

Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf

Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

Poliklinik für Zahnerhaltung und Präventive Zahnheilkunde

Kommissarischer Direktor: Prof. Dr. Ibrahim Nergiz

Hemmung der Erosionsentstehung an Zahnschmelz durch Mundspüllösungen – Eine vergleichende In-vitro-Studie

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin
an der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg

vorgelegt von

Johannes Malorny
aus Braunschweig

Hamburg 2017

**Angenommen von der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg am: 11. Juli 2017**

**Veröffentlicht mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.**

Prüfungsausschuss, der/die Vorsitzende: Prof. Dr. U. Schiffner

Prüfungsausschuss, zweite/r Gutachter/in: PD Dr. H. Seedorf

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Arbeitshypothese.....	6
2	Literaturübersicht	8
2.1	Zahnschmelz.....	8
2.2	Nicht-bakteriell bedingte Zahnhartsubstanzverluste	10
2.2.1	Abrasion.....	10
2.2.2	Attrition.....	11
2.2.3	Abfraktion.....	12
2.3	Erosionen.....	12
2.3.1	Definition und Prinzip der Entstehung von Zahnerosionen.....	12
2.3.2	Pathogenese.....	13
2.3.3	Ätiologie der Zahnerosionen	16
2.3.3.1	Intrinsische Faktoren	16
2.3.3.2	Extrinsische Faktoren.....	19
2.3.4	Diagnose und Indizes	22
2.3.5	Prävalenz und Inzidenz von Erosionen	28
2.3.6	Therapie.....	29
2.3.7	Prophylaxe erosiver Zahnschäden	33
2.3.8	Fluoride	33
2.3.9	Zinnverbindungen in der Zahnheilkunde	36
2.3.10	Weitere Inhaltsstoffe in Prophylaxemitteln zum Schutz vor Zahnerosionen	38
2.4	Forschungsfrage und Untersuchungsziel	41
3	Material und Methode	42
3.1	Probenherstellung	42
3.2	Prophylaxe-Lösungen	44
3.3	Künstlicher Speichel	45
3.4	Demineralisationslösung	46
3.5	Abrasion	46
3.5.1	Zahnbürste.....	46
3.5.2	Zahngel	47
3.6	Gruppeneinteilung.....	47
3.7	Probenaufbereitung und Analyse der Erosionen	48
3.7.1	LSM (Laser-Scanning-Mikroskop)	48
3.7.2	REM (Rasterelektronenmikroskop).....	50
3.8	Auswertung und Statistik	52
3.9	Versuchsübersicht	54
4	Ergebnisse	56
4.1	Quantitativer Versuchsteil: Statistische Analyse.....	56
4.1.1	Versuchsteil 1: Zahnhartsubstanzverluste unter erosiven Bedingungen	56
4.1.2	Versuchsteil 2: Zahnhartsubstanzverluste unter erosiv-abrasiven Bedingungen	60
4.2	Qualitativer Versuchsteil: Elementanalyse.....	62
5	Diskussion	72
5.1	Diskussion der Untersuchungsmethode	72
5.1.1	Zahnmaterial	72
5.1.2	Mundspüllösungen.....	74
5.1.3	Experimenteller Ablauf.....	75
5.1.4	Demineralisation	76
5.1.5	Remineralisation	76

5.1.6	Zahnputzabrasion	78
5.1.7	Quantitative und qualitative Analysen.....	79
5.2	Diskussion der Ergebnisse	81
5.2.1	Mikromorphologische Charakterisierung der Schmelzoberflächen	81
5.2.2	Quantitative Bestimmung der Zahnhartsubstanzverluste unter erosiven Bedingungen	82
5.2.3	Quantitative Bestimmung der Zahnhartsubstanzverluste unter erosiv- abrasiven Bedingungen	84
5.2.4	Qualitative Bestimmung von Elementen auf den erodierten Arealen nach Anwendung der Mundspüllösungen	88
5.3	Klinischer Bezug	90
5.4	Schlussfolgerungen	92
6	Zusammenfassung.....	94
7	Summary	97
8	Literaturverzeichnis	99
9	Anhang.....	107
9.1	Materialienliste	107
9.2	Chemikalienliste	108
9.3	Software	108
9.4	Deklarierte Inhaltsstoffe der verwendeten Mundspüllösungen	109
9.5	Messergebnisse	110
9.5.1	Messungen des Zahnhartsubstanzverlustes	110
9.5.2	EDX-Quantifizierungsergebnisse.....	112
9.5.3	EDX-Spektren	114
9.5.3.1	Exemplarische Probe aus Gruppe A	114
9.5.3.2	Exemplarische Probe aus Gruppe B	115
9.5.3.3	Exemplarische Probe aus Gruppe C	115
10	Danksagung	116
11	Lebenslauf	117
12	Eidesstattliche Versicherung	118

Abkürzungsverzeichnis

LSM	Laser-Scanning-Mikroskop
REM	Rasterelektronenmikroskop
EDX	Energy-dispersive x-ray spectrometry
Gew.	Gewichtskonzentration
vgl.	vergleiche
Mat.	Material
Sn	Zinn
Zn	Zink
Ca	Calcium
Mg	Magnesium
K	Kalium
mg	Milligramm
µm	Mikrometer
N	Newton
BSE	Backscattered electrons
TWI	Tooth Wear Index
BEWE	Basic Erosive Wear Examination
RDA	Relative Dentine Abrasivity
HAP	Hydroxylapatit
bzw.	beziehungsweise

1 Einleitung und Arbeitshypothese

Die Zähne sind in der Mundhöhle verschiedenen Einflüssen ausgesetzt, die unter bestimmten Bedingungen zu Zahnschäden führen können. Der am meisten verbreitete Schaden ist die kariöse Läsion, die aufgrund einer aus dem bakteriellen Stoffwechsel resultierenden Säureeinwirkung entsteht. Ein weiterer Schaden tritt jedoch immer mehr in den Fokus der Zahnmedizin: Die Erosion von Zahnschmelz oder Dentin.

Zahnerosion ist definiert als ein ohne Beteiligung von Bakterien durch direkte Säureeinwirkung entstehender Zahnschmelzverlust (Imfeld, 1996). In der Wissenschaft ist das Thema Zahnerosionen vermehrt Gegenstand der aktuellen Forschung (Lussi und Carvalho, 2014). Auch bei Patienten und Zahnärzten rückt der säurebedingte Zahnschmelzverlust zunehmend in das Bewusstsein. Der Konsum saurer Getränke und Nahrungsmittel bildet die Hauptursache für die Entstehung von Zahnerosionen (dazu Kapitel 2.3.3.2). Dabei ist die Problematik der Zahnerosionen nicht neu und vor allem nicht unbekannt: Bereits in der Bibel wurde Essig als schlecht für die Zähne beschrieben (Sprüche Salomons 10,26) und der Verzehr saurer Trauben als Ursache für stumpfe Zähne erkannt (Jeremia 31,29-30).

Die Diagnostik der „Zahnerosion“ ist oft schwierig. Zum einen sind initiale erosive Zahnhartsubstanzverluste klinisch nur schwer zu diagnostizieren. Zum anderen kommt erschwerend hinzu, dass die fortgeschrittene Zahnerosion häufig in Kombination mit anderen Faktoren auftritt. In erster Linie ist hier die Abrasion durch das Zähneputzen von Bedeutung (mehr dazu in Kapitel 2.2). Der entstandene Zahnhartsubstanzverlust ist irreversibel. Daher kann nur einem weiteren Fortschreiten der Erosionen oder einem Auftreten neuer erosiver Zahnschäden vorgebeugt werden. Dies erfordert in der Regel eine Verhaltensänderung. Parallel dazu wird versucht, durch entsprechende Substanzen die Löslichkeit des oberflächlichen Zahnschmelzes herabzusetzen oder den Zahnschmelz gar wieder zu reparieren.

Zu diesem Zweck werden unterschiedliche Mundspüllösungen mit verschiedenen Inhaltsstoffen angeboten. Die Effekte dieser Wirkstoffe werden in der Regel in einzelnen In-vitro-Untersuchungen gegenüber Kontrollen ohne den Wirkstoff beschrieben. Vergleichende Untersuchungen über die Wirksamkeit der Zubereitungen in erosiven Situationen sind hingegen selten. Dies gilt in besonderem Maße für neu entwickelte Produkte bzw. deren Wirkstoffe.

An dieser Stelle setzt die vorliegende In-vitro-Studie an. Drei Mundspüllösungen sollen vergleichend auf ihre Eignung getestet werden, säurebedingten Zahnschmelzabbau zu reduzieren. Alle drei Mundspüllösungen sind frei im Handel erhältlich und werben damit, den Zahnschmelz „zu härten“ beziehungsweise diesen vor Säuren „zu schützen“.

Die zu verifizierenden Arbeitshypothesen lauten:

- Zur Beeinflussung von Erosionen entwickelte Mundspüllösungen sind geeignet, den säurebedingten Zahnschmelzabbau zu reduzieren.
- Verschiedene Wirkstoffe beziehungsweise Wirkstoffkombinationen weisen signifikant unterschiedliche erosionshemmende Effekte auf.

Die Hypothesen sollen im Vergleich zu einer unbehandelten Kontrollgruppe überprüft werden. In einer zweiten Versuchsreihe soll die Wirksamkeit der Mundspüllösungen unter dem Einfluss einer zusätzlichen Abrasion getestet werden. Die diesem Versuch zugrunde liegende Arbeitshypothese ist:

- Die zur Beeinflussung von Erosionen entwickelten Mundspüllösungen sind auch dann geeignet, den säurebedingten Zahnschmelzabbau zu reduzieren, wenn die Zahnproben einer zusätzlichen Abrasion unterzogen werden.

Abschließend soll an einzelnen Zahnschmelzproben mit qualitativen Messmethoden untersucht werden, ob mineralische Bestandteile aus den Mundspüllösungen auf bzw. in der Zahnoberfläche nachweisbar sind. Die Arbeitshypothese lautet:

- Elemente der wirksamen Inhaltsstoffe der Mundspüllösungen sind auf bzw. in der Zahnoberfläche qualitativ nachweisbar.

2 Literaturübersicht

2.1 Zahnschmelz

Der Zahnschmelz (lat. enamelum) ist die äußere Schicht der Zahnkrone. Im menschlichen Körper ist der Zahnschmelz die härteste, aber auch die sprödeste Substanz (Hellwig et al., 2013; Schroeder, 2000). Die Härte variiert an der Schmelzoberfläche und wird nach der Knoop-Härtenummer angegeben mit 260-360 KHN (Schroeder, 2000). Gebildet wird der Zahnschmelz von den Ameloblasten. Die Ameloblasten sezernieren eine Schmelzmatrix, ein aus Proteinen bestehendes Produkt. In der Schmelzmatrix beginnt die Keimung der Apatitkristalle. Im ausgereiften Stadium ist der Zahnschmelz frei von Zellen und kann nicht als Hartgewebe angesehen werden, sondern als kristallines Gefüge (Schroeder, 2000; Strub et al., 2013). Der anorganische Anteil am Zahnschmelz beträgt 87 Volumenprozent und 95 Gewichtsprozent. Organische Bestandteile machen ein Prozent des Gewichtes bzw. zwei Prozent des Volumens aus. Die restlichen Bestandteile des Zahnschmelzes bildet Wasser (Nikiforuk, 1985). Dieses ist hauptsächlich in der Hydratationsschale gebunden, und nur ein Viertel des Wassers ist frei an organische Bestandteile gebunden. Hauptbestandteile des Zahnschmelzes sind Calcium und Phosphor, aber auch andere Mineralien wie Natrium, Magnesium oder Chlor sind im Zahnschmelz eingebaut (Schroeder, 2000). Im Laufe des Lebens werden die Zähne unterschiedlichen Umwelteinflüssen ausgesetzt. Dies führt dazu, dass über 40 verschiedene Spurenelemente im Zahnschmelz nachgewiesen wurden (Hellwig et al., 2013).

Der Zahnschmelz besteht vereinfacht beschrieben aus Hydroxylapatit ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{OH}_2$) und Mischapatiten wie fluoridiertem Hydroxylapatit, Fluorapatit ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$) oder Carbonatapatit ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{CO}_3$). Laut Hellwig et al. (2013) entspricht der Zahnschmelz dabei nicht der stöchiometrischen Form $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{OH}_2$, da Calcium, Phosphat und Hydroxylionen in geringerer Menge vorliegen. Die nichtstöchiometrische Form $(\text{Ca}_{10-x} \text{PO}_{6-x}) \times \text{X}_2 \times \text{H}_2\text{O}$ entspreche daher dem natürlichen Zahnschmelz. Die Kristalle unterscheiden sich dabei in ihrer Löslichkeit. Ist Fluor im Kristallgitter eingebaut, so ist die Löslichkeit

herabgesetzt, beim Einbau von Natrium und Magnesium hingegen ist sie erhöht (Shellis et al., 2014).

Die Schmelzentwicklung wird unterteilt in die präeruptive und die posteruptive Schmelzreifung. Diese Unterscheidung ist von Bedeutung, da Veränderungen der Zahnhartsubstanz auf systemischem Weg nur während der präeruptiven Schmelzreifung möglich sind.

Die präeruptive Schmelzreifung beschreibt den Prozess von der organischen Schmelzmatrix zum kristallinen Gefüge. Organische Bestandteile werden resorbiert und Mineralien – hauptsächlich Calcium – werden eingebaut. In der posteruptiven Schmelzreifung, dem Zeitpunkt nach dem Zahndurchbruch, wird der noch poröse Zahnschmelz mit Mineralien aus der Umgebung (Speichel, Nahrung, Zahnpasta) gehärtet (Schroeder, 2000).

Ausgereifter Zahnschmelz ist nicht mehr durch Zellaktivität veränderbar. Allerdings ist der Zahnschmelz kein undurchlässiges Gebilde. Er ist durchlässig für Wasser und kann wie ein Molekularsieb und Ionenaustauscher funktionieren. Dies könnte ein Ansatzpunkt für prophylaktische Therapeutika sein (Schroeder, 2000).

Ein Strukturmerkmal des Zahnschmelzes ist sein Aufbau aus Apatitkristallen, von denen 100 Kristalle im Querschnitt ein Schmelzprisma bilden (Hellwig et al., 2013). Die Schmelzprismen ziehen sich von der Schmelz-Dentin-Grenze bis fast an die äußerste Fläche des Zahnes. Dabei entsprechen sie in ihrer geschwungenen Form dem Wachstumsweg der Ameloblasten. Die Oberfläche des Zahnschmelzes ist prismenfrei (Schroeder, 2000).

Zwischen den Schmelzprismen befindet sich interprismatischer Schmelz, dieser ist ebenfalls kristallin und unterscheidet sich lediglich in der Ausrichtung der Kristallite. Im Querschliff zeigen sich unterschiedliche Anordnungen der Prismenstäbe, die als Schlüssellochtyp, Hufeisentyp oder zylindrischer Typ beschrieben werden (Hellwig et al., 2013).

Charakteristisch sind im histologischen Präparat die Retzius-Streifen. Diese auch als Wachstumslinien bezeichneten Strukturen entstehen vermutlich in einer Ruhephase der Ameloblasten zwischen zwei Sekretionsphasen (Schroeder, 2000). Die Retzius-Streifen sind weniger stark mineralisiert. Im Bereich der Inzisialkante bzw. Kaufläche erreichen die Retzius-Streifen nicht die Oberfläche des Zahnes, vielmehr stehen sie wie hufeisenförmige Kreise auf dem Dentin (Schroeder, 2000). An den Vestibularflächen hingegen erreichen sie die äußere Fläche des Zahnes, und an ihrem Schnittpunkt mit der Oberfläche entsteht eine Furche (Schroeder, 2000). Dieses Muster aus Wellen und Furchen ist an trockenen Zahnoberflächen kurz nach dem Zahndurchbruch zu erkennen und wird als Perikymatien bezeichnet (Schroeder, 2000).

2.2 Nicht-bakteriell bedingte Zahnhartsubstanzverluste

Zahnerosionen gehören in die Gruppe der nicht-bakteriell bedingten Zahnhartsubstanzverluste. Hierzu zählen Abrasionen, Attritionen und Abfraktionen (Shellis und Addy, 2014). Meist kommen diese Substanzdefekte nicht alleinig vor, sondern vielmehr in Kombinationen als multifaktorieller Zahnhartsubstanzverlust. Abrasion, Attrition und Abfraktion gehören zu den mechanischen Zahnhartsubstanzverlusten, wohingegen Zahnerosion chemisch bedingte Zahnhartsubstanzverluste sind (Imfeld, 1996). Im klinischen Alltag kann somit eine Unterscheidung schwierig sein. Deshalb sollen im Folgenden zur Abgrenzung der Defektarten die Begriffe und jeweiligen Charakteristika dargestellt werden.

Der Vollständigkeit halber ist zu erwähnen, dass Resorptionen von Zahnhartsubstanz ebenfalls in diese Gruppe der nichtbakteriell bedingten Zahnhartsubstanzverluste gehören (Imfeld (1996). Da es sich hierbei um einen rein biologischen Prozess handelt, der in keinem Zusammenhang zu Zahnerosion steht, wird diese Art des Substanzverlustes jedoch nicht weiter thematisiert.

2.2.1 Abrasion

Abrasion ist ein durch Fremdkörperpartikel verursachter Verlust von Zahnhartsubstanz (Hellwig et al., 2013). Ein bedeutendes Beispiel hierfür stellt der

Abrieb beim Zähneputzen durch mineralische Partikel in der Zahnpasta dar. Dabei spielt nicht nur die Zahnpasta eine entscheidende Rolle (Shellis und Addy, 2014). Vielmehr ist das Zusammenspiel aus Anpressdruck der Zahnbürste, Dauer des Zähneputzens und Häufigkeit des täglichen Reinigens der Zähne von Bedeutung (Addy und Hunter, 2003). Auch der Härtegrad der Zahnbürstenborsten ist mitentscheidend.

Der Abriebgrad von Zahnpasta wird standardisiert als relative dentine abrasivity (RDA) angegeben. Zum Vergleich dient eine Zahnpasta mit einer RDA = 100. Dieser Wert darf maximal um das 2,5 fache überschritten werden. Die meisten Zahnpasten unterschreiten diesen Wert (Shellis und Addy, 2014). Zahnpasten mit nicht hydratisiertem Aluminium oder Meersalz als Abrasionsmedium zeigen hohe Abrasionen (Shellis und Addy, 2014; Hellwig et al., 2013).

Ein weiterer Aspekt ist der Abrieb durch die Nahrungszerkleinerung. Diese Form der Abrasion durch Nahrungsmittel wird als Demastikation bezeichnet. Seit der industriellen Revolution und der damit verbundenen weicheren Kost ist diese Art des Abriebs gering und kann als physiologisch betrachtet werden (Shellis und Addy, 2014; Imfeld, 1996).

2.2.2 Attrition

Attrition beschreibt den Abrieb durch einen Zahn-Zahn-Kontakt. Antagonisten bzw. benachbarte Zähne reiben aneinander und führen somit zum Verlust von Zahnhartsubstanz (Imfeld, 1996). Schlucken und Kauen summieren sich auf ungefähr 1500 antagonistische Zahnkontakte am Tag. Der Abrieb ist in der Regel gering (Hellwig et al., 2013). In Kombination mit säurebedingt aufgeweichtem Zahnschmelz kann der Substanzverlust allerdings erheblich größer sein (Shellis und Addy, 2014).

Klinisch erscheinen Zahnhartsubstanzverluste durch Attrition als glatte, glänzende und flache Facetten, typischerweise auf der okklusalen Zahnoberfläche (Imfeld, 1996). Im Unterschied zu Zahnerosionen zeigen diese Defekte eine klare und

scharfe Randabgrenzung (Lussi et al., 2009). Die Abnutzungserscheinungen befinden sich ebenso an antagonistischen Zähnen (Shellis und Addy, 2014).

Attrition zeigt sich besonders markant bei Bruxismus. Das heftige und langanhaltende Pressen und Knirschen führt zu pathologischem Zahnhartsubstanzverlust. Häufig wird diese Form der Attrition durch Stress, aber auch durch falsch gestaltete Okklusionskontakte verstärkt (Hellwig et al., 2013).

2.2.3 Abfraktion

Unter Abfraktion wird das „Herausbrechen“ von Zahnschmelzfragmenten, vor allem an der Schmelz-Zement-Grenze, verstanden (Grippio, 1991). Die Ätiologie dieser keilförmigen Defekte ist noch nicht abschließend geklärt (Shellis und Addy, 2014; Imfeld, 1996). Es wird angenommen, dass durch eine starke exzentrische Belastung Mikrofrakturen entstehen, vorwiegend im Zahnschmelz, aber auch im Dentin. Die Belastung erfolgt von okklusal bzw. inzisal und führt zu wechselseitigen Dehn-, Kompressions- und Scherbelastung am Zahn (Imfeld, 1996; Grippio, 1991; Braem et al., 1992). Die Zahnfragmente brechen nicht am Kraftansatzpunkt heraus, sondern eher dort, wo am Zahnhals die Dehnbelastbarkeit überschritten ist (Grippio, 1991).

Klinisch sind die markanten abfraktiven keilförmigen Defekte scharf begrenzt (Imfeld, 1996) und meist vestibulär an Inzisiven, Canini und Prämolaren zu finden (Hellwig et al., 2013).

2.3 Erosionen

2.3.1 Definition und Prinzip der Entstehung von Zahnerosionen

Zahnerosionen sind als Zahnhartsubstanzverluste definiert, die ohne Beteiligung von Bakterien durch direkte Säureeinwirkung entstehen (Imfeld, 1996). Kommt die Zahnoberfläche in direkten Kontakt mit Säuren oder Chelaten, so beginnt die initiale, schmerzfreie Aufweichung des Zahnschmelzes. Bei länger andauernden oder wiederholten Säurekontakten entsteht ein irreversibler Zahnschmelzverlust,

der bis zur Demineralisation des Dentins fortschreitet (Hellwig et al., 2013). Ist das Dentin betroffen, sind Hypersensibilitäten mögliche Folgen (Ganss, 2014).

Zahnerosionen entstehen in einem multifaktoriellen Prozess. Ein alleiniger Fokus auf den pH-Wert der Säure ist nicht ausreichend. Andere Faktoren wie z.B. Speichelbestandteile, Speichelfluss, Calcium- bzw. Phosphatsättigung und Pufferkapazität spielen eine entscheidende Rolle bei der Entstehung von Zahnerosionen (Lussi und Jaeggi, 2006). So gibt es, anders als bei der Karies, keinen pH-Grenzwert. Selbst bei einem niedrigen pH-Wert muss es nicht zwangsläufig zu Zahnerosionen kommen. Im Gegensatz dazu kann auch eine Lösung mit hohem pH-Wert zu Zahnhartsubstanzschäden führen.

Die klinische Diagnostik ist von großer Bedeutung. Im Frühstadium ist die Diagnose jedoch schwierig. Eine Schmelzerweichung ist nicht feststellbar, und die Demineralisation des Zahnschmelzes findet großflächig, jedoch zunächst kaum erkennbar in die Tiefe statt (Lussi et al., 2009). Eine weitere Schwierigkeit bei der Diagnostik ist, dass Erosionen häufig mit anderen nicht-bakteriell bedingten Zahnhartsubstanzdefekten überlagert sind. Hierbei können Abrasion, Abfraktion, Attrition und Demastikation eine Rolle spielen (Lussi et al., 2009; Imfeld, 1996).

Die verursachenden Säuren werden in intrinsische und extrinsische Säuren unterschieden. Extrinsische (durch Essen und Trinken aufgenommene Säuren) und intrinsische (Magensäure) zeigen häufig unterschiedliche bevorzugte Demineralisationsstellen an den Zähnen. Während intrinsische Säuren sich meist an Palatinalflächen der oberen Inzisivi manifestieren (Moazzez und Bartlett, 2014), zeigen sich extrinsische Säuren an Vestibulär- und Okklusalfächen der unteren Molaren (Lussi et al., 2009).

2.3.2 Pathogenese

Bei der Entstehung erosiver Zahnhartsubstanzverluste spielen die Dauer und die Frequenz der schädigenden, an der Zahnoberfläche wirkenden Säure eine wichtige Rolle (Lussi et al., 2011). Für die Demineralisation des festen Zahnschmelzes ist ein Ungleichgewichtszustand zwischen der Zahnoberfläche

und der umfließenden sauren Lösung nötig (Shellis et al., 2014). Der pH-Wert und die Calcium-/ Phosphatkonzentration bilden dabei die bestimmenden Faktoren für das Entstehen von Zahnerosionen (Lussi et al., 2011). Wenn die Säure im Verhältnis zur Zahnoberfläche ungesättigt ist, beginnt die Zahnhartsubstanz in Lösung zu gehen.

Ein weiterer bedeutsamer Faktor ist die Pufferkapazität der angreifenden Säure, also die pH-Wert-Stabilität. Wenn die Pufferkapazität groß ist, benötigt der Speichel mehr Zeit zur Neutralisation der Säure (Shellis et al., 2014; Lussi et al., 2011). Ebenso können die Speichelfließrate und Speichelbestandteile einen Einfluss auf den Schweregrad der Zahnerosionen haben (Barbour und Lussi, 2014). Ist die Fließrate beispielsweise krankheitsbedingt reduziert, dauert die Neutralisation entsprechend länger (Lussi et al., 2011). Einigen Speichelproteinen, wie Statherin, wird ein positiver Effekt zur Verhinderung von Zahnerosionen zugeschrieben, da diese eine gute Adsorption an die Zahnoberfläche zeigen (Johnsson et al., 1991; Barbour und Lussi, 2014). In einer In-situ-Studie konnten Wiegand et al. (2008a) nachweisen, dass auch das dem Zahn aufgelagerte Pellikel den Zahn, wenn auch in begrenztem Ausmaß, vor umfließenden Säuren schützen kann.

Weitere charakteristische Eigenschaften der Säure sind zu beachten: Starke bzw. schwache Säuren, mehrprotonige Säuren und die Adhäsionseigenschaften der jeweiligen Säure sind entscheidend für das Entstehen von Zahnerosionen. Mit dem pKs-Wert wird die Stärke einer Säure angegeben: Je kleiner der pKs-Wert, umso stärker die Säure (Shellis et al., 2014).

Die Abbildung von Lussi et al. (2009) gibt einen Gesamtüberblick über alle Einflussfaktoren des multifaktoriellen Prozesses, die in Zusammenhang mit Zahnerosionen stehen können (Abbildung 1).

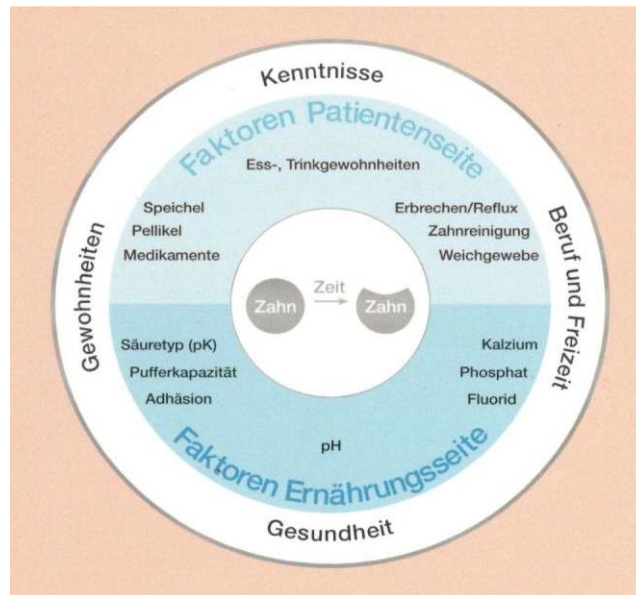


Abbildung 1: Die verschiedenen Faktoren für die Entstehung dentaler Erosionen (aus Lussi et al. (2009), Seite 37)

Histo-chemischer Ablauf

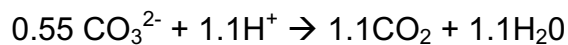
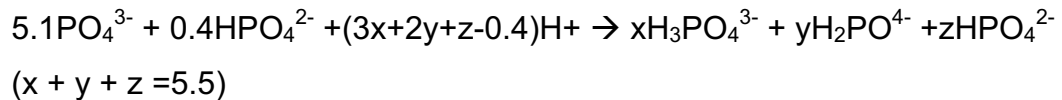
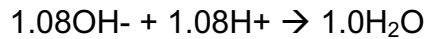
Initiale Zahnerosionen beginnen mit der messbaren Erweichung und einer rauer werdenden Zahnoberfläche (Nekrashevych und Stösser, 2003). Die Autoren Attin et al. (1997) maßen die Härte an Rinderzähnen. Sie stellten fest, dass die Härte des Rinderzahnschmelzes nach einer Minute in Sprite Light im Schnitt um 11,5 % abnahm. Das Fortschreiten der Zahnerosionen ist zentripetal gerichtet (Ganss et al., 2013). Dies bedeutet, dass der Zahn von der Zahnoberfläche ausgehend demineralisiert wird und sich somit Schicht für Schicht auflöst. Dabei diffundiert die Säure in die Zahnoberfläche und löst die Kristalle zuerst partiell auf. Dabei gehen Calcium und Phosphat in Lösung, bis sich ein entsprechendes Gleichgewicht mit der Zahnoberfläche eingestellt hat (Shellis et al., 2014). Das dabei entstehende Oberflächenmuster kann mit dem eines angeätzten Zahnes verglichen werden (Eisenburger et al., 2004). Eine mögliche Remineralisation der initial demineralisierten Zahnoberfläche in vivo ist umstritten (Lussi et al. 2011). Ein Fortschreiten des erosiven Angriffes führt zum weiteren Herauslösen der Calcium- und Phosphationen und endet mit der vollständigen Auflösung der Zahnhartsubstanz an der Oberfläche (Shellis et al., 2014).

Der Zahnschmelz besteht aus nicht-stöchiometrisch aufgebautem Hydroxylapatit. Shellis et al. (2014) setzen folgende durchschnittliche Zusammensetzung des Zahnschmelzes voraus:

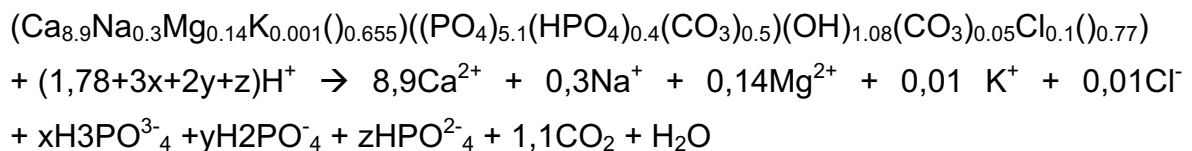


[() bedeutet nicht besetzte Position im Kristallgitter].

Gemäß der genannten Autoren geht die Zahnhartsubstanz nach den folgenden Säure-Basen-Reaktionen in Lösung:



Die komplexe Gesamtreaktion beschreiben Shellis et al. (2014) daher wie folgt:



$(1,78+3x+2y+z)\text{H}^+$ steht für eine mehrprotonige angreifende Säure. Die Stärke der Säure hängt wie oben beschrieben von ihrem pKs-Wert ab.

2.3.3 Ätiologie der Zahnerosionen

2.3.3.1 Intrinsische Faktoren

Eine Ursache für Zahnerosionen können intrinsische Faktoren sein. Zu den intrinsischen Faktoren zählen gastro-ösophagealer Reflux, Bulimie und Anorexie. Häufig geben Patienten diese Erkrankungen bei der Anamnese nicht an. Gründe dafür sind Nicht-Wissen (nächtlicher Reflux), den Zustand als „normal“ Ansehen (häufiges Aufstoßen) bzw. Verschweigen (Anorexia oder Bulimia nervosa). Der Zahnarzt kann daher die erste Person sein, die eine dieser Erkrankungen diagnostiziert (Lussi et al., 2009). Klinisch manifestieren sich die intrinsischen Zahnerosionen zu Beginn an den Palatinalflächen (meist der Oberkiefer-Inzisivi). Im fortgeschrittenen Stadium, können allerdings alle Zahnflächen betroffen und in Extremfällen zu restaurieren sein (Moazzez und Bartlett, 2014).

Gastro-ösophagealer Reflux

Beim gastro-ösophagealen Reflux gelangt Magensäure über den Ösophagus in den Mundraum. Etwa 10 % der Menschen leiden an dieser Erkrankung (Lussi et al., 2009). Dabei fällt auf, dass die Prävalenz des gastro-ösophagealen Refluxes in der 'westlichen Welt' sehr hoch ist (Moazzez und Bartlett, 2014). Typische Symptome sind etwa: Saures Aufstoßen, Sodbrennen, unangenehmer Geschmack am Morgen oder Schmerzen nach dem Verzehr von saurer oder fetthaltiger Nahrung (Lussi et al., 2009).

Bartlett und Coward (2001) zeigten in einem Vergleichsversuch zwischen Magensäure und einer carbonathaltigen Lösung, dass Magensäure sehr sauer sein kann (ein pH-Wert von 1,2 wurde als niedrigster Wert gemessen). Gastro-ösophagealer Reflux muss nicht kausal zu Zahnerosionen führen, jedoch ist das Risiko deutlich erhöht, besonders in Kombination mit chronischem Erbrechen (Schlüter und Tveit, 2014). Patienten, die besonders in der Nacht an einem gastro-ösophagealen Reflux leiden, können eine einseitige (asymmetrische) Variation von Zahnerosionen aufweisen. Dabei sind erosive Schäden an allen Zahnflächen der betreffenden Gesichtshälfte möglich. Ursache für dieses asymmetrische Vorkommen ist das Schlafen in Seitenlage als bevorzugter Position (Lussi et al., 2009). Aufgrund einer verminderten Speichelfließrate in der Nacht ist das erosive Potenzial zusätzlich erhöht (Lussi et al., 2011). Die Diagnose gastro-ösophagealer Reflux kann mittels Endoskopie und einer pH-Wertsonde (positioniert im Ösophagus) gestellt werden (Moazzez und Bartlett, 2014).

Anorexia nervosa

Anorexia nervosa bedeutet 'nervlich bedingte Appetitlosigkeit' und wird umgangssprachlich als 'Magersucht' bezeichnet. Die Krankheit beruht auf einer psychischen Störung, bei der sich Menschen als zu dick empfinden (Moazzez und Bartlett, 2014). Frauen sind deutlich häufiger als Männer betroffen (10 mal so häufig, (Williamson et al., 2004). Die Prävalenz der Anorexia nervosa macht in Deutschland bei Menschen im Alter von 18-79 Jahren bei Frauen 1,1 % und bei Männern 0,3 % aus (Jacobi et al., 2014). Es werden unterschiedliche Sub-Typen unterschieden: Zum einen der Typus, der die Nahrungsaufnahme verweigert bzw. reduziert; zum anderen der 'Purging Typ', der zusätzlich durch Erbrechen eine

Gewichtsreduzierung betreibt (Moazzez und Bartlett, 2014). Erkrankte Menschen sind meist an ihrem äußeren, untergewichtigen Erscheinungsbild zu erkennen (Lussi et al., 2009).

Bulimie

Unter Bulimie wird ein Krankheitsbild verstanden, bei dem Patienten nach der Nahrungsaufnahme eine Gewichtszunahme durch aktives Erbrechen zu vermeiden suchen. Als erkrankt gilt, wer sich mehr als zwei Mal in der Woche über einen Zeitraum von mindestens drei Monaten erbricht (Moazzez und Bartlett, 2014). Mit einer Prävalenz von 5 % in den Industriestaaten bei den 18-35-jährigen Frauen (Lussi et al., 2009) kommt diese Form der Essstörung insgesamt häufiger vor. In Deutschland sind gemäß der repräsentativen Studie zur Gesundheit Erwachsener (DEGS1) hingegen nur 0,3 % der Frauen und 0,1 % der Männer von Bulimie betroffen (Jacobi et al., 2014). Oft wird die Krankheit jedoch nicht festgestellt, da die betroffenen Personen ein Normalgewicht aufweisen (Lussi et al., 2009).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass intrinsische Säuren das Risiko für Zahnerosionen stark erhöhen (ten Cate und Imfeld, 1996; Lussi und Hellwig, 2014), aber nicht zwangsläufig zu Zahnhartsubstanzdefekten führen müssen. Vor allem Patienten mit gastro-ösophagealem Reflux zeigen nicht notwendigerweise erosive Läsionen auf. So wurden in einer Studie von Jarvinen et al. (1988) bei 7 von 109 Patienten Zahnerosionen diagnostiziert. In einem systematischen Reviewbeitrag von Pace et al. (2008) wurde ein Medianwert aus mehreren Studien ermittelt. Das Ergebnis war, dass 24 % der Patienten mit gastro-ösophagealen Reflux auch dentale Erosionen aufwiesen. Umgekehrt litten 32,5 % der Patienten mit Zahnerosionen an gastro-ösophagealem Reflux. Bei psychosomatischen Essstörungen mit chronischem Erbrechen hingegen ist die Prävalenz der Zahnerosionen sehr hoch. In einer Studie von Ohrn et al. (1999) zeigten 77 von 81 Patienten mit Essstörungen Zahnerosionen.

Eine mögliche Ursache für die unterschiedlichen Prävalenzraten bei gastro-ösophagealem Reflux und bei Essstörungen liegt in den Erkrankungscharakteristika. Beim gastro-ösophagealen Reflux muss die

Magensäure nicht zwangsläufig die Mundhöhle erreichen und in Kontakt mit den Zähnen kommen (Moazzez und Bartlett, 2014). Bei Essstörungen mit Erbrechen lässt sich ein Kontakt zwischen Zahnhartsubstanz und Magensäure hingegen nicht vermeiden.

2.3.3.2 Extrinsische Faktoren

Die Hauptursache für Zahnerosionen stellen extrinsische Faktoren dar (Lussi et al., 2004). Die von außen zugeführten Säuren lassen sich unterteilen in durch Nahrung, durch Umwelteinflüsse und durch Medikamente aufgenommene Säuren (ten Cate und Imfeld, 1996). Der pH-Wert ist die entscheidende Größe für ein erosives Potenzial (Barbour und Lussi, 2014). Wie bereits beschrieben sind Zahnerosionen allerdings ein multifaktorieller Prozess. Mit Blick auf exogene Säuren bedeutet das, dass ihr erosives Potenzial beeinflussbar ist. Neben dem pH-Wert spielen die Pufferkapazität, die Chelatbildungsfähigkeit zu Calcium, die Anhaftung der Säure an die Zahnoberfläche, die Fluoridkonzentration und die Phosphat- bzw. Calciumsättigung eine wichtige Rolle (Lussi et al., 2009; Barbour und Lussi, 2014).

Nahrungsbedingte Faktoren

Die Ess- und Trinkgewohnheiten bestimmen maßgeblich den Anteil an aufgenommenen erosiven Nahrungsmitteln. Neben dem erosiven Potenzial der Nahrungsmittel sind die Häufigkeit und die Art der Nahrungsaufnahme (Trinken mit Strohalm oder langes Umspülen der Zähne) weitere entscheidende Faktoren für das Entstehen von Zahnerosionen (Johansson et al., 2004; Edwards et al., 1998).

Mehrere Untersuchungen befassten sich mit dem erosiven Potenzial von Lebensmitteln (Lussi et al., 2012; Lussi et al., 1995; Rees et al., 2002). Danach haben Softgetränke, Fruchtsäfte, Weine, Obst (insbesondere Zitrusfrüchte), Essig, Salatsoßen und Ketchup als erosive Lebensmittel zu gelten. Die Aufnahme saurer Nahrung ist nicht gleichbedeutend mit dem Entstehen von Erosionen. Joghurt hat einen pH-Wert um vier und zeigt kein erosives Potenzial. Die Sättigung mit Calcium und Phosphat relativiert den sauren Charakter (Lussi et al., 2009). Mineralwasser mit Kohlensäure gelten als unbedenklich (Lussi et al., 2009). In

Versuchen war der erosive Effekt von Mineralwasser im Vergleich zu Softgetränken bis zu 100 mal schwächer ausgeprägt (Parry et al., 2001).

Der Konsum an Softgetränken ist in den letzten Jahrzehnten stark gestiegen. In den USA allein hat sich der Konsum von Softdrinks bei Jungen in den Jahren von 1965 bis 1996 verdreifacht (Cavadini et al., 2000). Laut der Autoren Lussi und Carvalho (2014) betrug im Jahr 2007 der weltweite Verbrauch an Softgetränken 552 Milliarden Liter. Das entspricht 83 Liter pro Person. Bei den Softgetränken zeigen sich gravierende Unterschiede bezüglich ihres erosiven Potenzials. Cola zeigt trotz eines niedrigen pH-Wertes von 2,6 ein geringeres erosives Potenzial als Sprite light (pH-Wert 2,9), Red Bull (pH-Wert 3,4) oder Eistee (pH-Wert 3) (Lussi et al., 2004). Doch nicht nur Softgetränke sind erosiv, auch vermeintlich gesunde Fruchtsäfte schädigen die Zahnhartsubstanz. Verstärkt wird dieser Effekt, wenn der Fruchtsaft zum Schlafengehen bzw. während der Nacht getrunken wird, da zu dieser Zeit der Speichelfluss reduziert ist (Zero und Lussi, 2006).

Eine gesunde Ernährung tritt immer mehr in den Fokus der Gesellschaft, doch zeigen sich gerade bei Lacto-Vegetariern vermehrt Zahnerosionen (Linkosalo und Markkanen, 1985; Amaechi und Higham, 2005). Ursachen könnten eine zitrusfruchthaltige Ernährung und ein hoher Konsum von essighaltigen Salatsoßen sein (Ganss et al., 1999).

Sportgetränken wird oft Calcium und Phosphat beigemischt. Hierdurch können sie ihr erosives Potenzial verlieren. Dies wurde in besonderem Maße bei experimenteller Zugabe von Casein Phosphopeptid – amorphes Calciumphosphat (CPP-ACP) ermittelt (Ramalingam et al., 2005). Zwar konnte in einer Übersichtsstudie von Coombes (2005) kein erhöhter Effekt von Zahnerosionen durch isotonische Sportgetränke festgestellt werden. Experimentelle Versuche von Lussi et al. (2012) weisen hingegen auf das Gegenteil hin. In vitro zeigte sich bei drei getesteten Sportgetränken bereits nach einer zweiminütigen Kontaktzeit mit dem Zahnschmelz eine geringere Schmelzhärte. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen die Autoren Lussi und Carvalho (2015) bei der Härtemessung des Zahnschmelzes bei Milchzähnen. Auch bei diesem In-vitro-Versuch war ein

Verlust der Härte des Zahnschmelzes nach zwei Minuten Kontaktzeit mit einem Sportgetränk messbar.

Umweltbedingte Faktoren

Zu den umweltbedingten Faktoren für die Erosionsentstehung zählen berufsbedingte Gegebenheiten. Diese haben in Deutschland eine geringere Bedeutung. Allerdings gibt es einige Berufe mit einer höheren Prädisposition zur Bildung von Zahnerosionen. Hierzu zählen beispielsweise Weintester. Wein hat ein erosives Potenzial: Er ist initial sauer und bildet Calciumkomplexe. Zudem behalten Weintester den Wein zum Kosten für einen längeren Zeitraum im Mund. In einer Studie von Wiktorsson et al. (1997) wurden 19 Weintester und Weintesterinnen auf Zahnerosionen untersucht, wovon 14 Zahnerosionen aufwiesen. Dabei stellten die Autoren fest, dass der Schweregrad der Zahnerosionen im Verhältnis zu den Dienstjahren steht. In einer neueren Studie aus Australien bestätigten George et al. (2014) ebenfalls, dass es bei Weintestern einen Zusammenhang zwischen Berufsjahren und Zahnerosionen gibt.

Ebenso haben Arbeiter in der Chemieindustrie, vor allem in der Batterie- und Galvanotechnik, ein verstärktes Erosionsrisiko (Cate, 1968; Arowojolu, 2001). Bei Untersuchungen in derselben Fabrik zeigten Arbeiter, die unter dem Einfluss von Säuredämpfen arbeiteten, signifikant mehr Zahnerosionen, als Arbeiter, die nicht den Dämpfen ausgesetzt waren (Tuominen et al., 1991).

Auch Wiegand und Attin (2007) befassten sich in einem Review mit berufsbedingten Zahnerosionen. Sie kamen zu dem Schluss, dass das Risiko für Zahnerosionen für Berufe in der Batterie- bzw. Galvanotechnik erhöht sei; für Weintester sei die Anzahl an Studien allerdings zu gering. Centerwall et al. (1986) zeigten, dass Leistungsschwimmer aus einem Schwimmverein vermehrt Zahnerosionen aufwiesen. Bei einer Untersuchung des Chlorgehaltes im Schwimmbad wurde ein zu niedriger pH-Wert des Wassers ($\text{pH} < 3$) gemessen. Üblicherweise hat das Wasser in einem Schwimmbad jedoch einen pH-Wert zwischen 7,2 bis 8 und ist unbedenklich (Lussi et al., 2009).

Medikamente

Einige Medikamente besitzen ein erosives Potenzial, das aus einem niedrigen pH-Wert, einem hohen Gehalt an titrierbaren Säuren oder einer Senkung der Speichelsekretion resultiert. Inwieweit dieses letztendlich zu Zahnerosionen führt, ist nicht eindeutig geklärt (Hellwig und Lussi, 2014).

Vitamin-C-Präparate (Ascorbinsäure) konnten in einigen Fällen als Ursache für Zahnerosionen festgestellt werden (Giunta, 1983; Bahal und Djemal, 2014). Bei normalem Speichelfluss führen Vitamin-C-Präparate laut Meurman und Murtomaa (1986) jedoch nicht zu Schäden an den Zähnen, sie besitzen aber bei langer Kontaktzeit mit der Zahnoberfläche ein theoretisches erosives Potenzial.

In einer In-vitro-Studie untersuchten Rogalla et al. (1992) die erosive Wirkung von Acetylsalicylsäure (ASS). Das Ergebnis war auch hier, dass für das Entstehen von Zahnerosionen die Kontaktzeit und die Pufferkapazität ausschlaggebend sind. Kinder mit juveniler Arthritis, die einen erhöhten Bedarf an ASS hatten, zeigten erosive Zerstörungen an ihren Zähnen, wenn sie die Tabletten kauten und nicht schluckten, wie es die Kinder aus der Kontrollgruppe taten (Sullivan und Kramer, 1983). In einer In-vitro-Studie zeigten einige Acetylsalicylsäurepräparate bei einer Kontaktzeit mit der Zahnoberfläche von vier Minuten ein erosives Potenzial. Ein Präparat hingegen veränderte bereits nach zweiminütiger Kontaktzeit mit der Zahnprobe signifikant die Härte der Zahnprobe (Lussi et al., 2012).

Ebenfalls unter Verdacht, Zahnerosionen auszulösen, ist die Medikamentengruppe der Asthmapräparate. Dieser Verdacht ergibt sich daher, dass einige dieser Medikamente einen niedrigen pH-Wert besitzen und über die Wirkung des β_2 -Adrenozeptores außerdem eine Reduzierung des Speichelflusses bewirken können (Hellwig und Lussi, 2014).

2.3.4 Diagnose und Indizes

Die klinische Untersuchung durch den behandelnden Arzt bildet zusammen mit einer gewissenhaften Anamnese die genaueste Herangehensweise zur Diagnose Zahnerosionen. Allerdings sind Zahnerosionen für den Zahnarzt erst nach einem gewissen Substanzverlust klinisch sichtbar (Lussi und Carvalho, 2014). Zurzeit ist

die Diagnosestellung von initialen Zahnerosionen mit technischen Hilfsmitteln nicht möglich, so dass das klinische Erscheinungsbild die Grundlage der Diagnosestellung bildet (Lussi und Hellwig, 2014).

Dieses klinische Erscheinungsbild von anfänglichen Zahnerosionen zeichnet sich durch einen seidenartigen Oberflächenglanz aus, der in Ausnahmen auch matt erscheint (Lussi und Hellwig, 2014; Lussi et al., 2009). Die Perikymatien sind nicht mehr zu sehen. Der Zahnhartsubstanzverlust liegt in der Regel oberhalb der Schmelz-Zement-Grenze (Ganss, 2014). Im Bereich des Gingiva-Sulkus ist der Zahn vollkommen intakt. Mögliche Ursache können Plaque-Rückstände sein, die als Diffusionsbarrieren fungieren, oder die neutralisierende Wirkung des Sulkusfluid (Lussi et al., 2004). Nach Messungen von Stephen et al. (1980) beträgt der pH-Wert des Sulkusfluid 7,5 - 8.

Bei weiterer Säureexposition schreitet der Zahnhartsubstanzverlust fort: Okklusal runden sich die Höckerspitzen der Molaren ab; bei starken Substanzverlusten verlieren diese ihre typische Morphologie. Die Inzisalkante der Inzisiven ist verkürzt (Ganss, 2014). Außerdem erscheinen vorhandene Füllungen als zu hoch im Vergleich zur Zahnhartsubstanz (Lussi et al., 2004). Eine Dentinexposition kann im Verlauf der Erosionsausprägung ebenfalls diagnostiziert werden, besonders in Bereichen, in denen der Zahnschmelz in natürlicher Weise dünner ist, wie beispielsweise am Zahnhals. Ist das exponierte Dentin verfärbt, kann auf ein Unterbrechen der Zahnerosion geschlossen werden (Lussi et al., 2009).

Zurzeit gibt es keinen einheitlichen Index zur Erfassung von Zahnerosionen – weder für wissenschaftliche Studien noch für den Gebrauch in der Zahnarztpraxis. Im Folgenden wird daher ein kurzer Überblick der klinisch und epidemiologisch häufig verwendeten Indizes gegeben:

Erosionsindex nach Eccles

Einer der ältesten Indizes ist der nach Eccles (1979) (Tabelle 1). Hierbei handelt es sich um eine Weiterentwicklung eines Indexes, den Eccles und Jenkins (1974) in einer Studie anwendeten.

Klasse/Grad	Zahnfläche	Kriterium
Klasse I	Meist labiale Flächen der oberen Inzisivi und Canini	Initialer Zahnhartsubstanzverlust; Dentin nicht betroffen
Klasse II (Typ 1) Substanzverlust: vorwiegend zervikal	labial und bukkal	Dentin-Beteiligung: weniger als 1/3 der Zahnoberfläche
Klasse II (Typ 2) Substanzverlust: in der Zahnkrone Kann in eine Klasse III a übergehen		
Klasse IIIa	labial und bukkal	Dentin-Beteiligung mehr als 1/3 der Zahnoberfläche
Klasse IIIb	lingual und palatinal	Dentin-Beteiligung mehr als 1/3 der Zahnoberfläche
Klasse IIIc	inzisal und okklusal	Dentin ist exponiert
Klasse IIId	labial/bukkal, lingual/palatinal, inzisal/okklusal	Starke erosive Schäden an allen Zahnflächen insbesondere für labiale und linguale Oberflächen

Tabelle 1: Erosionsindex nach Eccles (1979)

TWI (Tooth Wear Index)

Ein ebenfalls länger existierender Index ist der TWI (Tooth Wear Index) von Smith und Knight (1984) (Tabelle 2). Wie der Name schon sagt, erfasst dieser Index nicht nur erosiv bedingte Zahnhartsubstanzverluste, sondern auch durch Abrasion oder Attrition verursachte Schäden. Eine genaue Differenzierung des Zahnhartsubstanzdefektes ist somit nicht möglich (Margaritis und Nunn, 2014).

Klasse/Grad	Zahnfläche	Kriterium
0	bukkal/labial, lingual/palatinal, okklusal/inzisal	Kein Verlust an der charakteristischen Zahnschmelzoberfläche
	zervikal	Kein Verlust der Oberflächenkontur
1	bukkal/labial, lingual/palatinal, okklusal/inzisal	Verlust der charakteristischen Schmelzoberfläche
	zervikal	Minimaler Verlust der Oberflächenkontur
2	bukkal/labial, lingual/palatinal, okklusal	Verlust von Zahnschmelz; exponiertes Dentin auf weniger als 1/3 der Oberfläche
	inzisal	Verlust von Zahnschmelz, bei freigelegtem Dentin
	zervikal	Defekttiefe weniger als 1 mm
3	bukkal/labial, lingual/palatinal, okklusal	Verlust von Zahnschmelz; exponiertes Dentin auf mehr als 1/3 der Oberfläche
	inzisal	Verlust von Zahnschmelz und substanziellen Verlust von Dentin
	zervikal	Defekttiefe kleiner als 1 bis 2 mm
4	bukkal/labial, lingual/palatinal, okklusal	Vollständiger Zahnschmelzverlust, oder exponierte Pulpa, oder exponiertes Sekundärdentin
	inzisal	Exponierte Pulpa, oder exponiertes Sekundärdentin
	zervikal	Defekttiefe größer als 2 mm, oder exponierte Pulpa, oder exponiertes Sekundärdentin

Tabelle 2: TWI (Tooth Wear Index) nach Smith und Knight (1984)

Erosionsindex nach Lussi

Lussi et al. (1991) führten einen weiteren Index ein. Dieser Index bezieht sich speziell auf Zahnerosionen. Er differenziert zwischen Oberflächen und Schweregrad. Der Schweregrad wird unterschiedlich skaliert für faziale und oral/okklusale Oberflächen (Tabelle 3 und 4).

Faziale Oberflächen	
Grad	Kriterium
0	Keine Erosionen; Oberfläche glatt und seidenglänzend. Verlust der Oberflächenstruktur (Perikymatien) möglich
1	Oberflächlicher Schmelzverlust, intakte Schmelzleiste zervikal des Defekts, die Konkavität ist deutlich breiter als tief, wellenförmige Begrenzungen sind möglich, kein Dentin betroffen
2	Freiliegendes Dentin in weniger als $\frac{1}{2}$ der Zahnoberfläche
3	Freiliegendes Dentin in mehr als $\frac{1}{2}$ der Zahnoberfläche

Tabelle 3: Erosionsindex nach Lussi et al. (1991)

Orale und okklusale Oberflächen	
Grad	Kriterium
0	Keine Erosionen; Oberfläche glatt und seidenglänzend. Verlust der Oberflächenstruktur (Perikymatien) möglich
1	Leichte Erosionen, abgerundete Höcker, Restaurationen überragen die Zahnoberfläche, okklusale Furchen, Verlust von oberflächlichen Schmelz, Dentin ist nicht Betroffen
2	Stärkere Erosionen, deutlich ausgeprägtere Anzeichen auf Erosionen als in Grad 1, Dentin ist freigelegt

Tabelle 4: Erosionsindex nach Lussi et al. (1991)

BEWE (Basic Erosive Wear Examination)

Für eine einfache Quantifizierung und gute Anwendung im Praxisalltag und in wissenschaftlichen Studien wurde von Bartlett et al. (2008) die BEWE (Basic Erosive Wear Examination) vorgestellt (Tabellen 5 und 6). Bei dieser Untersuchung wird das Gebiss in Sextanten eingeteilt. In jedem Sextanten wird der maximale Erosionsbefund kodiert, anschließend werden die Punkte aus den jeweiligen Sextanten addiert. Anhand der Endpunkteanzahl wird eine Therapieempfehlung ausgesprochen.

Grad	Kriterium
0	Kein erosiver Zahnhartsubstanzverlust
1	Initialer Verlust der Oberflächenstruktur
2	Deutlicher Defekt, betroffene Zahnhartsubstanz weniger als 50 % der Zahnoberfläche
3	Zahnhartsubstanzverlust mehr als 50 % der Zahnoberfläche
Bei Grad 2 und 3 ist oft Dentin betroffen	

Tabelle 5: BEWE (Basic Erosive Wear Examination) nach Bartlett et al. (2008)

Risikograd	Gesamtsumme aller Sextanten	Management
Kein	≤ 2	Routinekontrolle, Wiederholung der BEWE im 3-Jahres-Intervall
Gering	3 - 8	Mundhygiene- und Ernährungsberatung, Routinekontrolle, Wiederholung der BEWE im 2-Jahres-Intervall
Mittel	9 - 13	Mundhygiene- und Ernährungsberatung, Herausfinden der Hauptursachen für die Zahnerosionen und Strategien zu deren Verhinderung, Fluoridierungsmaßnahmen, Monitoring, möglichst keine Füllungen legen, Wiederholung der BEWE alle 6 - 12 Monate
Hoch	14 und mehr	Wie oben, bei starkem Fortschreiten der Zahnerosionen restaurative Maßnahmen, Wiederholung der BEWE alle 6 – 12 Monate

Tabelle 6: BEWE-Risikostufen und klinische Empfehlung (Bartlett et al. (2008)

2.3.5 Prävalenz und Inzidenz von Erosionen

Es gibt einige Studien, die die Prävalenz und Inzidenz von Erosionen in der Bevölkerung untersuchen. Ein Vergleich der Studien ist jedoch häufig erschwert. Das liegt daran, dass die verwendeten Indizes nicht einheitlich und die Patienten nicht hinreichend kategorisiert sind. Die meisten Studien untersuchten Erosionen bei Kindern und Jugendlichen (Jaeggi und Lussi, 2014).

In der Bevölkerung der westlichen Welt lässt sich eine zunehmende Prävalenz von Zahnerosionen feststellen. Die Autoren Jaeggi und Lussi (2014) gehen davon aus, dass die Zahnerosionen mit dem steigendem Lebensalter zunehmen werden. In der Regel sind Jungen häufiger betroffen als Mädchen. Die häufigsten Prädilektionsstellen sind Okklusalfächen der ersten Molaren und die Palatinalflächen der oberen Inzisivi (Jaeggi und Lussi, 2014).

Eine Studie mit größerer Fallzahl führten Arnadottir et al. (2010) in Island durch. 2251 Menschen im Alter von 6, 12 und 15 Jahren (nahezu 20 % aus dieser Altersgruppe) wurden auf die Prävalenz von Zahnerosionen untersucht. Es wurden alle bleibenden Zähne einbezogen, wobei die Untersuchung nach dem modifizierten Index von Lussi erfolgte. Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass bei den 6-jährigen Kindern keine Prävalenz nachweisbar war, bei den 12-Jährigen hingegen eine Prävalenz von 15,7 % (Jungen 19,9 %, Mädchen 11 %), und bei den 15-Jährigen eine Prävalenz von 30,7 % (Jungen 38,3 %, Mädchen 22,7 %) bestand.

Auch bei einer in Hamburg durchgeführten Studie wurden Kinder im Alter von 6 bis 15 Jahren auf die Prävalenz von Zahnerosionen an bleibenden Zähnen untersucht. Bei 281 von 1580 untersuchten Teilnehmern wurden Zahnerosionen festgestellt. Dies entspricht einer Prävalenz von 17,8 %. Ähnlich der oben erwähnten Studie stieg die Prävalenz mit dem zunehmenden Alter der Probanden. So ergab sich eine Prävalenz 6 % bei den 6-Jährigen, 17,9 % bei den 9-Jährigen, 24,9 % bei den 12-Jährigen und 29,9% bei den 15-Jährigen (Waldmeyer, 2012).

Eine Studie, die auch die Inzidenz von Erosionen untersuchte, wurde von Ganss et al. (2001) durchgeführt. 1000 kieferorthopädische Modelle wurden auf

Zahnerosionen untersucht. 265 Teilnehmer wurden fünf Jahre später im Sinne einer Longitudinalstudie noch einmal kontrolliert. Die Ergebnisse zeigten, dass bei Zahnerosionen im Milchgebiss ein 3,9-fach erhöhtes Risiko besteht, Zahnerosionen auch im bleibenden Gebiss zu haben. Die Prävalenz, mindestens einen Zahn mit Zahnerosionen zu haben, lag bei den 10-Jährigen bei 5,3 %, fünf Jahre später ergab sich eine Prävalenz von 23,0 %. Somit ergibt sich eine Inzidenz nach fünf Jahren von 17,7 %.

In einer groß angelegten Studie wurden europaweit in sieben Ländern 3187 Patienten untersucht (Bartlett et al., 2013). Das Alter der Studienteilnehmer betrug 18 bis 35 Jahre. Insgesamt zeigten sich bei 29,4 % der untersuchten Personen Zahnerosionen. Die Prävalenz von Zahnerosionen unterschied sich teilweise massiv zwischen den teilnehmenden Ländern (Großbritannien 54,4 %, Frankreich 26,1 %, Spanien 26,3 %, Italien 21,9 %, Finnland 17,7 % und Estland/Lettland 17,1 %). Eine Zunahme an Zahnerosionen mit steigendem Lebensalter konnte ebenfalls festgestellt werden. In der Gruppe der 18- bis 25-Jährigen betrug die Prävalenz 26,5 %. Die Gruppe der 26- bis 35-Jährigen wies eine Prävalenz von 31,4 % auf.

2.3.6 Therapie

Die Therapie von Zahnerosionen lässt sich in eine kausale und eine symptomatische Therapie unterteilen. An erster Stelle steht immer eine genaue Anamnese. Die kausale Therapie geht der Ursache nach und untersucht, ob die Substanzverluste auf intrinsische oder extrinsische Säuren zurückzuführen sind und wie diese in Zukunft vermieden werden können. Bei der symptomatischen Therapie steht das gesamte zahnärztliche Spektrum von der Fluoridierung bis zur restaurativen Therapie zur Verfügung.

Kausale Therapie

Zur kausalen Therapie gehören das Ermitteln und das zukünftige Meiden von erosiven Noxen. Bei extrinsischen Säuren kann dafür eine leichte Änderung der Ess- und Trinkgewohnheiten notwendig sein. Es kann beispielsweise ausreichen, auf saure Bonbons, Fruchtgummis oder die Angewohnheit zu verzichten, mit einem Softgetränk die Zähne zu umspülen. Möglicherweise ist aber auch eine

tiefgreifendere Umstellung der Ernährung erforderlich (Lussi et al., 2009). Jedenfalls ist ein Verzicht auf saure Nahrungsmittel wie Softgetränke, Apfelsaft, nicht mit Calcium angereichertem Orangensaft, Weine, Zitrusfrüchte und Essigsoßen anzuraten. Die Autoren Lussi und Hellwig (2014) empfehlen, dass der Patient seine Essgewohnheiten und Mundhygiene über einen gewissen Zeitraum einschließlich des Wochenendes dokumentiert. Der Zahnarzt kann anhand dieser Daten die Einnahme potenziell erosiver Mahlzeiten oder Zwischenmahlzeiten aufzeigen.

Bei gastro-ösophagealem Reflux ist eine ärztliche Betreuung und Untersuchung anzuraten. Eine Medikamenteneinnahme von Protonenpumpenhemmern kann hilfreich sein (Bartlett et al., 1996). Auch der Verzicht auf Alkohol, fetthaltige Nahrung, Tomaten, koffeinhaltige Getränke und andere saure Lebensmittel ist indiziert (Lussi et al., 2009). Aufrechtes Schlafen verhindert einen Eintritt von Magensäure in die Mundhöhle (Taylor et al., 1992). In schweren Fällen kann eine Operation indiziert sein.

Das nächtliche Tragen von Schienen ist bei Patienten mit gastro-ösophagealem Reflux kontraindiziert. Bei Eintritt von Magensäure unter die Schiene besteht eine lange Kontaktzeit der Säure zur Zahnoberfläche und ein neutralisierender Speichelfluss ist erschwert (Lussi et al., 2009).

Bei der Einnahme von Medikamenten, die die Speichelsekretion verringern, sollten die Patienten auf ein erhöhtes Erosionsrisiko hingewiesen werden (Hellwig und Lussi, 2014). Nimmt der Patient ein Speichelersatzpräparat, das sauer ist, sollte mit dem behandelnden Arzt besprochen werden, ob eine Umstellung auf ein anderes Präparat möglich ist (Lussi et al., 2009).

Essstörungen vom Typ Anorexia nervosa oder Bulimie bedürfen einer medizinischen und psychologischen Behandlung. Nach Abschluss der Behandlung kann eine symptomatische Therapie begonnen werden (Rytomaa et al., 1998).

Mundhygiene

Auch unsachgemäße Mundhygiene kann per se zu Zahnhartsubstanzschäden führen oder erosiv bedingte Defekte verstärken. Ursachen können ungünstige Putzbewegungen sein oder eine Zahnbürste mit zu harten Borsten. Es empfiehlt sich daher, weiche Zahnbürsten zu verwenden (Lussi et al., 2009). Die Kraft, mit der die Zahnbürste aufgedrückt wird, sollte 100 N nicht übersteigen.

Auch die Abrasivität der Zahnpasta spielt eine Rolle. Der RDA-Wert sollte möglichst gering gewählt sein (Lussi et al., 2009).

Die generelle Empfehlung der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK), zwei Mal täglich die Zähne zu putzen, ist aus kariesprophylaktischer Sicht sinnvoll (Dörfer et al., 2007). Meist geschieht dies direkt im Anschluss an das Frühstück. In Einzelfällen kann es ratsam sein, eine längere Zeit abzuwarten, um dem erweichten Zahnschmelz Zeit zur Remineralisation zu geben. Die Wartezeit zwischen eingenommener Mahlzeit bis zum Zähneputzen ist umstritten (Lussi et al., 2009; Wiegand und Schlüter, 2014; Lussi und Carvalho, 2014). Laut der Autoren Wiegand und Schlüter (2014) gibt es hierzu keine gesicherten klinischen Studien. Die Autoren Lussi und Carvalho (2014) verweisen auf einige In-vitro/situ-Versuche, bei denen nach längeren Remineralisationsphasen eine höhere Resistenz des Zahnschmelzes gegenüber einer Abrasion feststellbar war. Allerdings sind sie der Meinung, dass diese Versuchssituation mit den In-vivo-Verhältnissen schwerlich in Einklang zu bringen sei. Eine generelle Empfehlung für eine Remineralisationszeit geben sie daher nicht. Sie sehen vielmehr im individuellen Putzverhalten die Möglichkeit erosiv-abrasivem Zahnhartsubstanzverlust entgegen zu wirken. Lediglich für spezielle Risikogruppen sollte im Einzelfall eine längere Phase der Remineralisation zwischen erosivem Angriff und Abrasion liegen.

Ebenfalls offen ist, inwieweit das Zähneputzen vor der Mahlzeit bei Erosionspatienten zu empfehlen ist. Hierbei kann das vor Säuren schützende Pellikel von der Zahnoberfläche abgetragen werden (Lussi et al., 2009). Bei Verwendung einer weichen Zahnbürste mit einer Zahnpasta mit geringem RDA-Wert ist jedoch keine vollständige Schädigung des Pellikels zu erwarten (Joiner et

al., 2008). Im Gegenteil ist der Zahn durch das Auftragen von Zinnverbindungen und von Fluoriden und der damit gebildeten Calciumfluoriddeckschicht zusätzlich geschützt. Das bestätigt ein In-situ/In-vitro-Versuch von Wiegand et al. (2008b), in welchem Zähne über 14 Tage vor bzw. nach der Demineralisation geputzt wurden.

Unbestritten hilfreich ist ein schnelles Neutralisieren der Säuren, beispielsweise durch Verwendung einer Mundspüllösung nach dem Genuss saurer Nahrung oder das Aus- und Umspülen der Zähne mit Wasser oder Milch (Lussi et al., 2009).

Speichelttest

Teilweise kann es ratsam sein, die Speichelfließrate zu bestimmen. Das ist vor allem dann empfehlenswert, wenn alle anderen oben genannten Ursachen ausgeschlossen wurden. Bei vermindertem Speichelfluss besteht für den Patienten ein erhöhtes Risiko für Zahnerosionen (Hara und Zero, 2014). Ursachen für verminderten Speichelfluss sind Nebenwirkungen durch Medikamente, Strahlentherapie und das Sjögren-Syndrom (Mese und Matsuo, 2007).

Minimalinvasive Therapie

Therapien sind indiziert bei Hypersensibilitäten. Das nicht-invasive Auftragen von Dentinadhäsiv-Systemen, sowohl von Einflaschen- als auch von Mehrflaschensystemen, hat sich dabei als wirksam erwiesen (Lussi et al., 2009). Allerdings ergab eine Untersuchung von Sundaram et al. (2007), dass eine Auffrischung alle 6-9 Monate notwendig ist. Auch die Anwendung von Fluoriden erweist sich als wirksam und kann als Therapie empfohlen werden (Schmidlin und Sahrmann, 2013). Zum Kenntnisstand bezüglich der Fluoridanwendung bei Erosionen wird auf den nachfolgenden Abschnitt verwiesen. Eine regelmäßige Kontrolle zu individuell erstellten Recall-Intervallen ist in jedem Fall wichtig. Ziel ist die Überprüfung, ob die diagnostizierten Ursachen verändert oder abgestellt wurden, und eine Verlaufskontrolle der Zahnerosionen. Der BEWE-Index beinhaltet Empfehlungen für weitere Recalltermine (Bartlett et al., 2008), die sich nach dem Schweregrad der Erosionen richten und dem Zahnarzt einen Anhaltspunkt geben können.

Restaurative Maßnahmen

Restaurative Maßnahmen sind dann indiziert, wenn die Zahnerosionen zu erheblichen Zahnhartsubstanzdefekten und starken subjektiven Symptomen geführt haben (Peutzfeldt et al., 2014). Für die Therapie stehen alle vorhandenen zahnmedizinischen Restaurationsmaßnahmen zur Verfügung. Kleine Zahnhartsubstanzdefekte können minimalinvasiv mit Kompositfüllungen repariert werden. Bei massiven okklusalen Zahnerosionen mit Verlust der physiologischen Bisshöhe kann eine Kronen-, Onlay- oder Teilkronentherapie mit Bisshebung indiziert sein (Peutzfeldt et al., 2014). Die adhäsive Befestigung der Versorgungen ist in der Regel indiziert, da es sich bei Zahnerosionen um einen oberflächlichen Zahnhartsubstanzverlust handelt.

2.3.7 Prophylaxe erosiver Zahnschäden

Neben der kausalen Therapie und den erwähnten symptomatischen Ansätzen werden verschiedene Wirkstoffe zur Prophylaxe erosiver Zahnschäden angeboten. Dabei hat die Anwendung von Fluorid einen besonderen Stellenwert erlangt. Für alle im Zusammenhang mit Erosionen angebotenen Wirkstoffe ist zu differenzieren zwischen der präventiven Anwendung bei Zahnschmelz, der bislang keine Erosionen aufweist, und dem Einsatz bei erosiv veränderten Zahnhartsubstanzen, um einen weiteren Fortgang der Substanzverluste zu unterbinden oder zu reduzieren. Beide Anwendungen wären präventiver Natur. Davon abzugrenzen sind Bemühungen, durch Wirkstoffe bereits erosiv verloren gegangenen Zahnschmelz reparieren zu wollen. Eine derartige therapeutische Wirkung kann im Grunde nicht erwartet werden (Buzalaf et al., 2014). Im Folgenden sollen die Kenntnisse zur Prophylaxe erosiver Zahnschäden durch Fluorid und durch andere Wirkstoffe dargestellt werden.

2.3.8 Fluoride

Der Einsatz von Fluor-Verbindungen wurde in der zahnmedizinischen Forschung in zahlreichen Versuchen und Studien unter dem Fokus der Kariesprophylaxe und der Remineralisation beginnender kariöser Defekte untersucht. Anlass für die intensive Forschung war die Feststellung, dass in Regionen mit erhöhten Fluoridvorkommen im Trinkwasser weniger kariöse Läsionen beobachtet wurden.

Zu den ersten epidemiologischen Untersuchungen zählen diejenigen von Dean aus dem Jahre 1938 (Dean, 1938). Die Wirksamkeit von Fluoriden gegen Karies ist unbestritten (Hellwig et al., 2013). Daher bilden Fluoride eine elementare Säule im Bereich der Kariesprophylaxe (Schiffner, 2001; Gülzow, 1995). Die positiven Effekte von Fluoriden zeichnen sich aus durch:

1. Förderung der Remineralisation und Hemmung der Demineralisation,
2. Bildung einer Calciumfluorid-Deckschicht, die als Fluoridreservoir dient,
3. Einlagerung in den Zahnschmelz und damit verbundener niedriger Säurelöslichkeit,
4. Eingriff in den Stoffwechsel bestimmter kariogener Bakterien und Hemmung der Anheftung an die Zahnoberfläche (Schiffner, 2001; Hellwig et al., 2013).

Die Applikation von Fluoriden erfolgt auf systemische oder lokale Weise, wobei beide Wege nicht strikt voneinander zu trennen sind (Schiffner, 2001). Die systemische Aufnahme erfolgt über fluoridiertes Trinkwasser, fluoridiertes Speisesalz oder Fluoridtabletten und wirkt dabei ebenfalls lokal im Mundraum. In der Phase der präeruptiven Schmelzreifung kann Fluorid direkt in das Apatitgitter des Zahnschmelzes eingebaut werden (Schiffner, 2001). Der entstandene Fluorapatit weist zwar eine geringere Säurelöslichkeit im Vergleich zu Hydroxylapatit auf (ten Cate, 1997), und dieser Mechanismus galt lange als die bedeutendste Fluoridwirkung bei der Kariesprophylaxe. Studien zeigten jedoch, dass dieser Einfluss geringer ist als ursprünglich angenommen und dass der Karieszuwachs sich nicht von demjenigen ohne systemische Fluoridzufuhr unterscheidet (Reich et al., 1992). Ein weiterer Nachteil bei einer zu hohen systemischen Fluoridapplikation ist die leichtere Ausbildung einer Fluorose. Die Grenzdosis für die Fluoridaufnahme liegt bei 0,05 mg/kg Körpergewicht (Efsa Panel on Dietetic Products and Allergies, 2013).

Nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft ist die lokale Fluoridapplikation für die guten Erfolge der Kariesprophylaxe verantwortlich. Dabei spielt vor allem die Calciumfluoriddeckschicht und deren Wirkung auf das Wechselspiel zwischen Re- und Demineralisation zugunsten der Remineralisation eine entscheidende Rolle (ten Cate, 1997; Schiffner, 2001). Insgesamt besteht eine Dosis-Wirkungs-

Beziehung zwischen appliziertem Fluorid und der Karieshemmung (Marinho et al., 2013; Walsh et al., 2010) Der Fluorid-Höchstwert in Zahnpasta beträgt 1500 ppm.

Inwieweit Fluorid auch Zahnerosion verhindern kann, ist Gegenstand mehrerer Untersuchungen mit teils unterschiedlichen Ergebnissen. Fluorid-Verbindungen wurden hierfür in Form von Natriumfluorid, Zinnfluorid, Aminfluorid und Titanfluorid getestet.

Sorvari et al. (1994) wiesen nach, dass Natriumfluorid in hohen Konzentrationen Demineralisationen am Zahn deutlich reduziert. Schlüter et al. (2010) zeigten jedoch, dass eine reine Natriumfluoridspüllösung im Gegensatz zu einer zinnhaltigen Spüllösung keinen Zahnschmelzsubstanzabtrag verhindern konnte. In einem Vergleich von Fluoridverbindungen mit metallischen Kationen deutete sich an, dass zinnhaltige Spüllösungen anderen Kationen wie Titan oder Kupfer überlegen sind (Schlüter et al. (2009a). Ganss et al. (2008) stellten fest, dass Zinnfluorid in Kombination mit Aminfluorid einen besonders guten Schutz gegenüber Säuren bildet.

In einer weiteren Studie verglichen die Autoren Ganss et al. (2010b) in situ die Wirkung einer Natriumfluoridmundspüllösung (500 ppm F^-) mit einer Mundspüllösung, die aus Aminfluorid, Natriumfluorid und Zinnchlorid (500 ppm F^- , 800 ppm Sn^{2+}) besteht, sowie mit einer Placebospüllösung. Beide Mundspüllösungen reduzierten den Zahnschmelz- und Dentinabbau unter erosiven Bedingungen signifikant. Jedoch zeigte sich auch ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Spüllösungen. Die rein natriumfluoridhaltige Mundspüllösung reduzierte den Zahnschmelzabbau um 19 % und den Dentinabbau um 23 %; demgegenüber wurde bei der komplexeren Lösung (im Vergleich zur Placebospüllösung) eine Reduktion des Verlustes am Zahnschmelz von 67 % und am Dentin von 47 % ermittelt.

2.3.9 Zinnverbindungen in der Zahnheilkunde

In der Zahnmedizin wird Zinn in Form von Zinnfluorid oder Zinnchlorid verwendet. Klinische Untersuchungen begannen in den 50er Jahren, bei denen Zinnfluorid als eine der ersten Fluoridverbindungen in Zahnprophylaxemitteln zur Anwendung kam (Muhler, 1958). Zinnfluoridhaltige Zahnpasta gab es dann bereits in den 60iger Jahren in den USA; 1964 wurde diese von der American Dental Association gegen koronale Karies empfohlen (Chace, 1964).

Problematisch erwies sich die Stabilität des wirkungsvollen zweiwertigen Zinn-Ions (Sn^{2+}) (Tinanoff, 1995). Zinn(II) ist sehr reaktiv und neigt zur Oxidation und Hydrolyse (Miller et al., 1994). Es oxidiert beispielsweise unter Sauerstoffzutritt zu Zinn(IV) (Klement und Haselbeck, 1963), und in wässrigem Milieu mit einem pH-Wert über 4 hydrolysiert Sn^{2+} zu Sn^{4+} (Tinanoff, 1995).

Ziel der Forschung war es daher, SnF_2 in Zahnpasta zu stabilisieren. Im Zuge erster Versuche wurde die wässrige Lösung durch Glycerin ausgetauscht und auf abrasive mineralische Additive verzichtet. Diese im Mund als unangenehm empfundene Zahnpasta fand bei den Konsumenten jedoch wenig Akzeptanz (Tinanoff, 1995).

Heutzutage kann Zinnfluorid durch das Hinzufügen von Antioxidantien und Chelaten stabilisiert werden. Die Chelate binden das Zinnfluorid; hinzugefügte zweiwertige Zinnionen dienen als Antioxidantien. Es besteht allerdings die Gefahr der „Überstabilisierung“ (Tinanoff, 1995).

Aufgrund seines relativ kleinen Radius ist das Zinn(II)-Ion nicht fähig, Apatit zu bilden (Klement und Haselbeck, 1963). In vitro konnte jedoch gezeigt werden, dass Zinn Calcium isomorph im Apatit-Kristallgitter ersetzen kann und einen „Mischapatit“ bildet (Klement und Haselbeck, 1963). In weiteren In-vitro-Studien wurde nachgewiesen, dass Zinnfluorid mit Hydroxylapatit vier Reaktionsprodukte bilden kann: Sn_2OHPO_4 , $\text{Sn}_3\text{F}_3\text{PO}_4$, $\text{Ca}(\text{SnF}_3)_2$ und CaF_2 . Meist wird allerdings CaF_2 gebildet. Die Bildung der anderen Produkte hängt vom Verhältnis Zinn zu Phosphor und der Zinnfluoridkonzentration ab (Babcock et al., 1978; Wei und Forbes, 1974; Nelson und Bainbridge, 1973). In einer In-vitro-Studie von Hercules

und Craig (1978) wurden Zahnschmelzproben vier Minuten lang mit einer sechsprozentigen Zinnfluoridlösung behandelt. Die Autoren stellten fest, dass sich an der Oberfläche hauptsächlich Zinnoxid befand. In tieferen Regionen konnten sie Sn_2OHPO_4 , CaF_2 und $\text{Sn}(\text{OH})_2$ nachweisen, jedoch kein $\text{Sn}_3\text{F}_3\text{PO}_4$.

In weiteren Studien (Gross und Tinanoff, 1977; Ferretti et al., 1982) konnten die guten bakteriostatischen Eigenschaften der Zinnionen belegt werden. Ferretti et al. (1982) zeigten beispielsweise, dass Zinnfluorid durch Adsorption an der Bakterienoberfläche aktiv den Metabolismus der Bakterien stört. Ota et al. (1989) zeigten in einer In-vitro-Studie, dass Zinnfluorid die Zell-Zell-Kohäsion von Bakterien beeinflusst.

Bei der Behandlung der Dentinhypersensibilität erweist sich Zinnfluorid als äußerst wirksam. Patienten spürten bereits nach wenigen Wochen eine Verbesserung besonders auf Luftzug (He et al., 2014; Ni et al., 2010; Schiff et al., 2006). Der mögliche Grund für diesen Erfolg ist ein Verschluss der offenen Dentintubuli durch Einlagerung von Zinnionen (Schiff et al., 2006). In mehreren rasterelektronenmikroskopischen Studien konnte der Verschluss der Dentintubuli nach einer Zinnfluoridapplikation bildlich nachgewiesen werden (Ellingsen und Rolla, 1987; Miller et al., 1994).

In mehreren Studien wurde darüber hinaus gezeigt, dass Zinn einen positiven, schützenden Effekt gegenüber organischen Säuren hat (Peutzfeldt et al., 2014; Schlüter et al., 2009b). So zeigten Schlüter et al. (2009a) in einer Vergleichsstudie, dass zinnhaltige Lösungen ($\text{AmF}/\text{NaF}/\text{SnCl}_2$) den erosiven Zahnschmelzabbau signifikant reduzieren. Mehrere metall-fluoridhaltige Spüllösungen wurden dabei im Vergleich getestet.

Dass Zinn nicht nur an der Zahnoberfläche aktiv ist, konnten Untersuchungen mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) an Querschliffen von Zahnschmelzproben bestätigen. Unter erosiven Bedingungen wurde Zinn in bis zu 20 μm Tiefe nachgewiesen (Schlüter et al., 2009b). Ein Einbau von Zinn ohne Demineralisationszyklen ließ sich jedoch nicht bestätigen.

Die Zinnkonzentration in Mundspüllösungen ist niedrig und liegt bei 800 ppm Zinn (Magalhaes et al., 2011). Die in Mundspüllösungen enthaltenden Zinnkonzentrationen gelten daher als unbedenklich für das Auslösen systemischer Reaktionen (Schlüter et al., 2009b).

2.3.10 Weitere Inhaltsstoffe in Prophylaxemitteln zum Schutz vor Zahnerosionen

Polymere

Polymere werden derzeit vermehrt als prophylaktisch wirksame Inhaltsstoffe gegenüber Säuren getestet (Buzalaf et al., 2014). Sie fanden bereits Eingang in Mundhygieneartikel. Gracia et al. (2010a) kamen zu dem Ergebnis, dass die Inhaltsstoffe Carboxymethylcellulose (CMC), Xanthan und Copovidon gegenüber Zitronensäure effektiv zahnschmelzschützend wirken. Carboxymethylcellulose und Xanthan sind anionische Polysaccharide. Copovidone ist ein nicht-ionisches Copolymer. Das Polymer-System wurde ursprünglich dazu entwickelt, um bei Xerostomie eingesetzt zu werden, da es eine gute Benetzung der Schleimhäute und Zähne ermöglicht (Gracia et al., 2010a).

Chitosan, ein Polyaminosaccharid, ist ein Bipolymer, das in Versuchen ebenfalls eine gute Oberflächenbenetzung bestätigte und erfolgreich säurebedingte Zahnhartsubstanzverluste vermindert (Schlüter et al., 2014; Ganss et al., 2012). Die Autoren Schlüter et al. (2014) sehen die guten Eigenschaften von Chitosan darin begründet, dass das positiv geladene Molekül mit der negativ geladenen Zahnhartsubstanz (Young et al., 1997) und dem Pellicel elektrostatische Bindungen eingehen kann. Es bilden sich Oberflächenschichten, die stabil gegenüber pH-Wert-Schwankungen und resistent bei niedrigen pH-Werten sind.

Zink-Carbonat-Hydroxylapatit und nano-sized Hydroxylapatit

Die Anwendung von Nano-Partikeln ist ein eher junges Forschungsgebiet in der Zahnmedizin. Zink kann in Hydroxylapatit eingebaut werden. Die Herstellung dieses zinksubstituierten Hydroxylapatits wird unter anderem von Thian et al. (2013) beschrieben. Laut den Autoren sei es möglich, Zink in Hydroxylapatit einzufügen, wodurch dieser eine zusätzliche antibakterielle Wirkung erhalte.

Im Folgenden wird der Begriff Zink-Carbonat-Hydroxylapatit verwendet – ein Begriff, den der Hersteller Dr. Wolf, Bielefeld, für sein Produkt BioRepair benutzt. Eine exaktere Wirkstoffkombination ist soweit ersichtlich nicht deklariert.

Der erosionshemmende Wirkmechanismus bei der Anwendung von Zink-Carbonat-Hydroxylapatit und nano-sized Hydroxylapatit liegt in der Bereitstellung von Calcium und Phosphatsilikaten. Die Mineralien sollen die durch Säuren zerstörte Zahnoberfläche reparieren, indem sie in die Zahnoberfläche integriert werden (Buzalaf et al., 2014). Die Wirkweise von Zink-Carbonat-Hydroxylapatit beruht zuerst auf der Benetzung der Zahnoberfläche. Die Lösung dringt daraufhin in die mikro-großen Risse an der Zahnoberfläche ein. Hier findet eine Fällung (Präzipitation) aus der flüssigen Lösung statt. Aufgrund seiner kristallinen Ähnlichkeit zum hexagonal angeordneten Hydroxylapatit des Zahnes verbindet sich das Zink-Carbonat-Hydroxylapatit mit der Zahnhartsubstanz. Inwieweit dieser postulierte Reparaturmechanismus möglich ist, bleibt umstritten (Buzalaf et al. (2014).

Die Wirksamkeit von Zink-Carbonat-Hydroxylapatit wurde in mehreren In-vitro/In-situ-Studien untersucht. Erste Publikationen stammen von den Autoren Yamagishi et al. (2005), die einen erfolgreichen kristallinen Einbau von künstlichem Zahnschmelz in einen initial am Zahnschmelz geschädigten Zahn veröffentlichten. Die Bestandteile der selbstangefertigten Zahnpasta nennen sie nicht.

In einem In-vitro-Erosionsversuch von Poggio et al. (2010) verglichen die Autoren zwei Zahnpasten (ProSchmelz und BioRepair) in Bezug auf einen schützenden Effekt vor Zahnerosionen. In diesem De- und Remineralisationsversuch wurden die unterschiedlichen Zahnpasten jeweils für 3 Minuten nach 0, 8, 24 und 36 Stunden auf Zahnschmelzproben aufgetragen. Die Demineralisation mittels Coca Cola bestand aus vier Zyklen mit jeweils 2 Minuten. Der Zahnhartsubstanzverlust unterschied sich nicht signifikant zwischen den beiden Zahnpasten. Beide zeigten jedoch einen schützenden Effekt im Vergleich zu einer nicht behandelten Kontrollgruppe. Zusätzlich präsentierten die Autoren für jede Gruppe nach Anwendung der jeweiligen Paste das Bild einer glatten Oberfläche. Bei der Versuchsgruppe von BioRepair folgerten sie, dass es sich um eine apatithaltige

Oberfläche handele, die durch die Anwendung von BioRepair mit seinen Inhaltsstoffen (nano-sized Hydroxylapatit) gebildet wurde.

Die Autoren Hannig et al. (2013) erkennen in ihren Versuchen antikariogene Eigenschaften bei der Anwendung von Zink-Carbonat-Hydroxylapatit. Laut ihrer Ergebnisse sei die bakterielle Anheftung an die Zahnoberfläche nach Anwendung von Zink-Carbonat-Hydroxylapatit erschwert und dies führe zu einer geringeren bakteriellen Besiedlung.

In einer neueren In-vivo-Studie untersuchen die Autoren Harks et al. (2016), inwieweit die Anwendung einer Zahnpasta mit Zink-Carbonat-Hydroxylapatit im Vergleich zu einer Aminfluorid/Zinnfluorid-Zahnpasta Auswirkungen auf Plaque und Gingivitis habe. Untersucht wurden diese Parameter bei Patienten mit leichter Parodontitis. Die Autoren stellten fest, dass kein Unterschied zwischen den zwei Prophylaxemitteln bestehe und beide die dentale Plaque reduzieren.

2.4 Forschungsfrage und Untersuchungsziel

Die Prävalenz erosiv geschädigter Zähne ist hoch und wird mit zunehmendem Lebensalter weiter steigen. Erosive Zahnschäden sind irreversibel. Daher sind die Prävention von Erosionen, aber auch das Stoppen der Weiterentwicklung oder zumindest die Verlangsamung der Erosionsentwicklung von besonderer Bedeutung. Verschiedene Produkte mit unterschiedlichen Wirkstoffen oder Wirkstoffkombinationen werden angeboten, für die die Hersteller einen nachhaltigen Erosionsschutz reklamieren. Über die erosionshemmende Wirksamkeit der Produkte liegen bislang jedoch auch in der In-vitro-Testung nur einzelne Angaben vor, und vergleichende Bewertungen sind selten.

Vor diesem Hintergrund sollen in einem In-vitro-Versuch drei Mundspüllösungen größerer Hersteller, die auf dem deutschen Markt erhältlich sind, unter standardisierten Bedingungen bezüglich ihrer Wirksamkeit gegenüber zyklischen Säureangriffen vergleichend untersucht werden. Folgende Fragen sollen dabei beantwortet werden:

- Sind die Mundspüllösungen in der Lage, den säurebedingten Zahnschmelzabbau zu reduzieren?
- Weisen die verschiedenen Wirkstoffe beziehungsweise Wirkstoffkombinationen signifikant unterschiedliche erosionshemmende Effekte auf?
- Sind die Mundspüllösungen in der Lage, den säurebedingten Zahnschmelzabbau zu reduzieren, wenn die Zahnproben einer zusätzlichen Abrasion unterzogen werden?
- Sind charakteristische Anteile der Mundspüllösungen nach der Anwendung auf bzw. in der Zahnoberfläche nachweisbar?

3 Material und Methode

Alle verwendeten Materialien sind im Anhang in Tabellen aufgeführt (Materialien- und Chemikalienliste). Die im folgenden Text enthaltenen Material-Nummern beziehen sich auf diese Tabellen.

3.1 Probenherstellung

Für das vorgesehene laborexperimentelle Versuchsprogramm wurden 42 Zähne benötigt. Insgesamt standen 104 Zähne zur Verfügung, die in einer MKG-Praxis in Niedersachsen gesammelt wurden. Alle Zähne waren retinierte dritte Molaren und hatten nicht in direktem Kontakt mit der Mundhöhle gestanden. Direkt nach der operativen Entfernung waren sie in physiologischer Kochsalzlösung gelagert worden. Die Lagerungsdauer bis zur experimentellen Aufarbeitung der Zähne machte maximal drei Monate aus. Zur Desinfektion wurden die Zähne für mindestens zwei Nächte in Formaldehyd (Mat. 38) eingelegt.

Mit einer Bandsäge der Firma Exakt (Mat. 1) wurden aus den Zähnen unter permanenter Wasserkühlung Zahnschmelzproben herausgeschnitten. Es wurden nur Zähne verwendet, aus denen vier intakte Schmelzproben gesägt werden konnten. Exemplarisch zeigt Abbildung 2 in zwei Ansichten einen der mittels Bandsäge zerteilten Zähne.

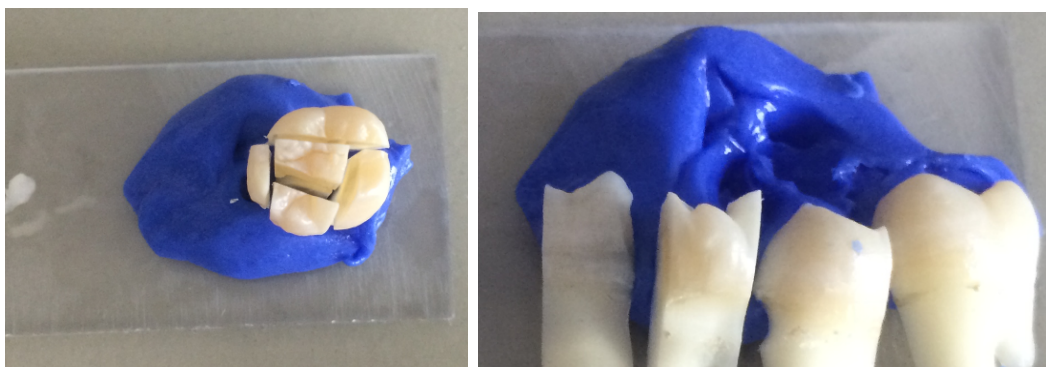


Abbildung 2: Beispiel eines zersägten Zahns: a) Aufsicht, b) seitliche Ansicht der Teilstücke

Jeder Zahn wurde nummeriert und mit allen seinen gesägten Schmelzproben in 12 ml-Röhren (Mat. 19) zwischengelagert. Die Röhren wurden mit physiologischer Kochsalzlösung (Mat. 32) gefüllt und kühl gelagert (Mat. 6). Mit Schleifpapier der

Körnung P 220 (Mat. 4) wurden Objektträger (Mat. 18) angeschliffen, um die Schmelzabschnitte darauf mit besserem Klebeverbund befestigen zu können. Jede Zahnprobe wurde mit Hilfe von Technovit (Mat. 29) einzeln auf einen Kunststoffobjektträger (Mat. 18) geklebt, der Objektträger wurde entsprechend nummeriert.

Zum Erzielen einer planen Oberfläche erfolgten Anschliff und Feinschliff der aufgeklebten Schmelzproben mittels des Mikroschleifsystems (Mat. 2) von der Fa. Exakt auf einem runden Drehteller unter ständigem Wasserfluss. Eine Vakuumpumpe (Mat. 3) fixierte die Probenhalter. Die Oberflächen der Schmelzproben wurden, wie nachfolgend beschrieben, minimal mit Schleifpapier der Körnung P1200 (Mat. 4) angeschliffen. Dafür wurden die Schmelzproben mit einem 20 g Gewicht beschwert und auf die Mitte des Schleiftellers gesetzt und einmal mittels automatischen Vorschubs bis zum Rand des Schleiftellers gefahren. Sobald sie zur Mitte zurückgekehrt waren, wurden sie unverzüglich vom Schleifteller genommen. Der Schleifprozess wurde mit Schleifpapier der Körnung P2500 (Mat. 4) wiederholt. Mit einer Siliziumcarbid-1200/4000-Schleifscheibe (Mat. 4) wurden die Zahnproben daraufhin für 10 Minuten poliert.

Anschließend wurde ein handelsüblicher Nagellack auf Basis von Nitrocellulose (Mat. 33) auf die Schmelzprobe aufgetragen, dabei wurde ein Versuchsfeld auf der polierten Oberfläche freigelassen. Die Kontrolle der Schmelzproben auf mögliche Verunreinigungen durch den Lack erfolgte mit einem Mikroskop (Mat. 20) bei 10-facher Vergrößerung.

Die Versuchsproben wurden in eigens für den Versuch aus Legosteinen (Mat. 16) zusammengesteckte Objektträgerhalter stehend einsortiert (Abbildung 3). Bis zum Versuchsbeginn erfolgte die Lagerung gekühlt in Kunststoffbehältern (Mat. 10), die mit physiologischer Kochsalzlösung (Mat. 32) gefüllt waren.



Abbildung 3: Objektträger mit den Zahnschmelzproben in den für den Versuch gebauten Lego-Objekthaltern

3.2 Prophylaxe-Lösungen

Mit der Studie sollte der Effekt unterschiedlicher Wirkstoffe, die in verschiedenen als erosionshemmend angebotenen Mundspüllösungen Verwendung finden, auf die Entwicklung von Erosionen untersucht werden. Folgende drei Mundspüllösungen wurden verwendet:

Mundspüllösung A: Elmex Erosionsschutz (Mat. 37)

Mundspüllösung B: ProSchmelz (Mat. 36)

Mundspüllösung C: BioRepair (Mat. 35).

Die Inhaltsstoffe der Produkte sind im Anhang aufgelistet (siehe Seite 109). Ausschlaggebend für die Wahl dieser drei Produkte war deren werbliches Versprechen, Zahnerosionen entgegenzuwirken. Die Anwendung der Mundspüllösungen fand dabei nicht gemäß Packungsbeilage statt, sondern standardisiert zweimal täglich (morgens und abends) für zwei Minuten. Die

Mundspüllösungen wurden während der gesamten Versuchsdauer im Kühlschrank (Mat. 6) gelagert und 20 Minuten vor Gebrauch im Wasserbad (Mat. 9) auf 38 Grad Celsius erwärmt.

3.3 Künstlicher Speichel

In der Mundhöhle können geringe Elementverluste aus dem HAP-Kristallgitter durch Speichelionen remineralisiert werden. Diese Möglichkeit sollte in der Versuchsanordnung durch die Verwendung künstlichen Speichels simuliert werden. Der künstliche Speichel setzte sich wie folgt zusammen (Matzker und Schreiber, 1972):

- | | | |
|---|---------------|--------------------------|
| 1. Kaliumchlorid (KCl, Mat. 24): | M=74,56g/mol | 0,016 mol/l (1,2g/l) |
| 2. Natriumchlorid (NaCl, Mat. 23): | M=58,44g/mol | 0,014 mol/l (0,843g/l) |
| 3. di-Kaliumhydrogenphosphat ($K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$, Mat. 25): | M=228,23g/mol | 0,00149 mol/l (0,342g/l) |
| 4. Salzsäure (HCl, Mat. 28): | M=1mol/l | 0,5 ml/l (0,5ml/l) |
| 5. Calciumchlorid ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$, Mat. 26): | M=147,02g/mol | 1 mmol/l (0,146g/l) |

Zweimal täglich wurden 2 Liter „Speichel“ angerührt. Die verwendeten Festsubstanzen wurden mit einer Waage (Mat. 7) gewogen und mit dem Magnetrührer (Mat. 8) entsprechend vermischt. Alle Substanzen wurden in Bechergläsern (Mat. 11) mit Wasser V.E. vorvermischt. Um ein Ausfällen von Calciumphosphat zu verhindern, wurde das Calciumchlorid erst nach dem Pipettieren (Mat. 14) der Salzsäure und vollständiger Auflösung aller vorherigen Mineralien hinzugefügt. In jedem Plastikbehälter befanden sich 500 ml künstlicher Speichel. Alle Behältnisse wurden zusätzlich zum Deckel mit Parafilm (Mat. 13) abgedeckt.

3.4 Demineralisationslösung

Der Säureangriff auf den Zahnschmelz wurde mit 1 %iger Zitronensäure (Mat. 27) durchgeführt. Hierzu wurden allmorgendlich 40 g Zitronensäure mit 3960 ml Aqua V.E. unter Verwendung eines Magnetrührers (Mat. 8) angesetzt und auf die Kunststoffbehältnisse (Mat. 10) verteilt. Die hergestellte Demineralisationslösung diente für fünf erosive Angriffszyklen. Der mit Hilfe eines pH-Meters (Mat. 12) kontrollierte pH-Wert betrug 2,3. Das pH-Meter wurde vor jeder Messung kalibriert (Mat. 30 und 31). 20 Minuten vor der Anwendung wurde die Zitronensäure im Wasserbad auf 38 Grad Celsius erwärmt.

3.5 Abrasion

In einem zweiten Versuchsteil sollte der Effekt der Wirkstoffe bzw. der sie enthaltenen Produkte unter erosiven Bedingungen und zusätzlicher abrasiver Zahnputz-Belastung untersucht werden. Hierzu wurden alle Zahnschmelzproben zwei Mal täglich standardisiert „geputzt“. Das Putzen fand jeweils nach einer 20-minütigen Remineralisationsphase statt.

3.5.1 Zahnbürste

Zum Zähneputzen wurde eine elektrische Zahnbürste (Mat. 15) der Firma Oral B verwendet. Die Zahnbürste wurde in einen eigens gebauten Halter eingeschraubt (siehe Abbildung 4). Mit dem Eigengewicht der Zahnbürste ergab sich eine Aufdrucklast des Bürstenkopfes auf die Zahnprobe von 35 g. Als Zahnbürstenköpfe dienten gleichzeitig oszillierende und rotierende Bürstenköpfe (Mat. 17), die als extra-weiche Borsten gekennzeichnet waren. Jeder Versuchsgruppe wurde ein eigener Zahnbürstenkopf zugeordnet. Die Zahnbürstenköpfe wurden dahingehend modifiziert, dass die äußeren Borsten abgeschnitten wurden. Auf diese Weise putzten die verbliebenden inneren Borsten fast ausschließlich auf dem Versuchsfeld und nicht auf der Feldbegrenzung.

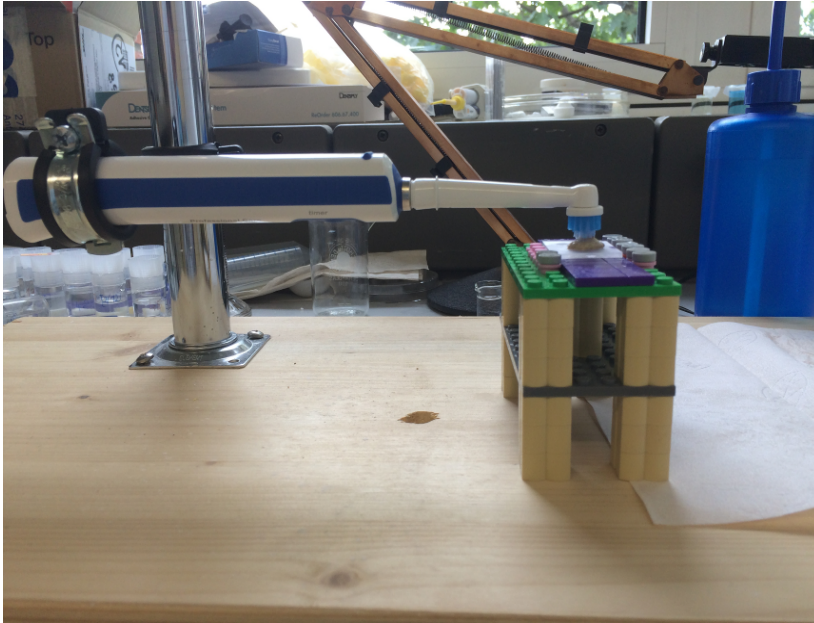


Abbildung 4: Für den Abrasionsversuch erstellter Zahnbürstenhalter

3.5.2 Zahngel

Als Abrasionsmittel wurde ein Kinderzahngel der Firma Weleda (Mat. 34) verwendet. Dieses Produkt ist frei von Fluorid und hat einen RDA-Wert von ca. 50. Jede Zahnprobe wurde zwei Mal täglich für fünf Sekunden geputzt.

3.6 Gruppeneinteilung

Bei 49 der 104 Zähne konnten aus jedem Zahn vier intakte Schmelzproben für den Versuch herausgetrennt werden. 42 der 49 Zähne wurden letztendlich für den Versuch verwendet, da dies die maximale Kapazität der Probenhalter darstellte. Jeder Zahn erhielt eine feste Nummer. Aus den vier Schmelzproben wurden vier Versuchsgruppen gebildet (A, B, C und D bzw. im zweiten Versuchsteil die Gruppen 2A, 2B, 2C und 2D). Dadurch wurde sichergestellt, dass aus jedem Zahn eine Schmelzprobe in den Gruppen A bis D (bzw. 2A bis 2D) vertreten war. Die Gruppeneinteilung erfolgte zufällig.

Bei Versuchsteil 1 (Zahnhartsubstanzverluste unter erosiven Bedingungen) waren jeweils 22 Schmelzproben den jeweiligen Gruppen zugeordnet, und bei Versuchsteil 2 (Zahnhartsubstanzverluste unter erosiv-abrasiven Bedingungen)

machte die Anzahl in den Gruppen jeweils 20 Proben aus. Beim Versuchsteil 2 musste aus rein praktischen Gründen mit zwei Versuchsproben je Gruppe weniger gearbeitet werden. Die 20 Proben ließen sich weniger problematisch aus den Probenhalter herausnehmen und wieder einsetzen. Dieses Vorgehen erübrigte sich beim ersten Versuch; daher wurde der Probenhalter mit 22 Proben voll besetzt.

3.7 Probenaufbereitung und Analyse der Erosionen

Nach Abschluss der erosiven bzw. erosiv-abrasiven Belastungszyklen wurde der Nagellack (Mat. 33) vorsichtig mit handelsüblichem Nagellackentferner (Mat. 39) von den Zahnschmelzproben entfernt. Mit bloßem Auge war das Versuchsfeld auf der polierten Zahnschmelzoberfläche bereits als kreidigweißes Areal zu erkennen.

3.7.1 LSM (Laser-Scanning-Mikroskop)

Der Zahnhartsubstanzverlust der Proben wurde mittels eines Laser-Scanning-Mikroskops der Firma Keyence (Mat. 22) ausgemessen. Zur Bedienung wurde das Softwareprogramm Viewer (Mat. 41) verwendet. Vor jeder neuen Messung wurde der Probentisch auf die Null-Position gefahren. Die Auflösung wurde zu 2048 mal 1536 Pixeln gewählt.



Abbildung 5: Zahnprobe vor dem Ausmessen des Zahnhartsubstanzabtrages (aufgenommen mit dem LSM): Die heller erscheinende Referenzfläche und die dunkle Versuchsfläche sind deutlich zu erkennen.

Das Laser-Scanning-Mikroskop vermisst Proben aus senkrechter Aufsicht und liefert die räumlichen Daten in X-, Y-, und Z-Richtung in digitaler Form. Die Auswertung der Aufnahmen erfolgte mit der Software VK Analyzer der Firma Keyence (Mat. 41). Abbildung 5 steht exemplarisch für eine gemessene Versuchsprobe. Die unterschiedlichen Grauwerte entsprechen der Intensität des zurückgestrahlten Laserlichtes. Die hellerscheinende Fläche entspricht dabei der planen Referenzfläche, der dunkle Anteil der erodierten Versuchsfläche.

Das Funktionsprinzip des hier angewandten Laser-Scanning-Mikroskops wird in der folgenden Abbildung 6 schematisch dargestellt.

Funktionsprinzipien der Modelle VK-9700K/VK-8700K

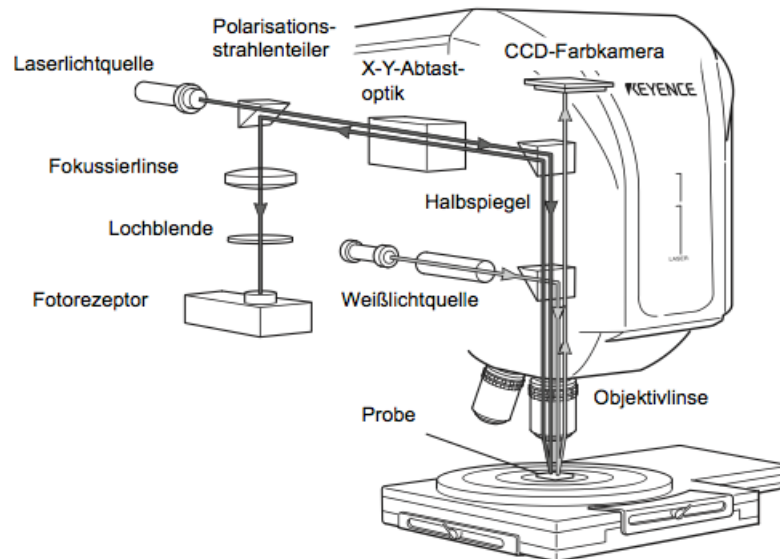


Abbildung 6: Funktionsprinzip des Laserscanningmikroskops (aus der Bedienungsanleitung des Herstellers Keyence (Japan))

3.7.2 REM (Rasterelektronenmikroskop)

Für stark vergrößerte Aufnahmen mit hoher Tiefenschärfe wurde ein Rasterelektronenmikroskop der Firma FEI vom Typ Quanta 250 FEG (Mat. 21) verwendet. Zur Durchführung von Mikroanalysen mittels EDX (energy-dispersive x-ray spectrometry) wurde das an diesem REM adaptierte EDX-System der Firma Thermo Scientific vom Typ NSS genutzt.

Zur Quantifizierung der Elemente wurde mit der Software NSS (Mat. 40) gearbeitet. Stark vergrößerte Aufnahmen wurden sowohl im Hochvakuum- („High Vacuum“) als auch im Niedervakuummodus („Low Vacuum“) aufgenommen. Elementanalysen wurden ausschließlich im Hochvakuummodus durchgeführt. Der Arbeitsabstand betrug 10,0 mm; die Beschleunigungsspannung betrug 10 kV.

Rasterelektronenmikroskope sind geeignet, Aufnahmen von Objekten stark vergrößert darzustellen und zeichnen sich dabei durch eine hohe Schärfentiefe aus. Durch die zusätzliche Ausstattung mit einem Detektor für die energiedispersive Röntgenmikroanalyse kann (anhand der elementcharakteristischen Strahlung) auf die in der Probe enthaltenen Elemente geschlossen werden. Die Funktionsweise eines Rasterelektronenmikroskops ist

wie folgt zu beschreiben: Ein Elektronenstrahl (= Primärelektronen), der aus der Elektronenquelle (beispielsweise eine beheizte Wolframkathode) im Kopf der elektronenoptischen Säule stammt, wird mit Hilfe eines elektrischen Feldes beschleunigt. Mit Hilfe von elektromagnetischen Linsen wird der Elektronenstrahl zu einer näherungsweise punktförmigen Sonde gebündelt und über die Probenoberfläche geführt, indem er die Objektoberfläche Punkt für Punkt abrastert. Zwischen dem einfallenden energiereichen Elektronenstrahl und dem probenoberflächennahen Bereich entstehen diverse Wechselwirkungen. Die aus dem Elektronenstrahl stammenden Primärelektronen setzen aus den oberflächennahen Atomen der Probe zum einen sogenannte Sekundärelektronen niedriger Energie frei. Das Sekundärelektronensignal wird zur kontrastreichen Oberflächenabbildung genutzt. Zum anderen werden die einfallenden Elektronen zurückgestreut (Rückstreuielektronen). Auch die Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung wird durch die Wechselwirkung zwischen Elektronenstrahl und Atomen in der Probenoberfläche hervorgerufen. Der physikalische Elementarprozess besteht dabei darin, dass ein kernnahes Elektron durch den Elektronenstrahl aus seiner Bahn geschossen wird. Die frei gewordene Position wird nachfolgend durch ein Elektron aus einer kernferneren Bahn ersetzt. Gemäß dem Prinzip der Energieerhaltung bewirkt der durch mit diesem Übergang ausgelöste Energieverlust die Abstrahlung eines Röntgenquants gleicher Energie. Die Größe dieser Energie ist für jedes einzelne Element charakteristisch und ist mit Hilfe geeigneter Halbleiterdetektoren messbar (Flegler et al., 1995).

Das in diesem Versuch verwendete Rasterelektronenmikroskop Quanta 250 FEG (Mat. 21) ist ein neues Niederdruck-Rasterelektronenmikroskop. Es ist mit einer beheizten Feldemissions-Kathode ausgestattet. Vorteilhaft gegenüber konventionellen Rasterelektronenmikroskopen mit Wolfram-Kathode ist neben der Brillanz der Strahlenquelle (hohe Energiedichte der Elektronenstrahlung) insbesondere die hohe Auflösung auch bei niedrigen Beschleunigungsspannungen. Letzteres kommt der Bildqualität auch insofern zugute, als hierdurch auch schlecht leitende Proben unter Verzicht auf das Aufbringen einer elektrisch leitenden Beschichtung zur Ableitung des Elektronenstroms ohne das Auftreten störender Aufladungserscheinungen abgebildet werden können (Stokes, 2008). Somit konnte auf den präparativen Schritt des als „Sputtern“ bezeichneten Auftrags eines dünnen Films, z.B. aus

Gold, auf die Probenoberfläche und die damit verbundene Gefahr des Entstehens von Artefakten verzichtet werden.

Für die Querschliffaufnahmen wurden die Proben mittig durchgesägt. Somit war es möglich, die Proben quer zur Einwirkrichtung der erosiven Säureangriffe bzw. zur oberflächlichen Kontaktfläche der Mundspüllösungen zu untersuchen. Die Querschliffe wurden im REM fotografisch dokumentiert. Zusätzlich wurden an wenigen ausgesuchten Proben-Abschnitten der Querschliffe Elementbestimmungen vorgenommen.

3.8 Auswertung und Statistik

Die mit dem Laser-Scanning-Mikroskop erfassten quantitativen Messdaten (das Volumen des Zahnhartsubstanzverlustes) wurden nachfolgend statisch analysiert. Die erodierte Versuchsfläche wurde wie folgt berechnet: Mittels der Analyzer-Software (Mat. 41) konnte unter Vergrößerung die Grenze zwischen der erodierten Versuchsfläche F (in X und Y Richtung) und der Referenzfläche exakt bestimmt werden. Um das Volumen bestimmen zu können, wurde zur Begrenzung auf Höhe der Referenzfläche eine Ebene eingezogen (auf der Z-Koordinaten). Die darunter befindliche Strecke entsprach der Höhe des erosiven Zahnhartsubstanzverlustes. Der gesamte Zahnhartsubstanzverlust wurde als Volumen errechnet. Um für die statistische Auswertung übersichtlichere Zahlenwerte zu erhalten und um diesen Versuch einfacher mit anderen Erosionsversuchen vergleichen zu können, wurde für jede Zahnprobe der mittlere Abtrag d errechnet. Aus der ausgemessenen Fläche des Versuchsfeldes F ließ sich der erosionsbedingte mittlere Abtrag d gemäß $d = \text{Volumen} / \text{Fläche}$ ermitteln.

Die statistische Auswertung erfolgte mit der Statistiksoftware SPSS (Version 22, Mat. 42). Im Vordergrund stand die Beantwortung der Frage, ob zwischen den einzelnen Versuchsgruppen signifikante Unterschiede hinsichtlich der Tiefe des Zahnhartsubstanzverlustes zu verzeichnen waren. Hierzu wurden die quantitativen Messergebnisse der Analyzer-Software (Mat. 41) nach Microsoft Excel (Mat. 43) exportiert. Die so erhaltenen Excel-Dateien der errechneten mittleren Abtragstiefe wurden in das Statistiksoftwareprogramm SPSS importiert.

Zur Bestimmung, ob zwischen den einzelnen Versuchsgruppen signifikante Differenzen der Erosionstiefen vorlagen, wurde eine Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. Die Varianzanalyse vergleicht die abhängigen metrischen Variablen, in diesem Versuch die Abtragswerte der einzelnen Versuchsproben, gegen die unabhängigen Variablen, in diesem Fall die Versuchsgruppen. Dies erfolgt über einen Vergleich der Mittelwerte aus den einzelnen Versuchsgruppen (Hartung et al., 2009). Somit entspricht die ANOVA einem t-Test für mehrere Versuchsgruppen.

Um den Fehler 1. Art (die Nullhypothese wird abgelehnt, obwohl sie richtig ist) möglichst gering zu halten, wurde das zu erreichende Signifikanzniveau mit 95 % gewählt. Damit der Fehler 2. Art (die Nullhypothese wird beibehalten, obwohl sie falsch ist) möglichst klein gehalten wird, wurde eine Nullhypothese H_0 formuliert, gegen die getestet wurde.

- Die Nullhypothese H_0 lautet: Keine Versuchsgruppe ist in der Lage, Zahnerosionen signifikant zu reduzieren.
- Die Alternativhypothese H_1 (in diesem Fall die Arbeitshypothese) lautet: Zur Beeinflussung von Erosionen entwickelte Mundspüllösungen sind geeignet, den säurebedingten Zahnschmelzabbau zu reduzieren.

Zur Annahme statistisch signifikanter Differenzen musste die Irrtumswahrscheinlichkeit p einen Wert annehmen, der einen α -Wert von 0,05 unterschritt ($p \leq 0,05$). Bei einem Signifikanzniveau unter 0,05 kann die Nullhypothese verworfen werden. Kann die Nullhypothese abgelehnt und die Alternativhypothese angenommen werden, so ist die Annahme der Alternativhypothese mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % richtig. Bei Ablehnung der Nullhypothese gibt die Varianzanalyse aber keinen Aufschluss darüber, welche Versuchsgruppen sich hinsichtlich des Zahnhartsubstanzastrags unterscheiden (Hartung et al., 2009). Fest steht nur, dass sich mindestens zwei Versuchsgruppen signifikant unterscheiden. Daher wurden im Anschluss an die Varianzanalyse Einzel-Gruppen-Vergleiche im Post-hoc-Verfahren nach dem Bonferroni-Test durchgeführt. Der Bonferroni-Test testet paarweise die Mittelwerte der einzelnen Gruppen auf Signifikanz, dabei wird allerdings das zu

unterschreitende Signifikanzniveau α korrigiert gemäß $p < \alpha/n$. Bei drei Untersuchungsgruppen muss hier also zur Annahme signifikanter Differenzen p einen α -Wert von $0,05/3$, also $0,0167$ unterschreiten ($p < 0,0167$).

3.9 Versuchsübersicht

Die nachstehende tabellarische Aufstellung (Tabelle 7) bietet eine kurzgefasste Übersicht des gesamten Versuchsprogramms.

Operativ entfernte 3. Molaren	
Herstellung der Schmelzproben	
Versuch Teil 1	Versuch Teil 2
Dauer: 10 tägiger Zyklus Demineralisation: Zitronensäure, 5 mal am Tag (je 2 Minuten) Remineralisationsbad: Künstlicher Speichel Anzahl Versuchsgruppen: 4 A, B, C, D Mundspüllösung: A, B, C (2 mal täglich für 2 Minuten) Kontrollgruppe: D	Dauer: 10 tägiger Zyklus Demineralisation: Zitronensäure, 5 mal am Tag (je 2 Minuten) Remineralisationsbad: Künstlicher Speichel Anzahl Versuchsgruppen: 4 2A, 2B, 2C, 2D Mundspüllösung: A, B, C, (2 mal täglich für 2 Minuten) Kontrollgruppe: 2D Zähneputzen: 2 mal täglich (morgens/ abends) alle Gruppen
Quantitative Bestimmung des Zahnhartsubstanzverlustes Laser Scanning Mikroskop	
Qualitative Analyse der Zahnschmelzproben-Oberflächen und Querschliffe Rasterelektronenmikroskop (EDX)	
Software VK Analyzer Keynes: Ausmessen Zahnhartsubstanzverlust Software NSS: Elementverteilung	
SPSS Version 22 Statistische Auswertung	

Tabelle 7: Versuchsübersicht

Die folgende Auflistung beschreibt in tabellarischer Form (Tabelle 8) die komplexe zyklisch wiederkehrende Beanspruchung der Zahnschmelzproben.

<u>Reihenfolge</u>	<u>Zeit</u>	<u>Vorgang</u>	<u>Dauer</u>
1.	8:00	Erosionsschutz Schmelzproben in Mundspüllösungen getaucht	2 min
		<i>Abspülen mit Wasser V.E.</i>	
2.	8:03	Remineralisation (kstl. Speichel)	1h
3.	9:00	Erosiver Angriff mit Zitronensäure	2 min
		<i>Abspülen mit Wasser V.E.</i>	
4.	9:03	Remineralisation	
	(9:25)	<i>(Abrasion bei Versuchsteil 2)</i>	5 sek. je Probe
5.	11:00	erosiver Angriff	2 min
		<i>Abspülen mit Wasser V.E.</i>	
6.	11:03	Remineralisation	
7.	13:00	erosiver Angriff	2 min
		<i>Abspülen mit Wasser V.E.</i>	
8.	13:03	Remineralisation	
9.	15:00	erosiver Angriff	2 min
		<i>Abspülen mit Wasser V.E.</i>	
10.	15:03	<i>Remineralisation</i>	
11.	17:00	erosiver Angriff	2 min
		<i>Abspülen mit Wasser V.E.</i>	
12.	17:03	Erosionsschutz	2 min
13.		Remineralisation über Nacht	
14.	(17:25)	<i>(Abrasion bei Versuchsteil 2)</i>	5 sek. je Probe

Tabelle 8: Tagesablauf der zyklischen Beanspruchung der Zahnproben

4 Ergebnisse

Für die quantitative Messung des Zahnhartsubstanzverlustes standen aus dem ersten Versuchsteil (nur erosiver Einfluss) aus jeder Versuchsgruppe 14 Zahnschmelzproben zur Verfügung. Aus dem zweiten Versuchsteil (erosiv-abrasiver Einfluss) wurden 18 Zahnschmelzproben aus jeder Versuchsgruppe für die quantitative Auswertung analysiert. Bei fünf Zahnschmelzproben konnte das verlorene Zahnschmelz-Volumen nicht ausgewertet werden, da sich der Schutzlack durch die Abrasion gelöst hatte und somit keine eindeutige Versuchsfläche gegeben war. Die Elementanalyse wurde an fünf Zähnen aus Versuchsteil 1 durchgeführt.

4.1 Quantitativer Versuchsteil: Statistische Analyse

4.1.1 Versuchsteil 1: Zahnhartsubstanzverluste unter erosiven Bedingungen

Eine Übersicht des erosiv bedingten Substanzverlustes (Tiefe der Läsionen in μm) der 14 Zahnschmelzproben aus Versuchsteil 1 ist der Tabelle 9 zu entnehmen. Angegeben sind der Mittelwert, die Standardabweichung, Minimal- und Maximalwert sowie das 95 %-Konfidenzintervall.

Mundspül- lösung	Mittelwert	Std.- abw.	Min.	Max.	95 %-Konfidenzintervall für Mittelwert	
					Unter- grenze	Ober- grenze
A	26,0	5,6	19,0	38,0	22,7	29,2
B	21,9	3,3	17,1	28,5	20,0	23,8
C	60,4	4,7	53,7	69,4	57,7	63,1
Kontrolle	59,8	9,9	46,4	84,0	54,1	65,6

Tabelle 9: Substanzverlust (μm) nach erosiven Einwirkungen auf Schmelzoberflächen (Versuchsteil 1)

Auffällig ist, dass die Mundspüllösung C und die Kontrollgruppe D einen mittleren Substanzverlust aufweisen, der um ein Vielfaches höher liegt als der entsprechende Mittelwert der Gruppen A und B. Dabei ist der mittlere Substanzverlust von Gruppe C und der Kontrolle fast identisch.

In Abbildung 7 sind die Mittelwerte des Zahnhartsubstanzverlustes der einzelnen Versuchsgruppen (Mundspüllösungen A, B, und C sowie Kontrolle D) graphisch dargestellt.

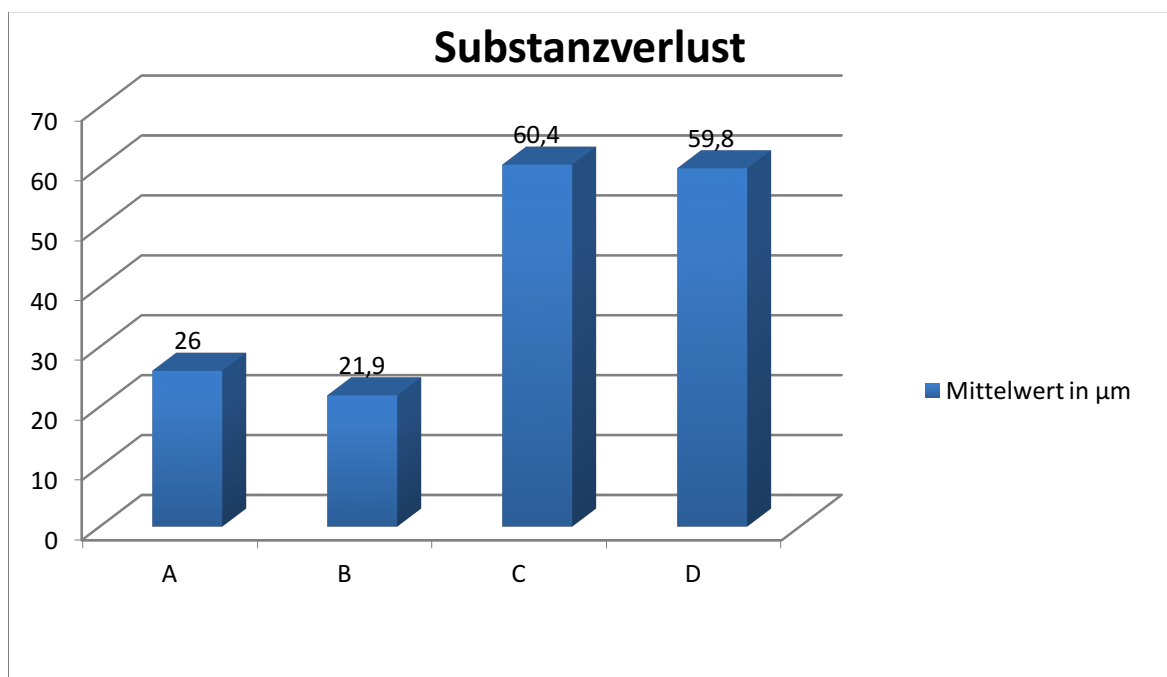


Abbildung 7: Graphische Darstellung der erosiv bedingten Substanzverluste (Versuchsteil 1)

In der Varianzanalyse errechnet sich für den Vergleich der Mittelwerte aller vier Untersuchungsgruppen ein Wert von $p < 0,001$. Dies bedeutet, dass sich die Zahnhartsubstanzverluste von mindestens zwei Versuchsgruppen signifikant voneinander unterscheiden. Mittels Post-hoc-Test nach Bonferroni wurden die Mittelwerte der einzelnen Versuchsgruppen im paarweisen Vergleich auf signifikante Differenzen überprüft. Tabelle 10 gibt die Ergebnisse der statistischen Vergleiche wieder.

	A	B	C
B	0,564		
C	< 0,001	< 0,001	
Kontrolle	< 0,001	< 0,001	> 0,999

Tabelle 10: Irrtumswahrscheinlichkeiten p im paarweisen Vergleich der mittleren Substanzverluste der Versuchsgruppen A – D (Versuchsteil 1, Post-hoc-Vergleich nach Bonferroni, abhängige Variable: Substanzabtrag in μm)

Die Substanzverluste unter Anwendung der Mundspüllösungen A und B unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Selbiges gilt für die Gruppen C und D. Die Messergebnisse nach Anwendung der Mundspüllösungen A und B differieren hingegen signifikant gegenüber den Werten der Kontrollgruppe D und ebenso gegenüber den Werten von Mundspüllösung C.

Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen exemplarisch in dreidimensionaler Form den unterschiedlich hohen Zahnhartsubstanzabtrag eines Zahnes in den verschiedenen Versuchsgruppen.

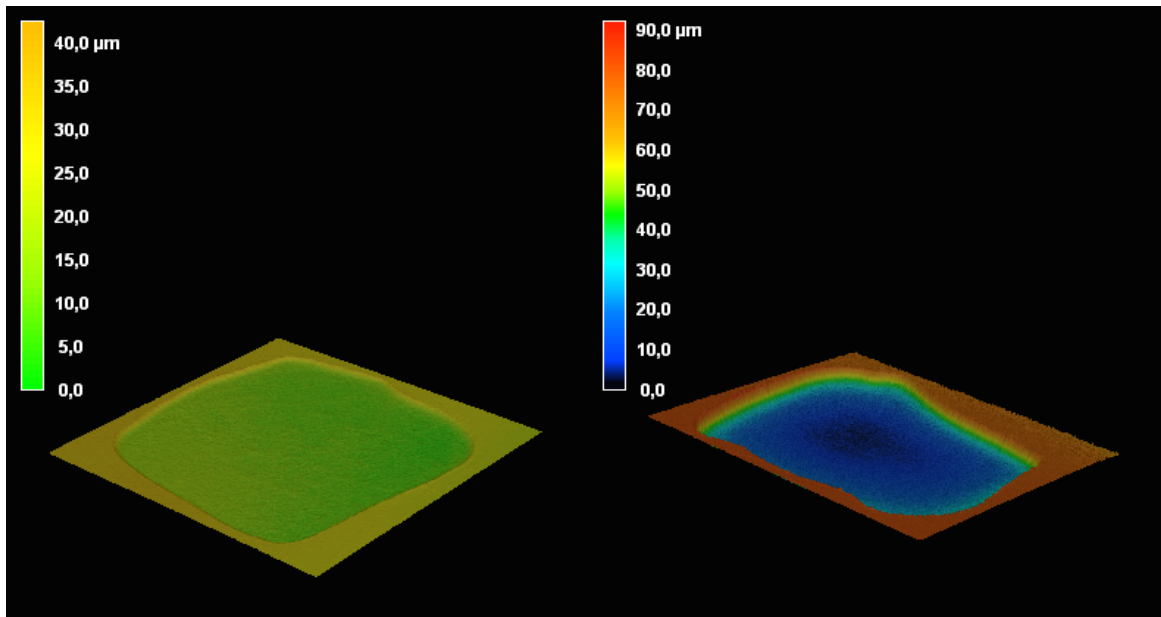


Abbildung 8: Exemplarische Darstellung eines erosiven Defektes nach Anwendung der Mundspüllösung A (links) bzw. der Kontrollgruppe D (rechts; Zahnprobe 17)

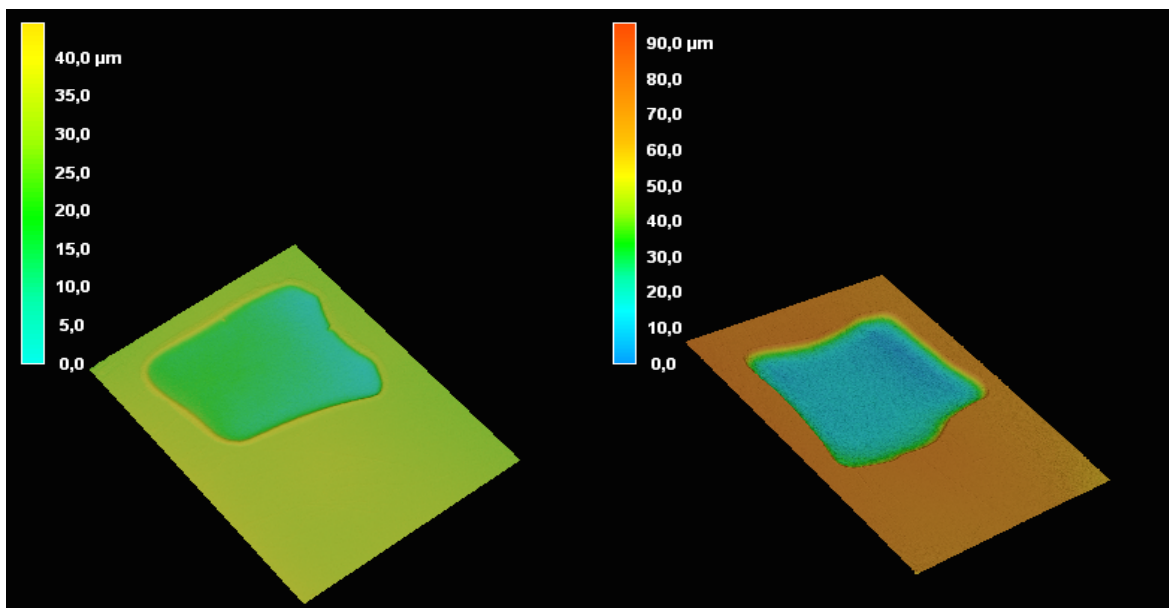


Abbildung 9: Exemplarische Darstellung eines erosiven Defektes nach Anwendung der Mundspüllösungen B (links) und C (rechts; Zahnprobe 17)

4.1.2 Versuchsteil 2: Zahnhartsubstanzverluste unter erosiv-abrasiven Bedingungen

Im zweiten Versuchsteil wurden die Zahnschmelzproben zusätzlich zur Säureeinwirkung zweimal täglich abrasiven Einflüssen durch Zahnbürste und Zahngel ausgesetzt. Die nach diesen Einflüssen ermittelten Substanzverluste sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Angegeben sind der Mittelwert, die Standardabweichung, Minimal- und Maximalwert sowie das 95 %-Konfidenzintervall.

Mundspül- lösung	Mittelwert	Std.- abw.	Min.	Max.	95 %-Konfidenzintervall für Mittelwert	
					Unter- grenze	Ober- grenze
2A	16,8	3,8	9,6	24,8	14,9	18,8
2B	17,8	5,2	11,2	29,1	14,9	20,7
2C	49,6	7,1	37,4	62,5	46,0	53,3
2D (Kontrolle)	45,8	7,4	32,2	64,0	42,2	49,5

Tabelle 11: Substanzverlust (μm) nach erosiv- abrasiven Einwirkungen auf Schmelzoberflächen (Versuchsteil 2)

Ähnlich der Ergebnisse aus Versuchsteil 1 liegen die Mittelwerte der Versuchsgruppen mit den Mundspüllösungen A und B eng beieinander, während die Versuchsgruppe mit der Mundspüllösung C einen ähnlich hohen Zahnhartsubstanzabtrag aufzeigt wie die Kontrollgruppe 2D.

Die Abbildung 10 stellt die Mittelwerte der Zahnhartsubstanzverluste unter zusätzlicher Abrasionsbelastung der einzelnen Versuchsgruppen graphisch dar.

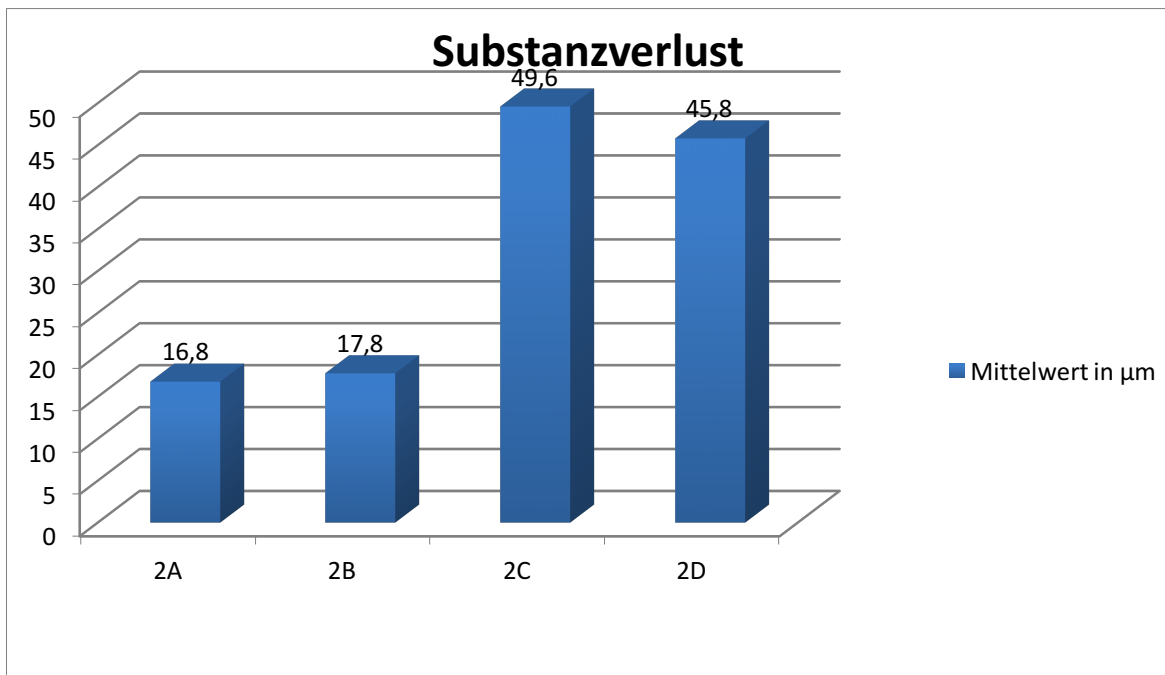


Abbildung 10: Graphische Darstellung der erosiv-abrasiv bedingten Substanzverluste (Versuchsteil 2)

Die Varianzanalyse belegt mit einem Wert von $p < 0,001$ hochsignifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten. Damit ist die Nullhypothese H_0 „Keine Mundspüllösung ist in der Lage, Zahnerosionen signifikant zu reduzieren“ abzulehnen. Das Ergebnis aus der Varianzanalyse besagt lediglich, dass sich mindestens zwei Versuchsgruppen signifikant unterscheiden. Welche Gruppen signifikant voneinander verschieden sind, ist wiederum der Post-hoc-Analyse nach Bonferroni zu entnehmen (Tabelle 12).

	2A	2B	2C
2B	> 0,999		
2C	< 0,001	< 0,001	
2D (Kontrolle)	< 0,001	< 0,001	0,428

Tabelle 12: Irrtumswahrscheinlichkeiten p im paarweisen Vergleich der mittleren Substanzverluste der Versuchsgruppen 2A – 2D (Versuchsteil 2, Post-hoc-Vergleich nach Bonferroni, abhängige Variable: Substanzabtrag in µm)

Die Zahnhartsubstanzverluste der Versuchsgruppen 2A und 2B unterscheiden sich statistisch nicht voneinander, sind aber gegenüber der Versuchsgruppe 2C sowie der Kontrollgruppe 2D signifikant niedriger. Die Messwerte der Versuchsgruppe 2C differieren nicht signifikant von denen der Kontrollgruppe 2D.

4.2 Qualitativer Versuchsteil: Elementanalyse

Die Ergebnisse aus der qualitativen Untersuchung (Nachweis von Elementen auf der Schmelzoberfläche) sind in der Tabelle 13, der Tabelle 14 und der Tabelle 15 zusammengefasst. Die Konzentrationen sind in Gewichtsprozent angegeben und entsprechen jeweils den höchsten Konzentrationen, die an der Zahnoberfläche gemessen wurden. Der angegebene Gewichtsprozentfehler gibt die mit der Messmethode verbundene Fehlertoleranz jeder Einzelmessung an. Abzulesen sind Elemente, die für die jeweilige Mundspüllösung charakteristisch sind. Aus dem Nachweis der Elemente können Folgerungen über die Oberflächenwirksamkeit der jeweiligen Mundspüllösungen an der Zahnprobe abgeleitet werden. Die vollständigen Messungen sind im Anhang aufgelistet.

Mundspüllösung A	Fluor	Gewichts- prozentfehler	Zinn	Gewichts- prozentfehler
	0,30	+/-0,33	59,22	+/- 2,62

Tabelle 13: Maximale Fluor- und Zinnkonzentrationen auf Zahnschmelz nach Anwendung von Mundspüllösung A (Gewichts-%)

Mundspüllösung B	Fluor	Gewichts- prozentfehler
	0,80	+/- 0,23

Tabelle 14: Maximale Fluorkonzentration auf Zahnschmelz nach Anwendung von Mundspüllösung B (Gewichts-%)

Mundspüllösung C	Zink	Gewichts- prozentfehler
	1,78	+/- 0,21

Tabelle 15: Maximale Zinnkonzentration auf Zahnschmelz nach Anwendung von Mundspüllösung C (Gewichts-%)

Bei den folgenden Abbildungen 11 bis 15 handelt es sich um REM-Aufnahmen der Zahnschmelzoberfläche. Sie stehen exemplarisch für jede Versuchsgruppe (A, B und C) sowie die Kontrollgruppe D. Während in der Kontrollgruppe das nach Säureeinwirkung zu erwartende Ätzmuster deutlich erkennbar ist (Abbildung 14 und Abbildung 15), erscheint dieses nach Anwendung der Mundspüllösung C kaschiert und nach Einwirken der Mundspüllösung A vollständig überdeckt. Dem gegenüber ist das Säureätzmuster des oberflächlichen Zahnschmelzes nach Anwendung der Mundspüllösung B unverändert.

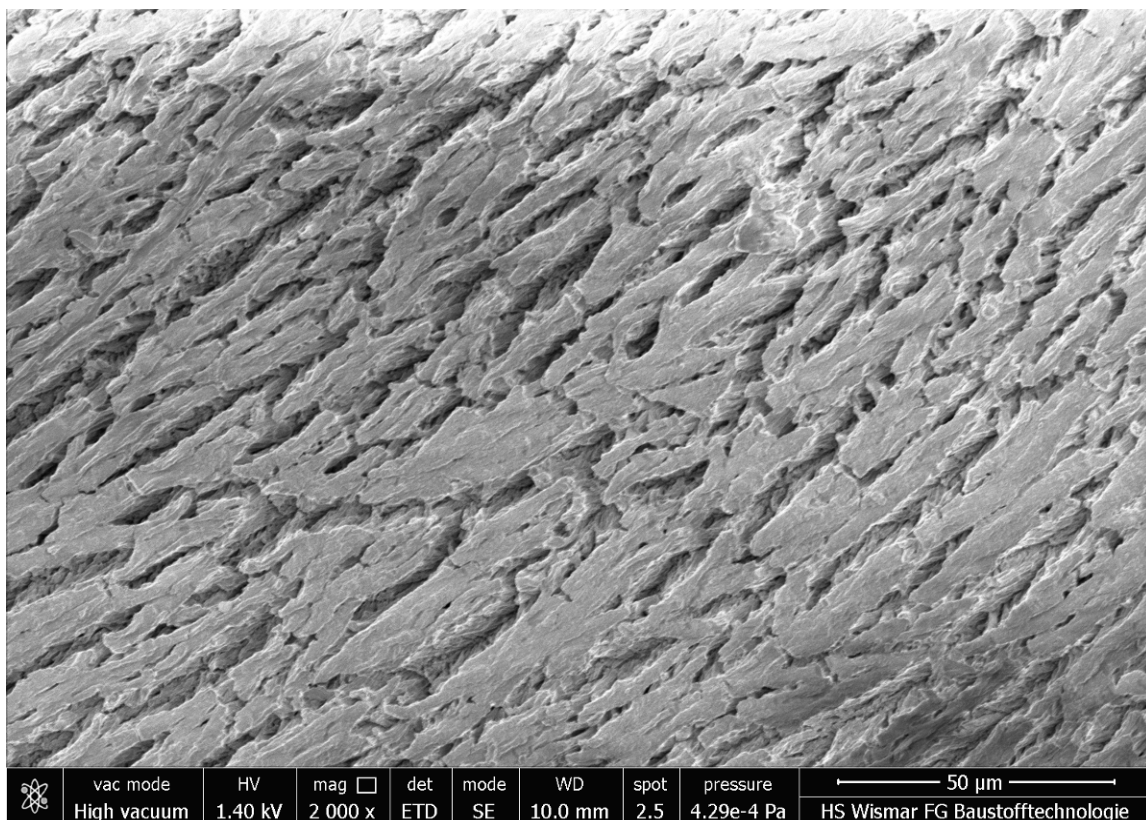


Abbildung 11: Zahnprobe aus Versuchsgruppe A, die Oberfläche zeigt kein typisches Ätzmuster (REM, Vergr. 2000fach)

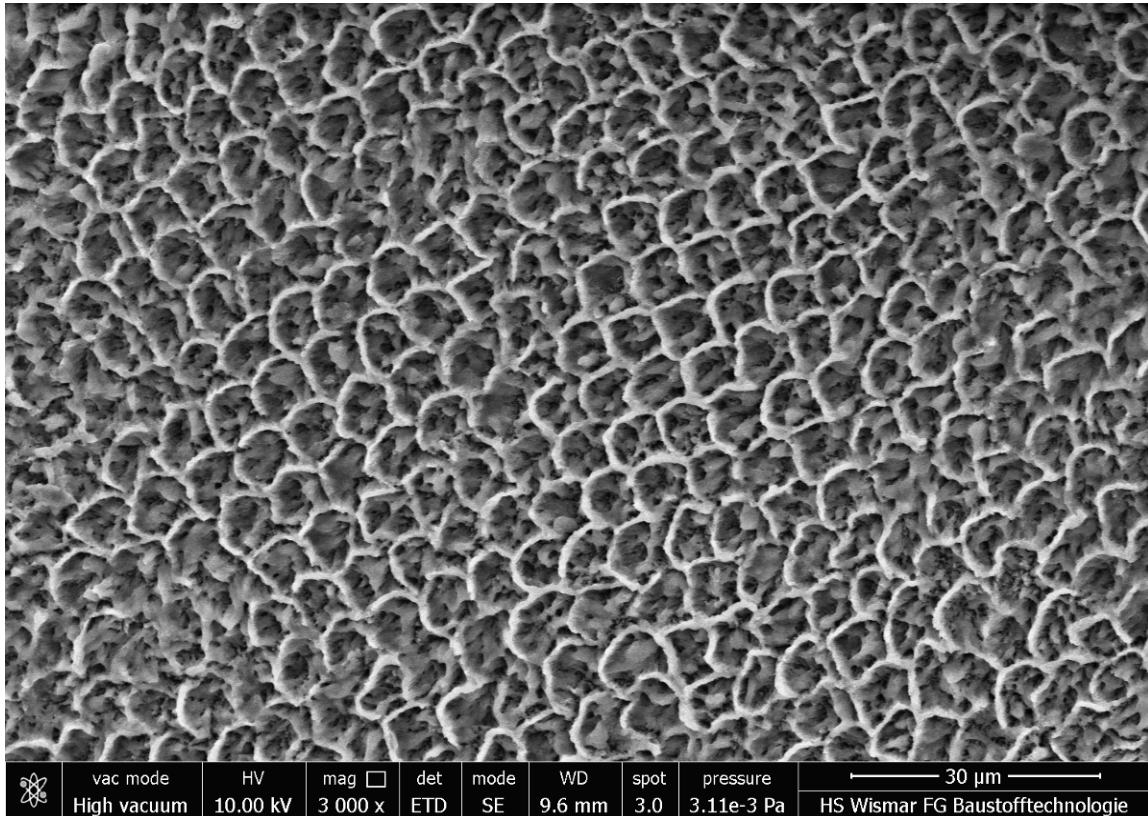


Abbildung 12: Zahnprobe aus Versuchsgruppe B, die Oberfläche zeigt ein typisches Ätzmuster mit quergetroffenen Schmelzprismen (REM, Vergr. 3000fach)

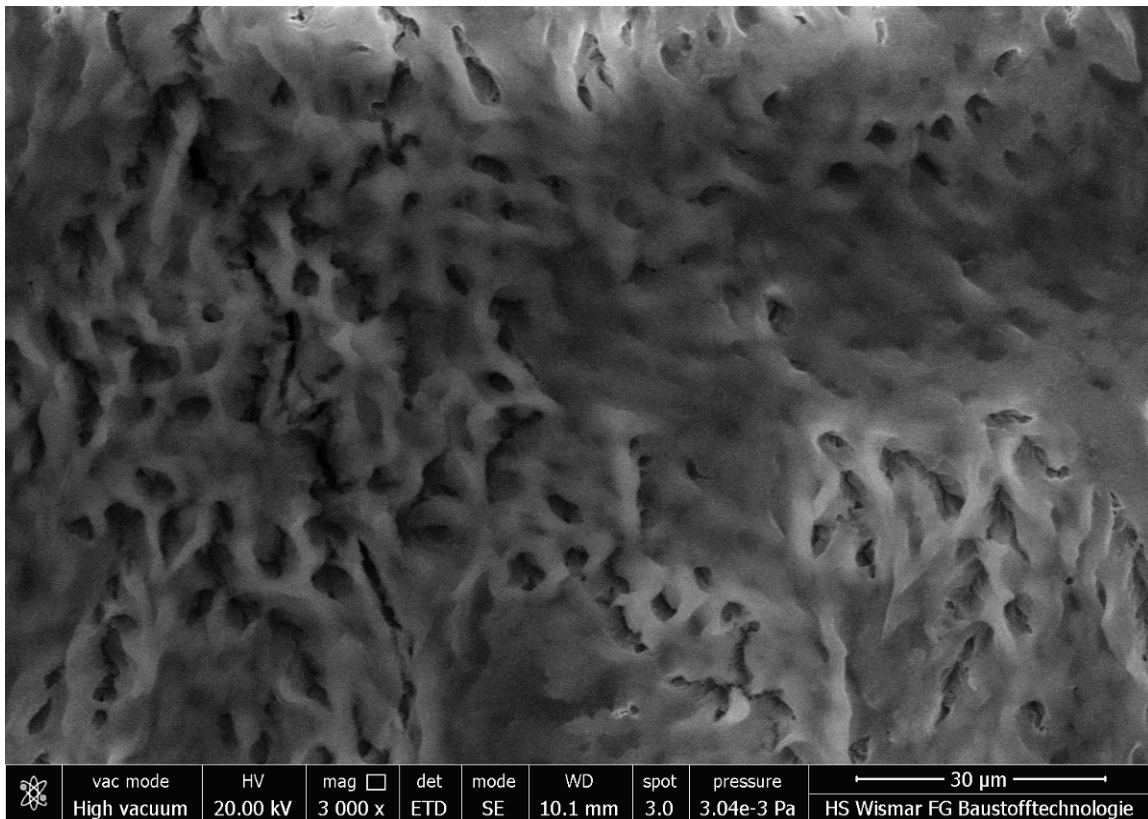


Abbildung 13: Zahnprobe aus Versuchsgruppe C, die Oberfläche zeigt ein überdecktes Ätzmuster (REM, Vergr. 3000fach)

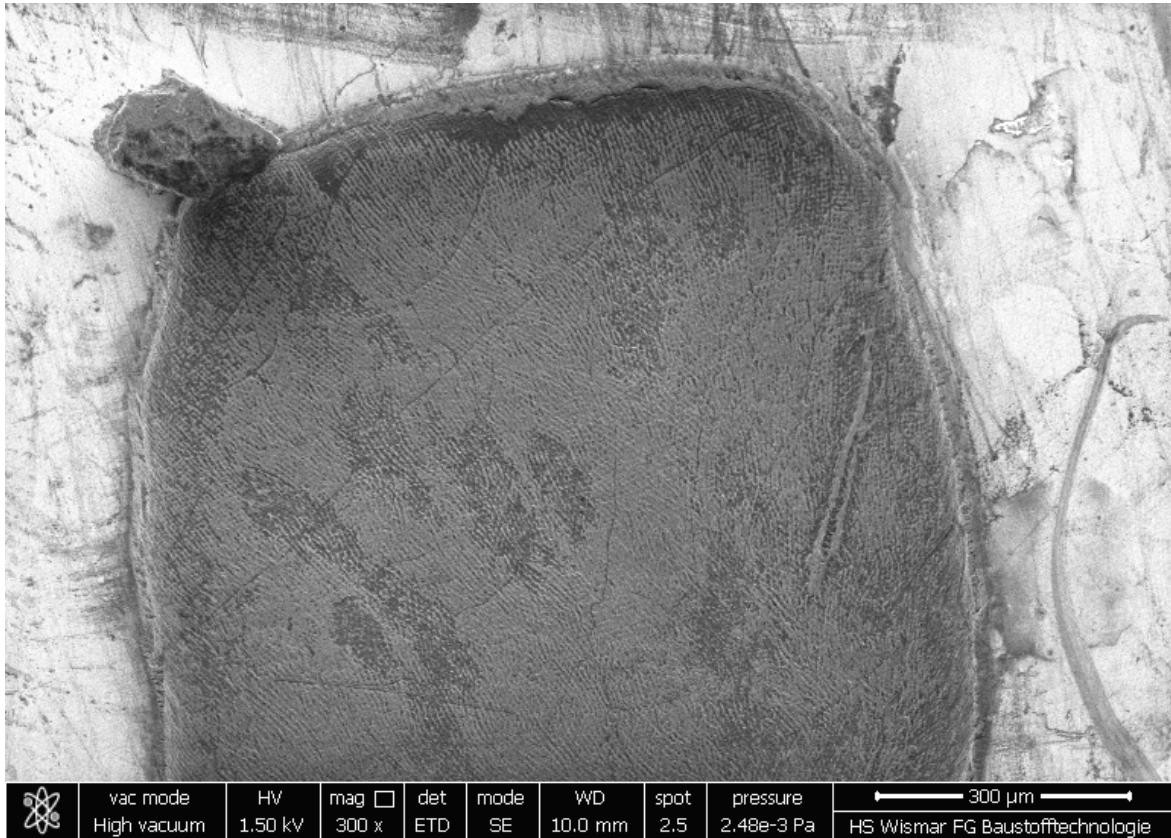


Abbildung 14: Übersicht, Zahnprobe aus der Kontrollgruppe D, quer- und längsgetroffene Schmelzprismen (REM, Vergr. 300fach)

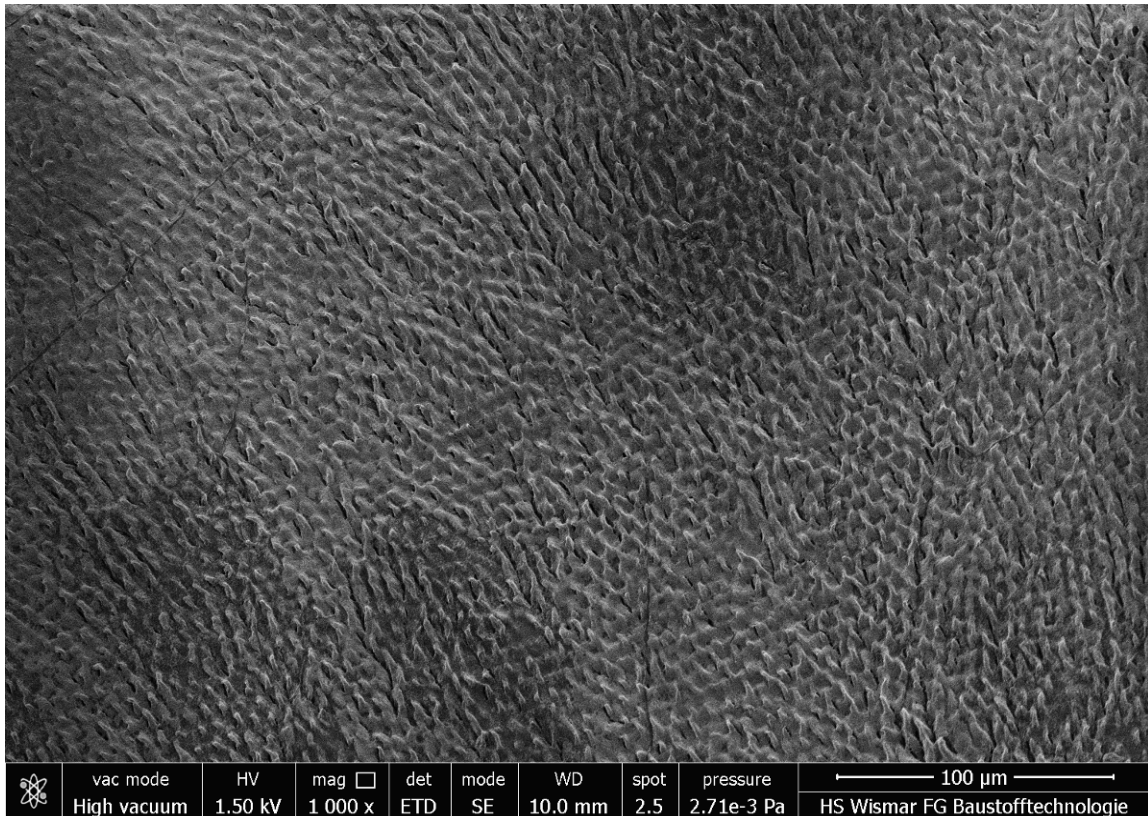


Abbildung 15: Vergrößerter Ausschnitt der Zahnprobe aus der Kontrollgruppe D, sichtbares Ätzmuster (REM, Vergr. 1000fach)

Bei den folgenden Aufnahmen sind jeweils Querschliffe der Zahnschmelzproben zu sehen. Sie zeigen jeweils eine REM-Aufsicht auf den Querschliff und das zugehörige EDX-Spektrum aus den Versuchsgruppen A, B und C. Abbildung 16 zeigt einen Querschliff aus Versuchsgruppe A. Es ist eine Zone der Demineralisation zu erkennen, die in etwa eine Breite von 15,1 µm aufweist. Die Elementzusammensetzung dieses demineralisierten Bereiches gibt das Spektrum in Abbildung 17 wieder. Zu erkennen sind eindeutige Zinn-Peaks (Sn), die zählstatistisch erfasst wurden (siehe eingezeichnete Pfeile). Das Spektrum in Abbildung 18 wurde in der darunterliegenden nicht demineralisierten Schicht aufgenommen. Es sind keine Zinn-Peaks zu erkennen. Es kann somit angenommen werden, dass die zinnhaltigen Bestandteile der Mundspüllösungen bei dieser Zahnprobe bis in etwa 15 µm Tiefe gewirkt haben.

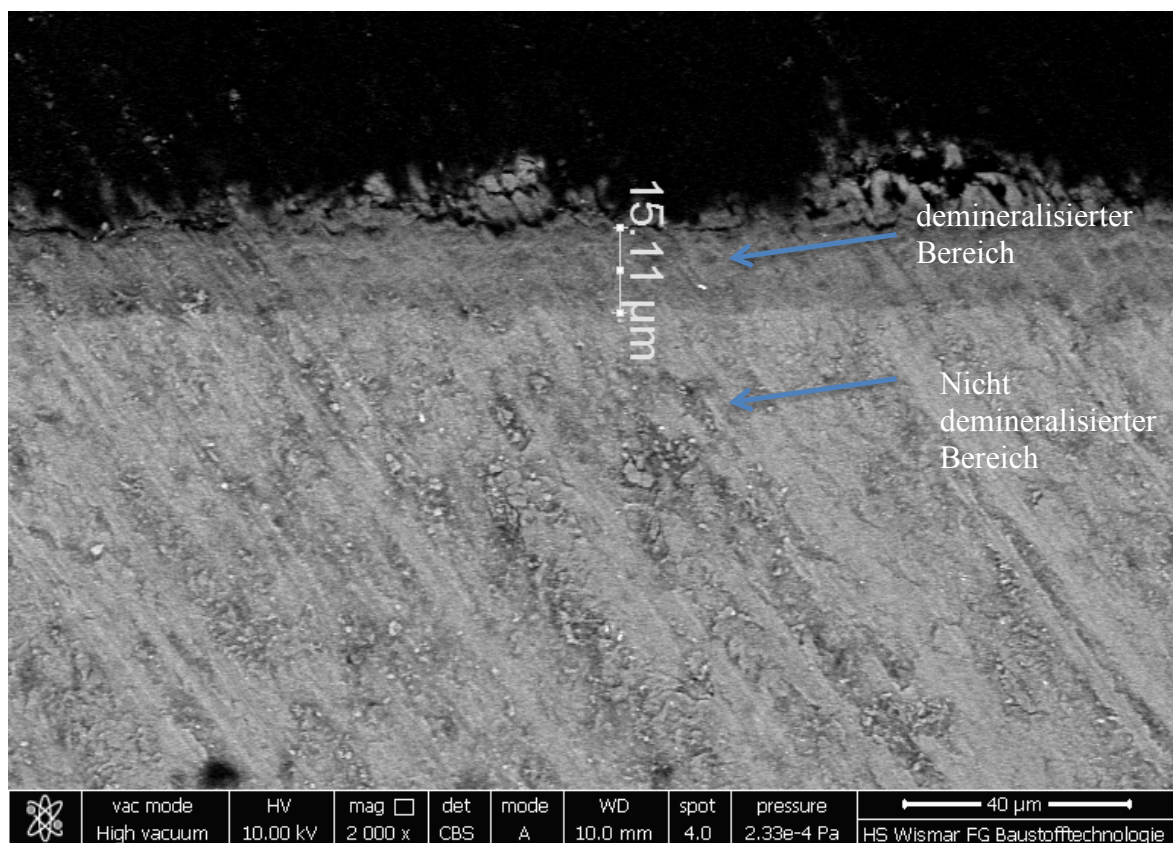


Abbildung 16: Querschliffaufnahme auf eine Probe aus Versuchsgruppe A; erkennbar veränderte Zone der Demineralisation

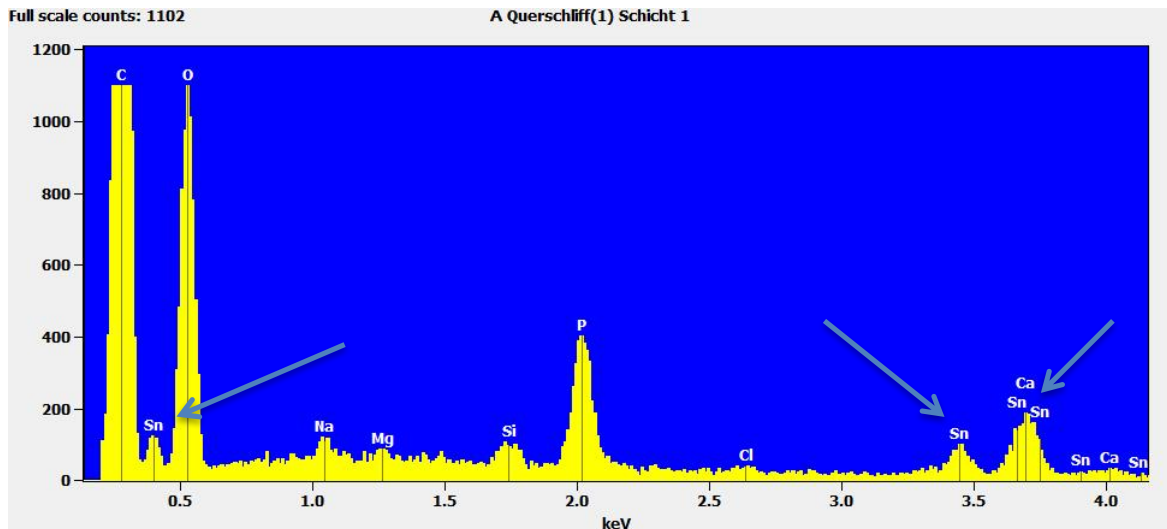


Abbildung 17: Element-Spektrum der obersten Schicht der demineralisierten Zone eines Querschliffs aus Versuchsgruppe A

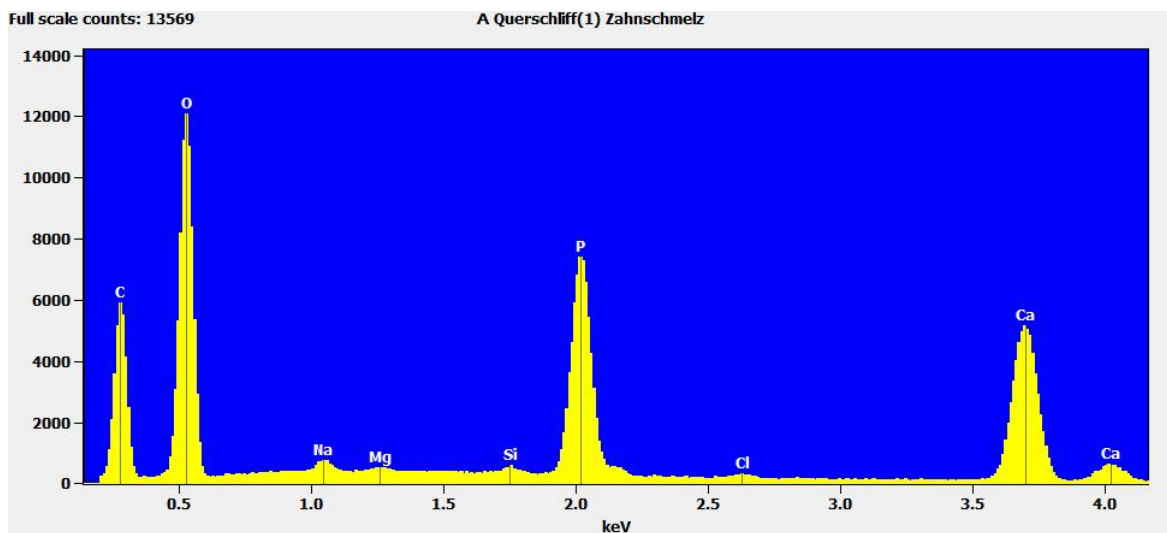


Abbildung 18: Element-Spektrum im Zahnschmelz in der nicht demineralisierten Zone eines Querschliffs aus Versuchsgruppe A

Abbildung 19 zeigt einen Querschliff aus der Versuchsgruppe B. Abbildung 20 gibt ein Element-Spektrum wieder, welches direkt an der Oberfläche des Versuchsfeldes aufgenommen wurde. Anders als in Versuchsgruppe A ist keine demineralisierte Zone sichtbar. Auch eine fluoridhaltige Deckschicht ist bei dieser Zahnprobe weder visuell zu erkennen noch mittels dazugehörigem Element-Spektrum darstellbar.

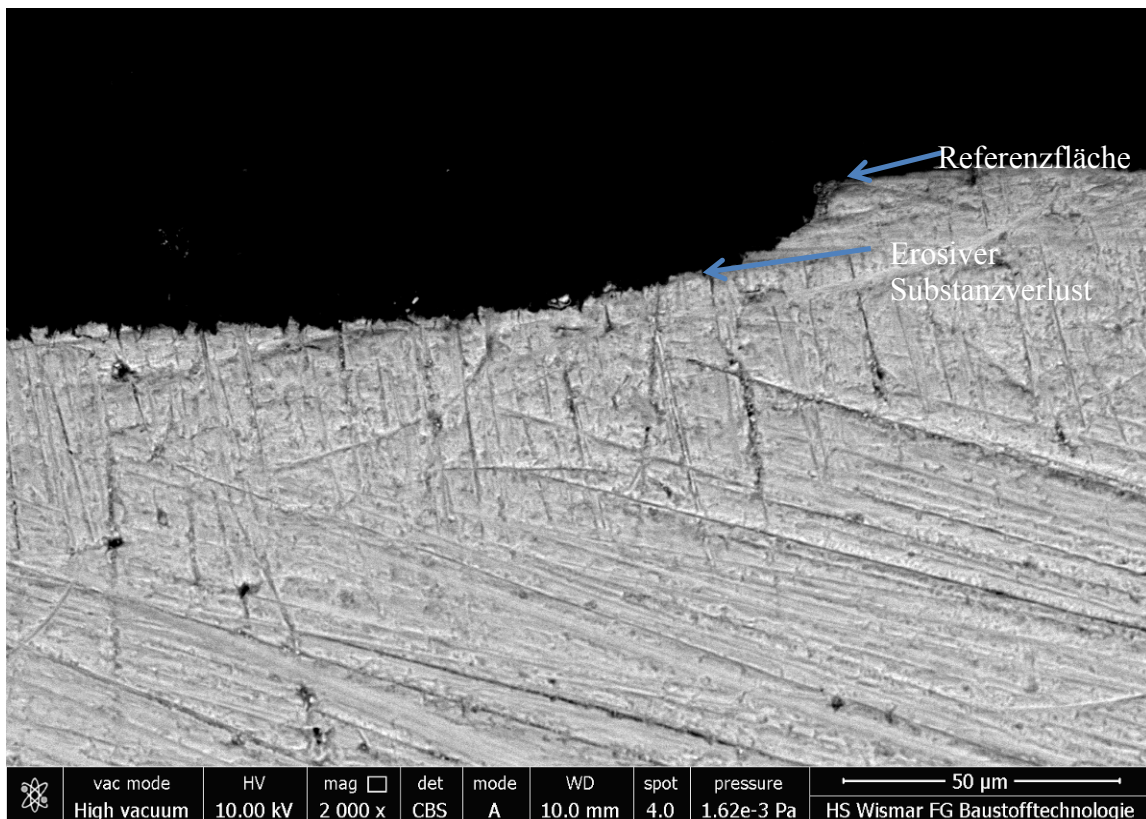


Abbildung 19: REM-Aufnahme eines Querschliffs einer Probe aus Versuchsgruppe B; eine Demineralisationsschicht unter dem erosiven Substanzverlust ist nicht erkennbar

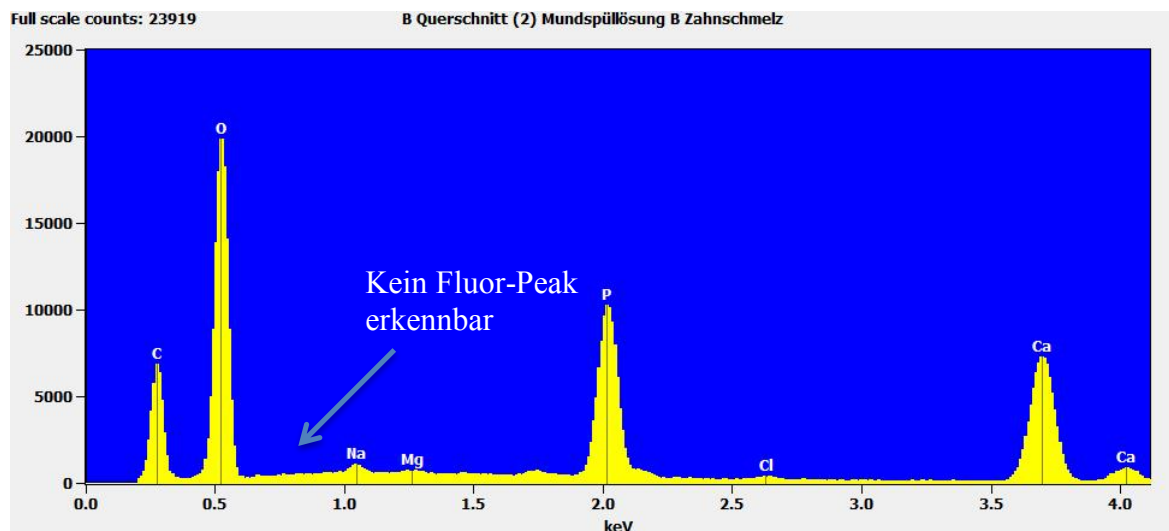


Abbildung 20: Element-Spektrum aus der obersten Schicht der erodierten Oberfläche eines Querschliffs aus Versuchsgruppe B

Abbildung 21 zeigt eine REM-Aufnahme eines Querschliffs aus der Versuchsgruppe C. Erneut ist – unter der hier infolge der Vergrößerung nicht dargestellten erosiven Verlustzone – eine Demineralisationszone zu erkennen. In Abbildung 22 ist ein EDX-Spektrum dargestellt, welches in der demineralisierten Zone aufgenommen wurde. Im EDX-Spektrum sind zwei eindeutige Zink-Peaks,

wenn auch mit niedriger Zählrate, zu erkennen. Zink als Bestandteil der Mundspüllösung C könnte somit an bzw. in den Zahnschmelz eingelagert sein.

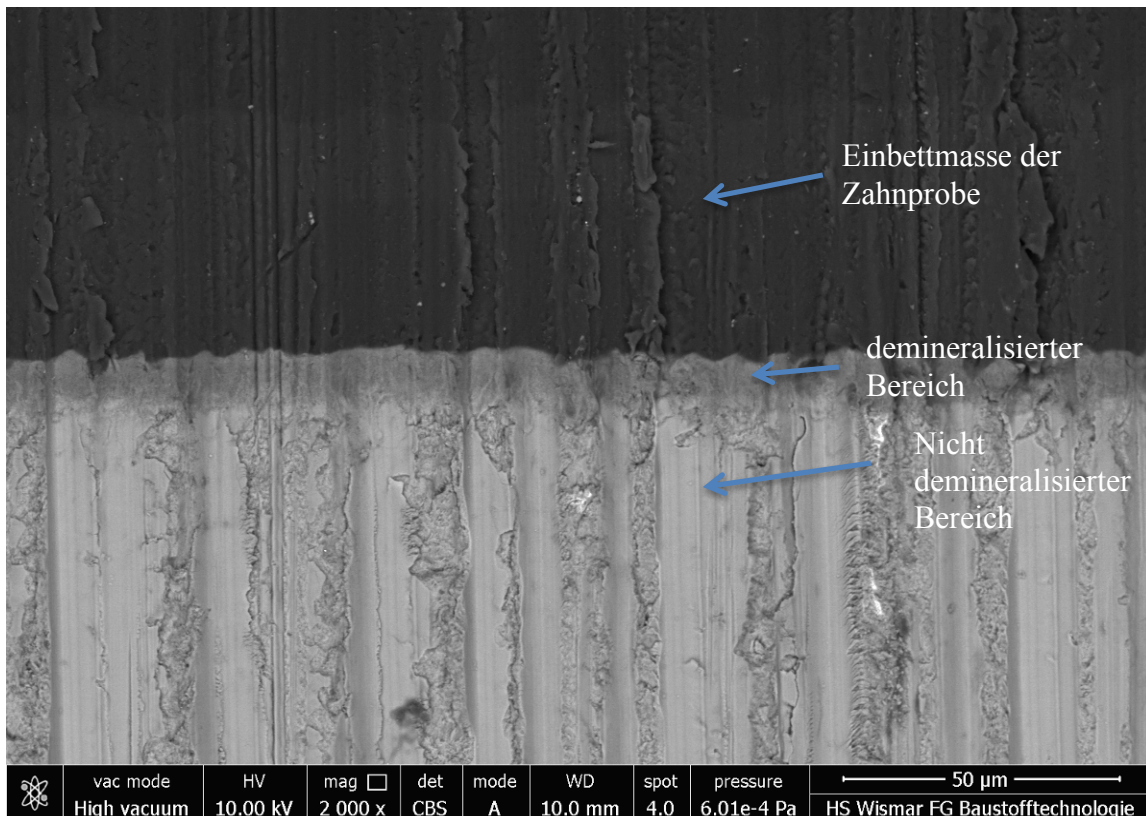


Abbildung 21: Querschliffaufsicht auf eine Probe aus Versuchsgruppe C, sichtbar veränderte Zone der Demineralisation

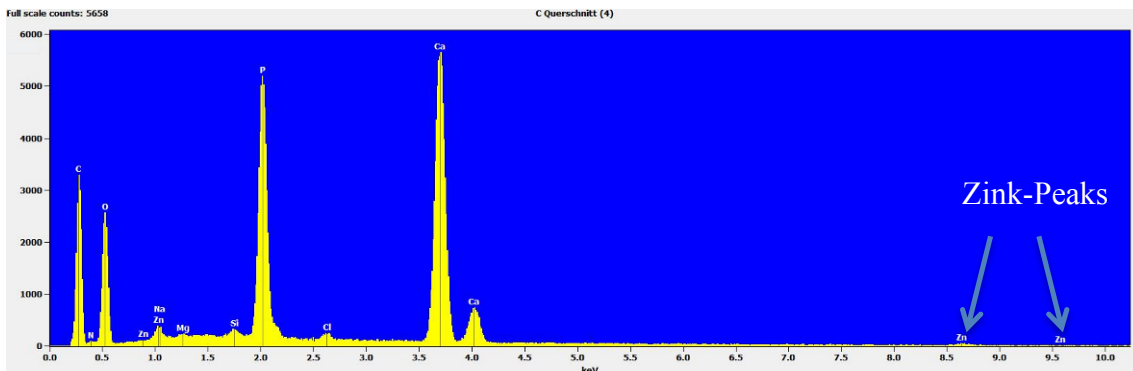


Abbildung 22: Element-Spektrum aus der demineralisierten Zone eines Querschliffs aus Versuchsgruppe C

Zusammenfassend ist anhand der aufgenommenen EDX-Spektren zu erkennen, dass bestimmte Elemente, die für jede Mundspüllösung charakteristisch sind, an der Versuchsoberfläche, also in Aufsicht, in geringen Konzentrationen nachzuweisen sind. Für Versuchsgruppe A ist es das Element Zinn, Versuchsgruppe B zeichnet sich durch das Element Fluor aus, und bei Versuchsgruppe C konnte Zink nachgewiesen werden. All diese Elemente sind

Bestandteile der jeweiligen Mundspüllösung. Bei den exemplarischen Querschliffaufnahmen konnte bei Versuchsgruppe A und Versuchsgruppe C eine demineralisierte Zone direkt unterhalb des Versuchsfeldes beobachtet werden. In den jeweiligen demineralisierten Bereichen konnten die für die Versuchsgruppen spezifischen Elemente Zinn bzw. Zink mittels EDX-Analyse nachgewiesen werden. Bei Versuchsgruppe B war im Querschliff keine demineralisierte Zone erkennbar; anders als in der Aufsicht konnte das charakteristische Element Fluor im Querschliff nicht mittels EDX-Analyse nachgewiesen werden.

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 23 und Abbildung 24) beziehen sich auf eine Versuchsprobe aus Gruppe A. Die Aufnahmen erfolgten, um das an der Versuchsoberfläche wirksame Zinn bildlich darzustellen. Die beiden Abbildungen zeigen in verschiedenen technischen Verfahren denselben Versuchsausschnitt. Abbildung 23 ist eine Sekundärelektronenaufnahme, Abbildung 24 zeigt eine Rückstreuelektronenaufnahme (engl. BSE = Backscattered electrons). Bei dieser Art der Aufnahme erscheinen Elemente mit hoher Ordnungszahl, in diesem Fall Zinn, heller. An der Oberfläche sind derartige hellere Bereiche zu erkennen. Zwei punktuelle Elementanalysen in den oberen helleren Bereichen ergaben für Zinn Gewichtskonzentrationen von 53,6 % (Gewichtsprozentfehler $\pm 2,3$ Prozentpunkte) bzw. 48,5 % (Gewichtsprozentfehler $\pm 2,2$ Prozentpunkte). In den dunkleren, um einige μm tieferen Regionen ergab sich bei einer punktuellen Messung ein Zinngehalt von 35,4 % (Gewichtsprozentfehler $\pm 2,2$ Prozentpunkte). Hieraus lässt sich schließen, dass das Element Zinn aus Mundspüllösung A vermehrt an der Zahnoberfläche vorhanden ist.

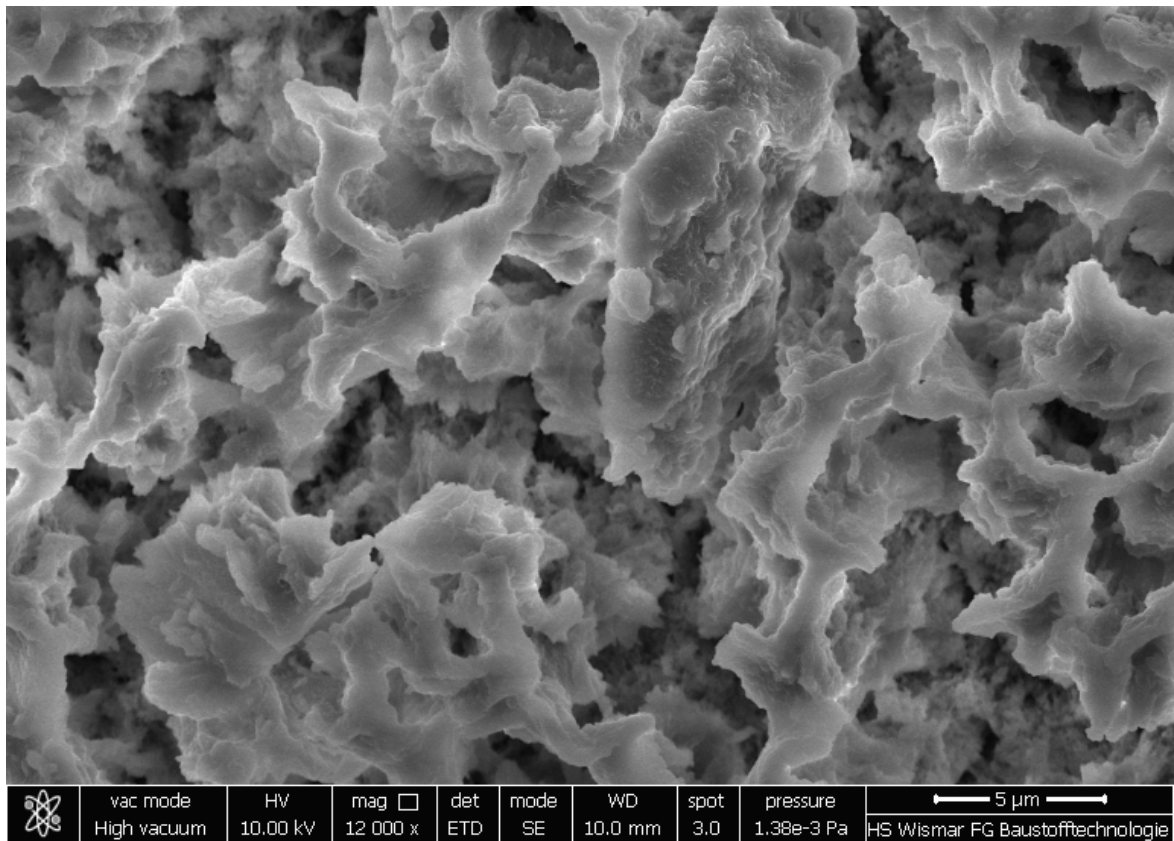


Abbildung 23: Versuchsfeld einer Zahnprobe aus Versuchsgruppe A (Vergrößerung 12000fach)

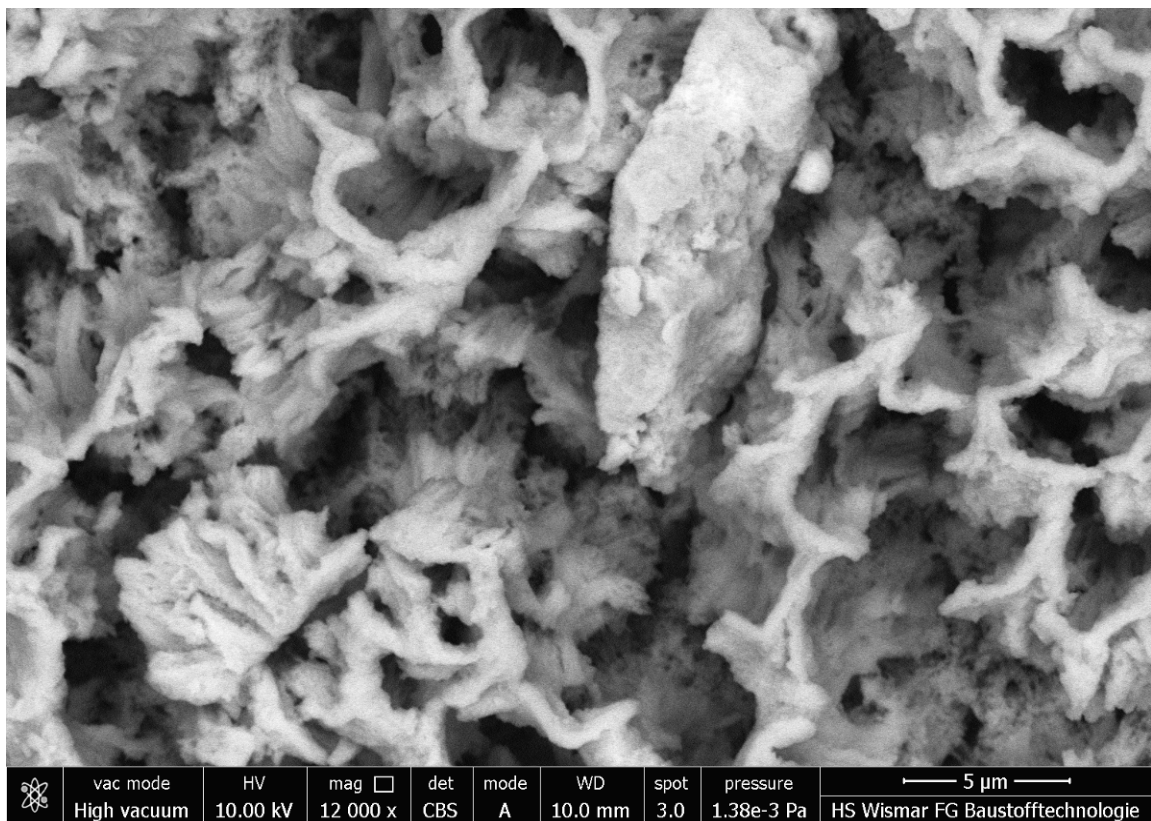


Abbildung 24: BSE-Aufnahme; gleicher Aufnahmebereich wie bei Abbildung 23 (Vergrößerung 12000fach)

5 Diskussion

5.1 Diskussion der Untersuchungsmethode

5.1.1 Zahnmaterial

Für den Versuch wurden vollständig retinierte dritte Molaren mit abgeschlossenem Wurzelwachstum verwendet. Um möglichst standardisierte Versuchsbedingungen zu gewährleisten, sollten die Zähne zuvor keinen Kontakt zur Mundhöhle gehabt haben (West et al., 2011). Auf diese Weise konnte die bei jedem Menschen unterschiedliche Schmelzreife im Mundraum ausgeschlossen werden. Eine Fluoridzufuhr in den Zahnschmelz vor der Zahnentfernung war somit nur auf systemischem Wege möglich, so dass der Fluoridgehalt und damit das Lösungsverhalten des Zahnschmelzes nicht durch lokale Fluoridapplikationen beeinflusst werden konnte.

Nach der Osteotomie wurden die Versuchszähne in Plastikgefäßen mit physiologischer Kochsalzlösung gelagert, damit keine lokale Fluoridzufuhr möglich war. Informationen über die Herkunft der Zähne, die im Versuch verwendet wurden, wie das Alter des Patienten, das Geschlecht oder die Anzahl der Zähne, die von einem Patienten stammten, standen nicht zur Verfügung.

Laut Schroeder (2000) ist der Ablauf der Zahnschmelz-Bildung für alle Zähne gleich. Der Zahnschmelz der verwendeten dritten Molaren ist daher mit allen anderen Zähnen der bleibenden Dentition prinzipiell vergleichbar, so dass die Studienergebnisse auf alle Zähne übertragbar sind.

Jeder Versuchszahn wurde in vier Teile zerlegt, so dass er in allen Versuchsgruppen vertreten war. Da der Zahnschmelz bei jedem Individuum unterschiedlich dicht mineralisiert sein kann, wurde auf diese Weise erreicht, dass ein „besonders harter Zahn“ bzw. „weniger harter Zahn“ in allen Versuchsgruppen gleichermaßen auftreten konnten. In wie weit dieser Aspekt aber von Bedeutung ist, ist fraglich, da bereits der einzelne Zahn unterschiedliche Mineralisierungsdichten an der Oberfläche aufweist (Schroeder, 2000). Tucker et

al. (1998) untersuchten in vitro die Löslichkeit von Zahnoberflächen mit dem Ergebnis, dass die linguale/palatinale Zahnfläche eine größere Löslichkeit aufwies als die labiale/bukkale Zahnfläche. Durch die randomisierte Zuordnung der vier aus jedem Zahn gewonnenen Schmelzproben auf die Untersuchungsgruppen dürfte dieser Aspekt jedoch bedeutungslos sein.

Die Autoren West et al. (2011) sind zudem der Meinung, dass alle Zahnflächen von dritten Molaren gleichermaßen für Zahnerosionsversuche geeignet seien. Sie beziehen sich dabei auf eine unveröffentlichte Studie von Hooper, in der 199 Zahnflächen keinen signifikanten Unterschied bezüglich des erosiv verursachten Zahnhartsubstanzverlustes zeigten.

Die Zahnschmelzproben wurden plangeschliffen und poliert. In Untersuchungen von Ganss et al. (2000) wurde festgestellt, dass polierte Zähne eine geringere Säurefestigkeit aufweisen als unpolierte. Auch Finke et al. (2000) erklärten die geringeren Zahnhartsubstanzverluste in ihrem Erosionsversuch damit, dass die Zähne nicht poliert waren. Mögliche Ursache dafür ist eine posteruptiv gereifte, mit Fluorid angereicherte Zahnschmelzoberfläche. Nach dem Durchbruch der Zähne in die Mundhöhle durchlaufen diese eine physiologische Abrasion und Attrition mit einem daraus resultierenden Zahnhartsubstanzverlust. Dies hat zur Folge, dass der in der Zahnoberfläche befindliche prismenfreie Zahnschmelz verloren geht (Schroeder, 2000). Trotz allem erfährt der Zahnschmelz eine Reifung (die posteruptive Schmelzreifung) in der Mundhöhle, durch die die Oberfläche härtet (Hellwig et al., 2013). Die Härtung findet in der Regel durch die lokale Aufnahme von Fluorid statt. Dazu trägt zum einen das tägliche Zähneputzen mit fluoridhaltiger Zahnpasta bei, wie auch die Verwendung von Mundspüllösungen oder aber auch mit der Nahrung aufgenommenes Fluorid (Schroeder, 2000). Durch das Polieren der Zahnproben wird diese obere Schmelzschicht abgetragen (Attin und Wegehaupt, 2014). Nichtsdestotrotz ist es im Rahmen wissenschaftlicher Untersuchungen häufig notwendig, Zahnproben zu polieren; der Hauptgrund dafür liegt meist in der technischen Auswertung, die ohne eine plane Oberfläche vielfach nicht möglich ist (Young und Tenuta, 2011; Attin und Wegehaupt, 2014; West et al., 2011).

Die Verwendung von planpolierten Zahnschmelzproben bot in diesem Versuch zwei entscheidende Vorteile: Zum einen konnte das Volumen des Zahnhartsubstanzverlustes genau berechnet werden, da durch die planpolierte Oberfläche eine standardisierte Referenzfläche gegeben war. Der zweite Vorteil bestand darin, dass zum anderen die Zahnbürsten-Borsten im zweiten Teil des quantitativen Versuches sehr genau auf die plane Zahnoberfläche ausgerichtet werden konnten.

5.1.2 Mundspüllösungen

In vielen In-vitro-Studien wurden experimentelle und kommerziell erhältliche Mundspüllösungen bereits auf ihre Wirksamkeit gegenüber Zahnerosionen getestet. In diesem Versuch sollten allein Mundspüllösungen getestet werden, die in Deutschland am Markt sind und damit werben, den Zahnschmelz vor Zahnerosionen zu schützen.

Die Anwendungshäufigkeit und -dauer war mit zweimal täglich für zwei Minuten bei allen Mundspüllösungen gleich. Damit entsprach die Dauer der Anwendung nicht den Angaben in den Packungsbeilagen der Hersteller. Der Grund für diese abweichende, aber einheitliche Anwendung war, dass der Versuch standardisiert ablaufen sollte und alle Spüllösungen die gleiche Einwirkungszeit erhalten sollten. Die gewählte Anwendungsdauer sollte den praktischen Gebrauch von Mundspüllösungen im täglichen Leben in Form einer mindestens zweiminütigen Zahnpflege morgens und abends zumindest näherungsweise korrekt widerspiegeln. Inwiefern die Annahme, dass die gewählte Frequenz und Dauer dem Anwenderverhalten entsprechen, liegen keine Hinweise vor. Möglicherweise ist die Anwendungszeit im Alltag geringer.

Dies könnte dadurch kompensiert werden, dass die Zahnschmelzproben im Versuch direkt nach der zweiminütigen Kontaktzeit mit Aqua V.E. abgespült wurden. Für den Alltag gilt die Herstellerempfehlung, die Mundspüllösung lediglich auszuspucken, so dass die aktiven Inhaltsstoffe im Mundraum noch nachwirken können.

5.1.3 Experimenteller Ablauf

In-vitro-Studien haben den Vorteil, dass sie vergleichsweise einfach zu standardisieren sind. Alle Proben durchlaufen exakt denselben Versuchszyklus, und der Versuch ist unschwer zu reproduzieren. Es kann gezielt die Wirkung einzelner Parameter untersucht werden, es können aber auch jederzeit weitere Parameter zur Untersuchung hinzugefügt werden (West et al., 2011). Allerdings stellen In-vitro-Studien immer nur ein Modell dar und bilden nicht die gesamte Komplexität des realen Lebens ab. In-vivo-Studien erfüllen diesen Sachverhalt, In-situ-Studien erlauben dies ansatzweise. Für die hier bearbeitete Fragestellung ist allerdings zu konstatieren, dass sich unter ethischen Aspekten In-vivo-Demineralisationen mit starken Säuren verbieten. In einer Studie von Hooper et al. (2003) wurden Erosionen in der Mundhöhle durch das 10-minütige Trinken von 250 ml Orangensaft erzeugt. Der Versuch erstreckte sich über 10 Tage mit jeweils vier erosiven Angriffen täglich. Die Autoren Wiegand und Attin (2011) befürchten bei solch langen erosiven Angriffen in der Mundhöhle ein ethisches Problem mit Blick auf die Patientengesundheit.

Bei In-situ-Studien werden Demineralisation und zum Teil auch Abrasionsvorgänge extraoral durchgeführt. Ein großer Nachteil bei In-vivo- und In-situ-Studien ist die Studienprotokoll-gerechte Umsetzung (West et al., 2011). Die Studienteilnehmer müssen in Bezug auf das vorgesehene Verhalten absolut zuverlässig sein und einem standardisierten Vorgehen folgen, was sich bei In-situ-Studien zur Abrasion von Zahnhartsubstanzen als schwierig erweisen kann (Wiegand und Attin, 2011).

Der im Rahmen der vorliegenden Untersuchung zur Erzeugung von Erosionen gewählte zehntägige Zeitraum entspricht dem ähnlicher In-vitro-Studien (Ganss et al., 2008; Flury et al., 2013). Mit dieser Dauer sind messbare Effekte zu erwarten, und diese können mit anderen Zahnerosionsversuchen verglichen werden.

5.1.4 Demineralisation

Zur Demineralisation wurde 1 %ige Zitronensäure verwendet. Zitronensäure ist eine Säure, die häufig in der Nahrung vorkommt. Viele Softgetränke (Cola, Zitronenlimonade, Sportgetränke, Orangensaft) und Zitrusfrüchte beinhalten Zitronensäure. In anderen Versuchen wurde direkt mit zitronensäurehaltigen Softgetränken ein Demineralisationsangriff durchgeführt (Young und Tenuta, 2011; Shellis et al., 2011). Ein Nachteil bei dieser sehr realistisch erzeugten Zahnerosion ist, dass in den Softgetränken weitere Inhaltsstoffe enthalten sind, die Wechselreaktionen auslösen können (Shellis et al., 2011). So kann beispielsweise der hohe Phosphatgehalt in Cola den erosiven Effekt des Getränks schmälern.

Die Dauer der einzelnen erosiven Impulse von zwei Minuten orientierte sich an intraoralen pH-Wertmessungen von Millward et al. (1997). Die Autoren maßen mit einer flexiblen Sonde den pH-Wert in der Mundhöhle nach Gabe von 1 %iger Zitronensäure. Innerhalb eines Zeitraums von einer Minute fiel der pH-Wert auf 2 bis 3 und stieg dann langsam wieder an. Nach 2 Minuten lag er an den oberen Inzisivi bei 5,5; bei den oberen Prämolaren wurde dieser pH-Wert nach ca. 4 bis 5 Minuten erreicht.

Die täglich fünfmalige Anwendung der Zitronensäure simuliert drei Hauptmahlzeiten und zwei Zwischenmahlzeiten. Fünf Demineralisationszyklen sind in vielen Studien angewendet worden. Durch die gewählten standardisierten Zyklen lassen sich die Ergebnisse dieser Arbeiten einfach mit anderen Versuchen vergleichen.

5.1.5 Remineralisation

Als Remineralisationslösung diente künstlicher Speichel; dieser war frei von Proteinen. Der künstliche Speichel wurde zwei Mal täglich frisch angerührt und der pH-Wert betrug 6,9. Die Zusammensetzung des Speichels wurde der Literatur entnommen (Matzker und Schreiber, 1972). In modifizierter Form mit einigen weiteren Bestandteilen wurde die Rezeptur als Speichelersatz für Menschen nach einer Radio-/Chemobehandlung mit eingeschränkter Speichelsekretion empfohlen.

Während der Remineralisationszeit befanden sich die Plastikbehältnisse mit dem künstlichen Speichel und den Zahnschmelzproben in einem Schüttelbad (Mat. 9) und wurden bei 38°Grad Celsius horizontal geschwenkt. Dieses Vorgehen diente der Simulation der natürlichen Temperatur und der Bewegung des Speichels in der Mundhöhle.

Der verwendete künstliche Speichel war frei von Proteinen. Damit bot sich nicht die Möglichkeit, dass sich ein Pellikel an der Oberfläche der Zähne bilden konnte. Das Pellikel kann eine begrenzte Schutzfunktion vor säurebedingten Schmelzverlusten aufweisen. In einer Vergleichsstudie über die erosive Wirkung von Orangensaft (Dauer: 15 Tage) untersuchten die Autoren West et al. (1998) unter anderem den Substanzabtrag in situ und in vitro. Das Ergebnis war, dass der Zahnhartsubstanzverlust in vitro fast dem 10-fachen des In-situ-Versuchs entsprach. In weiteren Studien (Amaechi et al., 1999; Hara et al., 2006) konnte nachgewiesen werden, dass das Pellikel den Zahn vor Zahnerosionen schützen kann. Allerdings ergaben die Studien auch, dass das Speichelpellikel nicht gleichmäßig dick und lokal auf der Zahnoberfläche verteilt auftritt. Zusätzlich konnte nachgewiesen werden, dass der schützende Effekt limitiert ist.

Eine spezielle Problematik bei der Verwendung von menschlichem Speichel bei In-vitro-Versuchen stellt zudem die Haltbarkeit und Stabilität der Speichelbestandteile dar (Schipper et al., 2007).

Im vorliegenden Versuch ging es vorrangig um den Prozess der Erosionshemmung durch unterschiedliche Wirkstoffe. Ein zusätzlicher Schutz der Zähne durch eine Proteinhülle war wegen den oben genannten Problematiken mit Speichelbestandteilen nicht durchführbar. Inwiefern dadurch die erhaltenen Ergebnisse beeinflusst werden, kann nicht abgeschätzt werden. Eine mögliche Abweichung dürfte aber für alle Untersuchungsgruppen gleichermaßen auftreten, so dass aus den erhaltenen Ergebnissen zumindest vergleichende Aussagen über das Potenzial der verwendeten Produkte zur Erosionshemmung abzuleiten sind.

5.1.6 Zahnputzabrasion

Ziel des Abrasionsversuches war zu testen, inwieweit die Mundspüllösungen aus Versuchsteil 1 auch bei zusätzlichen abrasiven Belastungen die Entstehung von erosiv-abrasiven Defekten verhindern können. Aus diesem Grund erfolgte die abrasive Beanspruchung abweichend von verschiedenen Empfehlungen, die zur Erosionsprophylaxe neben Spüllösungen die routinemäßige Verwendung einer fluoridhaltigen Zahnpasta empfehlen, mit einer fluoridfreien Zahnpasta.

Die Dauer der simulierten Zahnreinigung von fünf Sekunden orientierte sich an einem von den Autoren Wiegand und Attin (2011) veröffentlichten Artikel. Die Autoren gaben an, dass nach einer Untersuchung von Ganss et al. (2009) die durchschnittliche Zeit des Zähneputzens um die 90 Sekunden beträgt. Dies entspräche ihrer Meinung nach 300 bis 400 Bewegungen der elektrischen Zahnbürste und somit werde ein Zahn nicht länger als fünf Sekunden gereinigt. Diese Zeit erscheint realistisch. Weiterhin kritisieren die Autoren Versuche mit extremen langen Standzeiten der Zahnbürste.

Im vorliegenden Versuch wurden die Zahnproben mit einem sehr geringen Gewicht der Zahnbürste belastet (35 g). Ursprünglich vorgesehen war ein Gewicht von 100 g, das in etwa 1 N entspricht. Durch die Anwendung der sensitiven Zahnbürste (Mat. 17) und deren Präparation der außenstehenden Borsten (Abbildung 25), war es aber nicht möglich, mit einem Druck von 100 g zu putzen. Die weichen Borsten drückten sich zur Seite weg und wirkten dann ausschließlich auf die Schutzlack-Isolierung des Testareals ein. Allein schon die Begrenzung des Versuchsfeldes durch Schutzlack (Nagellack) erwies sich beim Abrasionsversuch als problematisch. Bei einigen Proben platzte der Lack am Rand zum Versuchsfeld ab. Der Grund für die Auswahl des Nagellacks war, dass er sich speziell als temporäre Beschichtung eignet, welche sich einfach und ohne Veränderung des Testareals entfernen lässt.



Abbildung 25: Die an den Borsten präparierten Zahnbürste (Mat. 17)

5.1.7 Quantitative und qualitative Analysen

Zur Beurteilung von Zahnerosionen steht eine Vielzahl an technischen Hilfsmitteln zur Verfügung, die in wissenschaftlichen Untersuchungen Anwendung finden (Attin und Wegehaupt, 2014). In der hier vorgelegten Arbeit wurde mit einem Laser Scanning Mikroskop (Mat. 22) und einem Rasterelektronenmikroskop (Mat. 21) gearbeitet. Die Laser Scanning Mikroskopie (LSM) diente dazu, die verlorene Zahnhartsubstanz zu erfassen. Profilometrische Messungen sind hierfür ein weiteres, oft angewendetes Verfahren (Attin und Wegehaupt, 2014). In einigen Studien wurde das Profil mittels eines Tasters linienförmig aufgenommen, so zum Beispiel bei Schlüter et al. (2009b) oder auch bei Ganss et al. (2010a). Ein Nachteil dieses Testverfahrens liegt darin, dass die Tastspitze durch die direkte Oberflächenberührung Schäden an der erodierten Zahnschmelzoberfläche hervorrufen kann (Attin und Wegehaupt, 2014).

Das Laser Scanning Mikroskop arbeitet kontaktlos und bietet außerdem den Vorteil, im Gegensatz zum Tastverfahren eine unvergleichbar höhere Anzahl an gemessenen Linien aufzuweisen sowie in der Auswertung des 3D-Profiles annähernd die gesamte Versuchsfläche abzubilden. Die Auflösung betrug 2048 mal 1536 Pixel. Somit wurde jeder Bildpunkt des Versuchsfeldes bei der Ermittlung des Zahnhartsubstanzverlustes berücksichtigt. Zusätzlich konnte mit Hilfe einer dreidimensionalen Visualisierung der Zahnhartsubstanzverlust räumlich dargestellt werden.

Nachteil bei diesem Verfahren ist, dass es sich um eine reine Oberflächenanalysemethode handelt. Mögliche demineralisierte Zonen unterhalb der Zahnoberfläche sind mit diesem Verfahren nicht zu ermitteln. Die Autoren Attin und Wegehaupt (2014) weisen darauf hin, dass bei feuchten bzw. nassen Oberflächen der Laserstrahl fehlerhaft reflektiert werden kann und dass für eine genaue Messung der Zahnhartsubstanzverlust $0,4\text{ }\mu\text{m}$ überschreiten muss. Außerdem bestehe die Möglichkeit der Bildung von Artefakten an scharfen Kanten.

Für die qualitative Untersuchung der erodierten Oberflächen mit einem Nachweis dort vorhandener chemischer Elemente wurde ein Rasterelektronenmikroskop mit daran adaptiertem Detektor für die energiedispersive Röntgenspektroskopie verwendet. Bei dem Rasterelektronenmikroskop handelte es sich um ein „environmental scanning electron microscope“ (ESEM). Vorteil bei derartigen Elektronenmikroskopen ist, dass auf eine elektrisch leitfähige Beschichtung der Probenoberfläche durch Aufputtern von Gold oder Platin verzichtet werden kann (Attin und Wegehaupt, 2014). Die EDX-Anwendung ist keine Analytik der unmittelbaren Oberfläche, sondern der Elektronenstrahl dringt – je nach gewählter Energie – leicht in die Oberfläche ein. Dabei handelt es sich um einige wenige Zehntel-Mikrometer. Daher ist die EDX Anwendung als oberflächennah einzustufen. Die Nachweisgrenzen für die Elemente liegen typischerweise im Bereich von Zehntel-%.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

5.2.1 Mikromorphologische Charakterisierung der Schmelzoberflächen

Die Abbildung 11 zeigt exemplarisch eine Aufsicht auf ein Versuchsfeld bei Gruppe A. Die Oberfläche erscheint glatt. Damit unterscheidet sie sich von den Oberflächen nach Anwendung der Mundspüllösungen B und C sowie der Kontrollgruppe (Abbildung 12 und Abbildung 14). Ähnliche Ergebnisse einer glatten Versuchsoberfläche sind aus einem Versuch der Autoren Ganss et al. (2008) bekannt. Diese Auflagerung wird von den erwähnten Autoren so interpretiert, dass das in den Zahnschmelz integrierte bzw. aufgelagerte Zinn in Kombination mit Fluorid zu einer homogen glatten Oberfläche führt, die den Zahnschmelz bedingt vor Säuren schützt.

Die Abbildung 12 zeigt exemplarisch eine Aufsicht aus Versuchsgruppe B. Das zu erkennende Schmelzmuster erinnert an das Ätzmuster nach dem Konditionieren vor dem Legen einer Kompositfüllung. Es sind deutlich die quergetroffenen Schmelzprismen zu sehen. Ein ähnliches Schmelzmuster ist auf Abbildung 14 und Abbildung 15 der Kontrollgruppe D zu erkennen. Vergleichbare Aufnahmen wurden auch von Lussi (Lussi et al., 2011) vorgelegt und beschrieben.

Es hätte erwartet werden können, dass das in Mundspüllösung B enthaltene Fluorid als eine Fluoriddeckschicht auf der Oberfläche der Zahnproben nachweisbar wäre. Bei kariogenen Säureangriffen schützt diese Deckschicht den Zahnschmelz (Schiffner, 2007). Auf der Abbildung ist eine Fluoriddeckschicht jedoch nicht sichtbar. Es ist bekannt, dass auch die Auswirkung erosiver Angriffe am Zahnschmelz durch Fluorid verringert wird (Wiegand und Attin, 2010). In der vorliegenden Studie bewirkte die fluoridhaltige Mundspüllösung B einen deutlich geringeren Zahnhartsubstanzverlust im Vergleich zur unbehandelten Kontrollgruppe D. Der Nachweis dieser Schutzwirkung, ohne dass eine Fluoridspeicherschicht erkennbar gewesen wäre, kann so interpretiert werden, dass diese Schicht durch den erosiven Angriff vollständig gelöst wurde, dabei aber immerhin den erosiven Verlust der Schmelzoberfläche gehemmt hat.

Die Oberfläche nach Anwendung der Mundspüllösung C ist in Abbildung 13 dargestellt. Die durch die Säure geschädigte Schmelzoberfläche wirkt teilweise überdeckt. Ähnlich wie bei der Mundspüllösung A ist auch in diesem Fall die Zahnoberfläche nicht mit der Kontrollgruppe D, mit dem klassischen Säure-Ätz-Muster, vergleichbar. Eine mögliche Erklärung für das Zustandekommen einer glatten Schmelzoberfläche kann in der Zusammensetzung der Mundspüllösungen liegen. Die Zink-Carbonat-Hydroxylapatite legen sich an die Zahnoberfläche an und füllen Unebenheiten auf. Die im Vergleich zur Kontrolle unbeeinflusste Erosionstiefe zeigt aber, dass diese Auflagerungen nicht in der Lage sind, die erosive Lösung des Schmelzes zu hemmen.

5.2.2 Quantitative Bestimmung der Zahnhartsubstanzverluste unter erosiven Bedingungen

Die Ergebnisse im ersten Teil der quantitativen Bestimmung zeigen, dass die Zahnhartsubstanzverluste in den Versuchsgruppen A und B im Vergleich zur Kontrollgruppe D signifikant reduziert sind. Der Zahnhartsubstanzverlust ist bei Anwendung der Mundspüllösung A im Vergleich zur Kontrollgruppe D um 56,5 % reduziert, und für die Mundspüllösung B macht die Reduktion des Materialverlustes 63,4 % aus. Diese bemerkenswerten Ergebnisse bestätigen eine Wirkung der beiden Mundspüllösungen. Die Arbeitshypothese, dass Mundspüllösungen säurebedingten Zahnschmelzabbau reduzieren können, ist somit bestätigt. Dies steht in Übereinstimmung mit anderen vergleichbaren Studien, in denen beispielsweise zinnhaltige Mundspüllösungen ebenfalls eine Reduktion von Zahnerosionen zeigten (Schlüter et al., 2010; Ganss et al., 2008).

Die in diesem Versuch getestete Mundspüllösung Elmex Erosionsschutz der Firma CP-Gaba (Mundspüllösung A) ist in mehreren Versuchen als wirksam gegen Zahnerosionen getestet worden. In situ konnten bei einer Studie der Autoren Ganss et al. (2010b) Zahnerosionen im Zahnschmelz um 67 % signifikant im Vergleich zur Kontrollgruppe reduziert werden. Das Produkt beinhaltet als oberflächenwirksame Inhaltsstoffe Zinnchlorid, Aminfluorid und Natriumfluorid. Laut den Autoren Magalhaes et al. (2011) bildet sich mit den Zinnionen auf der Zahnschmelzoberfläche eine Deckschicht in Form von $\text{Ca}(\text{SnF}_3)_2$, SnOHPO_4 oder

$\text{Sn}_3\text{F}_3\text{PO}_4$. Diese Schicht sei gegenüber Säuren resistenter als eine Calciumfluoriddeckschicht und schütze somit den Zahnschmelz.

Das Bipolymer Chitosan, das in der Zahnpasta Elmex Erosionsschutz enthalten ist, konnte bereits in mehreren Studien mit zahnerosionshemmenden Effekten in Verbindung gebracht werden. In einem In-situ-(Erosions-/und Abrasions-)Versuch, bei dem Zahnpasten verglichen wurden, konnte eine Zahnpasta mit den Inhaltsstoffen Zinn, Fluorid und Chitosan den Zahnhartsubstanzauftrag signifikant im Vergleich zur Kontrollgruppe reduzieren (Schlüter et al., 2014). Laut den Autoren bindet das Bipolymer Chitosan sowohl an die negativ geladene Zahnoberfläche als auch an das Speichelpellikel und bleibt auch bei niedrigen pH-Werten positiv geladen.

Die in Versuchsgruppe B angewendete Mundspüllösung ProSchmelz beinhaltet neben Natriumfluorid ebenfalls organische Bestandteile (Carboxymethylcellulose, Xanthan Gum und Copovidone). Die organischen Bestandteile führen zu einer besseren Benetzung der Zahnoberfläche. Gracia et al. (2010b) stellten einen signifikant reduzierten Zahnhartsubstanzauftrag gegenüber niedriger konzentrierten fluoridhaltigen Mundspüllösungen fest. In einem weiteren Teil des Versuchs verglichen die Autoren den durch die Mundspüllösungen ProSchmelz und Elmex Erosionsschutz bewirkten Fluoridgehalt in der Zahnprobenoberfläche. Dabei stellten sie fest, dass die Zahnoberfläche, die mit der Mundspüllösung Pro Schmelz behandelt wurde, mehr Fluorid beinhaltete. Beide Mundspüllösungen haben sich im vorliegenden Versuch im Vergleich zu den anderen beiden Versuchsgruppen (C und D) als hochwirksam bezüglich der Reduktion säurebedingten Zahnschmelzaufbaus gezeigt (siehe die exemplarischen Abbildung 8 und Abbildung 9). Zwischen den beiden Spüllösungen A und B war keine signifikant differierende Hemmung der Erosionsbildung zu ermitteln.

Der erosive Schmelzauftrag nach Anwendung der Mundspüllösung C unterscheidet sich hingegen nicht signifikant von der Kontrollgruppe D. Der mittlere Substanzauftrag ($60,4 \mu\text{m}$) entspricht dem der Kontrollgruppe ($59,8 \mu\text{m}$). Die in Versuchsgruppe C verwendete Mundspüllösung BioRepair weist die Komponenten Zink-Carbonat in Form von Nano-Hydroxylapatit auf. Der Wirkstoff

soll sich der Zahnoberfläche auflagern und den Zahn vor weiterem säurebedingten Abbau schützen. In einer In-vitro-Studie zeigten Roveri et al. (2009) mittels REM-Aufnahmen, dass nach einer 10-minütigen Anwendung von nano-Hydroxylapatiten eine aufgelagerte Schutzschicht nachweisbar ist. Laut Hannig und Hannig (2010) können nano-große Hydroxylapatitpartikel initiale säurebedingte Zahnerosionen auffüllen und somit remineralisieren, wenn die Defektgröße der Partikelgröße entspricht. Diese auf BioRepair bezogenen Ergebnisse seien bisher allerdings nur in vitro erzielt worden und nicht klinisch verifiziert. Das Remineralisieren klinisch sichtbarer Läsionen sei nicht möglich.

Die Studienlage bezüglich der Erosionshemmung durch Nano-Hydroxylapatitpartikeln ist sehr uneinheitlich (Buzalaf et al., 2014). In einem In-vitro-Remineralisationsversuch mit verschiedenen Konzentrationen an Nano-Hydroxylapatitpartikeln konnte lediglich die 0,2 Natriumfluoridlösung ohne Zusätze von Nano-Hydroxylapatit den Zahnschmelzabbau reduzieren (Comar et al., 2013). Tschoppe et al. (2011) untersuchten ebenfalls das Remineralisationsverhalten von Nano-Apatit-Zahnpasten (BioRepair und ApaCare) mit vielversprechenden Ergebnissen insbesondere hinsichtlich der Remineralisation des Dentins. Der Versuchsaufbau unterschied sich allerdings wesentlich von dem im vorliegenden Versuch gewählten Vorgehen. Es fand zuerst eine Demineralisation statt und anschließend über zwei und fünf Wochen eine Phase der Remineralisation. Die Kontaktzeit der Zahnpasten betrug zweimal täglich 120 Sekunden (inklusive fünf Sekunden manuellem „Putzen“). In einer Erosions-/Abrasionsstudie konnte hingegen kein schützender Effekt einer Zink-Carbonat-Nano-Hydroxylapatit Zahnpasta (BioRepair) am Zahnschmelz festgestellt werden (Ganss et al., 2011).

5.2.3 Quantitative Bestimmung der Zahnhartsubstanzverluste unter erosiv-abrasiven Bedingungen

Im zweiten Versuchsteil wurden die Zahnschmelzproben zusätzlich zu den Demineralisationszyklen zwei Mal täglich einer fünfsekündigen Zahnputzabrasion unterzogen. Die Ergebnisse aus Versuchsteil 2 entsprechen bezüglich der zwischen den Untersuchungsgruppen ermittelnden Unterschiede des Substanzverlustes den Ergebnissen aus Versuchsteil 1. So sind die Verluste in

den beiden Versuchsgruppen 2A und 2B gegenüber der Kontrollgruppe 2D signifikant geringer. Bei Versuchsgruppe 2C hingegen unterscheidet sich der Zahnhartsubstanzverlust statistisch nicht vom Verlust in Kontrollgruppe 2D. Ebenfalls ist kein statistisch differierender Verlust zwischen den Gruppen 2A und 2B feststellbar.

Die zusätzliche abrasive Belastung bedeutete mithin keinen negativen Einfluss auf die Wirkung der Mundspüllösungen. Die Versuchsgruppe 2A mit der Mundspüllösung Elmex Erosionsschutz zeigte eine 63,3 %ige Reduktion des Zahnhartsubstanzverlustes, und die Versuchsgruppe 2B mit der Mundspüllösung ProSchmelz wies um 61,2 % weniger Zahnhartsubstanzverluste als die Kontrollgruppe auf.

Allerdings ist im Vergleich der beiden Versuchsteile ein auffälliger Aspekt zu diskutieren: Der Zahnhartsubstanzverlust ist in allen vier Versuchsgruppen im Vergleich zu Versuchsteil 1 verringert.

Dies lässt auf eine systematische Abweichung schließen, deren Ursache nicht bekannt ist. Da der Versuchsteil 2 nach Beendigung von Versuchsteil 1 durchgeführt wurde, kann vermutet werden, dass die Arbeitsschritte routinierter durchgeführt wurden. Möglicher Weise wurde dabei das Abspülen der Zahnschmelzproben mit Aqua V.E. zügiger durchgeführt, so dass erosive Prozesse schneller gestoppt wurden als in Versuchsteil 1.

In vielen anderen Studien wurde durchgängig ein zunehmender Substanzverlust gefunden, wenn erosive und abrasive Einflüsse zusammen auf Zahnschmelz einwirken. Eine kritische Rolle kommt dabei durchweg der aufgewendeten Bürstkraft zu. Dass die Kombination von Säureeinwirkung und Krafteinwirkung zu geringeren Verlusten als alleinige Säureexposition führt, wurde bislang nicht beschrieben und erscheint nicht logisch. Wenn, wie oben diskutiert, eine systematische Veränderung bei der experimentellen Durchführung angenommen wird, so verbietet sich ein Vergleich zwischen den beiden Versuchsteilen.

Es ist jedoch auch zu diskutieren, dass die Abrasionslast in der vorliegenden Studie im Vergleich zu anderen Untersuchungen zu gering war. Die hier gewählte Putz-Zeit von fünf Sekunden sollte das alltägliche Zähneputzen (pro Zahn) in etwa widerspiegeln und war der Literatur entnommen (Wiegand und Attin, 2011). Das Gewicht, das während des Putzens auf der Zahnbürste lag, war in diesem Versuch mit 35 g sehr gering. Laut den Autoren Wiegand und Attin (2011) wurde in den meisten Versuchen mit Kräften von 2 N bis 3 N (entspricht näherungsweise der Gewichtskraft, die eine Masse von 200 g bis 300 g ausübt) geputzt.

In der Literatur finden sich unterschiedliche Ergebnisse aus Abrasionsversuchen wieder (Ganss et al., 2013). Viele Faktoren spielen dabei eine Rolle, wie die Frequenz, Dauer und Kraft des Bürstens, aber auch die verwendete Zahnpasta und Zahnbürste (Wiegand und Attin, 2011). Auch der Härtegrad der Zahnborsten ist nicht zu vernachlässigen. Die in diesem Versuch verwendete Zahnbürste war eine elektrische Zahnbürste Oral-B (Mat. 15), die Borstenhärte war weich. In einem In-vitro-Vergleichsversuch von Wiegand et al. (2006) kamen die Autoren zu dem Ergebnis, dass elektrisches Zahnbürsten einen höheren Zahnhartsubstanzverlust erzeugte als manuelles Zahnbürsten. In dem De-/Remineralisationsversuch wurden verschiedene elektrische Zahnbürstenmodelle gegenüber dem manuellen Putzen verglichen. Die gewählten Abrasionszeiten mit 10 Minuten waren allerdings sehr viel länger als im Alltag zu erwarten ist. Auch das standardisierte Putzen der elektrischen Zahnbürsten mit geraden Linien zusätzlich zur elektrischen Putzbewegung könnte zu den erhöhten Substanzverlusten beigetragen haben. In einem weiteren Abrasionsversuch am Dentin stellten Wiegand et al. (2013) hingegen fest, dass der Zahnhartsubstanzverlust bei Verwendung einer elektrischen Zahnbürste im Vergleich zum manuellen Putzen vermindert war.

Zudem ist die Zahnpasta als Abrasionsmedium von Bedeutung. Die Autoren Ganss et al. (2013) messen der Zahnpasta eine größere Bedeutung für die Abrasion zu als der Zahnbürste. Zur Bestätigung dieser These beziehen sie sich auf zwei Versuche. Der erste Versuch wurde von Voronets und Lussi (2010) durchgeführt. Bei diesem Test wurden Zahnschmelzproben in vitro für drei Minuten mit Orangensaft bzw. Zitronensäure demineralisiert und anschließend mit

einer Zahnpasta oder mit Speichel geputzt. Die Handzahnbürste wurde mit 150 g beschwert und führte 590 Putzbewegungen durch. Der Substanzabtrag war beim Speichel im Mittel mit 16 nm bzw. 14 nm wesentlich geringer als beim Abrasionsmedium Zahnpasta (339 nm bzw. 268 nm).

Der zweite Versuch wurde von Hara et al. (2009) durchgeführt. In diesem Versuch wurden Schmelzproben und Dentinproben mit unterschiedlich stark abrasiven Zahnpasten beansprucht. Zusätzlich wurde untersucht, ob fluoridhaltige Zahnpasten den Zahnhartsubstanzverlust minimieren können. Das Ergebnis war, dass sowohl der Abrasivitätsgrad als auch der Fluoridgehalt Einfluss auf den Zahnhartsubstanzverlust haben.

Aufgrund der vielen Faktoren, die bei einem Abrasionsversuch eine Rolle spielen, ist es letztendlich schwer zu ergründen, welche Parameter (Andruckkraft, „Putzzeit“, Härtegrad des Zahnbürstenkopfes etc.) in dem vorliegenden Versuch nicht optimal gewählt wurden, um zumindest in der Kontrollgruppe einen höheren Zahnhartsubstanzabtrag durch Abrasion zu erzeugen, vor dem die Wirkstoffgruppen 2A bis 2C dann einen Effekt hätten unter Beweis stellen können. Zumindest die Parameter der minimalen Andruckkraft und der geringen Zahnpasten-Abrasivität sowie die kurze Einwirkzeit waren in der vorliegenden Studie Faktoren, die einer deutlichen Steigerung des Schmelzabtrages durch die Putzsimulation entgegengestanden haben. Der fehlende Fluoridgehalt der verwendeten Zahnpasta hingegen hätte eine Akzentuierung der Verluste nach der Putzsimulation fördern können. Für eine theoretisch denkbare Hypothese, das verwendete Zahnputzgel habe durch andere Eigenschaften die Tiefe der Substanzverluste reduziert, liegen auch ansatzweise keine Hinweise vor.

Das Fazit aus dem eigenen Erosions/Abrasions-Versuch lautet, dass bei einem geringen Anpressdruck der Zahnbürste in Kombination mit einer nicht zu stark abrasiven Zahnpasta keine Schäden am Zahnschmelz zu beobachten sind, die über die erosiv bedingten Substanzverluste hinausgehen. Für die hier insgesamt beobachteten Verluste können die aus dem experimentellen Versuchsteil 1 abzuleitenden Folgerungen, dass die Wirkstoffe von Gruppen A und B die Entstehung von Erosionen, hier jetzt auch unter den beschriebenen zusätzlichen

schwach abrasiven Bedingungen, bestätigt werden. Ebenso kann bestätigt werden, dass die Wirkstoffe von Gruppe C keinen den Zahnschmelzverlust hemmenden Effekt aufweisen.

5.2.4 Qualitative Bestimmung von Elementen auf den erodierten Arealen nach Anwendung der Mundspüllösungen

Als Ergebnis der Probenbehandlung mit den Mundspüllösungen konnten bei allen drei Mundspüllösungen Inhaltsstoffe der jeweiligen Lösung als chemische Elemente in Aufsicht an der Zahnoberfläche mittels EDX nachgewiesen werden. Die gemessenen Konzentrationen waren allerdings sehr gering.

Versuchsgruppe A

Bei Versuchsgruppe A konnte das Element Zinn auf dem Zahnschmelz eindeutig nachgewiesen werden. Die gemessene Fluor-Konzentration war hingegen sehr gering und nah an der Nachweisgrenze (vgl. Tabelle 13).

Die Abbildung 23 zeigt eine stark vergrößerte Aufnahme der erodierten Versuchsfläche. Abbildung 24 gibt denselben Ausschnitt der Zahnprobe in einer Rückstreuungselektronenaufnahme (englisch BSE für backscattered electrons) wieder. Schwere Elemente, also Elemente mit hoher Ordnungszahl, erscheinen heller, während Elemente mit niedriger Ordnungszahl dunkler sind. Bei der Abbildung sind deutlich helle Bereiche an der Oberfläche sichtbar, dieser Kontrast ist nicht ausschließlich durch die Topografie zu erklären.

Gemäß einer stichprobenartigen EDX-Analyse in einer der dunkleren Regionen betrug der Zinngehalt 35,4 % (Gewichtsprozentfehler $\pm 2,2$ Prozentpunkte). In dem nur wenige Mikrometer höheren, helleren Bereich ergab eine stichprobenartige EDX-Analyse eine Gewichtskonzentration für Zinn von 53,6 % (Gewichtsprozentfehler $\pm 2,3$ Prozentpunkte). Die Wiederholung der Stichprobe an einer anderen Stelle im hellen Bereich ergab eine Gewichtskonzentration für Zinn von 48,5 % (Gewichtsprozentfehler $\pm 2,2$ Prozentpunkte). Trotz dieser Schwankung kann gefolgert werden, dass das Zinn besonders an der Zahnoberfläche aktiv ist.

Die Querschliffaufnahme mit den nachfolgenden Elementanalysen aus Versuchsgruppe A (Abbildung 16 bis Abbildung 18) bestätigt dies. Zu sehen ist eine demineralisierte Schicht. In dieser wurde eine erhöhte Zinnkonzentration gemessen (Abbildung 17), in dem darunter liegenden unveränderten Zahnschmelz befand sich hingegen kein Zinn (Abbildung 18). Die zinnhaltige demineralisierte Schicht weist eine Breite von ca. 15 µm auf. In einem ähnlichen Versuch von Schlüter et al. (2009b) konnte Zinn bis zu einer Tiefe von 20 µm nachgewiesen werden.

Fluorid konnte im Querschliff nicht nachgewiesen werden und lag somit unter der Nachweisgrenze der technischen Apparatur oder ist nicht in das erosiv demineralisierte Areal eingedrungen.

Versuchsgruppe B

In Versuchsgruppe B konnte Fluor auf der Zahnoberfläche nachgewiesen werden. Die Messwerte betrugen bis zu 0,8 Gewichtsprozent (Gewichtsprozentfehler $\pm 0,23$ Prozentpunkte). Die Ergebnisse der EDX- Messungen müssen wegen ihrer geringen Anzahl und ihrer Schwankungen jedoch zurückhaltend interpretiert werden. Aus diesem Grund sind nur die Maximalwerte angegeben. Die auch als Maximalwert gefundenen niedrigen Konzentrationen korrelieren mit den REM-Aufnahmen, in denen keine Calciumfluoriddeckschicht sichtbar ist (Abbildung 12). Sie lassen darauf schließen, dass bei einer Kontaktzeit von zwei Minuten keine großflächige Calciumfluoriddeckschicht gebildet wurde. ten Cate (1997) schreibt in einem Reviewbeitrag zwar, dass Fluorid bereits bei geringen Konzentrationen einen positiven Effekt auf die Remineralisation habe. Das Fluorid sei in diesen Fällen allerdings in der Plaque, dem Speichel und möglicherweise in der Mukosa gespeichert. Zum Ausbilden einer Calciumfluoriddeckschicht sei bei niedrigen Konzentrationen eine längere Kontaktzeit erforderlich. Nichtsdestotrotz kann angesichts der gemessenen signifikant verminderten Zahnhartsubstanzverluste von einer schützenden Wirkung des Fluorids ausgegangen werden.

Das Fehlen einer durch die Behandlung hervorgerufenen Calciumfluorid-Deckschicht lässt sich durch die Querschliffaufnahme aus der Versuchsgruppe B

bestätigen (Abbildung 19). Im Gegensatz zu den Versuchsgruppen A und C ist im Querschliff unter dem erosiven Defekt auch keine Demineralisationsschicht erkennbar. Es kann angenommen werden, dass das Natriumfluorid aus der Mundspüllösung eine weitere, tiefer reichende Zone der Demineralisation des Zahnschmelzes verhindert hat. Auch mit EDX Messung war im Querschliff keine fluoridhaltige Phase darstellbar, wie das Spektrum in Abbildung 20 zeigt.

Versuchsgruppe C

Bei Versuchsgruppe C konnte Zink als aktives Element aus der Mundspüllösung nachgewiesen werden. Ob und inwieweit Calcium-haltige Partikel aus der Mundspüllösung auf den Zahn aufgetragen wurden, konnte nicht nachgewiesen werden, da Calciumpartikel zum einen visuell nicht erkennbar waren, zum anderen die gemessene Calciumkonzentration auch das natürliche Calcium des Zahnes beinhaltete. Die acht in Aufsicht gemessenen Zinkkonzentrationen beliefen sich auf Werte von 0,8 Gewichts.-% (Gewichtsprozentfehler $\pm 0,2$ Prozentpunkte) bis zu 1,8 Gewichts.-% (Gewichtsprozentfehler $\pm 0,2$ Prozentpunkte).

Abbildung 21 zeigt eine Querschliffaufnahme aus Versuchsgruppe C. Auffällig ist die demineralisierte Schicht. In dieser Schicht konnten geringe Konzentrationen von Zink gemessen werden (Abbildung 22). Der Nachweis von eingelagerten Partikeln in Form von Hydroxylapatiten aus der Mundspüllösung, die den Zahnschmelz reparieren sollen, konnte jedoch nicht erbracht werden.

5.3 Klinischer Bezug

Die Diagnosestellung Zahnerosion wird in der Zahnarztpraxis aller Voraussicht nach zunehmen; vor allem junge Menschen werden davon betroffen sein. Non-invasive Therapien bereits erkennbarer erosiver Zahnhartsubstanzverluste sind nicht möglich. Daher sind Behandlungen früher Erosionsstadien auf eine Hemmung der weiteren Säurelösung ausgerichtet. Dies kann durch eine adäquate Mundhygiene des Patienten gefördert werden. Dabei kann Mundhygieneprodukten zum Schutz vor Zahnerosionen für die tägliche Anwendung besondere Bedeutung zukommen. Allerdings gibt es eine Vielzahl solcher Produkte mit unterschiedlichen

Wirkstoffen oder Wirkstoffkombinationen auf dem Markt. Eine Einschätzung ihrer Wirksamkeit ist häufig schwer zu treffen.

Die vorliegende Untersuchung hat aufgezeigt, dass die Produkte Elmex Erosionsschutz und ProSchmelz säurebedingten Zahnschmelzabbau hemmen können. Unter anderem durch den Wirkstoff Fluorid stellen diese Produkte auch einen wichtigen Baustein in der Kariesprophylaxe dar, die bei der Empfehlung von Mundhygieneprodukten im Vergleich zur Erosionsprophylaxe immer noch im Vordergrund stehen sollte (Schiffner, 2015).

Ein weiteres Produkt, bei dem synthetisches Hydroxylapatit auf die Zahnfläche aufgebracht wird und das Erosionen hemmen soll (BioRepair), konnte im Rahmen dieser Arbeit keine erfolgreiche Beeinflussung der Erosionsentstehung bewirken. Es wurden aus diesem Produkt zwar Spuren von Zink an der Zahnoberfläche nachgewiesen, jedoch war der Zahnhartsubstanzverlust vergleichbar mit dem der Kontrollgruppe. Als nachteilig muss unter dem Aspekt der Kariesprophylaxe außerdem das Fehlen von Fluorid angesehen werden.

5.4 Schlussfolgerungen

- Eine Hemmung säurebedingten Zahnschmelzabbaus durch Mundspüllösungen mit bestimmten Wirkstoffen ist möglich.
- Eine vollständige Hemmung der Erosionsbildung findet nicht statt.
- Unter Einfluss der Mundspüllösung A (Elmex Erosionsschutz) und der Mundspüllösung B (ProSchmelz) wird die Tiefe von Erosionen im Zahnschmelz unter den gewählten Versuchsbedingungen gleichermaßen signifikant reduziert.
- Der erosive Schmelzverlust nach Anwendung der Mundspüllösung C (BioRepair) unterscheidet sich hingegen nicht signifikant von dem einer nicht behandelten Kontrollgruppe.
- Unter zusätzlich potenziell abrasivem Einfluss sind ebenfalls die Mundspüllösungen A und B in statistisch gleichem Maße wirkungsvoll, Mundspüllösung C hingegen nicht. Es ist einzuschränken, dass die Versuchsbedingungen nur eine geringe abrasive Belastung dargestellt haben.
- Auf dem erosiv belasteten Schmelz kann nach Anwendung der Spüllösung A ein deutlicher Substanzniederschlag dargestellt werden. Aus Spüllösung C resultiert ein partieller Auftrag auf dem Schmelz, nach Anwendung der Lösung B hingegen erscheint der oberflächliche Zahnschmelz unverändert säurekonditioniert.
- In Schmelz-Querschliffen kann bei Anwendung der Spüllösungen A und C eine über den erosiven Substanzverlust hinausgehende Demineralisationszone beobachtet werden. Bei Anwendung der Spüllösung B ist das nicht der Fall. Dies kann auf einen kategorisierenden Einfluss der in Spüllösung B vorhandenen Fluoridkonzentration hinweisen, die zu einem vollständigen Verlust der Schmelzoberfläche bei gleichzeitig vollständiger Strukturbewahrung der darunter liegenden Schmelzschicht führt.
- Aus allen drei Mundspüllösungen konnten spezifische Elemente ihrer Inhaltsstoffe in geringen Konzentrationen als chemische Elemente auf der Zahnoberfläche nachgewiesen werden. Dies deutet auf Interaktionen der Wirkstoffe mit der Schmelzoberfläche hin.

Die eingangs erstellten Arbeitshypothesen können mithin wie folgt akzeptiert werden:

- Die Hypothese „Zur Beeinflussung von Erosionen entwickelte Mundspüllösungen sind geeignet, den säurebedingten Zahnschmelzabbau zu reduzieren“ ist mit Einschränkungen zu akzeptieren.
- Die Hypothese „Verschiedene Wirkstoffe beziehungsweise Wirkstoffkombinationen weisen signifikant unterschiedliche erosionshemmende Effekte auf“ ist zu akzeptieren.
- Die Hypothese „Die zur Beeinflussung von Erosionen entwickelten Mundspüllösungen sind auch dann geeignet, den säurebedingten Zahnschmelzabbau zu reduzieren, wenn die Zahnproben einer zusätzlichen Abrasion unterzogen werden“ ist unter den gewählten Versuchsbedingungen zu akzeptieren. Hierbei ist zu ergänzen, dass die gewählten Versuchsbedingungen keine starke abrasive Belastung dargestellt haben.
- Die Hypothese „Elemente der wirksamen Inhaltsstoffe der Mundspüllösungen sind auf bzw. in der Zahnoberfläche qualitativ nachweisbar“ ist zu akzeptieren.

6 Zusammenfassung

Ziel dieser In-vitro-Untersuchung war es, einen Vergleich zwischen drei Mundspüllösungen mit verschiedenen Wirkstoffen beziehungsweise Wirkstoffkombinationen anzustellen, die zum Schutz vor Zahnerosionen angeboten werden. Unter standardisierten Versuchsbedingungen sollte an Schmelzproben untersucht werden, ob und in welchem Ausmaß die Mundspüllösungen geeignet sind, säurebedingten Zahnschmelzabbau zu hemmen. Dabei sollte zusätzlich der Aspekt einer Abrasionsbelastung einbezogen werden. Die Untersuchung sollte durch den Nachweis charakteristischer Elemente der Spüllösungs-Wirkstoffe an den Schmelzproben ergänzt werden.

Aus operativ entfernten dritten menschlichen Molaren wurden jeweils vier Schmelzareale entnommen und auf vier Untersuchungsgruppen (jeweils $n = 14$) verteilt. Alle Proben wurden für 10 Tage einem Zyklus aus erosiver Demineralisation (fünfmal täglich für jeweils 2 Minuten 1 %-ige Zitronensäure) und einer remineralisierenden Lagerung in künstlichem Speichel unterzogen. Die Proben von drei Untersuchungsgruppen wurden zweimal täglich für 2 Minuten in eine der drei Mundspüllösungen eingelegt. Bei den Mundspüllösungen handelte es sich um Elmex Erosionsschutz (Gruppe A), ProSchmelz (Gruppe B) und BioRepair (Gruppe C). Die quantitative Bestimmung des Zahnhartsubstanzverlustes erfolgte nach Beendigung der Behandlungszyklen mittels Laser-Scanning-Mikroskopie.

In einem weiteren Versuchsteil wurde die Prozedur mit neuen Schmelzproben wiederholt (je Gruppe $n = 18$). Zusätzlich zum erosiven Angriff wurden die Schmelzproben jedoch zweimal täglich mit einer elektrischen Zahnbürste und einem fluoridfreien Zahnputzgel für jeweils 5 Sekunden unter leichtem Auflagedruck von 35 g geputzt. Damit sollte ein abrasiver Einfluss des Zähneputzens simuliert werden. In beiden Versuchsteilen wurden die Tiefen der erosiven Substanzverluste mittels t-Test mit Bonferroni-Korrektur auf statistisch signifikante Differenzen überprüft.

Die qualitative Analyse erfolgte mittels Rasterelektronenmikroskop und Energiedispersiver Röntgenspektroskopie an zufällig ausgewählten Probenoberflächen aus dem ersten Versuchsteil (jeweils 5 aus den Gruppen A bis C) sowie an Querschliffen, die aus diesen Proben hergestellt worden waren.

Im ersten Versuchsteil wiesen die mit der Mundspüllösung C behandelten Proben sowie die Kontrollgruppe D einen statistisch gleichen mittleren Substanzverlust von 60,4 μm bzw. von 59,8 μm auf. Dieser Verlust war signifikant höher als der entsprechende Mittelwert der Gruppen A und B von 26,0 μm bzw. 21,9 μm , die sich nicht signifikant voneinander unterschieden. Im Vergleich zur Kontrolle wurde die Tiefe des erosiven Zahnhartsubstanzverlustes bei Anwendung der Mundspüllösung A um 56,5 % und bei der Mundspüllösung B um 63,4 % reduziert.

Die Ergebnisse aus Versuchsteil 2 mit zusätzlicher mechanischer Belastung durch simuliertes Zähneputzen entsprechen bezüglich der zwischen den Untersuchungsgruppen bestimmten unterschiedlichen Substanzverluste den Ergebnissen aus Versuchsteil 1. Auch hier wurden in den Gruppen A (16,8 μm) und B (17,8 μm) signifikant geringere Tiefen, die untereinander nicht signifikant unterschiedlich waren, als in Gruppe C (49,6 μm) sowie der Kontrollgruppe (45,8 μm) ermittelt. Allerdings waren die Tiefen der Substanzverluste in diesem Versuchsteil geringer als im ersten Teil. Dies kann mit dem experimentellen Vorgehen in Verbindung stehen, das eine sehr geringe mechanische Auflagekraft und eine gestraffte Versuchsdurchführung beinhaltet.

In der mikromorphologischen Darstellung war in der Kontrollgruppe sowie in Gruppe B das typische Muster säurekonditionierten Schmelzes erkennbar. Demgegenüber war in Gruppe C eine mäßige Überdeckung des Schmelzprismenmusters und in Gruppe A eine starke Auflagerung feststellbar. Im Querschliff wiesen die Präparate aus Gruppe B keine über den erosiven Schmelzverlust hinausgehenden Demineralisationen auf, während bei Gruppe A und C derartige Demineralisationszonen erkennbar waren. Anhand der EDX-Spektren konnten typische Bestandteile der jeweiligen Mundspüllösungen, wenn auch in nur geringer Konzentration, auf oder innerhalb der obersten Schmelzschicht nachgewiesen werden. Dies lässt darauf schließen, dass alle

Mundspüllösungen an der Zahnoberfläche eine Reaktion eingegangen sind.

Die Studie zeigt, dass zur Hemmung von Erosionen entwickelte Mundspüllösungen den säurebedingten Zahnschmelzabbau reduzieren können. Allerdings bestehen in dieser Beziehung große Unterschiede zwischen den verschiedenen Wirkstoffen bzw. Wirkstoffkombinationen. Zudem ist keine der verwendeten Mundspüllösung in der Lage, den erosiven Zahnhartsubstanzverlust vollständig zu vermeiden.

7 Summary

This in-vitro-study aimed to compare three mouth rinses with different active ingredients that are offered promising protection against dental erosions. Enamel samples were studied under standardized experimental conditions to examine whether the mouth rinses could inhibit dental erosions. In addition, the aspect of abrasive condition was considered. The study was supplemented by the proof of characteristic elements of the mouth rinses' active ingredients at the sample surfaces.

The crowns of operatively removed human third molars were each cut into four parts and distributed to four different groups ($n = 14$ each). All samples were subjected to a cyclic demineralization (five times daily for two minutes each with 1 % citric acid) and a remineralization procedure with storage in artificial saliva. Three of the four groups contained mouth rinses: Elmex Erosionsschutz (group A), ProSchmelz (group B), BioRepair (group C). The last group was the negative control group (group D). The samples of the groups A to C were transferred to the respective mouth rinses twice a day for two minutes each. After 10 days of this cyclic procedure, the quantitative surface loss was determined profilometrically using the laser scanning microscope.

In a second part of the experiment the same cyclic procedure was repeated with new samples ($n = 18$ per group). In addition to the erosive attack the enamel samples were brushed twice a day with an electric toothbrush to simulate the abrasive influence of tooth brushing. A fluoride free toothpaste was used. Each brushing procedure took five seconds with a contact pressure of 35 g. In both experimental parts the depth of the tissue loss was measured and compared statistically between the study groups using the t-test with Bonferroni correction.

The qualitative analysis took place using scanning electron microscopy and energy dispersive x-ray spectrometry on randomly chosen sample surfaces of the first part of the study (each time five samples from group A to C). Cross sections that were made from these samples were analyzed in the same way.

In the first part of the study, group C and the negative control group D showed the same average amount of surface loss (60.4 μm and 59.8 μm , respectively). This loss was significantly higher than the equivalent average in groups A and B (26.0 μm and 21.9 μm , resp.). Group A and B did not differ significantly from each other. In comparison to the negative control group, the depth of the erosive tissue loss was reduced by 56.5 % (group A) and 63.4 % (group B).

The results of the second part of the experiment with the simulated tooth brushing correspond to the results from the first part. Group A (16.8 μm) and group B (17.8 μm) showed significantly smaller erosion depths than group C (49.6 μm) as well as the negative control group D (45.8 μm). Group A and B did not differ significantly from each other. Surprisingly, the depths of the tissue losses in the second part of the experiment were considerably shallower than in the first part. The reason of this different hard tissue loss may be related to the low contact pressure used in the second part of the study and the fact that single steps of the experimental procedure were conducted more experienced and faster in this part.

The micromorphological analysis showed similar surface patterns for group B and the negative control group D, exhibiting typical acid etched surfaces. In contrast, group C exhibited a moderate covering of the enamel prisms and group A showed a strong covering. Regarding the enamel sections, group B did not show a demineralization zone below the erosive tissue loss whereas in groups A and C such demineralization zones were detected. On top or slightly below the surface layer, typical ingredients of the respective mouth rinses of each group were identified using the energy dispersive x-ray spectrometry, even though only small concentrations were found. This indicates that all mouth rinses reacted with the enamel surface.

The study shows that some mouth rinses are able to reduce dental erosions. However, there are strong differences regarding this effect. Moreover, none of the analyzed mouth rinses was capable of completely preventing dental erosions.

8 Literaturverzeichnis

- Addy M, Hunter ML: Can tooth brushing damage your health? Effects on oral and dental tissues. *Int Dent J* 2003; 53 Suppl 3: 177-186
- Amaechi BT, Higham SM: Dental erosion: Possible approaches to prevention and control. *J Dent* 2005; 33: 243-252
- Amaechi BT, Higham SM, Edgar WM, Milosevic A: Thickness of acquired salivary pellicle as a determinant of the sites of dental erosion. *J Dent Res* 1999; 78: 1821-1828
- Arnadottir IB, Holbrook WP, Eggertsson H, Gudmundsdottir H, Jonsson SH, Gudlaugsson JO, Saemundsson SR, Eliasson ST, Agustsdottir H: Prevalence of dental erosion in children: A national survey. *Community Dent Oral Epidemiol* 2010; 38: 521-526
- Arowojolu MO: Erosion of tooth enamel surfaces among battery chargers and automobile mechanics in Ibadan: A comparative study. *Afr J Med Med Sci* 2001; 30: 5-8
- 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
- Attin T, Wegehaupt FJ: Methods for assessment of dental erosion. *Monogr Oral Sci* 2014; 25: 123-142
- Babcock FD, King JC, Jordan TH: The reaction of stannous fluoride and hydroxyapatite. *J Dent Res* 1978; 57: 933-938
- Bahal P, Djemal S: Dental erosion from an excess of vitamin C. *Case Rep Dent* 2014; article ID 485387
- Barbour M E, Lussi A: Erosion in relation to nutrition and the environment. *Monogr Oral Sci* 2014; 25: 143-154
- Bartlett D, Ganss C, Lussi A: Basic Erosive Wear Examination (BEWE): a new scoring system for scientific and clinical needs. *Clin Oral Investig* 2008; 12: 65-68
- Bartlett DW, Coward PY: Comparison of the erosive potential of gastric juice and a carbonated drink in vitro. *J Oral Rehabil* 2001; 28: 1045-1047
- Bartlett DW, Evans DF, Smith BG: The relationship between gastro-oesophageal reflux disease and dental erosion. *J Oral Rehabil* 1996; 23: 289-297
- Bartlett DW, Lussi A, West NX, Bouchard P, Sanz M, Bourgeois D: Prevalence of tooth wear on buccal and lingual surfaces and possible risk factors in young European adults. *J Dent* 2013; 41: 1007-1013
- Braem M, Lambrechts P, Vanherle G: Stress-induced cervical lesions. *J Prosthet Dent* 1992; 67: 718-722
- Buzalaf MA, Magalhaes AC, Wiegand A: Alternatives to fluoride in the prevention and treatment of dental erosion. *Monogr Oral Sci* 2014; 25: 244-252
- Cate H: Dental erosion in industry. *Br J Ind Med* 1968; 25: 249-266
- Cavadini C, Siega-Riz AM, Popkin BM: US adolescent food intake trends from 1965 to 1996. *Arch Dis Child* 2000; 83: 18-24
- Centerwall BS, Armstrong CW, Funkhouser LS, Elzay RP: Erosion of dental enamel among competitive swimmers at a gas-chlorinated swimming pool. *Am J Epidemiol* 1986; 123: 641-647
- Chace R: Reclassification of Crest toothpaste. Council on dental therapeutics. *J Am Dent Assoc* 1964; 69: 195-196

- Comar LP, Souza BM, Gracindo LF, Buzalaf MA, Magalhaes AC: Impact of experimental nano-HAP pastes on bovine enamel and dentin submitted to a pH cycling model. *Braz Dent J* 2013; 24: 273-278
- Coombes JS: Sports drinks and dental erosion. *Am J Dent* 2005; 18: 101-104
- Dean HT: Endemic fluorosis and its relation to dental caries. *Publ Hlth Rep* 1938; 53: 1443-1452
- Dörfer CE, Schiffner U, Staehle HJ: Häusliche mechanische Zahn- und Mundpflege (Stellungnahme der DGZMK). *Dtsch Zahnärztl Z* 2007; 62: 616-620
- Eccles JD: Dental erosion of nonindustrial origin. A clinical survey and classification. *J Prosthet Dent* 1979; 42: 649-653
- Eccles JD, Jenkins WG: Dental erosion and diet. *J Dent* 1974; 2: 153-159
- Edwards M, Ashwood RA, Littlewood SJ, Brocklebank LM, Fung DE: A videofluoroscopic comparison of straw and cup drinking: the potential influence on dental erosion. *Br Dent J* 1998; 185: 244-249
- European Food Safety Authority (EFSA): Panel on Dietetic Products N & Allergies: Scientific opinion on dietary reference values for fluoride. *EFSA Journal* 2013; 11: 3332 (1-46)
- Eisenburger M, Shellis RP, Addy M: Scanning electron microscopy of softened enamel. *Caries Res* 2004; 38: 67-74
- Ellingsen JE, Rölle G: Treatment of dentin with stannous fluoride - SEM and electron microprobe study. *Scand J Dent Res* 1987; 95: 281-286
- Ferretti GA, Tanzer JM, Tinanoff N: The effect of fluoride and stannous ions on *Streptococcus mutans*. Viability, growth, acid, glucan production, and adherence. *Caries Research* 1982; 16: 298-307
- Finke M, Jandt KD, Parker DM: The early stages of native enamel dissolution studied with atomic force microscopy. *J Colloid Interface Sci* 2000; 232: 156-164
- Flegler SL, Heckman JW, Klomparens KL: Elektronenmikroskopie. Grundlagen, Methoden, Anwendungen. Spektrum Akad. Verl., Heidelberg 1995
- Flury S, Koch T, Peutzfeldt A, Lussi A, Ganss C: The effect of a tin-containing fluoride mouth rinse on the bond between resin composite and erosively demineralised dentin. *Clin Oral Investig* 2013; 17: 217-225
- Ganss C: Is erosive tooth wear an oral disease? *Monogr Oral Sci* 2014; 25: 16-21
- Ganss C, Hardt M, Lussi A, Cocks AK, Klimek J, Schlüter N: Mechanism of action of tin-containing fluoride solutions as anti-erosive agents in dentine - an in vitro tin-uptake, tissue loss, and scanning electron microscopy study. *Eur J Oral Sci* 2010a; 118: 376-384
- Ganss C, Klimek J, Giese K: Dental erosion in children and adolescents - a cross-sectional and longitudinal investigation using study models. *Community Dent Oral Epidemiol* 2001; 29: 264-271
- Ganss C, Klimek J, Schwarz N: A comparative profilometric in vitro study of the susceptibility of polished and natural human enamel and dentine surfaces to erosive demineralization. *Arch Oral Biol* 2000; 45: 897-902
- Ganss C, Lussi A, Grunau O, Klimek J, Schlüter N: Conventional and anti-erosion fluoride toothpastes: Effect on enamel erosion and erosion-abrasion. *Caries Res* 2011; 45: 581-589
- Ganss C, Neutard L, von Hinckeldey J, Klimek J, Schlüter N: Efficacy of a tin/fluoride rinse: a randomized in situ trial on erosion. *J Dent Res* 2010b; 89: 1214-1218

- Ganss C, Schlechtriemen M, Klimek J: Dental erosions in subjects living on a raw food diet. *Caries Res* 1999; 33: 74-80
- Ganss C, Schlüter 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
- Ganss C, Schlüter N, Preiss S, Klimek J: Tooth brushing habits in uninstructed adults - frequency, technique, duration and force. *Clin Oral Investig* 2009; 13: 203-208
- Ganss C, Schulze K, Schlüter N: Toothpaste and erosion. *Monogr Oral Sci* 2013; 23: 88-99
- Ganss C, von Hinckeldey J, Tolle A, Schulze K, Klimek J, Schlüter N: Efficacy of the stannous ion and a biopolymer in toothpastes on enamel erosion/abrasion. *J Dent* 2012; 40: 1036-1043
- George R, Chell A, Chen B, Undery R, Ahmed H: Dental erosion and dentinal sensitivity amongst professional wine tasters in South East Queensland, Australia. *SCI World J* 2014; article ID 516975
- Giunta JL: Dental erosion resulting from chewable vitamin C tablets. *J Am Dent Assoc* 1983; 107: 253-256
- Gracia LH, Brown A, Rees GD, Fowler CE: Studies on a novel combination polymer system: In vitro erosion prevention and promotion of fluoride uptake in human enamel. *J Dent* 2010a; 38 Suppl 3: S4-11
- Gracia LH, Rees GD, Brown A, Fowler CE: An in vitro evaluation of a novel high fluoride daily mouthrinse using a combination of microindentation, 3D profilometry and DSIMS. *J Dent* 2010b; 38 Suppl 3: S12-20
- Grippio JO: Abfractions: A new classification of hard tissue lesions of teeth. *J Esthet Dent* 1991; 3: 14-19
- Gross A, Tinanoff N: Effect of SnF₂ mouthrinse on initial bacterial colonization of tooth enamel. *J Dent Res* 1977; 56: 1179-1183
- Gülzow H-J: Präventive Zahnheilkunde. Grundlagen und Möglichkeiten der Karies- und Gingivitisprophylaxe. Hanser, München 1995
- Hannig C, Basche S, Burghardt T, Al-Ahmad A, Hannig M: Influence of a mouthwash containing hydroxyapatite microclusters on bacterial adherence in situ. *Clin Oral Investig* 2013; 17: 805-814
- Hannig M, Hannig C: Nanomaterials in preventive dentistry. *Nat Nanotechnol* 2010; 5: 565-569
- Hara AT, Ando M, Gonzalez-Cabezas C, Cury JA, Serra MC, Zero DT: Protective effect of the dental pellicle against erosive challenges in situ. *J Dent Res* 2006; 85: 612-616
- 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
- Hara AT, Zero DT: The potential of saliva in protecting against dental erosion. *Monogr Oral Sci* 2014; 25: 197-205
- Harks I, Jockel-Schneider Y, Schlagenhauf U, May TW, Gravemeier M, Prior K, Petersilka G, Ehmke B: Impact of the daily use of a microcrystal hydroxyapatite dentifrice on de novo plaque formation and clinical/microbiological parameters of periodontal health. A randomized trial. *PLoS One* 2016; 11: e0160142
- Hartung J, Elpelt BR, Klösener KH: Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik; mit zahlreichen durchgerechneten Beispielen. Oldenbourg, München 2009

- He T, Barker ML, Biesbrock AR, Miner M, Qaqish J, Sharma N: A clinical study to assess the effect of a stabilized stannous fluoride dentifrice on hypersensitivity relative to a marketed sodium fluoride/triclosan control. *J Clin Dent* 2014; 25: 13-18
- Hellwig E, Klimek J, Attin T: Einführung in die Zahnerhaltung. Prüfungswissen Kariologie, Endodontologie und Parodontologie. Dt. Zahnärzte-Verl., Köln 2013
- Hellwig E, Lussi A: Oral hygiene products, medications and drugs - hidden aetiological factors for dental erosion. *Monogr Oral Sci* 2014; 25: 155-162
- Hercules DM, Craig NL: Fluorine and tin uptake by enamel studied by x-ray photoelectron spectroscopy (ESCA). *J Dent Res* 1978; 57: 296-305
- Hooper S, West NX, Pickles MJ, Joiner A, Newcombe RG, Addy M: Investigation of erosion and abrasion on enamel and dentine: A model in situ using toothpastes of different abrasivity. *J Clin Periodontol* 2003; 30: 802-808
- Imfeld T: Dental erosion. Definition, classification and links. *Eur J Oral Sci* 1996; 104: 151-155
- Jacobi F, Hofler M, Strehle J, Mack S, Gerschler A, Scholl L, Busch MA, Maske U, Hapke U, Gaebel W, Maier W, Wagner M, Zielasek J, Wittchen HU: Psychische Störungen in der Allgemeinbevölkerung. Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland und ihr Zusatzmodul Psychische Gesundheit (DEGS1-MH). *Nervenarzt* 2014; 85: 77-87
- Jaeggi T, Lussi A: Prevalence, incidence and distribution of erosion. *Monogr Oral Sci* 2014; 25: 55-73
- Jarvinen V, Meurman J H, Hyvarinen H, Rytomaa I, Murtomaa H: Dental erosion and upper gastrointestinal disorders. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1988; 65: 298-303
- Johansson AK, Lingstrom P, Imfeld T, Birkhed D: Influence of drinking method on tooth-surface pH in relation to dental erosion. *Eur J Oral Sci* 2004; 112: 484-489
- Johnsson M, Richardson CF, Bergey EJ, Levine MJ, Nancollas GH: The effects of human salivary cystatins and statherin on hydroxyapatite crystallization. *Arch Oral Biol* 1991; 36: 631-636
- Joiner A, Schwarz A, Philpotts CJ, Cox TF, Huber K, Hannig M: The protective nature of pellicle towards toothpaste abrasion on enamel and dentine. *J Dent* 2008; 36: 360-368
- Klement R, Haselbeck H: Über Phosphate und Arsenate des zweiwertigen Zinns. *Chemische Berichte* 1963; 96: 1022-1026
- Linkosalo E, Markkanen H: Dental erosions in relation to lactovegetarian diet. *Scand J Dent Res* 1985; 93: 436-441
- Lussi A, Carvalho TS: Erosive tooth wear: a multifactorial condition of growing concern and increasing knowledge. *Monogr Oral Sci* 2014; 25: 1-15
- Lussi A, Carvalho TS: Analyses of the erosive effect of dietary substances and medications on deciduous teeth. *PLoS One* 2015; 10: 1-15
- Lussi A, Hellwig E: Risk assessment and causal preventive measures. *Monogr Oral Sci* 2014; 25: 220-229
- Lussi A, Jaeggi T: Chemical factors. *Monogr Oral Sci* 2006 ; 20: 77-87
- Lussi A, Jaeggi T, Ganß C, Attin T: Dentale Erosionen. Von der Diagnose zur Therapie. Quintessenz, Berlin 2009
- Lussi A, Jaeggi T, Jaeggi-Scharer S: Prediction of the erosive potential of some beverages. *Caries Res* 1995; 29: 349-354

- Lussi A, Jaeggi T, Zero D: The role of diet in the aetiology of dental erosion. *Caries Res* 2004; 38 Suppl 1: 34-44
- Lussi A, Megert B, Shellis RP, Wang X: Analysis of the erosive effect of different dietary substances and medications. *Br J Nutr* 2012; 107: 252-262
- Lussi A, Schaffner M, Hotz P, Suter P: Dental erosion in a population of Swiss adults. *Community Dent Oral Epidemiol* 1991; 19: 286-290
- Lussi A, Schlüter N, Rakhmatullina E, Ganss C: Dental erosion - an overview with emphasis on chemical and histopathological aspects. *Caries Res* 2011; 45 Suppl 1: 2-12
- Magalhaes A C, Wiegand A, Rios D, Buzalaf MA, Lussi A: Fluoride in dental erosion. *Monogr Oral Sci* 2011; 22: 158-170
- Margaritis V, Nunn J: Challenges in assessing erosive tooth wear. *Monogr Oral Sci* 2014; 25: 46-54
- Marinho VC, Worthington HV, Walsh T, Clarkson JE: Fluoride varnishes for preventing dental caries in children and adolescents. *Cochrane Database Syst Rev* 2013; 1-93 Cd002279
- Matzker J, Schreiber J: Synthetischer Speichel zur Therapie der Hyposaliven, insbesondere bei der radiogenen Sialadenitis. *Z Laryng Rhinol* 1972; 51: 422-428
- Mese H, Matsuo R: Salivary secretion, taste and hyposalivation. *J Oral Rehabil* 2007; 34: 711-723
- Meurman JH, Murtomaa H: Effect of effervescent vitamin C preparations on bovine teeth and on some clinical and salivary parameters in man. *Scand J Dent Res* 1986; 94: 491-499
- Miller S, Truong T, Heu R, Stranick M, Bouchard D, Gaffar A: Recent advances in stannous fluoride technology: Antibacterial efficacy and mechanism of action towards hypersensitivity. *Int Dent J* 1994; 44: 83-98
- 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
- Moazzez R, Bartlett D: Intrinsic causes of erosion. *Monogr Oral Sci* 2014; 25: 180-196
- Muhler J C: The effect of a modified stannous fluoride-calcium pyrophosphate dentifrice on dental caries in children. *J Dent Res* 1958; 37: 448-450
- Nekrashevych Y, Stösser L: Protective influence of experimentally formed salivary pellicle on enamel erosion. An in vitro study. *Caries Res* 2003; 37: 225-231
- Nelson KG, Bainbridge CA: SnHPO_4 from the reaction of stannous fluoride and hydroxyapatite at a low pH. *J Dent Res* 1973; 52: 318-321
- Ni LX, He T, Chang A, Sun L: The desensitizing efficacy of a novel stannous-containing sodium fluoride dentifrice: An 8-week randomized and controlled clinical trial. *Am J Dent* 2010; 23 Spec No B: 17b-21b
- Nikiforuk G: Understanding dental caries: Etiology and mechanisms. Basic and clinical aspects. Karger, Basel 1985
- Ohrn R, Enzell K, Angmar-Mansson B: Oral status of 81 subjects with eating disorders. *Eur J Oral Sci* 1999; 107: 157-163
- Ota K, Kikuchi S, Beierle JW: Stannous fluoride and its effects on oral microbial adhesive properties in vitro. *Pediatr Dent* 1989; 11: 21-25
- Pace F, Pallotta S, Tonini M, Vakil N, Bianchi Porro G: Systematic review: Gastro-oesophageal reflux disease and dental lesions. *Aliment Pharmacol Ther* 2008; 27: 1179-1186

- Parry J, Shaw L, Arnaud MJ, Smith AJ: Investigation of mineral waters and soft drinks in relation to dental erosion. *J Oral Rehabil* 2001; 28: 766-772
- Peutzfeldt A, Jaeggi T, Lussi A: Restorative therapy of erosive lesions. *Monogr Oral Sci* 2014; 25: 253-261
- Poggio C, Lombardini M, Colombo M, Bianchi S: Impact of two toothpastes on repairing enamel erosion produced by a soft drink: an AFM in vitro study. *J Dent* 2010; 38: 868-874
- Ramalingam L, Messer LB, Reynolds EC: Adding casein phosphopeptide-amorphous calcium phosphate to sports drinks to eliminate in vitro erosion. *Pediatr Dent* 2005; 27: 61-67
- Rees J, Hughes J, Innes C: An in vitro assessment of the erosive potential of some white wines. *Eur J Prosthodont Restor Dent* 2002; 10: 37-42
- Reich E, Schmalz G, Bergmann RL, Bergler H, Bergmann KE: Kariesbefall von Kindern nach unterschiedlich langer Applikation von Fluoridtabletten. *Dtsch Zahnärztl Z* 1992; 47: 232-234
- Rogalla K, Finger W, Hannig M: Influence of buffered and unbuffered acetylsalicylic acid on dental enamel and dentine in human teeth: An in vitro pilot study. *Methods Find Exp Clin Pharmacol* 1992; 14: 339-346
- Roveri N, Battistella E, Bianchi CL, Foltran I, Foresti E, Iafisco M, Lelli M, Naldoni A, Palazzo B, Rimondini L: Surface enamel remineralization: Biomimetic apatite nanocrystals and fluoride ions different effects. *J Nanomater* 2009; Article ID 746383
- Rytomaa I, Jarvinen V, Kanerva R, Heinonen OP: Bulimia and tooth erosion. *Acta Odontol Scand* 1998; 6: 36-40
- Schiff T, He T, Sagel L, Baker R: Efficacy and safety of a novel stabilized stannous fluoride and sodium hexametaphosphate dentifrice for dentinal hypersensitivity. *J Contemp Dent Pract* 2006; 7: 1-8
- Schiffner U: Grundlagen der Fluoridanwendung. *Oralprophylaxe* 2001, 23: 23-26
- Schiffner U: Fluorid in der Kariesprophylaxe - Grundlagen und Konzept. *ZWR* 2007; 116: 165-174
- Schiffner U: Was taugt das Zahnwunder aus der Tube [Online]. Spiegel Online. Available: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/medizin/biorepair-was-taugt-das-zahnwunder-aus-der-tube-a-1028057.html> 2015 (Stand: 13.01.2016).
- Schipper R G, Silletti E, Vingerhoeds M H: Saliva as research material: biochemical, physicochemical and practical aspects. *Arch Oral Biol* 2007; 52: 1114-1135
- Schlüter N, Duran A, Klimek J, Ganss C: Investigation of the effect of various fluoride compounds and preparations thereof on erosive tissue loss in enamel in vitro. *Caries Res* 2009a; 43: 10-16
- Schlüter N, Hardt M, Lussi A, Engelmann F, Klimek J, Ganss C: Tin-containing fluoride solutions as anti-erosive agents in enamel: An in vitro tin-uptake, tissue-loss, and scanning electron micrograph study. *Eur J Oral Sci* 2009b; 117: 427-434
- Schlüter 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
- Schlüter N, Neutard L, von Hinckeldey J, Klimek J, Ganss C: Tin and fluoride as anti-erosive agents in enamel and dentine in vitro. *Acta Odontol Scand* 2010; 68: 180-184
- Schlüter N, Tveit AB: Prevalence of erosive tooth wear in risk groups. *Monogr Oral Sci* 2014; 25: 74-98

- Schmidlin PR, Sahrman P: Current management of dentin hypersensitivity. Clin Oral Investig 2013; 17 Suppl 1: 55-59
- Schroeder HE: Orale Strukturbioogie: Entwicklungsgeschichte, Struktur und Funktion normaler Hart- und Weichgewebe der Mundhöhle und des Kiefergelenks. Thieme, Stuttgart 2000
- Shellis RP, Addy M: The interactions between attrition, abrasion and erosion in tooth wear. Monogr Oral Sci 2014; 25: 32-45
- Shellis RP, Featherstone JD, Lussi A: Understanding the chemistry of dental erosion. Monogr Oral Sci 2014; 25: 163-179
- Shellis RP, Ganss C, Ren Y, Zero D T, Lussi A: Methodology and models in erosion research: Discussion and conclusions. Caries Res 2011; 45 Suppl 1: 69-77
- Smith BG, Knight JK: An index for measuring the wear of teeth. Br Dent J 1984; 156: 435-438
- Sorvari R, Meurman JH, Alakuijala P, Frank RM: Effect of fluoride varnish and solution on enamel erosion in vitro. Caries Res 1994; 28: 227-232
- Stephen KW, Mccrossan J, Mackenzie D, Macfarlane CB, Speirs CF: Factors determining the passage of drugs from blood into saliva. Br J Clin Pharmacol 1980; 9: 51-55
- Stokes DJ: Principles and practice of variable pressure/environmental scanning electron microscopy (VP-ESEM). Wiley, Chichester 2008
- Strub JR, Kern M, Türp JC, Witkowski S, Heydecke G, Wolfart S: Curriculum Prothetik, Band 1. 4. Aufl. Quintessenz, Berlin 2013
- Sullivan RE, Kramer WS: Iatrogenic erosion of teeth. J Dent Child 1983; 50: 192-196
- Sundaram G, Wilson R, Watson TF, Bartlett D: Clinical measurement of palatal tooth wear following coating by a resin sealing system. Oper Dent 2007; 32: 539-543
- Taylor G, Taylor S, Abrams R, Mueller W: Dental erosion associated with asymptomatic gastroesophageal reflux. J Dent Child 1992; 59: 182-185
- Ten Cate JM: Review on fluoride, with special emphasis on calcium fluoride mechanisms in caries prevention. Eur J Oral Sci 1997; 105: 461-465
- Ten Cate JM, Imfeld T: Dental erosion, summary. Eur J Oral Sci 1996; 104: 241-244
- Thian ES, Konishi T, Kawanobe Y, Lim PN, Choong C, Ho B, Aizawa M: Zinc-substituted hydroxyapatite: A biomaterial with enhanced bioactivity and antibacterial properties. J Mater Sci Mater Med 2013; 24: 437-445
- Tinanoff N: Progress regarding the use of stannous fluoride in clinical dentistry. J Clin Dent 1995; 6: 37-40
- Tschoppe P, Zandim DL, Martus P, Kielbassa AM: Enamel and dentine remineralization by nano-hydroxyapatite toothpastes. J Dent 2011; 39: 430-437
- Tucker K, Adams M, Shaw L, Smith AJ: Human enamel as a substrate for in vitro acid dissolution studies: Influence of tooth surface and morphology. Caries Res 1998; 32: 135-140
- Tuominen ML, Tuominen RJ, Fubusa F, Mgalula N: Tooth surface loss and exposure to organic and inorganic acid fumes in workplace air. Community Dent Oral Epidemiol 1991; 19: 217-220
- Voronets J, Lussi A: Thickness of softened human enamel removed by toothbrush abrasion: An in vitro study. Clin Oral Investig 2010; 14: 251-256

- Waldmeyer M: Erosionen an permanenten Zähnen bei Hamburger Schülerinnen und Schülern. Med Diss, Hamburg 2012
- Walsh T, Worthington HV, Glenny AM, Appelbe P, Marinho VC, Shi X: Fluoride toothpastes of different concentrations for preventing dental caries in children and adolescents. *Cochrane Database Syst Rev* 2010: Cd007868
- Wei SH, Forbes WC: Electron microprobe investigations of stannous fluoride reactions with enamel surfaces. *J Dent Res* 1974; 53: 51-56
- West NX, Davies M, Amaechi BT: In vitro and in situ erosion models for evaluating tooth substance loss. *Caries Res* 2011; 45 Suppl 1: 43-52
- West NX, Maxwell A, Hughes JA, Parker DM, Newcombe RG, Addy M: A method to measure clinical erosion: the effect of orange juice consumption on erosion of enamel. *J Dent* 1998; 26: 329-335
- Wiegand A, Attin T: Occupational dental erosion from exposure to acids: A review. *Occup Med* 2007; 57: 169-176
- Wiegand A, Attin T: Einsatz von Fluoriden in der Prävention von dentalen Erosionen. *Oralprophylaxe Kinderzahnheilk* 2010; 32: 28-32
- Wiegand A, Attin T: Design of erosion/abrasion studies - insights and rational concepts. *Caries Res* 2011; 45 Suppl 1: 53-59
- Wiegand A, Begic M, Attin T: In vitro evaluation of abrasion of eroded enamel by different manual, power and sonic toothbrushes. *Caries Res* 2006; 40: 60-65
- Wiegand A, Bliggenstorfer S, Magalhaes AC, Sener B, Attin T: Impact of the in situ formed salivary pellicle on enamel and dentine erosion induced by different acids. *Acta Odontol Scand* 2008a; 66: 225-230
- Wiegand A, Burkhard JP, Eggmann F, Attin T: Brushing force of manual and sonic toothbrushes affects dental hard tissue abrasion. *Clin Oral Investig* 2013; 17: 815-822
- Wiegand A, Egert S, Attin T: Toothbrushing before or after an acidic challenge to minimize tooth wear? An in situ/ex vivo study. *Am J Dent* 2008b; 21: 13-16
- Wiegand A, Schlüter N: The role of oral hygiene: Does toothbrushing harm? *Monogr Oral Sci* 2014; 25: 215-219
- Wiktorsson AM, Zimmerman M, Angmar-Mansson B: Erosive tooth wear: Prevalence and severity in Swedish winetasters. *Eur J Oral Sci* 1997; 105: 544-550
- Williamson DA, Martin CK, Stewart T: Psychological aspects of eating disorders. *Best Pract Res Clin Gastroenterol* 2004; 18: 1073-1088
- Young A, Smistad G, Karlsen J, Rölla G, Rykke M: Zeta potentials of human enamel and hydroxyapatite as measured by the Coulter DELSA 440. *Adv Dent Res* 1997; 11: 560-565
- Young A, Tenuta LM: Initial erosion models. *Caries Res* 2011 ; 45 Suppl 1: 33-42
- Zero DT, Lussi A: Behavioral factors. *Monogr Oral Sci* 2006; 20: 100-105

9 Anhang

9.1 Materialienliste

- Mat. 1: Exakt-Trennschleifsystem, Exakt-Apparatebau Otto Herrmann, Norderstedt (D)
- Mat. 2: Exakt-Mikroschleifsystem, Exakt-Apparatebau Otto Herrmann, Norderstedt (D)
- Mat. 3: Vakuumpumpe Laboport N86, KNF, Freiburg i.Br. (D)
- Mat. 4: Schleifpapier WS-Flex 18-C P 1200, Hermes (D)
Schleifpapier WS-Flex 18-C P 2500, Hermes (D)
Schleifpapier WS-Flex 18-C P 220, Hermes (D)
- Mat. 5: Silicon Carbide 1200/4000, 3M, St. Paul/Minnesota (USA)
- Mat. 6: Kühlschrank, Liebherr, Bulle (CH)
- Mat. 7: PM 4600 DeltaRange, Mettler-Toledo, Gießen (D),
- Mat. 8: Magnetrührer MR 2002 Heidolph, Schwabach (D)
- Mat. 9: Schüttelwasserbad Thermolab, GFL, Burgwedel (D)
- Mat. 10: Plastikbehälter JÄMKA, Ikea, Leiden (NL)
- Mat. 11: Mess- und Rührgläser, Schott u. Gen Mainz (D)
- Mat. 12: pH-Meter SA 720 Orion, Beverly (USA)
- Mat. 13: Parafilm M, American National Can, Greenwich (USA)
- Mat. 14: Pipet Lite, Rainin, Oakland (USA)
- Mat. 15: Oral-B Professional Care Type: 4729, Braun, Kronberg im Taunus (D)
- Mat. 16: Legosteine und Platten, Lego, Billund (DK)
- Mat. 17: Oral-B Senitive Clean, Braun, Kronenberg im Taunus (D)
- Mat. 18: Objektträger, Walter Messner, Oststeinbeck (D)
- Mat. 19: Kunststoffröhren 12ml, 40x23,5 mm, Sarstedt, Nümbrecht (D)
- Mat. 20: Mikroskop Axiophot, Zeiss, Oberkochen (D)
- Mat. 21: Rasterelektronenmikroskop, Quanta FEG 250, Fei, Eindhoven (NL)
- Mat. 22: Laserscanningmikroskop VK-8700K, Keyence, Osaka (J)

9.2 Chemikalienliste

Mat. 23:	Natriumchlorid, Merk, Darmstadt (D)
Mat. 24:	Kaliumchlorid, Roth, Karlsruhe (D)
Mat. 25:	di-Kaliumhydrogenphosphat-Trihydrat, Merk, Darmstadt (D)
Mat. 26:	Calciumchlorid-2-hydrat krist., Merk, Darmstadt (D)
Mat. 27:	Zitronensäure, Roth, Karlsruhe (D)
Mat. 28:	Salzsäure (1 N), Roth, Karlsruhe (D)
Mat. 29:	Technovit 4000, Heraeus Kluzer, Wehrheim (D)
Mat. 30:	Pufferlösung pH 9.21 (+- 0.02), Mettler Toledo, Schwerzenbach (CH)
Mat. 31:	Pufferlösung pH 7 (+- 0.02), Mettler Toledo, Schwerzenbach (CH)
Mat. 32:	Natriumchlorid-Tabletten 9g, Merk, Darmstadt (D)
Mat. 33:	Complete Salon Manicure, Sally Hansen, (Sp)
Mat. 34:	Kinderzahngel, Weleda, Schwäbisch Gmünd (D)
Mat. 35:	BioRepair, Dr. Wolff, Bielefeld (D)
Mat. 36:	ProSchmelz, GlaxoSmithKline, Bühl (D)
Mat. 37:	Elmex Erosionsschutz, GABA, Therwil (CH)
Mat. 38:	Roti-Histofix 4 %, Roth, Karlsruhe (D)
Mat. 39	Elina Nagellackentferner, Jean, Karsbach (D)

9.3 Software

Mat. 40	NSS 3, Thermo Fisher Scientific, Madison (USA)
Mat. 41	VK Viewer/Analyzer Keyence, Osaka (J)
Mat. 42	SPSS 22, IBM, Armonk (USA)
Mat. 43	Excel, Microsoft Office, Redmond (USA)

9.4 Deklarierte Inhaltsstoffe der verwendeten Mundspüllösungen

Mundspüllösung A: Elmex Erosionsschutz

Ingredients: Aqua, Glycerin, Sodium Gluconate, PEG-40 Hydrogenated Castor Oil, Olaflur, Aroma, Stannous Chloride, Sodium Fluoride, Cocamidopropyl Betaine, Sodium Saccharin, Hydrochloric Acid.

Fluoridgehalt: 500ppm

Mundspüllösung B: ProSchmelz

Ingredients: Aqua, Glycerin, Sorbitol, Poloxamer 338, PEG-60 Hydrogenated Castor Oil, VP/VA Copolymer, Potassium Nitrate, Sodium Benzoate, Cellulose Gum, Aroma, Sodium Fluoride, Methylparaben, Propylparaben, Cetylpyridinium Chloride, Sodium Saccharin, Xanthan Gum, Disodium Phosphate, Sodium Phosphate, CL 42090.

Fluoridgehalt 450ppm.

Mundspüllösung C: BioRepair

Ingredients: Aqua, Sorbitol, Alcohol Denat, Glycerin, Xylitol, Cellulose Gum, Zinc PCA, Zinc Hydroxyapatite, Aroma, Sodium Lauryl Sulfate, Silica, Ricinus Communis Seed Oil, Ammonium Acryloyldimethyltaurate/VP Copolymer, Sodium Saccharin, Sodium Benzoate, Sodium Myristoyl Sarcosinate, Sodium Methyl Cocoyl Taurate, Benzyl Alcohol, Phenoxyethanol, Limonene.

9.5 Messergebnisse

9.5.1 Messungen des Zahnhartsubstanzverlustes

Versuchsteil 1 (Abtrag in μm)

Probennr.	Abtrag
A_9_2	31,05405055
A_10	37,9727846
A_11	29,52354452
A_12	24,532561
A_13	31,2755163
A_14	24,085068
A_15	19,0375626
A_16	28,5783684
A_17	19,0124052
A_18	31,0166065
A_19	22,1071923
A_20	21,97159857
A_21	21,9008123
A_22	22,0723121
B_9	25,4778854
B_10	28,4917667
B_11	26,8491765
B_12	21,2112185
B_13	18,8922665
B_14	17,149542
B_15	19,1862412
B_16	22,1924906
B_17	19,1420527
B_18	21,9894762
B_19	22,5805104
B_20	18,7905456
B_21	23,9051735
B_22	20,6223071

Probennr.	Abtrag
C_9	67,6884882
C_10	57,7541266
C_11	67,4166377
C_12	69,3863985
C_13	58,7961653
C_14	62,6022782
C_15	61,0897808
C_16	57,6965858
C_17	57,3699709
C_18	56,05768
C_19	59,0953897
C_20	57,0231756
C_21	59,8664986
C_22	53,7071799
D_9	83,9697702
D_10	71,0555912
D_11	68,2005819
D_12	56,0112006
D_13	51,3823709
D_14	47,5709399
D_15	57,0830368
D_16	55,3623983
D_17	61,3838258
D_18	46,3965764
D_19	66,079944
D_20	58,3940071
D_21	57,4815041
D_22	57,1997823

Versuchsteil 2 (Abtrag in μm)

Probennr.	Abtrag
2_A_3	24,778711
2_A_4	23,9534837
2_A_5	18,2783262
2_A_6	15,4392023
2_A_7	nicht messbar
2_A_8	11,2622342
2_A_9	15,2388906
2_A_10	14,3458501
2_A_11	9,61153514
2_A_12	17,479793
2_A_13	20,4338016
2_A_14	14,9275832
2_A_15	16,4783001
2_A_16	16,3074775
2_A_17	14,9640856
2_A_18	18,6945489
2_A_19	17,143994
2_A_20	16,9207884
2_B_3	nicht messbar
2_B_4	19,9743811
2_B_5	15,1349732
2_B_6	18,6803074
2_B_7	18,5974634
2_B_8	28,8110926
2_B_9	18,1821521
2_B_10	29,1116276
2_B_11	nicht messbar
2_B_12	12,6645051
2_B_13	14,2728148
2_B_14	14,9067963
2_B_15	nicht messbar
2_B_16	15,371563
2_B_17	14,4213975
2_B_18	16,7124152
2_B_19	11,2297792
2_B_20	19,0096517

Probennr.	Abtrag
2_C_3	56,8815067
2_C_4	47,2689544
2_C_5	51,5047639
2_C_6	45,265006
2_C_7	37,3851897
2_C_8	62,1326806
2_C_9	nicht messbar
2_C_10	45,4323895
2_C_11	58,5777357
2_C_12	62,5095568
2_C_13	49,7669455
2_C_14	46,6889467
2_C_15	44,0652068
2_C_16	46,5088256
2_C_17	44,8975951
2_C_18	41,2938198
2_C_19	52,0825783
2_C_20	51,3085547
2_D_3	40,2123929
2_D_4	47,2703137
2_D_5	45,0295436
2_D_6	48,0318322
2_D_7	64,0434804
2_D_8	39,6747032
2_D_9	54,5748314
2_D_10	36,1953354
2_D_11	51,3452235
2_D_12	52,9689082
2_D_13	45,0120122
2_D_14	43,3314812
2_D_15	52,0466442
2_D_16	42,7682831
2_D_17	40,460816
2_D_18	32,2386071
2_D_19	46,5773865
2_D_20	43,340787

9.5.2 EDX-Quantifizierungsergebnisse

Die folgenden Tabellen geben einen Überblick über die gemessenen charakteristischen Elemente der jeweiligen Mundspüllösungen. Die Werte entsprechen den Ergebnissen aus der Quantifizierung der EDX-Spektren, gemessen an der Zahnoberfläche.

Mundspüllösung A	Zinn angegeben in Gewichts- konzentration (%)	Gewichts- prozentfehler	Fluor angegeben in Gewichts- konzentration (%)	Gewichts- prozentfehler
	41,91	+/- 2,43	Nicht messbar	
	40,13	+/- 2,46	Nicht messbar	
	50,37	+/- 2,25	Nicht messbar	
	46,24	+/- 1,27	Nicht messbar	
	42,33	+/- 5,46	Nicht messbar	
	51,19	+/- 2,63	Nicht messbar	
	45,88	+/- 2,43	Nicht messbar	
	43,55	+/- 2,64	Nicht messbar	
	48,48	+/- 2,22	Nicht messbar	
	35,42	+/- 2,22	Nicht messbar	
	35,04	+/- 2,36	0,30	+/- 0,33
	45,07	+/- 3,23	Nicht messbar	
	44,72	+/- 1,46	Nicht messbar	
	57,89	+/- 1,30	Nicht messbar	
	59,22	+/- 2,62	Nicht messbar	
	57,75	+/- 2,53	Nicht messbar	
	51,23	+/- 1,59	Nicht messbar	
	50,16	+/- 2,85	Nicht messbar	
	44,21	+/- 1,20	Nicht messbar	

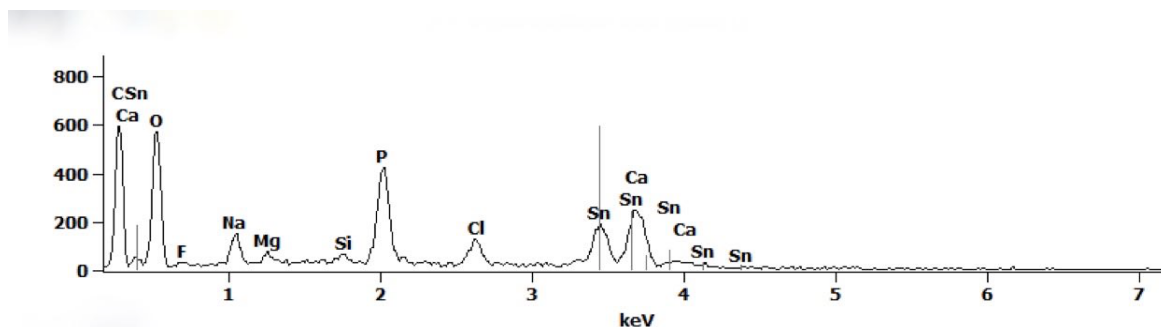
Mundspüllösung B	Fluor angegeben in Gewichtskonzentration (%)	Gewichts- prozentfehler
	0,03	+/- 0,42
	0,59	+/- 0,23
	0,63	+/- 0,26
	0,69	+/- 0,20
	0,80	+/- 0,23
	0,66	+/- 0,24
	0,26	+/- 0,28
	0,29	+/- 0,23
	0,27	+/- 0,22
	0,65	+/- 0,29
	0,06	+/- 0,30
	0,66	+/- 0,27
	0,49	+/- 0,26

Mundspüllösung C	Zink angegeben in Gewichtskonzentration (%)	Gewichts- prozentfehler
	1,52	+/- 0,11
	1,27	+/- 0,20
	0,44	+/- 0,18
	0,82	+/- 0,20
	1,00	+/- 0,19
	1,19	+/- 0,21
	1,78	+/- 0,21
	1,48	+/- 0,21

9.5.3 EDX-Spektren

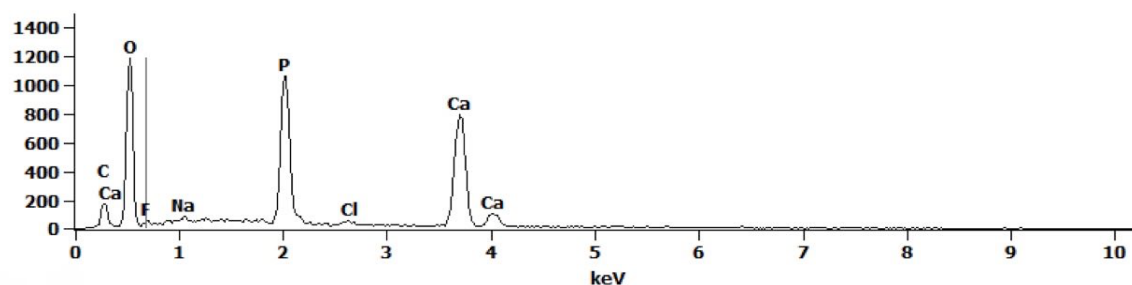
Nachfolgend sind zu jeder Untersuchungsgruppe exemplarische EDX-Spektren mit dazugehöriger Element-Quantifizierung abgebildet.

9.5.3.1 Exemplarische Probe aus Gruppe A



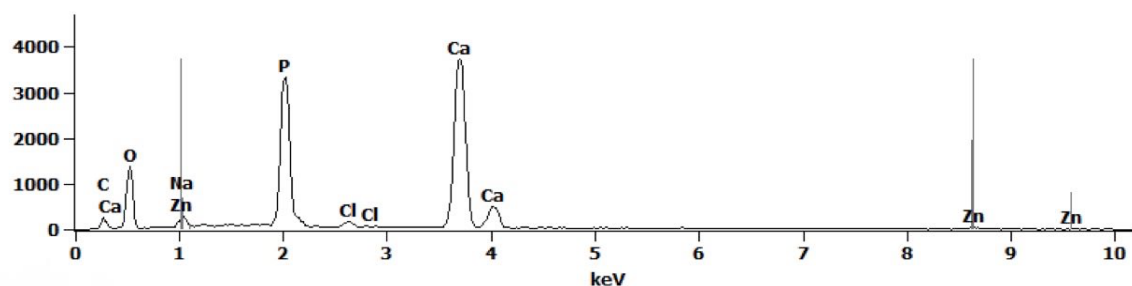
Element Linie	Gew.- Konz %	Gew. % Fehler	Atom Konz %	Atom- % Fehler	Formel	Verb. Konz %
C K	---	---	---	---	(null)	---
O K	25.38S	---	51.70	± 3.00	(null)	---
F K	0.30	± 0.33	0.51	± 1.12	F	0.30
Na K	3.35	± 0.12	4.75	± 0.35	Na ₂ O	4.52
Mg K	1.07	± 0.10	1.43	± 0.26	MgO	1.77
Si K	---	---	---	---	(null)	---
Si L	---	---	---	---	(null)	---
P K	13.01	± 0.22	13.69	± 0.47	P ₂ O ₅	29.82
P L	---	---	---	---	(null)	---
Cl K	5.04	± 0.19	4.63	± 0.35	Cl	5.04
Cl L	---	---	---	---	(null)	---
Ca K	16.81	± 0.50	13.67	± 0.82	CaO	23.52
Ca L	---	---	---	---	(null)	---
Sn L	35.04	± 2.36	9.62	± 1.30	Sn	35.04
Sn M	---	---	---	---	(null)	---
Total	100.00		100.00			100.00

9.5.3.2 Exemplarische Probe aus Gruppe B



Element Linie	Gew.- Konz %	Gew. % Fehler	Atom Konz %	Atom- % Fehler	Formel	Verb. Konz %
C K	---	---	---	---	(null)	---
O K	39.42S	---	59.55	± 1.67	(null)	---
F K	0.80	± 0.23	1.01	± 0.57	F	0.80
Na K	0.44	± 0.06	0.46	± 0.13	Na ₂ O	0.59
P K	17.75	± 0.25	13.85	± 0.38	P ₂ O ₅	40.66
Pl	---	---	---	---	(null)	---
Cl K	0.64	± 0.08	0.44	± 0.11	Cl	0.64
Cl L	---	---	---	---	(null)	---
Ca K	40.96	± 0.60	24.70	± 0.72	CaO	57.32
Ca L	---	---	---	---	(null)	---
Total	100.00		100.00			100.00

9.5.3.3 Exemplarische Probe aus Gruppe C



Element Linie	Gew.- Konz %	Gew. % Fehler	Atom Konz %	Atom- % Fehler	Formel	Verb. Konz %
C K	---	---	---	---	(null)	---
O K	39.80S	---	60.19	± 1.43	(null)	---
Na K	1.24	± 0.11	1.30	± 0.24	Na ₂ O	1.67
P K	18.39	± 0.17	14.36	± 0.26	P ₂ O ₅	42.13
Pl	---	---	---	---	(null)	---
Cl K	0.75	± 0.04	0.51	± 0.05	Cl	0.75
Cl L	---	---	---	---	(null)	---
Ca K	38.05	± 0.26	22.97	± 0.32	CaO	53.24
Ca L	---	---	---	---	(null)	---
Zn K	1.78	± 0.21	0.66	± 0.15	ZnO	2.21
Zn L	---	---	---	---	(null)	---
Total	100.00		100.00			100.00

10 Danksagung

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. Ulrich Schiffner für die Überlassung des Themas sowie die sehr produktiven Diskussionen und Hilfestellungen, die zur Vollendung dieser Dissertation führten.

Bedanken möchte ich mich bei allen, die mich bei meinem Promotionsvorhaben unterstützt haben, insbesondere bei der Praxis von Herrn Dr. Dr. Eißing und Herrn Dr. Dr. Vaal für die Bereitstellung der Versuchsproben, meinem Vater für die Bereitstellung des technischen Instrumentariums und die vielen Diskussionen sowie bei Herrn Fischer für die Unterstützung im Labor der Zahnerhaltung am UKE.

Ein besonderer Dank gilt meiner lieben Frau, die mich immer motivierend unterstützt hat.

11 Lebenslauf

Der Lebenslauf ist aus datenschutzrechtlichen Gründen nicht enthalten.

12 Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Ich erkläre mich einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

Unterschrift: