung eine Rolle für den abrasionsbedingten Substanzverlust spielt. In der Studie von Lippert et al. wurden initiale Erosionen (Zitronensäure, pH 3,25; 1, 2, 3 Minuten) untersucht [Lippert et al., 2004], wohingegen in der Studie von Attin et al. starke Erosionen (Sprite Light, pH 2,91; 1, 5, 15 Minuten) und somit wesentlich höhere Enthärtungen des Schmelzes erzeugt wurden [Attin et al., 1997].

Des Weiteren erfolgte die Bürstabrasion in der Studie von Attin et al. in nicht fluoridierter Slurry mit Silica als Abrasivmittel [Attin et al., 1997], während in der Studie von Lippert et. al, wie bereits beschrieben, nur in Trinkwasser gebürstet wurde [Lippert et al., 2004].

Neben Abrasiva enthalten Zahnpasten in der Regel verschiedene Wirkstoffe. Ziel von erosionsinhibierenden Wirkstoffen ist die Erhöhung der Säureresistenz von Zahnhartsubstanzen.

Es wird vermutet, dass der Effekt der physikalischen Einwirkung in einem kleinen Bereich der Schmelzoberfläche auftritt [Ganss et al., 2011]. Bei dieser Annahme würde das Ausmaß des Substanzverlustes sowohl vom erosionsinhibierenden Potenzial der Wirkstoffe als auch von ihrer Wirkungsweise abhängen. Handelt es sich lediglich um eine Oberflächenpräzipitation, würde der Substanzverlust auf der Menge sowie den

physikalischen Eigenschaften der aufgelagerten Substanzen beruhen [Ganss et al., 2011]. Bei einem Einbau von verschiedenen Ionen stellt sich die Frage, wie die dabei veränderte Schmelzstruktur vor physikalischen Einwirkungen geschützt werden kann [Ganss et al., 2011]. Die Interaktion von Abrasiva und Wirkstoffen konnte bisher nicht vollständig aufgeklärt werden.

Mehrere Studien bestätigen die Reduktion des Substanzverlustes durch fluoridhaltige Zahnpasten bei alleiniger Applikation von Slurries. Bei zusätzlicher Bürstabrasion resultieren jedoch deutlich höhere Substanzverluste [Ganss et al., 2011; Magalhaes et al., 2007; Moretto et al., 2010; Rios et al., 2008].

Sn-haltige Zahnpasten scheinen eine stärkere oder zumindest gleich starke erosionsinhibierende Wirkung zu besitzen. Die Applikation von Sn/F-haltigen Slurries zeigt eine gute Wirksamkeit und reduziert den Substanzverlust im Vergleich zu NaF-Zahnpasten deutlich [Faller et al., 2011; Ganss et al., 2011; Hooper et al., 2007; Young et al., 2006]. Bei Bürstabrasion ist die Wirksamkeit von Sn/F-Formulierungen jedoch reduziert und führt zu höheren Substanzverlusten, die mit denen konventioneller NaF-Zahnpasten vergleichbar sind [Ganss et al., 2012b].

Die In-situ-Studie von Huysmans et al. zeigte hingegen auch bei Bürstabrasion sehr erfolgversprechende Ergebnisse. Es wurde gezeigt, dass Sn/F-Zahnpasten nicht nur den erosiven, sondern ebenso den abrasiven Substanzverlust im Vergleich zur NaF-Zahnpaste signifikant reduzieren konnten [Huysmans et al., 2011b].

Die Studie deutet darauf hin, dass weitere Faktoren wie der pH-Wert die Effektivität der Zahnpaste beeinflussen. Obwohl die untersuchten Sn/F-Zahnpasten eine fast gleiche Fluorid-Konzentration aufwiesen, zeigte die Zahnpaste mit geringerem pH-Wert eine noch bessere Wirksamkeit [Huysmans et al., 2011b].

In einer weiteren In-situ-Studie konnte die erosions- und abrasionsinhibierende Wirkung einer Sn/F-Zahnpaste ebenso bestätigt werden. Untersucht wurden zwei Sn/F-Zahnpasten (A: 0,4% SnF₂; B: 0,454% SnF₂) sowie eine Sn/F Lösung (0,4% SnF₂). Die Sn/F Lösung wies nahezu vollständigen Schutz vor erosiven und abrasiven Einwirkungen auf. Die Sn/F Zahnpaste (A) zeigte eine geringere Wirkung als die Sn/F Lösung, aber dennoch einen signifikanten Schutz. Die Sn/F Zahnpaste (B) enthielt zwar einen höheren Fluorid-Gehalt als die Sn/F Zahnpaste (A), bot jedoch keinen signifikanten Schutz vor erosiv-abrasiven Einwirkungen [Hove et al., 2014].

Zahnpaste (B) enthielt eine modifizierte stabilere Sn/F-Verbindung. Es wird spekuliert, dass die Wirksamkeit der Zahnpaste durch die Modifizierung vermindert wurde. Möglicherweise bewirken einige Inhaltsstoffe die Adsorption von freien Sn- und F-Ionen [Hove et al., 2014].

Die Zahnpaste (A) enthielt Sn-Pyrosphosphat und somit vermutlich eine höhere Konzentration an freien Sn-Ionen. Die Zahnpaste (A) besaß zudem einen geringeren pH-Wert als Zahnpaste (B) [Hove et al., 2014]. Bereits in anderen Studien wurde gezeigt, dass die Wirksamkeit von fluoridhaltigen Präparaten unter sauren Bedingungen erhöht ist [Saxegaard und Rolla, 1988].

Formulierungen sind aufgrund vieler Inhaltsstoffe sehr kompliziert, was die Interpretation von Effekten von kombiniert physikalisch-chemischen Einflüssen auf der Schmelzoberfläche erschwert. Es wird vermutet, dass Abrasiva die Effekte der Wirkstoffe stören [Ganss et al., 2013]. Eine mögliche Theorie ist, dass die physikalische Wirkung der Abrasiva die Präzipitation von Sn-Salzen auf der Schmelzoberfläche hindert oder bereits Sn-angereicherte oberflächliche Schmelzstrukturen entfernt [Ganss et al., 2013]. Somit besteht die Forderung nach Wirkstoffen, die nicht nur eine erhöhte Resistenz gegenüber erosiver Demineralisation, sondern auch gegenüber physikalischer Einwirkung ermöglichen.

4.2.4 Effekte der Slurry-Bürst-Gruppen

Die positive Wirkungskraft von Sn/F Formulierungen wird auch bei den SB-Gruppen deutlich. Mit Ausnahme der Gruppen mit 5% und 10% Silica aus V1 zeigten alle Gruppen beider Versuchsreihen einen signifikant geringeren Substanzverlust im Vergleich zur wirkstofffreien Placebogruppe.

Neben Wirkungseffekten, wie sie bereits bei den S-Gruppen beschrieben wurden, sind bei den SB-Gruppen durch Bürstabrasion zusätzlich physikalische Effekte feststellbar. Gegenüber der alleinigen Applikation der Slurries bei den S-Gruppen erhöht die zusätzliche Bürstabrasion den Substanzverlust um 23 – 85% (V1) bzw. 35 – 77% (V2). Die Bewegung der Abrasiva auf der Probenoberfläche führte somit zu einem erhöhten Abrieb.

Die beste Wirksamkeit zeigten, wie erwartet, Formulierungen ohne Abrasiva und mit 20% Polyethylen. Die untersuchten Formulierungen mit Polyethylen enthielten jedoch zur Einstellung der Abrasivität wie alle Testprodukte zusätzlich Silica und Aluminiumoxid als Basisformulierung. Aufgrund des schwachen Reinigungspotenzials ist Polyethylen als alleiniges Abrasivmittel nicht einsetzbar.

Bei abrasivhaltigen Formulierungen wurde erwartet, dass mit steigender Konzentration an Abrasiva gleichen Typs auch der Substanzverlust zunimmt. Innerhalb von V1 (ohne Chitosan) bestand jedoch kein proportionaler Zusammenhang zwischen Substanzverlust und Silica-Gehalt. Zwischen den SB-Gruppen mit 5% – 20% Silica war kein statistisch signifikanter Unterschied feststellbar. Der signifikante Unterschied von 0% Silica zu 5% und 10% Silica zeigt einen erhöhten Verlust bei gesteigerter Silica-Konzentration. Bei weiterer Steigerung des Silica-Gehalts auf 15% und 20% ist im Vergleich zur Gruppe mit 0% Silica allerdings kein signifikanter Unterschied nachweisbar. Die weitere Konzentrationszunahme hatte offenbar nicht, wie zunächst erwartet, zu einer weiteren Zunahme, sondern zu einer Abnahme des Substanzverlustes geführt.

Diese Vermutung erhärtet sich beim Vergleich der SB-Gruppen von V2 (mit Chitosan). Auch in V2 war der Substanzverlust der SB-Gruppen nicht proportional zum Silica-Gehalt. Es ist festzustellen, dass die Wirksamkeit der Formulierungen mit steigendem Silica-Gehalt bis 10% signifikant abnimmt. Mit weiter zunehmendem Silica-Gehalt bis

20% kommt es zu einer signifikanten Zunahme der Wirksamkeit und somit geringen Substanzverlusten.

Entgegen der Hypothese war in beiden Versuchsreihen (V1 und V2) bei höherer Konzentration an Abrasiva ein geringerer Substanzverlust feststellbar. Es wird deutlich, dass Art und Menge der Abrasiva die Wirksamkeit der Zahnpastenformulierung beeinflussen.

Dieser paradoxe Befund ist nicht einfach zu erklären. Gegebenenfalls ist es aber möglich, aus dem Bereich der Tribologie eine Erklärung abzuleiten.

Das Versuchsverfahren der vorliegenden Studie lässt sich mit dem aus der Fertigungstechnik stammenden Läppen, einem Feinbearbeitungsverfahren nach DIN 8589-15, vergleichen. Mit diesem Fertigungsverfahren können fast alle Werkstückstoffe, wie z. B. alle Metalle, Oxidkeramiken, Rohgläser, Naturstoffe und sonstige Hartstoffe sowie verzugempfindliche und unmagnetische Teile bearbeitet werden [Hoffmeister, 2008].

Das Läppen beschreibt das Spanen mit geometrisch unbestimmten und ungebundenen Körnern, die sich in Verbindung mit einer Paste oder Suspension zum sogenannten Läppgemisch zusammensetzen. Das Läppgemisch wird zwischen Werkstück und Gegenstück geführt [Westkämper und Warnecke, 2002].

Im Läppverfahren dringen die Spitzen der einzelnen Körner auf ihren ungeordnet rollenden Schneidbahnen in das Werkstück ein und induzieren Mikrorisse. Diese führen zum Ausbrechen mikroskopisch kleiner Werkstoffpartikel und in Summe zum Materialabtrag [Westkämper und Warnecke, 2002].

In der vorliegenden Studie ist das Läppgemisch mit der Slurry gleichzusetzen. Die vorgenannten Körner stellen die Abrasiva dar. Das Werkstück wird durch die Schmelzprobe und das Gegenstück durch den Bürstenkopf dargestellt. Im Läppverfahren wie auch im vorliegenden Laborversuch bewirken Relativbewegungen in Form ungeordneter Rollbewegungen der Abrasiva zwischen dem Werkstück Schmelzprobe und dem Gegenstück Bürstenkopf einen Substanzabtrag.

Beim Läppen entstehen zwei zeitgleich ablaufende Vorgänge des Abtrages am Werkstück. Läppkörner drücken sich in das Gegenstück und in das Werkstück ein. Die Läppkörner werden hierbei so im Gegenstück festgehalten, dass infolge der Relativbewegung zwischen dem Gegenstück und der Werkstückoberfläche ein Spanen

stattfindet [Hoffmeister, 2008]. Bezugnehmend auf die vorliegende Studie kann dieser erste Vorgang vernachlässigt werden, da Abrasiva keinen festen Halt am Bürstenkopf erlangen.

Im zweiten parallelen Vorgang rollen Läppkörner zwischen Gegenstück und Werkstück ab. In diesem Prozess verformen und verfestigen Kornspitzen den Werkstoff an der Werkstückoberfläche. Übersteigt der Verformungswiderstand die Trennfestigkeit des Werkstoffs, kommt es zum Herausbrechen von Werkstoffteilchen [Hoffmeister, 2008]. Dieser zweite Vorgang ist mit dem Verfahren im Laborversuch durch rollende Abrasiva zwischen Bürstenkopf und Schmelzprobe vergleichbar.

Beide Versuchsreihen zeigen zunächst einen erwartungsgemäß zunehmenden Substanzverlust bei Erhöhung des Abrasiva-Gehalts bis zu einem sichtbaren Scheitelpunkt. Bei weiterer Erhöhung des Abrasiva-Gehalts verringert sich hingegen der Substanzverlust.

Es wird vermutet, dass die Erhöhung der Anzahl von Körnern bzw. Abrasiva über den Scheitelpunkt hinaus eine größere Körnungsverteilung zwischen Schmelzprobe und Bürstenkopf zur Folge hat. Diese größere Körnungsverteilung wird durch die überhöhte Dichte an Abrasiva erreicht und bewirkt eine Art Übersättigung. Eine Theorie wäre, dass eine über den Scheitelpunkt hinaus ansteigende Abrasivadichte den Materialabtrag bzw. Substanzverlust zunehmend verhindert.

Die nachfolgende Abbildung scheint diese Theorie zu bestätigen (Abb. 13). Der Materialabtrag, hier als Zeitspanvolumen bezeichnet, lässt sich innerhalb bestimmter Grenzen durch eine größere Läppkorndichte steigern, da immer mehr Körner am Werkstoffabtrag beteiligt werden. Im weiteren Verlauf zunehmender Läppkorndichte hindern sich die Körner in ihrer Bewegung. Hierdurch wird der Materialabtrag vermindert [Hoffmeister, 2008].

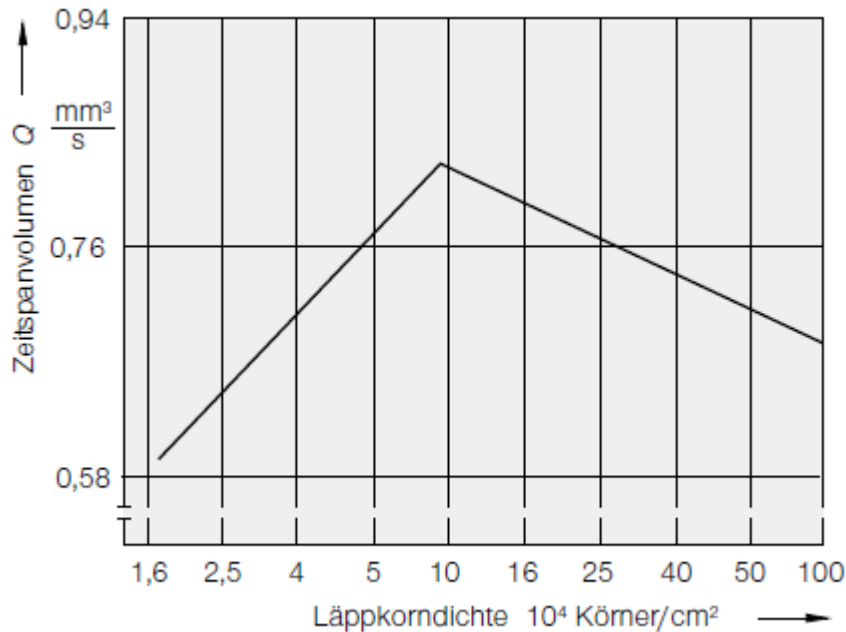


Abb. 13: „Zeitspanvolumen Q in Abhängigkeit von der Läppkorndichte – Werkstückstoff: GJL 250 (GG 26); Läppscheibe: Perlitguss, 180HB; Läppkorn: SiC; Läppkornflüssigkeit: Petroleum – (nach Lichtenberg)“ [Hoffmeister, 2008].³

Cong et al. beschreiben das Läppverfahren als einen sehr komplexen Vorgang, der durch eine Reihe von Faktoren wie Läppdruck, Rotationsgeschwindigkeit, Abrasivagröße, Abrasiva-Konzentration und Slurry-Fließgeschwindigkeit beeinflusst wird. In Hinblick auf die Abrasiva-Konzentration ist ein Phänomen des nicht linearen Abtrags erkennbar. Anfänglich kommt es in einem relativ kleinen Bereich der Konzentrationssteigerung zu einem linearen Anstieg des Materialabtrags, bei weiterer Konzentrationssteigerung sinkt die Steigung des Materialabtrags jedoch immer weiter ab [Cong et al., 2009]. Insgesamt deutet dieser Verlauf ebenso auf eine Art Sättigung hin.

³ Die Abbildung wird im Rahmen eines durch das Copyright Clearance Center („CCC“) zur Verfügung gestellten Nutzungsvertrags zwischen Frau Maike Möllers und Springer-Verlag verwendet (Lizenznummer: 3602030748489).

Eine Studie zur chemisch-mechanischen Politur mit Silica-haltigen Slurries zeigt ebenso einen zunehmenden Materialabtrag bei steigender Abrasiva-Konzentration bis zu einem definierten Scheitelpunkt. Bei weiterer Konzentrationssteigerung ist ein geringerer Materialabtrag zu verzeichnen. Die Studie deutet darauf hin, dass weitere Faktoren wie Slurry-pH-Wert, Korngröße, Konzentration und Art der Abrasiva sowie Art des Festkörpers eine Rolle spielen [Ahn et al., 2004].

Im Läppverfahren ist beschrieben, dass Körner insbesondere durch längere Läppzeiten splintern. Dies bewirkt eine Verkleinerung der Korndurchmesser und verringert den Werkstoffabtrag. Mit zunehmender Läppkorndichte werden daher nicht nur die Körner in ihrer Bewegung gehindert, sondern in gleicher Weise auch ein Splintern verringert [Hoffmeister, 2008]. Es ist offen, ob Abrasiva im Bürstvorgang möglicherweise ebenso splintern und den Verlauf des Substanzverlustes mitbestimmen. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich.

4.2.5 Wirkung von Chitosan

Seit einiger Zeit werden dem Biopolymer Chitosan ($C_6H_{11}NO_4$)_n erosionsinhibierende Eigenschaften zuerkannt. Chitosan ist ein kationisches Polysaccharid natürlichen Ursprungs und wird durch Abspaltung von Acetylgruppen des Chitinmoleküls gewonnen [Kumar et al., 2004].

Das Biopolymer Chitin ($C_8H_{13}NO_5$) findet sich vor allem in Schalen von Krustentieren, Muscheln, Zellwänden von Pilzen und im Exoskelett von Gliederfüßern wie beispielsweise Insekten. Chitosan bietet ein vielfältiges Anwendungsspektrum in industriellen und biomedizinischen Bereichen [Kumar et al., 2004]. Es besitzt gewebshelende [Xu et al., 2012] wie auch antibakterielle Eigenschaften innerhalb der Mundhöhle [Decker et al., 2005; Verkaik et al., 2011] und hemmt das Wachstum von *Streptococcus mutans* [Bae et al., 2006; Tarsi et al., 1997].

Die vorliegende In-vitro-Studie belegt das antierosive Potenzial von Sn/F-Formulierungen. Aus der zusätzlichen Bürstabrasion resultieren jedoch höhere Substanzverluste. Ziel der zweiten Versuchsreihe war es, die positiven Effekte der erosionsinhibierenden Wirkstoffe Fluorid, Sn und Chitosan wirkungsvoll zu kombinieren und die Auswirkung auf den Substanzverlust zu untersuchen.

Beim Vergleich der SB- und S-Gruppen aus der ersten und zweiten Versuchsreihe ist eine höhere Effektivität durch den Zusatz von Chitosan feststellbar. Im Vergleich zur Placebo-Gruppe zeigen die Sn/F-Formulierungen (mit Ausnahme der SB-Formulierungen mit 5% und 10% Silica) eine signifikante Reduktion des Substanzverlustes von 35 – 54% innerhalb der SB-Gruppen und 51– 82% innerhalb der S-Gruppen. Der Zusatz von Chitosan zeigt eine noch effektivere Wirksamkeit und vermindert den Substanzverlust um 48 – 84% innerhalb der SB-Gruppen und um 69% bis nahezu 100% innerhalb der S-Gruppen.

Die vorliegende In-vitro-Studie zeigt, dass Sn/F/Chitosan-haltige Formulierungen den durch Erosion und Abrasion bedingten Substanzverlust unabhängig von Art und Menge der Abrasiva signifikant reduzieren.

Eine signifikante Reduktion des Substanzverlustes durch eine Sn/F/Chitosan-haltige Formulierung bestätigen Resultate eines ähnlichen Versuches. Wie auch in der vorliegenden Studie, wurden Schmelzproben über einen Zeitraum von zehn Tagen

behandelt. Die erosive Demineralisation erfolgte täglich für 6 x 2 Minuten in 0,5%-iger Zitronensäure. Im Anschluss an die erste und letzte Demineralisation eines Versuchstages wurden die Proben für 2 Minuten mit Slurry behandelt und für 15 Sekunden im Bürstsimulator gebürstet. Die Formulierung mit Sn/F/Chitosan (AmF/NaF/SnCl₂ + 0,5% Chitosan) zeigte im Vergleich zu den untersuchten NaF-Formulierungen (NaF/1, NaF/2, NaF/3) und Sn-Formulierungen (NaF/SnCl₂, AmF/SnF₂, AmF/NaF/SnCl₂) die stärkste Wirksamkeit. Im Vergleich zur Placebo-Gruppe reduzierten Sn/F-Formulierungen den Substanzverlust um 27% – 39%. Der Zusatz von Chitosan zur Sn/F-Formulierung konnte die Wirksamkeit der Formulierung deutlich steigern und reduzierte den Substanzverlust um bis zu 67% [Ganss et al., 2012b]. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit den Ergebnissen der vorliegenden In-vitro-Studie.

In einer weiteren In-vitro-Studie mit ähnlichen Versuchsbedingungen wurde die erosionsinhibierende Wirkung von Chitosan ebenfalls bestätigt. Es konnte gezeigt werden, dass Chitosan sogar ohne Fluorid vor Erosionen schützt. Die fluoridfreie Formulierung mit Chitosan zeigte sowohl ohne als auch mit zusätzlicher Bürstabrasion vergleichbare Werte des Substanzverlustes wie konventionelle NaF-Formulierungen [Ganss et al., 2011].

Auch In-situ-Studien zeigen ermutigende Ergebnisse Chitosan-haltiger Formulierungen. Es wurde bestätigt, dass die Sn/F/Chitosan-Formulierung im Vergleich zu einer konventionellen Na/F-Formulierung eine signifikant höhere Effektivität gegen erosiven sowie erosiv/abrasiven Substanzverlust aufweist. Im Vergleich zur Placebo-Gruppe reduzierte die Sn/F/Chitosan-Formulierung den Substanzverlust um 52,5% innerhalb der S-Gruppen und um 50,2% innerhalb der SB-Gruppen. Die konventionelle Na/F-Formulierung senkte den Substanzverlust im Vergleich zur Placebo-Gruppe lediglich um 19,0% innerhalb der S-Gruppen und um 21,3% innerhalb der SB-Gruppen [Schlueter et al., 2013]. Dieses Ergebnis entspricht ebenso den Ergebnissen der vorliegenden Studie und deutet darauf hin, dass die Wirkstoffkombination Sn/F/Chitosan auch in Anwesenheit von Speichel und Pellikel effektiv ist.

Die In-situ-Studie von Schlueter et al. untersuchte ebenso die Wirksamkeit einer Sn/F-Zahnpaste mit und ohne Zusatz von Chitosan und bestätigt das positive anti-erosive/anti-abrasive Potenzial des Biopolymers. Der Zusatz von Chitosan steigerte die Wirksamkeit der Sn/F-haltigen Zahnpaste deutlich. Im Vergleich zur Placebo-Gruppe reduzierte die

Sn/F/Chitosan-Formulierung den Substanzverlust um 46% innerhalb der SB-Gruppen und um 76% innerhalb der S-Gruppen. Interessanterweise zeigte die Sn/F/Chitosan-Zahnpaste (im Gegensatz zu der Sn/F-Formulierung ohne Chitosan) nicht nur im Vergleich zur SB-Placebo-Gruppe eine deutliche Reduktion des Substanzverlustes, sondern auch im Vergleich zur Placebogruppe ohne Bürstabrasion (15%) [Schlueter et al., 2014].

Trotz der vorliegenden Hinweise auf den erosions- und abrasionsinhibierenden Effekt von Chitosan besteht bislang nur wenig Kenntnis über den genauen Wirkungsmechanismus sowie die Interaktion mit Schmelzoberflächen, Pellikel, Abrasiva und weiteren Wirkstoffen. Insbesondere über die Kombination von Chitosan und Sn/F und deren synergistische Effekte ist nur wenig bekannt.

Die positive Wirkungskraft von Chitosan kann auf die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Biopolymers zurückgeführt werden. Chitosan besitzt eine stark positive Ladung bei niedrigem pH-Wert [Li et al., 1992] und bindet elektrostatisch an Strukturen mit negativem Zeta-Potenzial [Guo und Gemeinhart, 2008].

Mit einem negativen Zeta-Potenzial von -17 bis -30 mV (unbehandelte Proben) beziehungsweise -10 bis -14 mV (in Speichel behandelte Proben) [Young et al., 1997] bietet Schmelz eine gute Adsorptionsmöglichkeit für Chitosan. Pellikel und Silica weisen ebenso ein negatives Zeta-Potenzial auf [Weerkamp et al., 1988; Kim und Lawler, 2005]. Eine Adsorption von Chitosan an die Pellikel oder Abrasiva ist gleichermaßen denkbar. Insgesamt ist die Interaktion von Chitosan mit derart negativ geladenen Strukturen sehr komplex.

Von Pellikeln bedeckte Schmelzproben besitzen ein negativeres Zeta-Potenzial als unbedeckte Proben [Weerkamp et al., 1988]. Somit adsorbiert Chitosan bevorzugt an negativ geladene Pellikel und beeinflusst deren Oberflächeneigenschaften. Beispielsweise wird nicht nur die negative Ladung der Pellikel in eine positive Ladung gewandelt, sondern auch die Hydrophobie und die Oberflächenrauigkeit erhöht [van der Mei et al., 2007]. Die Relevanz der zuletzt erwähnten Veränderungen auf die vorliegende Fragestellung ist bisher nicht bekannt, bietet jedoch Potenzial für weiterführende Forschungsarbeiten.

Es wurde zudem gezeigt, dass Chitosan-Moleküle mit weiteren Chitosan-Molekülen [Guo und Gemeinhart, 2008] und insbesondere mit Muzin in Mehrfachschichten

adsorbieren können [Dedinaite et al., 2005; Svensson et al., 2006]. Muzin adsorbiert an negativ geladene Strukturen und bildet eine stark hydratisierte Schicht. Diese Schicht kann durch das in vielen Zahnpastaformulierungen enthaltende anionische Tensid Natriumlaurylsulfat leicht entfernt werden. Bindet positiv geladenes Chitosan an die zuvor adsorbierte Muzinschicht, bildet sich ein Muzin-Chitosan-Komplex. Diese Schicht ist auch gegenüber hohen Konzentrationen von Natriumlaurylsulfat sehr stabil [Dedinaite et al., 2005]. Dabei wird vermutet, dass es nicht nur zur Adsorption sondern vielmehr zu einer Inkorporation von Chitosan in die Muzinschicht kommt [Dedinaite et al., 2005].

Die Mehrfachschichten sind bemerkenswert resistent gegenüber Veränderungen des pH-Wertes und auch bei relativ saurem pH-Wert stabil [Claesson und Ninham, 1992]. Hierdurch wird die darunterliegende Probenoberfläche geschützt [Lee et al., 2012].

Die positiven Effekte der vorliegenden Studie können vermutlich auf den Aufbau einer protektiven organischen Schicht auf der Probenoberfläche zurückzuführen sein, die auch unter erosiven Bedingungen Schutz bietet.

Eine weitere Studie zeigt, dass sowohl physikalisch adsorbiertes als auch vernetztes Chitosan Hydroxylapatit vor Erosionen schützt, wobei vernetztes Chitosan eine etwas stärkere Schutzwirkung bietet [Lee et al., 2012].

Auch die Oberflächeneigenschaften des Festkörpers scheinen im Rahmen der Adsorption von Chitosan eine Rolle zu spielen. Beispielsweise ist bei hydrophobierten Silica-Partikeln ein annähernd linearer Anstieg von adsorbierten Chitosan-Muzin-Schichten zu verzeichnen, wohingegen bei unmodifizierten Silica-Partikeln die Adsorption begrenzt ist. Vermutlich ist eine ausreichende Menge des zuerst adsorbierten Muzins entscheidend für die sukzessive Mehrschichtbildung. Hierbei zeigen hydrophobierte Silica-Partikel eine deutlich größere Muzinadsorption als unmodifizierte Silica-Partikel [Svensson et al., 2006].

In diesem Zusammenhang wäre es sehr interessant zu untersuchen, wie sich die Wirkstoffkombination Sn/F/Chitosan in einer Formulierung mit modifizierten Silica-Partikeln auf den erosiv-/abrasiv bedingten Zahnhartsubstanzverlust auswirkt.

Eine weitere mögliche Funktion von Chitosan ist der Lubrikationseffekt [Kampf et al., 2004]. Bei der elektrostatischen Bindung von Chitosan an Silica kommt es möglicherweise zur Bildung eines Gleitfilmes, wodurch die Friktion zwischen Zahnhartsubstanz und Abrasiva vermindert wird. Die Abrasivität der Silica-Partikel wird

reduziert und die Zahnhartsubstanz vor einem weiteren Substanzverlust geschützt.

Bei der Adsorption von Chitosan an die Schmelzoberfläche ist Reduktion des Abrasionseffektes durch die vorgenannten Lubrikationseigenschaften gleichermaßen vorstellbar.

Die vorliegende Studie zeigt, dass Chitosan unabhängig von der Art und der Menge der Abrasiva den Substanzverlust maßgeblich reduziert. Es besteht somit die Frage, ob Sn bei Anwendung von Sn/F-haltigen Formulierungen grundsätzlich in den Schmelz aufgenommen wird und diese Aufnahme durch Chitosan möglicherweise verstärkt wird.

Um diese interessante Frage zu beantworten, wurde in der Nachfolgerstudie durch energiedispersive Röntgenspektroskopie die Sn-Aufnahme auf der Schmelzoberfläche gemessen. Es konnte nachgewiesen werden, dass alle mit Sn/F-Formulierungen behandelten Proben eine Zinnaufnahme zeigten. Alle mit Chitosan-haltigen Formulierungen behandelten Schmelzproben zeigten eine signifikant höhere Sn-Aufnahme als Vergleichsproben ohne Chitosan [Jung, 2014].

Formulierungen ohne Abrasiva zeigten die höchste Sn-Aufnahme und erreichten bis zu dreimal höhere Werte als die entsprechenden Formulierungen mit Abrasiva. Formulierungen mit Silica und Polyethylen zeigten in Bezug auf die Sn-Aufnahme im Schmelz keinen signifikanten Unterschied. Die Sn-Aufnahme hing hauptsächlich von der An- oder Abwesenheit der Abrasiva ab. Insgesamt wurde die Sn-Aufnahme der Schmelzoberfläche durch die Anwesenheit von Chitosan deutlich erhöht [Jung, 2014].

Der Zusammenhang von Substanzverlust und Sn-Verfügbarkeit⁴ auf den untersuchten Schmelzproben der SB-Gruppen wird im nachfolgenden Diagramm graphisch dargestellt (Abb. 14).

⁴ Die Daten der Sn-Verfügbarkeit auf der Schmelzoberfläche wurden in der Nachfolgerstudie von Herrn Dr. Jung erhoben und mit freundlicher Genehmigung verwendet [Jung, 2014].

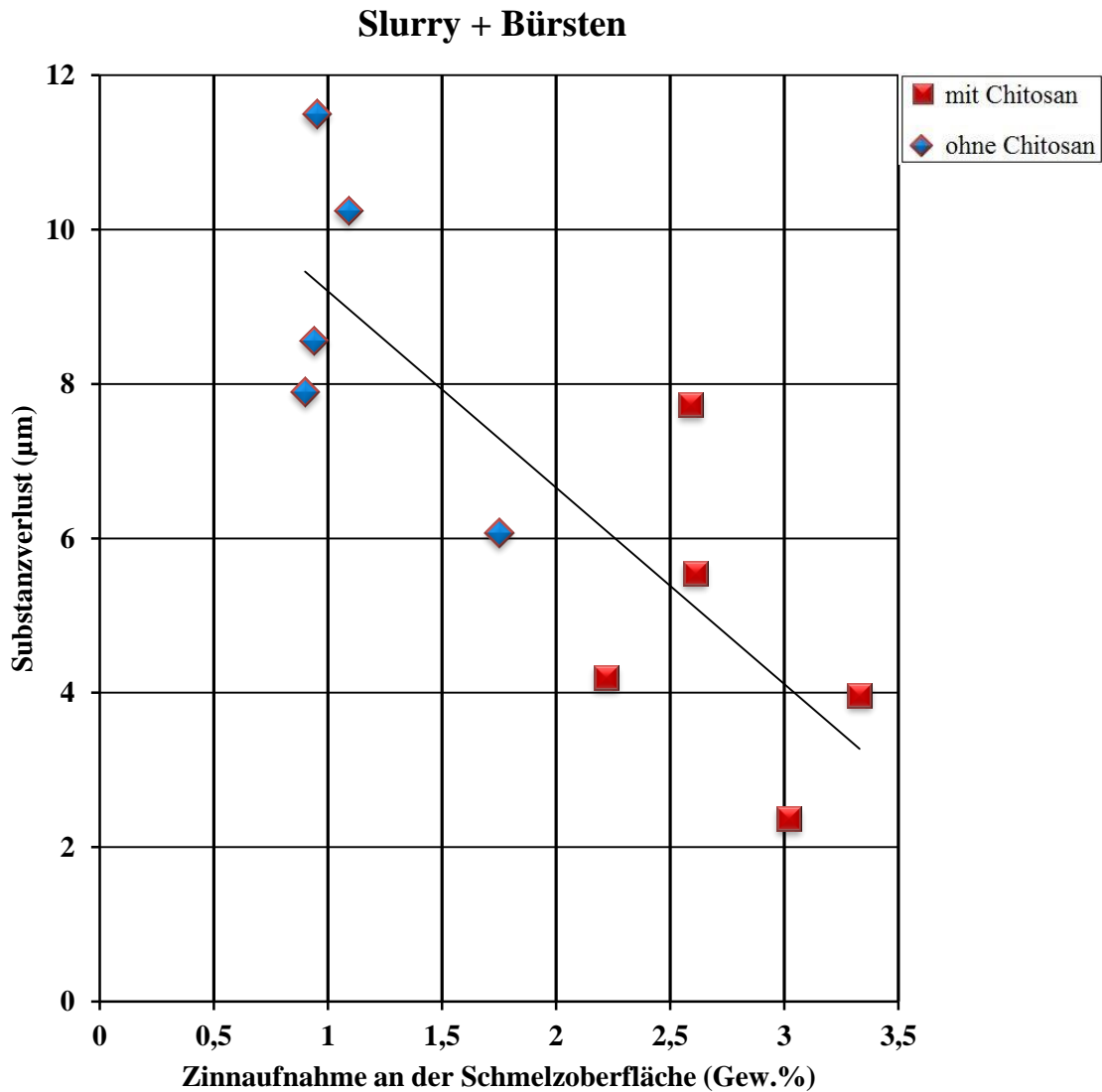


Abb. 14: Darstellung des linearen Zusammenhangs von Sn-Aufnahme an der Schmelzoberfläche und Substanzverlust bei **SB-Gruppen**. Auf der X-Achse ist die Sn- Retention in Gew. %, auf der y-Achse der Substanzverlust in µm dargestellt. Der funktionelle Zusammenhang wird durch die Regressionsgerade veranschaulicht. Gruppen aus der ersten Versuchsreihe ohne Chitosan sind blau, Gruppen aus der zweiten Versuchsreihe mit Chitosan sind rot dargestellt. Die Daten der Sn-Verfügbarkeit wurden in der Nachfolgerstudie von Herrn Dr. Jung erhoben und werden mit freundlicher Genehmigung verwendet [Jung, 2014].

Bei Gegenüberstellung von Substanzverlust und Zinnkonzentration wird deutlich, dass eine höhere Zinnaufnahme mit einer Reduktion des Substanzverlustes korreliert (Abb. 13). Die mit Chitosan behandelten Gruppen der zweiten Versuchsreihe zeigen eine deutlich höhere Sn-Aufnahme sowie geringere Substanzverluste als ohne Chitosan behandelte Gruppen der ersten Versuchsreihe. Der lineare Zusammenhang von geringerem Substanzverlust bei erhöhter Zinnaufnahme ist sowohl bei SB-Gruppen als auch bei S-Gruppen erkennbar. Durch physikalische Einwirkung der Bürstabrasion ist diese Beziehung bei SB-Gruppen sogar noch deutlicher.

Neben der Bestimmung der Zinnkonzentration wurde in der Nachfolgerstudie durch Kohlenstoffgehaltsuntersuchungen versucht, Chitosan auf der Schmelzoberfläche indirekt nachzuweisen. Die abrasivafreien Gruppen mit Chitosan zeigten einen signifikant höheren Kohlenstoffgehalt als Gruppen ohne Chitosan. In den Gruppen mit Abrasiva war der indirekte Nachweis von Chitosan über den Kohlenstoffgehalt nicht möglich, was auf eine Wechselwirkung von Abrasiva und Chitosan hindeutet [Jung, 2014].

Insgesamt wurde sowohl bei SB-Gruppen als auch bei S-Gruppen ein positiver linearer Zusammenhang von Kohlenstoff- und Zinnkonzentration nachgewiesen. Bei steigendem Kohlenstoffgehalt ist ebenso eine höhere Zinnkonzentration auf der Probenoberfläche messbar. In der Nachfolgerstudie wurde ein möglicher Synergismus von Chitosan und Sn gefolgert [Jung, 2014].

Des Weiteren wurde gezeigt, dass Chitosan die Sn-Adsorption an Abrasiva nicht verringert [Jung, 2014]. Eine kompetitive Adsorption von Chitosan und Sn an Abrasiva erscheint somit unwahrscheinlich.

Zusammenfassend besteht die Annahme, dass die Wirkstoffkombination Sn/F/Chitosan im Vergleich zu Sn/F-Formulierungen ohne Chitosan zu einer widerstandsfähigeren Schmelzoberfläche gegenüber erosiven und abrasiven Einwirkungen führt. Chitosan scheint trotz physikalischer Einflüsse an die Schmelzoberfläche zu adsorbieren, die Sn-Aufnahme zu erhöhen und den Substanzverlust zu reduzieren.

Chitosan ist ein Biopolymer mit sehr interessanten Eigenschaften und eröffnet neue Perspektiven im Rahmen der Erosions- und Abrasionsprävention. Trotz deutlicher Hinweise auf erosions- und abrasionsinhibierende Eigenschaften sind weitere

Untersuchungen notwendig, um die Wechselwirkung von Chitosan mit weiteren Wirkstoffen, wie beispielsweise F und Sn, Abrasiva und erodierten Schmelzoberflächen umfassend aufzuklären.

4.3 Schlussfolgerung

Sn ist gegenwärtig der effektivste Wirkstoff zur Prävention und Therapie von Erosionen. Die außerordentlich gute antierosive Wirkung von Sn wurde in Mundspüllösungen nachgewiesen. Der schützende Effekt von Sn in Zahnpasten blieb im Vergleich zu Mundspüllösungen hinter den erhofften Erwartungen zurück. Anders als Mundspüllösungen setzen sich Zahnpasten aus einer Vielzahl von Komponenten zusammen. Dies macht Zahnpastaformulierungen sehr kompliziert.

Derzeit besteht die Suche nach Einflussfaktoren für die reduzierte Wirksamkeit. Offenbar spielt die Abrasivkonzentration eine wichtige Rolle. Es wurde nachgewiesen, dass Bürstabrasion die Wirksamkeit der Formulierung grundsätzlich reduziert.

Die Erhöhung der Abrasivkonzentration führt zu einer reduzierten Wirksamkeit bis zu einem Scheitelpunkt. Bei weiterer Konzentrationssteigerung nimmt die Wirksamkeit jedoch wieder zu. Es konnte ein Einfluss von Art und Menge der Abrasiva auf die Wirksamkeit von Zahnpastaformulierungen nachgewiesen werden.

Das Biopolymer Chitosan zeigt ein erfolgversprechendes antierosives Potenzial. Chitosan steigert unabhängig von Art und Menge der Abrasiva die Effektivität der Zahnpastenformulierungen. Trotz physikalischer Einwirkung scheint Chitosan an die Schmelzoberfläche zu adsorbieren, die Sn-Aufnahme im Schmelz zu erhöhen und den Substanzverlust zu reduzieren.

Ein Synergismus von Sn und Chitosan erscheint möglich. Es ist somit zu empfehlen, eine Zahnpaste zu entwickeln, welche die protektiven Eigenschaften von Sn/F und Chitosan kombiniert.

Diese interessanten Ergebnisse bieten ein breites weiterführendes Forschungspotenzial. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um die kombiniert physikalisch-chemischen Interaktionen, welche im Rahmen der Erosion sowie Abrasion auftreten, aufzuklären. Hierbei ist insbesondere der Wirkungsmechanismus von Sn/F sowie Chitosan mit Abrasiva und erodierten Schmelzoberflächen von großem Interesse.

5 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Studie war es, den Einfluss von verschiedenen Typen und unterschiedlichem Gehalt von Abrasiva auf die Wirksamkeit Sn/F-haltiger sowie Sn/F/Chitosan-haltiger experimenteller Zahnpasten gegen den erosiven und erosiv-abrasiven Substanzverlust bei humanem Schmelz zu untersuchen.

Die In-vitro-Studie wurde in zwei Versuchsreihen durchgeführt. In beiden Versuchsreihen (V1 + V2; jeweils 15 Gruppen, n = 15 pro Gruppe) wurden Schmelzproben für 10 Tage periodisch re- und demineralisiert (0,5%-ige Zitronensäure, pH 2,4; 6 x 2 Min./Tag). Proben der Gruppen 1 – 7 wurden zweimal täglich für je 2 Minuten mit einer Zahnpasta-Slurry behandelt und für 15 Sekunden innerhalb der Einwirkungszeit gebürstet (Auflagegewicht 200g, Bürstsimulator). Die Proben der Negativ-Kontrolle (Gruppe 8) wurden ausschließlich erodiert. Schmelzproben der Gruppen 9 – 15 wurden ebenso der Slurry ausgesetzt, aber nicht gebürstet. Der Basisformulierung (1400 ppm F; 3500 ppm Sn) wurden unterschiedliche Mengen von Abrasiva zugefügt (0, 5, 10, 15 und 20% Silica oder 20% Polyethylen, RDA: 56 – 81). Die Placebo-Formulierung enthielt 20% Abrasiva, aber keine Wirkstoffe. Testprodukte der zweiten Versuchsreihe enthielten zusätzlich 0,5% Chitosan bei ansonsten gleicher Formulierung. Der Substanzverlust der Proben wurde profilometrisch in μm bestimmt.

Die Negativ-Kontrollgruppe zeigte einen Substanzverlust von $11,7 \pm 3,2 \mu\text{m}$ in V1 und $11,0 \pm 2,5 \mu\text{m}$ in V2. Der höchste Substanzverlust in V1 und V2 wurde in der Placebo-Gruppe mit Bürstabrasion gemessen ($13,2 \pm 3,9 \mu\text{m}$ bzw. $14,7 \pm 1,8 \mu\text{m}$). Der Substanzverlust der Placebo-Gruppe ohne Bürstabrasion lag bei $9,6 \pm 2,3 \mu\text{m}$ in V1 und $9,1 \pm 2,6 \mu\text{m}$ in V2. Im Vergleich zur Placebo-Gruppe zeigten alle Bürstgruppen eine signifikante Reduktion des Substanzverlustes von 35% – 54% in V1 (mit Ausnahme der Gruppen mit 5% und 10% Silica) und 48% – 84% in V2. Bei den Gruppen ohne Bürstabrasion variierte die Reduktion zwischen 51% und 82% in V1 bzw. 69% und nahezu 100% in V2. In beiden Versuchsreihen bestand kein proportionaler Zusammenhang zwischen Substanzverlust und Silica-Gehalt. Die beste Wirksamkeit innerhalb der Bürstgruppen zeigte in beiden Versuchsreihen die Formulierung ohne Abrasiva (V1: $6,1 \pm 3,3 \mu\text{m}$; V2: $3,1 \pm 1,5 \mu\text{m}$; $p < 0,001$ im Vergleich zur Placebo-Gruppe) und mit 20% Polyethylen (V1: $6,1 \pm 2,8 \mu\text{m}$; V2: $2,4 \pm 1,0 \mu\text{m}$; $p < 0,001$ im Vergleich zur Placebo-Gruppe).

Typ und Menge der Abrasiva scheinen die Wirksamkeit von Sn/F-haltigen Formulierungen über die Abrasivität hinaus zu beeinflussen. Chitosan steigerte die Effektivität der Formulierungen unabhängig von Typ und Menge der Abrasiva.

6 Summary

Impact of abrasives on the efficacy of experimental Sn/F- and Sn/F/Chitosan-formulations against erosion and abrasion on human enamel in –vitro

The aim of this study was to investigate the impact of varying types and amounts of abrasives in experimental Sn/F-containing and Sn/F/Chitosan-containing toothpastes on erosive and erosive/abrasive tissue loss.

The study was conducted in two experiments. In both experiments (E1 + E2; 15 groups each, n = 15/group) human enamel specimens were subjected to a cyclic re- and demineralisation procedure for ten days (0.5% citric acid, pH 2.4; 6 x 2 min/day). Specimens of groups 1 – 7 were immersed in toothpaste slurries for 2 x 2 min/day and were brushed in a brushing machine for 15 seconds within immersion time (load 200 g). Negative control (group 8) was demineralised only. Specimens of groups 9 – 15 were also immersed in toothpaste slurries, but were not brushed. To the basic formulation (1400 ppm F, 3500 ppm Sn) varying amounts of abrasives were added (0, 5, 10, 15 and 20% silica or 20% polyethylene, range of RDA: 56 – 81). Placebo toothpaste contained 20% abrasives, but no active ingredients. To all toothpaste in E2 0.5% Chitosan was added. Tissue loss was determined profilometrically.

Tissue loss (E1/E2) after erosion only was $11.7 \pm 3.2 \mu\text{m}$ in E1 and $11.0 \pm 2.5 \mu\text{m}$ in E2. In E1 and E2 highest tissue loss was found after brushing with placebo ($13.2 \pm 3.9 \mu\text{m}$ respectively $14.7 \pm 1.8 \mu\text{m}$). Tissue loss of placebo without brushing was $9.6 \pm 2.3 \mu\text{m}$ in E1 and $9.1 \pm 2.6 \mu\text{m}$ in E2. All formulations with brushing reduced the tissue loss compared to placebo significantly in the order of 35% – 54% in E1 (except the ones with 5% and 10% silica) and 48% – 84% in E2. Tissue loss reduction of groups without brushing ranged between 51% and 82% in E1 respectively 69% and almost 100% in E2. Generally, in both experiments efficacy was not proportional to silica content. The numerically best results in both experiments were found with the formulation without abrasives (E1: $6.1 \pm 3.3 \mu\text{m}$; E2: $3.1 \pm 1.5 \mu\text{m}$; each $p < 0,001$ compared to placebo) and with 20% polyethylene (E1: $6.1 \pm 2.8 \mu\text{m}$; E2: $2.4 \pm 1.0 \mu\text{m}$; each $p < 0,001$ compared to placebo;).

Type and amount of abrasives may have an impact on efficacy of Sn/F-toothpaste beyond

abrasiveness. Chitosan generally increased efficacy independent of the type and amount of abrasives.

7 Literaturverzeichnis

1. Aguirre A, Mendoza B, Levine MJ, Hatton MN, Douglas WH: In vitro characterization of human salivary lubrication. *Arch Oral Biol* 1989; 34: 675-677.
2. Ahn Y, Yoon JY, Baek CW, Kim YK: Chemical mechanical polishing by colloidal silica-based slurry for micro-scratch reduction. *Wear* 2004; 257: 785-789.
3. 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.
4. Attin T, Buchalla W, Putz B: In vitro evaluation of different remineralization periods in improving the resistance of previously eroded bovine dentine against tooth-brushing abrasion. *Arch Oral Biol* 2001; 46: 871-874.
5. 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.
6. Attin T, Meyer K, Hellwig E, Buchalla W, Lennon MA: Effect of mineral supplements to citric acid on enamel erosion. *Arch Oral Biol* 2003; 48: 753-759.
7. Babcock FD, King JC, Jordan TH: The reaction of stannous fluoride and hydroxyapatite. *J Dent Res* 1978; 57: 933-938.
8. Bae K, Jun EJ, Lee SM, Paik DI, Kim JB: Effect of water-soluble reduced chitosan on *Streptococcus mutans*, plaque regrowth and biofilm vitality. *Clin Oral Investig* 2006; 10: 102-107.
9. Bartlett D, Ganss C, Lussi A: Basic Erosive Wear Examination (BEWE): A new scoring system for scientific and clinical needs. *Clin Oral Invest* 2008; 12: 65-68.
10. Binnewies M, Jaeckel M, Willner H, Rayner-Canham G: *Allgemeine und Anorganische Chemie*. Zweite Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, 2010.
11. Buzalaf MA, Hannas AR, Kato MT: Saliva and dental erosion. *J Appl Oral Sci* 2012; 20: 493-502.
12. Claesson PM, Ninham BW: pH-dependent interactions between adsorbed chitosan layers. *Langmuir* 1992; 8: 1406-1412.

13. Cong WL, Zhang PF, Pei ZJ: Experimental Investigations on Material Removal Rate and Surface Roughness in Lapping of Substrate Wafers: A Literature Review. *Key Engineering Materials* 2009; 404: 23-31.
14. Decker EM, von Ohle C, Weiger R, Wiech I, Brex M: A synergistic chlorhexidine/chitosan combination for improved antiplaque strategies. *J Periodontal Res* 2005; 40: 373-377.
15. Dedinaite A, Lundin M, Macakova L, Auletta T: Mucin-chitosan complexes at the solid-liquid interface: multilayer formation and stability in surfactant solutions. *Langmuir* 2005; 21: 9502-9509.
16. Domsch A: Suspensionen. In: Domsch A: Die kosmetischen Präparate – Lipidhaltige und emulgierte Formulierungen. Vierte Auflage des von Nowak GA begründeten Werkes. Augsburg, Verlag für chemische Industrie, H. Ziolkowsky GmbH, 1994; 3: 320-326.
17. Dörfer CE: Abrasivität von Zahnpasten und ihre klinische Bedeutung. In: DGZMK eV, DGKiZ (Hrsg): Oralprophylaxe Kinderzahnheilkunde. Köln, Deutscher Ärzte-Verlag, 2011;1: 18-22.
18. Douglas WH, Reeh ES, Ramasubbu N, Raj PA, Bhandary KK, Levine MJ: Statherin: A major boundary lubricant of human saliva. *Biochem Biophys Res Commun* 1991; 180: 91-97.
19. 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.
20. Eisenburger M, Shellis RP, Addy M: Scanning electron microscopy of softened enamel. *Caries Res* 2004; 38: 67-74.
21. Faller RV, Eversole SL, Tzeghai GE: Enamel protection: a comparison of marketed dentifrice performance against dental erosion. *Am J Dent* 2011; 24: 205-210.
22. Featherstone JD, Lussi A: Understanding the chemistry of dental erosion. *Monogr Oral Sci* 2006; 20: 66-76.
23. 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.
24. 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.

25. 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.
26. Ganss C, Lussi A, Schlueter N: Dental erosion as oral disease. Insights in etiological factors and pathomechanisms, and current strategies for prevention and therapy. *Am J Dent* 2012a; 25: 351-364.
27. Ganss C, Schleichriemen M, Klimek J: Dental erosions in subjects living on a raw food diet. *Caries Res* 1999; 33: 74-80.
28. 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.
29. Ganss C, Schlueter N, Preiss S, Klimek J: Tooth brushing habits in uninstructed adults-frequency, technique, duration and force. *Clin Oral Invest* 2009; 13: 203-208.
30. Ganss C, Schulze K, Schlueter N: Toothpaste and erosion. *Monogr Oral Sci* 2013; 23: 88-99.
31. Ganss C, von Hinckeldey J, Tolle A, Schulze K, Klimek J, Schlueter N: Efficacy of the stannous ion and a biopolymer in toothpastes on enamel erosion/abrasion. *J Dent* 2012b; 40: 1036-1043.
32. Gerrard WA, Winter PJ: Evaluation of toothpastes by their ability to assist rehardening of enamel in vitro. *Caries Res* 1986; 20: 209-216.
33. Guo C, Gemeinhart RA: Understanding the adsorption mechanism of chitosan onto poly(lactide-co-glycolide) particles. *Eur J Pharm Biopharm* 2008; 70: 597-604.
34. Hammadeh M, Rees JS: The erosive susceptibility of cervical versus occlusal enamel. *Eur J Prosthodont Restor Dent* 2001; 9: 13-17.
35. Hannig M: Ultrastructural investigation of pellicle morphogenesis at two different intraoral sites during a 24-h period. *Clin Oral Investig* 1999a; 3: 88-95.
36. Hannig M, Balz M: Influence of in vivo formed salivary pellicle on enamel erosion. *Caries Res* 1999b; 33: 372-379.
37. 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.

38. 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.
39. Hart H, Craine LE, Hart DJ, Hadad CM: *Organische Chemie*. Dritte Auflage. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2007.
40. Harte DB, Manly RS: Effect of toothbrush variables on wear of dentin produced by four abrasives. *J Dent Res* 1975; 54: 993-998.
41. Harte DB, Manly RS: Four variables affecting magnitude of dentrifice abrasiveness. *J Dent Res* 1976; 55: 322-327.
42. Hellwig E, Klimek J, Attin T: *Einführung in die Zahnerhaltung*. Fünfte Auflage. Köln, Deutscher Zahnärzte Verlag, 2009.
43. Hoffmeister HW: Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden. In: Fritz AH, Schulze G (Hrsg): *Fertigungstechnik*. Achte Auflage. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2008; 337-341.
44. 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.
45. Hove L, Holme B, Ogaard B, Willumsen T, Tveit AB: The protective effect of TiF₄, SnF₂ and NaF on erosion of enamel by hydrochloric acid in vitro measured by white light interferometry. *Caries Res* 2006; 40: 440-443.
46. Hove LH, Holme B, Young A, Tveit AB: The protective effect of TiF₄, SnF₂ and NaF against erosion-like lesions in situ. *Caries Res* 2008; 42: 68-72.
47. Hove LH, Stenhagen KR, Holme B, Tveit AB: The protective effect of SnF₂ containing toothpastes and solution on enamel surfaces subjected to erosion and abrasion in situ. *Eur Arch Paediatr Dent* 2014; 15: 237-243.
48. Huysmans MC, Chew HP, Ellwood RP: Clinical studies of dental erosion and erosive wear. *Caries Res* 2011a; 45, H 1: 60-68.
49. Huysmans MC, Jager DH, Ruben JL, Unk DE, Klijn CP, Vieira AM: Reduction of erosive wear in situ by stannous fluoride-containing toothpaste. *Caries Res* 2011b; 45: 518-523.
50. Imfeld T: Dental erosion. Definition, classification and links. *Eur J Oral Sci* 1996; 104: 151-155.

51. Jaeggi T, Lussi A: Prevalence, incidence and distribution of erosion. In: Lussi A (Hrsg): Dental Erosion: From diagnosis to therapy. Monographs in oral science. Basel, Karger, 2006; 20:44-65.
52. Järvinen VK, Rytömaa I, Heinonen OP: Risk factors in dental erosion. *J Dent Res* 1991; 70: 942-947.
53. Jung MS: Wirkungsmechanismus von erosionsinhibierenden Sn/F-Zahnpasten im Schmelz: Effekte von Putzkörpern in experimentellen Formulierungen mit und ohne Chitosan. Eine Studie zur Zinnaufnahme und Ultrastruktur. Med Diss, Gießen 2014.
54. Kampf N, Raviv U, Klein J: Normal and Shear Forces between Adsorbed and Gelled Layers of Chitosan, a Naturally Occurring Cationic Polyelectrolyte. *Macromolecules* 2004; 37: 1134-1142.
55. Kelly MP, Smith BG: The effect of remineralizing solutions on tooth wear in vitro. *J Dent* 1988; 16: 147-149.
56. Kim J., Lawler D.F.: Characteristics of Zeta Potential Distribution in Silica Particles. *Bull Korean Chem Soc* 2005; 26: 1083-1089.
57. König K: Verbesserte Modelle zur Einschätzung der Abrasivität von Zahnpasten. *Schweiz Monatssch Zahnmed* 2002; 112: 673-674.
58. Kumar MN, Muzzarelli RA, Muzzarelli C, Sashiwa H, Domb AJ: Chitosan chemistry and pharmaceutical perspectives. *Chem Rev* 2004; 104: 6017-6084.
59. 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.
60. Lee HS, Tsai S, Kuo CC, Bassani AW, Pepe-Mooney B, Miksa D, Masters J, Sullivan R, Composto RJ: Chitosan adsorption on hydroxyapatite and its role in preventing acid erosion. *J Colloid Interface Sci* 2012; 385: 235-243.
61. Levitch LC, Bader JD, Shugars DA, Heymann HO: Non-carious cervical lesions. *J Dent* 1994; 22: 195-207.
62. Li Q, Dunn ET, Grandmison EW, Goosen MFA: Applications and properties of chitosan. *J Bioact Compat Pol* 1992; 7: 370-397.
63. Lippert F, Parker DM, Jandt KD: Toothbrush abrasion of surface softened enamel studied with tapping mode AFM and AFM nanoindentation. *Caries Res* 2004; 38: 464-472.

64. Lussi A, Jaeggi T: Erosion - diagnosis and risk factors. *Clin Oral Invest* 2008; 12: 5-13.
65. Lussi A, Jaeggi T: Die Abrasion erosiv veränderter Zahnhartsubstanz - eine Literaturübersicht. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 2002; 112: 629-634.
66. Lussi A, Jaeggi T: Dentale Erosionen - Von der Diagnose zur Therapie. Berlin, Quintessenz Verlags-GmbH, 2009.
67. Lussi A, Jaeggi T, Jaeggi-Schärer S: Prediction of the erosive potential of some beverages. *Caries Res* 1995; 29: 349-354.
68. Lussi A, Jaggi T, Schärer S: The influence of different factors on in vitro enamel erosion. *Caries Res* 1993; 27: 387-393.
69. Lussi A, Schaffner M, Jaeggi T, Grüniger A: Erosionen Befund-Diagnose-Risikofaktoren-Prävention-Therapie. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 2005; 115: 917-935.
70. Lussi A, Schlueter N, Rakhmatullina E, Ganss C: Dental erosion - an overview with emphasis on chemical and histopathological aspects. *Caries Res* 2011; 45 H 1: 2-12.
71. Lussi A, von Salis-Marincek M, Ganss C, Hellwig E, Cheaib Z, Jaeggi T: Clinical study monitoring the pH on tooth surfaces in patients with and without erosion. *Caries Res* 2012; 46: 507-512.
72. 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.
73. Magalhaes AC, Wiegand A, Buzalaf MA: Use of dentifrices to prevent erosive tooth wear: harmful or helpful? *Braz Oral Res* 2014; 28: 1-6.
74. Magalhaes AC, Wiegand A, Rios D, Buzalaf MA, Lussi A: Fluoride in dental erosion. *Monogr Oral Sci* 2011; 22: 158-170.
75. Manly RS, Wiren J, Harte DB, Ahern JM: Influence of method of testing on dentifrice abrasiveness. *J Dent Res* 1974; 53: 835-839.
76. Marinho VC: Cochrane reviews of randomized trials of fluoride therapies for preventing dental caries. *Eur Arch Paediatr Dent* 2009; 10: 183-191.
77. Maupome G, Diez-de-Bonilla J, Torres-Villasenor G, Andrade-Delgado LC, Castano VM: In vitro quantitative assessment of enamel microhardness after exposure to eroding immersion in a cola drink. *Caries Res* 1998; 32: 148-153.

78. Meurman JH, Drysdale T, Frank RM: Experimental erosion of dentin. *Scand J Dent Res* 1991a; 99: 457-462.
79. Meurman JH, Frank RM: Progression and surface ultrastructure of in vitro caused erosive lesions in human and bovine enamel. *Caries Res* 1991b; 25: 81-87.
80. Meyer-Lückel H, Paris S, Ekstrand K: *Karies - Wissenschaft und Klinische Praxis*. Stuttgart, Thieme Verlag, 2012.
81. Micheelis W, Schiffner U: *Vierte Deutsche Mundgesundheitsstudie (DMS IV)*. Köln, Deutscher Zahnärzte Verlag, 2006.
82. Millward A, Shaw L, Harrington E, Smith AJ: Continuous monitoring of salivary flow rate and pH at the surface of the dentition following consumption of acidic beverages. *Caries Res* 1997; 31: 44-49.
83. 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.
84. Nekrashevych Y, Stösser L: Protective influence of experimentally formed salivary pellicle on enamel erosion. An in vitro study. *Caries Res* 2003; 37: 225-231.
85. 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.
86. 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* 2008; 139: 1652-1656.
87. Saxegaard E, Rolla G: Fluoride acquisition on and in human enamel during topical application in vitro. *Scand J Dent Res* 1988; 96: 523-535.
88. Scherge M, Sarembe S, Kiesows A, Petzold M: Dental Tribology at the Microscale. *Wear* 2013; 297: 1040-1044.
89. Schlueter N, Ganss C, De Sanctis S, Klimek J: Evaluation of a profilometrical method for monitoring erosive tooth wear. *Eur J Oral Sci* 2005; 113: 505-511.
90. Schlueter N, Hara AT, Shellis RP, Ganss C: Methods for measurement and characterization of erosion in enamel and dentine. *Caries Res* 2011; 45, 1: 13-23.
91. 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* 2009; 117: 427-434.

-
92. Schlueter N, Klimek J, Ganss C: Randomised in situ study on the efficacy of a tin/chitosan toothpaste on erosive-abrasive enamel loss. *Caries Res* 2013; 47: 574-581.
 93. Schlueter N, Klimek J, Ganss C: Effect of a chitosan additive to a Sn²⁺-containing toothpaste on its anti-erosive/anti-abrasive efficacy - a controlled randomised in situ trial. *Clin Oral Investig* 2014; 18: 107-115.
 94. Schüpbach P, Oppenheim FG, Lendenmann U, Lamkin MS, Yao Y, Guggenheim B: Electron-microscopic demonstration of proline-rich proteins, statherin, and histatins in acquired enamel pellicles in vitro. *Eur J Oral Sci* 2001; 109: 60-68.
 95. Shellis RP, Ganss C, Ren Y, Zero DT, Lussi A: Methodology and models in erosion research: Discussion and conclusions. *Caries Res* 2011; 45, 1: 69-77.
 96. Srinivasan N, Kavitha M, Loganathan SC: Comparison of the remineralization potential of CPP-ACP and CPP-ACP with 900 ppm fluoride on eroded human enamel: An in situ study. *Arch Oral Biol* 2010; 55: 541-544.
 97. Svensson O, Lindh L, Cardenas M, Arnebrant T: Layer-by-layer assembly of mucin and chitosan - Influence of surface properties, concentration and type of mucin. *J Colloid Interface Sci* 2006; 299: 608-616.
 98. Tabak LA: In defense of the oral cavity: Structure, biosynthesis, and function of salivary mucins. *Annu Rev Physiol* 1995; 57: 547-564.
 99. Tarsi R, Muzzarelli RA, Guzman CA, Pruzzo C: Inhibition of *Streptococcus mutans* adsorption to hydroxyapatite by low-molecular-weight chitosans. *J Dent Res* 1997; 76: 665-672.
 100. 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.
 101. van der Mei HC, Engels E, de Vries J, Dijkstra RJB, Busscher HJ: Chitosan adsorption to salivary pellicles. *Eur J Oral Sci* 2007; 115: 303-307.
 102. Verkaik MJ, Busscher HJ, Jager D, Slomp AM, Abbas F, van der Mei HC: Efficacy of natural antimicrobials in toothpaste formulations against oral biofilms in vitro. *J Dent* 2011; 39: 218-224.
 103. Vieira A, Overweg E, Ruben JL, Huysmans MC: Toothbrush abrasion, simulated tongue friction and attrition of eroded bovine enamel in vitro. *J Dent* 2006; 34: 336-342.
 104. Voronets J, Lussi A: Thickness of softened human enamel removed by toothbrush abrasion: An in vitro study. *Clin Oral Investig* 2010; 14: 251-256.

105. Weerkamp AH, Uyen HM, Busscher HJ: Effect of zeta potential and surface energy on bacterial adhesion to uncoated and saliva-coated human enamel and dentin. *J Dent Res* 1988; 67: 1483-1487.
106. Wegehaupt FJ, Taubock TT, Stillhard A, Schmidlin PR, Attin T: Influence of extra- and intra-oral application of CPP-ACP and fluoride on re-hardening of eroded enamel. *Acta Odontol Scand* 2012; 70: 177-183.
107. West NX, Hughes JA, Addy M: The effect of pH on the erosion of dentine and enamel by dietary acids in vitro. *J Oral Rehabil* 2001; 28: 860-864.
108. Westkämper E, Warnecke HJ: Einführung in die Fertigungstechnik. Fünfte Auflage. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, BG Teubner GmbH, 2002; 233.
109. Wetton S, Hughes J, West N, Addy M: Exposure time of enamel and dentine to saliva for protection against erosion: A study in vitro. *Caries Res* 2006; 40: 213-217.
110. Wiegand A, Attin T: Design of erosion/abrasion studies - insights and rational concepts. *Caries Res* 2011; 45, H 1: 53-59.
111. 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* 2008; 66: 231-235.
112. Willumsen T, Ogaard B, Hansen BF, Rolla G: Effects from pretreatment of stannous fluoride versus sodium fluoride on enamel exposed to 0.1 M or 0.01 M hydrochloric acid. *Acta Odontol Scand* 2004; 62: 278-281.
113. Wirtschaftsvereinigung Alkoholfreie Getränke eV: Entwicklung des Pro-Kopf-Verbrauchs von Alkoholfreien Getränken nach Getränkearten 2009-2013. Berlin, 2013.
114. Xu C, Lei C, Meng L, Wang C, Song Y: Chitosan as a barrier membrane material in periodontal tissue regeneration. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 2012; 100: 1435-1443.
115. Young A, Smistad G, Karlsen J, Rolla G, Rykke M: Zeta potentials of human enamel and hydroxyapatite as measured by the Coulter DELSA 440. *Adv Dent Res* 1997; 11: 560-565.
116. Young A, Thrane PS, Saxegaard E, Jonski G, Rølla G: Effect of stannous fluoride toothpaste on erosion-like lesions: An in vivo study. *Eur J Oral Sci* 2006; 114: 180-183.

117. Zantner C, Kielbassa AM: Wie wirksam sind Weißmacher-Zahnpasten? In: Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde eV (Hrsg): Oralprophylaxe. Köln, Deutscher Ärzte-Verlag, 2002; 24: 23-29.
118. Zhang XZ, Anderson P, Dowker SEP, Enzell K: Optical profilometric study of changes in surface roughness of enamel during in vitro demineralisation. Caries Res 2000; 34: 164-174.

8 Anhang

8.1 Publikation

Die Ergebnisse der vorliegenden in vitro Studie wurden auf der 59. Jahrestagung der European Organisation of Caries Research (ORCA) in Cabo Frio/Brasilien vorgestellt und sind als Abstract publiziert.

Impact of Abrasives and Chitosan on the Efficacy of Experimental F/Sn-Toothpastes against Erosion/Abrasion in-vitro

O. Grunau, N. Schlueter, M. Möllers, J. Klimek, C. Ganss
Caries Res 2012; 46; 276 (Abstract)

acid were collected using a questionnaire. Poisson regression model was used for data analysis ($p < 0.05$). **Results:** The prevalence of ETW was similar in 2008 (51.6%) and 2010 (53.9%) and most of the lesions found were confined to enamel. There were no significant associations between ETW and dental caries or socio-economic, environmental, and nutritional variables. Risk indicators for ETW were daily soft drink intake ($p < 0.001$), drinking methods causing prolonged contact with the teeth ($p = 0.007$) frequent gastroesophageal reflux ($p = 0.005$), frequent vomiting ($p = 0.011$), and an increase in age ($p = 0.003$). **Conclusions:** In conclusion, a high and similar prevalence of ETW was found in this sample of preschool children in 2008 and 2010 and risk indicators included the frequency and method of soft drink intake, vomiting, reflux and an increase in age.

Funded by National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) Brazilian Federal Agency for Support and Evaluation of Graduate Education (CAPES).

19

Impact of Abrasives and Chitosan on the Efficacy of Experimental F/Sn-Toothpastes against Erosion/Abrasion In-vitro

O. Grunau*, N. Schlueter, M. Möllers, J. Klimek, C. Ganss

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

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

Tin is a notable anti-erosive agent. In toothpastes tin might interact with abrasives possibly influencing its efficacy. Chitosan is a positively charged biopolymer with anti-erosive properties and able to bind to various surfaces. The effect of varying types and amounts of abrasives and of Chitosan in experimental F/Sn toothpastes on erosive/abrasive tissue loss was investigated. The study was conducted in two experiments. In both experiments (E1+E2; 8 groups each, $n = 15$) human enamel specimens were cyclically demineralised (10 days, 0.5% citric acid, pH 2.6; 6×2 min/day). Specimens were exposed to toothpaste slurries for 2×2 min/day and were brushed for 15 s within the exposure time (2 N, brushing machine). Negative control was erosion only. Substance loss was quantified profilometrically (μm). To a basic formulation (1,400 ppm F, 3,500 ppm Sn) varying amounts (wt%) of abrasives were added (5, 10, 15, 20% silica or 20% polyethylene, range of RDA: 56–81). One formulation contained no abrasives; placebo toothpaste contained 20% abrasives but no F/Sn. To all toothpastes in E2 Chitosan was added. Tissue loss (E1/E2) after erosion only was $11.7 \pm 3.2/11.0 \pm 2.5$. In E1/E2 highest tissue loss was found after brushing with placebo ($13.2 \pm 3.9/14.7 \pm 1.8$). Tissue loss reduction (%) compared to placebo ranged between 2% and 48% in E1 and between 48 and 84% in E2. In both experiments efficacy was not proportional to silica content. The best efficacy in both experiments was found with the formulation without abrasives (E1: 6.1 ± 3.3 ; E2: 3.1 ± 1.5 ; each $p < 0.001$ compared to placebo) and with 20% polyethylene (E1: 6.1 ± 2.8 ; E2: 2.4 ± 1.0 ; each $p < 0.001$ compared to placebo). Type and amount of abrasives may have an impact on efficacy beyond abrasiveness. Chitosan increased efficacy independent of the type and amount of abrasives.

Supported by GABA International, Therwil, Switzerland.

20

Mode of Action of Experimental F/Sn-Preparations: In-vitro and In-situ Tin Retention on Enamel after Erosion/Abrasion

N. Schlueter*, J. Brinker, J. Klimek, C. Ganss

nadine.schlueter@dentist.med.uni-giessen.de

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

Tin anti-erosive properties are based on the incorporation of the ion into the dental hard tissue. This been shown to occur with highly concentrated mouthrinses in-vitro. However, nothing is known about the mode of action of tin under in-situ conditions and for lower Sn concentrations as present in toothpastes. In contrast to mouthrinses, toothpastes have a complex composition, containing a multitude of ingredients including abrasives or efficacy enhancing additives, e.g. the biopolymer Chitosan. Therefore, their mode of action might be different to mouthrinses. The retention of tin on and in human enamel after corresponding in-vitro and in-situ use of three different F/Sn-containing preparations was investigated: one abrasive-free gel (3,000 ppm Sn, 1,000 ppm F), two experimental toothpastes (TP1: 3,500 ppm Sn, 1,400 ppm F; TP2: as TP1 plus Chitosan). All specimens were cyclically eroded (0.5% citric acid; 6×2 min/day) and treated 2×2 min/day with slurries. In-vitro specimens were brushed for 15 s (2 N, brushing-machine) within the exposure time. In-situ specimens were intraorally treated and brushed for 5 s within the 2 min exposure time (2.5 N, powered toothbrush). Tin retention was measured by Electron-Dispersive-X-ray-spectroscopy on surfaces and cross sections. Tin content (wt%) on in-vitro surfaces was (gel, TP1, TP2) 2.7 ± 0.3 , 0.9 ± 0.3 , 2.1 ± 0.4 ($p < 0.001$ between all groups), and on in-situ surfaces 5.6 ± 4.6 , 1.0 ± 1.0 , 1.1 ± 0.9 ($p < 0.01$ between gel and TP1/TP2). Significant differences between in-situ and in-vitro specimens were found for gel and TP2. Tin incorporation was deeper under in-vitro than under in-situ conditions. The use of the gel led to higher tin retention than the toothpastes, both under in-vitro and in-situ conditions, perhaps due to the lack of abrasives. Chitosan had a significant impact on tin retention under in-vitro, but not under in-situ conditions.

Supported by GABA International, Therwil, Switzerland.

21

Role of Abrasives and Chitosan in Experimental F/Sn Toothpastes: Tin-Uptake in Enamel after Erosion/Abrasion In-vitro

K. Schulze*, N. Schlueter, M. Jung, J. Klimek, C. Ganss

katja.schulze@dentist.med.uni-giessen.de

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

Tin and Chitosan have promising anti-erosion properties. In toothpastes, however, tin might interact with abrasives influencing the efficacy of the preparation. Chitosan might adsorb to surfaces with negative zeta-potential, thus influencing the tin-uptake

8.2 Ehrenwörtliche Erklärung

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

Gießen, 31. Mai 2015

Unterschrift

8.3 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. Carolina Ganß für die Bereitstellung des interessanten Themas dieser Arbeit und die freundliche sowie kompetente Betreuung in allen Abschnitten dieser Dissertation.

Herzlichen Dank möchte ich auch an die Abteilung für Zahnerhaltungskunde und Präventive Zahnheilkunde des Zentrums für Zahn-, Mund-, und Kieferheilkunde der Justus-Liebig-Universität Gießen richten. Insbesondere danke ich Frau Birgitt Meier für ihre Unterstützung im medizinisch-technischen Labor.

Ein besonderer Dank geht an meinen guten Freund Philipp für die moralische und tatkräftige Unterstützung.

Von ganzem Herzen möchte ich mich bei meiner Großmutter sowie meiner Patentante und meinem Onkel für die Unterstützung und Motivation während des Studiums sowie der Anfertigung dieser Arbeit bedanken. Auch möchte ich meinem Freund Michael einen liebevollen Dank für seine Unterstützung sowie seinen unermüdlichen Optimismus aussprechen.

**Der Lebenslauf wurde aus der elektronischen
Version der Arbeit entfernt.**

**The curriculum vitae was removed from the
electronic version of the paper.**



édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

VVB LAUFERSWEILER VERLAG
STAUFENBERGRING 15
D-35396 GIESSEN

Tel: 0641-5599888 Fax: -5599890
redaktion@doktorverlag.de
www.doktorverlag.de

ISBN: 978-3-8359-6469-3

