

Vergleich von der Profilometrie, Kalzium- und Phosphatanalyse zur
quantitativen Bestimmung erosiver Mineralverluste

Inauguraldissertation

Zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnheilkunde
des Fachbereichs Humanmedizin
der Justus-Liebig-Universität Giessen

Vorgelegt von Marcus A. Köster
aus Dortmund

Giessen 2009

Aus dem Medizinischen Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Poliklinik für Zahnerhaltungskunde und Präventive Zahnheilkunde

Leiter: Prof. Dr. J. Klimek
des Universitätsklinikums Gießen

Gutachter: Prof. Dr. Ganss

Gutachter: Prof. Dr. Schneider

Tag der Disputation: 05.05.2009

Für meine Eltern

„Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbständig, ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.“

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Einleitung	3
2	Literaturübersicht	4
2.1	Aufbau des Zahnschmelzes	4
2.2	Erosion	5
2.2.1	Definition der Erosion	5
2.2.2	Erscheinungsbild der Erosion	6
2.2.3	Epidemiologie	7
2.2.4	Ätiologie der Erosion	9
2.2.4.1	Extrinsische Faktoren	9
2.2.4.2	Intrinsische Faktoren	12
2.2.5	Therapie und Prophylaxe der Erosion	14
2.2.6	Meßmethoden zur Feststellung von Erosionen	15
2.2.7	Fragestellung	21
3	Material und Methode	23
3.1	Versuchsaufbau	23
3.1.1	Vorbereitung der Schmelzproben	23
3.1.2	Herstellen der Schmelzschliffe	24
3.1.3	Erzeugung von Erosionen	26
3.2	Profilometrie	27
3.3	Kalzium- und Phosphat-Analyse	30
3.4	Statistische Auswertung	31
3.5	Materialien- und Chemikalienliste	31
4	Ergebnisse	34
4.1	Allgemeines	34
4.2	Deskriptive Betrachtung und Vergleich der Messmethoden	34
4.3	Zusammenhang und Übereinstimmung der Messmethoden	36
4.4	Verhältnis von Kalzium und Phosphat in der Erosionslösung	40
5	Diskussion	42
5.1	Versuchsaufbau- und Durchführung	42
5.1.1	Probenmaterial und Erzeugung der Erosionen	42
5.1.2	Betrachtung der Methoden	43

5.1.2.1	Profilometrie	44
5.1.2.2	Chemische Testverfahren	47
5.2	Diskussion der Ergebnisse	47
5.2.1	Charakteristik des erosiven Mineralverlustes	47
5.2.2	Vergleich der Messergebnisse aus Phosphat und Kalzium mit der Profilometrie	51
5.3	Goldstandard	53
6	Zusammenfassung	59
6.1	Zusammenfassung	59
6.2	Abstract	61
7	Literaturverzeichnis	63
8	Anhang	72

1 Einleitung

Die Erosion der Zähne stellt einen oberflächlichen Substanzverlust durch Einwirkung von Säuren dar, welche nicht das Produkt der intraoralen Bakterienflora sind [Imfeld, 1983].

Hierbei kann es sich um exogene Säuren handeln wie sie in Getränken, Lebensmitteln, Medikamenten, Vitaminpräparaten und Säuredämpfen zu finden sind, oder um endogene Säuren wie der Magensäure [Meurman und ten Cate, 1996].

Zur Bestimmung erosiver Mineralverluste wurde eine Vielzahl von Methoden entwickelt [Grenby 1996]. Auch wenn die Bandbreite von Vor- und Nachteilen der einzelnen Methoden eine besondere Empfehlung für alle Versuchsreihen ausschließt, so können dennoch bestimmte Anforderungen formuliert werden. Um zum Beispiel die Pathophysiologie der Erosion aufzuklären, sollten nicht destruktive Methoden zur Anwendung kommen, die auch den direkten Vergleich von in vitro und in situ Versuchen ermöglichen sollten. Bislang sind allerdings keine vergleichenden Untersuchungen von Meßmethoden publiziert, so dass deren Bewertung ebenso wie der Vergleich von Studien aus der Erosionsforschung schwierig ist. Neben der Messung des Härtegrades ist eine der am häufigsten verwendeten Methoden die Profilometrie, die, wie die chemischen Testverfahren zwar bereits als „Goldstandard“ bezeichnet werden (Ten Bosch und Angmar-Manson, 1991 sowie Hall et al., 1997), jedoch bislang nicht standardisiert ist.

Als Teil einer größeren Studie war es Ziel der vorliegenden Untersuchung, erosive Mineralverluste im Schmelz mit einer Methode zur Darstellung der Oberflächengeometrie (Profilometrie) und zwei Methoden zur Bestimmung des gelösten Minerals (Kalzium- und Phosphatanalyse) zu bestimmen und die Ergebnisse vergleichend zu diskutieren.

2 Literaturübersicht

2.1 Aufbau des Zahnschmelzes

Der Zahnschmelz wird von den Ameloblasten gebildet, die eine Schmelzmatrix ausscheiden, welche mineralisiert und ausreift. Währenddessen findet eine Kristallisation von Kalzium-Phosphat-Verbindungen statt. Diese Kristallisation und das anschließende Wachstum der Kristallite wird als präeruptive Schmelzreifung bezeichnet, die allerdings Mikroporositäten zwischen den Kristalliten und Ionendefekte in ihren Gitterstrukturen aufweist.

Nach dem Zahndurchbruch werden diese Mängel weitestgehend durch die posteruptive Schmelzreifung ausgeglichen. Der Zahnschmelz unterliegt nach seiner Bildung keinem zellulären Reparaturmechanismus.

Seine mittlere Dichte schwankt zwischen 2,8 und 3,0. Seine Härte liegt im Durchschnitt zwischen 250 KHN (Knoop-hardness numbers) an der Schmelz-Dentin-Grenze und 390 KHN an der Schmelzoberfläche [Hellwig et al., 1999].

Schmelz besteht zu 95 Gew.- % aus mineralischen Stoffen wie Kalzium und Phosphat (Gewichtsverhältnis Ca : P - 2:1) sowie in geringer Menge aus Natrium, Magnesium, Chlor, Kalium und Spurenelementen. Das Schmelzmineral liegt hauptsächlich als Hydroxylapatit ($\text{Ca}_{10}[\text{PO}_4]_6[\text{OH}]_2$) vor, dessen Hydroxylgruppen durch Fluorid substituiert werden können. Das kariesprophylaktisch wichtige Spurenelement Fluor kommt hauptsächlich in der oberflächlichen 50 µm dicken Schmelzschicht in einer Konzentration von 300 bis 1200 ppm vor. Der Fluoridgehalt ist abhängig von verschiedenen Faktoren wie etwa dem Fluoridgehalt des Trinkwassers, der Nahrungsmittel und dem von Mundhygieneprodukten. Weiterhin spielen auch das Alter, der Zahntyp und die Schmelzfläche eine Rolle.

Zusätzlich kommt Wasser mit einem Anteil von 4 Gew.-% im Schmelz vor. Das Wasser ist zum größten Teil an die Apatitkristallite gebunden (Hydratationsschale), der übrige Teil befindet sich in der organischen Matrix, die mit etwa einem Gewichtsprozent im Schmelz verteilt ist. Die Matrix besteht aus löslichen und unlöslichen Proteinen, Kohlenhydraten und Lipiden.

Das Gerüst des Schmelzes bilden die Schmelzprismen, wobei jedes dieser Prismen einem Ameloblasten (Zellfortsatz) entspricht. Die einzelnen Schmelzprismen winden sich ohne Unterbrechung von der Schmelz-Dentingrenze bis zur Schmelzoberfläche, wobei der Prismenquerschnitt (ca. 5-10 µm) zur Oberfläche hin zunimmt. Die Bausteine der

Schmelzprismen bilden die Kristallite, welche 500-1000 nm lang und 5-10 nm breit sind. Zahnschmelz ist in Säuren löslich. Chelatbildner können den Lösungsvorgang zudem noch beschleunigen [Schröder, 1992].

Die äußere prismenfreie Schmelzschicht besitzt eine höhere Resistenz gegenüber der Einwirkung von Säuren als der in prismatisch konfigurierte Schmelz und stellt somit eine Barriere gegenüber schwächeren Säuren dar [Schröder, 1992].

2.2 Erosion

2.2.1 Definition der Erosion

Die Erosion wird definiert als ein oberflächlicher Zahnhartsubstanzverlust durch den Einfluss chemischer Prozesse ohne Beteiligung von Mikroorganismen [Eccles, 1979; Jäggi et al., 1999; Zipkin und McClure, 1949]. Damit steht sie im Gegensatz zu kariösen Läsionen, die durch kariogene Mikroorganismen entstehen. Bei entsprechender Substratzufuhr produzieren diese organische Säuren, welche zur Demineralisation der Zahnhartsubstanzen führen [Hellwig et al., 1999]. Bei einer kariösen Initiailläsion ist ein stark demineralisierter Läsionskörper unterhalb der weniger demineralisierten Oberfläche vorhanden, was ein Charakteristikum für diese Erkrankung darstellt. Bei der Erosion ist keine nennenswerte Demineralisation unterhalb der Oberfläche festzustellen.

Des Weiteren ist die Erosion von Substanzverlusten abzugrenzen, die durch Abrasion, Attrition oder als sogenannte keilförmige Defekte entstehen. Die Abrasion ist dabei definiert als pathologischer Verlust von Zahnhartsubstanz durch mechanische Kräfte [Levitch et al., 1994]. Bei der Attrition kommt es zum Abrieb der Zahnhartsubstanzen durch direkten Kontakt antagonistischer oder benachbarter Zahnflächen [Hellwig et al., 1999]. Die Ursache von keilförmigen Defekten am bukkalen Gingivalrand ist differenzierter zu betrachten. So kommt die Einwirkung abrasiver Kräfte durch eine falsche Zahnputztechnik in Frage [Bergstroem und Lavstedt, 1979]. Ebenso kann ein übermäßiges Zähneputzen diese Defekte hervorrufen [Sangnes und Gjermo, 1976]. Eine weitere Ursache kann die Aussprengung von Schmelz- und Dentinteilen im zervikalen Bereich aufgrund von Spannungen im Zahn sein, die durch okklusale Überbelastung entstehen [Dawid et al., 1994].

2.2.2 Erscheinungsbild der Erosion

Erosionen lassen sich in Früh- und Spätläsionen einteilen. Die Frühläsion ist dabei nur schwer zu erkennen. Sie betrifft nur den Schmelz, welcher glatt und matt glänzend aussieht, was durch eine Veränderung der typischen Schmelzmorphologie ausgelöst wird. Hierbei kommt es zum Verlust der Perikymatien. Bei der Spätläsion liegt bereits eine Dentinbeteiligung vor, die das Dentin bis zu einer Tiefe von 100 µm erweichen und entkalken kann [Schröder, 1997].

Es kommt zu einer Vertiefung konkaver Zahnflächen und zu einer deutlichen Abflachung konvexer Flächen. An den Okklusalfächen beginnt die Erosion vorrangig an den Höckerspitzen, wobei im Spätstadium die gesamte Okklusionsfläche betroffen sein kann. Dadurch wirken diese Flächen wie abgeschmolzen. Die Frontzähne hingegen werden messerscharf dünn und transluzent. Der zunehmende Verlust des Schmelzes führt schließlich zur Freilegung des Dentins. Dies geschieht zunächst im zervikalem Drittel des Zahnes, bei fortschreitender Läsion bleibt oft ein sichelförmiger zervikaler Schmelzrand stehen. Häufig treten zu diesem Zeitpunkt die ersten Schmerzempfindungen an den betroffenen Zähnen der Patienten bei Wärme- und Kältereizen auf [Hotz, 1987].

Eine klinische Einteilung schlägt Eccles [1979] vor. Er unterteilt die Erosion in drei Klassen:

Klasse 1: oberflächliche Schmelzläsion. Hier liegt eine reine Schmelzbeteiligung vor.

Klasse 2: lokalisierte Läsion. Hierbei liegt bereits eine Dentinbeteiligung vor, die allerdings auf weniger als ein Drittel der Gesamtfläche reduziert ist.

Klasse 3: generalisierte Läsion. In diesem Fall ist die Erosionsfläche zu mehr als einem Drittel in das Dentin gelangt, sie umfasst häufig mehrere Oberflächen zugleich.

Eine detailliertere Aufteilung schlägt Lussi et al. [1991] vor, bei der in bukkale, okklusale und orale Erosionen unterschieden wird.

Bukkale Erosion:

Grad 0 : Keine Erosion. Schmelz glänzend. Verlust der Oberflächenstruktur (Perikymatien) möglich.

Grad 1 : Größerer, flächenhafter Verlust von Schmelz. Intakte Schmelzleiste zervikal des Defektes. Eindellungen, Stufenbildung. Schmelz zeigt Seidenglanz. Kein Dentinbefall.

Grad 2: Dentin liegt auf weniger als der Hälfte der betroffenen Zahnoberfläche frei.

Grad 3: Dentin liegt auf mehr als der Hälfte der betroffenen Zahnoberfläche frei.

Okklusale Erosion:

Grad 0: Keine Erosion. Schmelz glänzend.

Grad 1: Schwach ausgeprägte Erosion. Gerundete Höcker. Schmelz seidenglänzend, Füllungen höher als benachbarte Zahnhartsubstanz. Dentin nicht befallen.

Grad 2: Stark ausgeprägte Erosion. Dentin ist befallen.

Orale Erosion:

Grad 0: Keine Erosion. Schmelz glänzend. Verlust der Oberflächenstruktur (Perikymatien) möglich.

Grad 1: Größerer, flächenhafter Verlust von Schmelz. Intakte Schmelzleiste zervikal des Defektes. Schmelz zeigt Seidenglanz. Kein Dentinbefall.

Grad 2: Stark ausgeprägte Erosion. Intakter Schmelz zervikal des Defektes möglich. Dentin ist befallen.

Diese verschiedenen Aufteilungen geben jedoch keinen Hinweis auf die Progredienz einer Erosion.

2.2.3 Epidemiologie

Es gibt nur wenige epidemiologische Studien über die Verbreitung von Erosionen in der Bevölkerung. Des Weiteren ist ein Vergleich der Ergebnisse verschiedener Studien schwierig, da die Beurteilung von Erosionen nicht standardisiert geschieht und ätiologische Faktoren zahlreich sind [Nunn 1996]. Ein weiteres Problem liegt darin, dass sich viele Studien auf spezielle Untersuchungsgruppen beziehen, die ein potentiell Risiko für Erosionen haben.

Sognaes et al. [1972] veröffentlichten eine landesweite Studie aus den USA, bei der 10.000 extrahierte Zähne auf Erosionen untersucht wurden. Sie ergab, dass 18% der Zähne erosiven Veränderungen unterlagen. Befallen waren 26% der Frontzähne, 17% der Eckzähne, 22% der Prämolaren und 3% der Molaren. Nähere Angaben über den Befall der einzelnen Zahnflächen wurden nicht gemacht.

Xhonga und Valdmanis [1983] untersuchten 527 Krankenhauspatienten im Alter zwischen 14 und 80 Jahren. Diese klinische Studie ergab eine Erosionsprävalenz von 25%.

Im Gegensatz dazu ergab eine Studie von Centerwall et al. [1986] eine Prävalenz von 3% und eine finnische Untersuchung ergab 5% [Järvinen et al., 1991].

In der Schweiz wurden im gleichen Jahr 391 zufällig ausgesuchte Patienten im Alter von 26 bis 30 Jahren und 46 bis 50 Jahren auf Erosionen untersucht. Die Zahnflächen wurden einzeln

beurteilt, wobei linguale Erosionen nicht festgestellt werden konnten. Jedoch waren an allen anderen Zahnflächen Erosionen zu beobachten, die bei älteren Personen häufiger waren als bei jüngeren. Es konnte ebenfalls ein Zusammenhang zwischen Konsum von Früchten und dem Vorhandensein von bukkalen Erosionen einerseits und chronischem Erbrechen und okklusalen und palatinalen Erosionen andererseits hergestellt werden. Die 197 Personen der jüngeren Gruppe hatten zu 7,7% Erosionen an den Fazialflächen und zu 29,9% an den Okklusalfflächen. Die 194 älteren Personen wiesen zu 13,2% Erosionen an den Fazial- und zu 42,6% an den Okklusalfflächen auf. Die erosiven Defekte hatten jeweils schon eine Dentinbeteiligung [Lussi et al., 1991].

Jaeggi et al. [1999] untersuchten 417 Rekruten der Schweizer Armee im Alter zwischen 19 und 25 Jahren mit dem Ziel, die Prävalenz von Erosionen und keilförmigen Defekten zu bestimmen. Die Untersuchungen umfassten die Aufnahme der Erosionsindizes für die bukkalen, okklusalen und oralen Flächen und diejenigen der keilförmigen Defekte der Bukkalflächen. 82% der untersuchten Personen zeigten okklusale Erosionen ohne Dentinbeteiligung, 30,7% okklusale Erosionen mit Dentinbeteiligung. Bukkale Erosionen waren zu 14,4 % vorhanden, das Dentin war nicht betroffen. Orale Erosionen kamen bei den Rekruten mit 0,7% so gut wie nicht vor.

Obwohl sich vermuten lässt, dass Erosionen mit zunehmendem Alter voranschreiten und häufiger sind, ist deren Prävalenz nicht altersgebunden. Dies belegen einige Studien, die sich mit Kindern befassen.

Milosevic et al. [1994] berichten über die Verbreitung von Erosionen bei Kindern in Liverpool. Dort wurden 1035 Kinder im Alter von 14 Jahren untersucht. Davon hatten insgesamt 80 Kinder (8%) Erosionen an den Okklusal- und Lingualflächen, 30% hatten schon freiliegende Dentinareale.

Ein Jahr später wurde in England eine Studie über das Vorkommen von Erosionen bei Kindern im Alter von 1,5 bis 4,5 Jahren veröffentlicht. Bei 10% der Kinder fanden sich Erosionen an den bukkalen und bei 19% an den palatinalen Zahnflächen. 8% der Kinder hatten Erosionen bis ins tiefe Dentin [Hinds und Gregory, 1995].

Ganss et al. [2001] untersuchten kieferorthopädische Situationsmodelle von 1000 Kindern im Alter von $11,4 \pm 3,3$ Jahre, um die Prävalenz und das Vorkommen von Erosionen festzustellen. 265 davon konnten nach einem Zeitraum von 5 Jahren an Hand abschließender Modelle der Kieferorthopädie nachuntersucht werden. Im Milchgebiß wiesen 70,6% mindestens an einem Zahn geringgradige Läsionen auf, 26,4% hatten bereits schwere

Läsionen. Im bleibenden Gebiss hatten allerdings nur 11,6% der Kinder an mindestens einem Zahn Erosionen. Aus der Langzeitbeobachtung konnte man schließen, dass Kinder, die schon Erosionen an den Milchzähnen aufweisen, ein größeres Risiko haben auch an den bleibenden Zähnen Erosionen zu bekommen. So hatten 34% der Kinder mit Milchzahnerosion ebenfalls Erosionen an den bleibenden Zähnen, dagegen konnten nur 8,8% der Kinder ohne Milchzahnerosionen Läsionen an den bleibenden Zähnen nachgewiesen werden.

Bei einigen Personengruppen lassen sich höhere Prävalenzwerte finden als bei der Normalbevölkerung. Zu diesen Risikogruppen zählen Personen mit Essstörungen oder Magen-Darm- Erkrankungen genauso wie Alkoholiker oder Personen mit speziellen Ernährungsgewohnheiten. Auch Personen, die berufsbedingt eine Risikogruppe darstellen, sind in diesem Zusammenhang zu nennen.

2.2.4 Ätiologie der Erosion

Als Ursache für die Entstehung von Erosionen werden extrinsische und intrinsische Faktoren verantwortlich gemacht [Järvinen et al., 1991; Zero 1996].

2.2.4.1 Extrinsische Faktoren

Ernährungsgewohnheiten

Die Ernährungsgewohnheiten sind die sicherlich am besten dokumentierten Erosionsursachen. Es lässt sich zum Beispiel schon bei Miller [1907] etwas über die erosive Wirkung von Fruchtsäuren nachlesen.

Das Ausmaß der Erosion durch Nahrungsmittel hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab. So sind der pH- Wert, die Art und Menge sowie die Konzentration der Säure als wichtige Faktoren zu nennen.

Hughes et. al. [2000] testete den Effekt des pH- Wertes und der Konzentration von Zitronen-, Apfel-, und Milchsäure auf den Schmelz. Je niedriger der pH- Wert wurde, desto höher war der Substanzverlust. Wurde die Säurekonzentration erhöht, war eine weitere Steigerung des Mineralverlustes festzustellen. Dies galt für jede der drei Säurearten, wobei der Substanzverlust bei der Apfelsäure signifikant niedriger war als bei der Zitronen- oder Milchsäure. Ein zweiter Aspekt der Studie beschäftigte sich mit der Wirkung von Kalzium

auf den Substanzverlust bei oben genannten Versuchsbedingungen. Es ergab sich, dass das Hinzufügen von Kalzium (0,0198 g/100 ml) zu einer Zitronensäurelösung (0,24g/100ml) bei einem pH-Wert von 3,8 den Substanzverlust bereits um mindestens 50% reduzierte. Somit lässt sich sagen, dass das erosive Potential verschiedener säurehaltiger Getränke auch von dem Gehalt an Kalzium, Phosphat und Fluorid abhängt. Es konnte gezeigt werden, dass ein Getränk mit einem Phosphatgehalt von 5,53 mmol/l bei annähernd gleichem pH-Wert im Vergleich zu einem anderen Getränk, dessen Phosphatgehalt bei 1,61 mmol/l lag, kein erosives Potential hatte [Lussi et. al., 1993].

Ein weiterer wesentlicher Faktor ist die Häufigkeit der Säureangriffe. So ist nach Meinung der Autoren Linkosalo und Markkanen [1985] die Häufigkeit bei der Aufnahme von Essig bzw. in Essig konservierten Nahrungsmitteln, Zitrusfrüchten und sauren Beerenfrüchten die Ursache dafür, dass 76,9% der untersuchten Laktovegetarier Erosionen an den Kontaktflächen der Zähne aufwiesen. Eine finnische Untersuchung von Järvinen et al. [1991] bestätigt diese Auffassung. Es war ein enger Zusammenhang zwischen regelmäßigem Verzehr von mehr als zwei Zitrusfrüchten pro Tag, dem Genuss von Apfelessig oder Erfrischungsgetränken mindestens einmal pro Woche und dem Vorkommen von Erosionen festzustellen. So war das Risiko von Erosionen um den Faktor 37 höher bei Patienten, die mehr als zwei Zitrusfrüchte pro Tag zu sich nahmen. Bei Patienten mit übermäßigem Apfelessigkonsum war das Risiko noch zehnmal höher und bei der täglichen Aufnahme von Softdrinks oder Sportlergetränken immerhin noch viermal höher. Es lässt sich folglich schließen, dass Personen, die aus Gründen der Gewichtsreduzierung vermehrt Obst und Fruchtsäfte konsumieren oder Sportler, die aufgrund ihrer sportlichen Aktivität viele Sportlergetränke trinken besonders gefährdet sind. Dies bestätigen auch weitere Studien [Eccles und Jenkins 1974, Young 1995]. Eine besonders stark gefährdete Personengruppe ist die der Rohköstler. In einer Studie von Ganss et al. [1999] wurden 130 Patienten untersucht, die sich durchschnittlich seit 39 Monaten nahezu ausschließlich von Rohkost ernährten (Rohkostanteil mehr als 95 %). Es ließen sich bei 97% der Patienten Erosionen nachweisen.

Einnahme von Medikamenten und Vitaminpräparaten

Die Einnahme von Medikamenten kann als Nebenwirkung eine Demineralisation des Zahnschmelzes zur Folge haben. In diesem Zusammenhang ist die Acetylsalicylsäure zu nennen, die sowohl zur Vorbeugung gegen Herzinfarkt bei Atherosklerose als auch bei der

Therapie der juvenilen rheumatoiden Arthritis Verwendung findet. Sullivan und Kramer [1983] konnten zeigen, dass das Medikament als Kautablette verabreicht zu Erosionen führen kann. In Form von Tabletten geschah das allerdings nicht. Die Verwendung von Ascorbinsäure (Vitamin C) kann ebenfalls zu Erosionen führen. Meurmann und Murtomaa [1986] untersuchten verschiedene Vitamin-C-Präparate. Deren pH-Wert lag immer unter 5,5 und führte nach etwa 100 Stunden zu erosiven Veränderungen, allerdings nur dann, wenn sie direkt mit der Zahnoberfläche in Kontakt traten. Als ebenfalls erosionsauslösend gelten Mundspüllösungen, die den Chelatbildner EDTA enthalten und saure Speichelstimulanzien [Rytömaa et al. 1989] sowie Speichelsubstituenten mit einem niedrigen pH-Wert [Smith 1989]. Zusätzlich wurde schon von James und Parfitt [1953] der erosive Effekt von eisenhaltigen Medikamenten diskutiert.

Berufsbedingte Säureexposition

Sicherlich sind die berufsbedingten Säureexpositionen aufgrund der strengen Arbeitsschutzvorschriften zurückgegangen. Trotzdem finden sich vor allem im Ausland noch Fälle von Industriearbeitern mit erheblichen Zahnhartsubstanzverlusten, die durch säurehaltige Luft am Arbeitsplatz bedingt sind [Zero, 1996].

Erosionen aufgrund einer erhöhten Säurekonzentration der Luft treten vornehmlich an den Labialflächen der Oberkieferfrontzähne auf [Petersen und Gormsen, 1991]. Tuominen et al. [1991] untersuchten Arbeiter zweier Fabriken in Tansania. Die Schwefelsäurekonzentration der Luft betrug in beiden Fabriken zwischen 1 bis 5 mg/m³. Bei 63% der einen und bei 50% der anderen Fabrikarbeiter ließen sich Erosionen nachweisen. Im Gegensatz dazu lagen die Ergebnisse der Kontrollgruppen mit 37% bei der ersten und 15% der zweiten Fabrik deutlich unter den gemessenen Werten der Arbeiter. Den Unterschied erklärten die Autoren damit, dass das Erosionsrisiko von der Säurekonzentration der Luft abhängt. Zur Risikogruppe der berufsbedingten Erosionen zählen Arbeiter der Druckindustrie [Smith und Knight, 1984], Angestellte der Munitions- und Feuerwerkskörperherstellung [ten Bruggen Cate, 1968], Chemielaboranten, die mit dem Mund pipetieren [Levine, 1973] und professionelle Weinkoster [McIntyre, 1992].

2.2.4.2 Intrinsische Faktoren

Alle intrinsischen Ursachen haben als Gemeinsamkeit, dass sie mit dem Reflux von Mageninhalt einhergehen [Friedmann und Isselbacher, 1991]. Das Einwirken des sauren Mageninhaltes auf die Zahnhartsubstanzen hat ein sehr hohes Erosionspotential [Scheutzel, 1996], da der pH-Wert des Mageninhaltes mit 1 bis 1,5 besonders niedrig ist. Allerdings ist eine ausreichend lange, chronische Säureeinwirkung vonnöten um klinisch relevante Läsionen zu erzeugen. Erst wenn Magensäure regelmäßig einige Male pro Woche über einen Zeitraum von ein bis zwei Jahren auf die Zahnschicht einwirkt, manifestiert sich der Substanzverlust klinisch [Scheutzel, 1992].

Chronisches Erbrechen

Psychosomatische Störungen führen häufig zu stressbedingtem Erbrechen und Essstörungen [Friedmann und Isselbacher, 1991]. Ungefähr 5% der jungen Frauen in westlichen Industrieländern im Alter zwischen 20 und 30 Jahren leiden unter psychosomatischen Störungen mit untypischen Essgewohnheiten. Man unterscheidet hierbei zwischen der Anorexia nervosa und der Bulimia nervosa. Bei der Anorexia nervosa tritt durch stetiges Hungern ein Gewichtsverlust auf. Diese Patienten sehen sich selbst trotz erheblichen Untergewichtes als zu dick. Dieses Krankheitsbild lässt sich noch in zwei Unterformen unterteilen. Bei der restriktiven Form ist die Ursache des Untergewichtes in einem exzessiven Fasten zu suchen, bei der bulimischen Form jedoch wird nach jeder Mahlzeit ein absichtliches Erbrechen hervorgerufen. Bei der Bulimia nervosa wird das Erbrechen nach übermäßiger Nahrungsaufnahme hervorgerufen. Diese Patienten leiden in der Regel nicht unter Untergewicht [Cooper et al., 1987, Scheutzel und Meermann, 1994]. Järvinen et al. [1991] bemerkten, dass das Erosionsrisiko bei Patienten, die unter chronischem Erbrechen leiden um den Faktor 18 erhöht ist. Die gleiche Studie ergab, dass Patienten mit gastroösophagealem Reflux ein vierfach höheres Risiko haben.

Gastroösophagealer Reflux

Die gastroösophagealen Refluxerkrankungen sind durch einen Rückfluß von Mageninhalt in die Speiseröhre und dadurch in die Mundhöhle gekennzeichnet. Dies wird durch eine

Kardiainsuffizienz hervorgerufen, bei der die Fehlfunktion des Schließmuskels dieser Region einen unvollständigen Verschluss verursacht. Die Ursachen werden in primär idiopathische, und sekundäre eingeteilt. Zu den primär idiopathischen Ursachen zählen die mit oder ohne Hiatushernien [Howden, 1971], zu den sekundären zählen die Bindegewebserkrankungen, neurologische Störungen wie die alkoholische Polyneuropathie, oder die Zerstörung des Sphinkters durch operative Maßnahmen, sowie sklerotische Veränderungen [Scheutzel, 1996].

Regurgitation

Smith und Robb [1989] untersuchten chronischen Alkoholismus in Verbindung mit Erosionen. Es stellte sich heraus, dass nicht die alkoholischen Getränke selbst, sondern die alkoholbedingten Gastritiden mit subklinischer Regurgitation die Ursache der Erosionen sind. In einer Folgestudie von Robb und Smith [1990] wiesen 34 von 37 alkoholkranken Patienten Erosionen auf. Dabei werden zuerst die Palatinalflächen der oberen Inzisivi befallen, bevor im fortgeschrittenen Stadium die Okklusalfächen der Prämolaren und Molaren des Oberkiefers in Mitleidenschaft gezogen werden.

Rumination

Ein seltenes Phänomen ist die Rumination, bei der Patienten nach ca. 15 bis 30 Minuten nach den Mahlzeiten das Essen wieder in die Mundhöhle hochwürgen, es erneut kauen, um es dann wieder herunterzuschlucken. Die Ursache dafür vermutete Parry-Jones [1994] in einer somatischen Projektion eines psychischen Konfliktes.

Abschließend sind auch noch Allgemeinerkrankungen zu nennen, die Erbrechen auslösen können. Hierzu zählen neurologische Störungen wie Migräne oder Morbus Meniere [Friedmann und Isselbacher, 1991], metabolische und endokrinologische Störungen sowie Störungen des Gastrointestinaltraktes. Ferner können auch Medikamente als Nebenwirkungen Erbrechen auslösen.

2.2.5 Therapie und Prophylaxe der Erosion

Bei der Therapie der Erosion sollte man alle ätiologischen Faktoren in die Überlegung mit einbeziehen, da diese sehr vielschichtig sind. Grundsätzlich gibt es zwei Therapieansätze, zum einen den kausalen, bei dem alle Maßnahmen Anwendung finden, die das Erosionspotential der Säureangriffe verringern, zum anderen den symptomatischen, bei dem die Verringerung der Substanzverluste bei bestehenden Noxen im Vordergrund steht [ten Cate und Imfeld 1996].

Sicherlich ist die effektivste präventive Maßnahme bei Erosionen in der Vermeidung der Ursachen, das heißt der Säureeinwirkung, zu sehen. In solchen Fällen können erosive Prozesse auch ohne invasive Maßnahmen zum Stillstand kommen.

Daher ist im Rahmen der Therapie die Anamnese ein wichtiger Faktor. Wenn sich hier die Noxen herauskristallisieren, kann man häufig schon durch einfache Veränderungen zu guten Ergebnissen kommen. So kann man bei medikamentös bedingten Erosionsdefekten die sauren Tabletten durch Kapseln ersetzen, um den Kontakt mit der Zahnoberfläche zu vermeiden.

Patienten, bei denen die Anamnese Essstörungen oder Erbrechen mit psychosomatischer Ätiologie ergibt, sollten von einem Psychologen oder Psychiater behandelt werden. Bei anderen intrinsischen Faktoren wie chronischer Regurgitation und gastroösophagealem Reflux sollte ein Facharzt die Einnahme von Medikamenten veranlassen, die die Magensäureproduktion senken [Taylor et al. 1992].

Bei Patienten, deren erosive Ursache in den Ernährungsgewohnheiten zu finden ist, sollte die Anzahl der Aufnahme von säurehaltigen Lebensmitteln auf ein Minimum reduziert werden. Ebenfalls sollte die Säureeinwirkzeit möglichst kurz gehalten werden.

Da man allerdings speziell in diesem Fall die säurehaltigen Noxen nicht vollständig meiden kann, wird auch über Modifikationen bei sauren Produkten nachgedacht, durch die sie ihre erosiven Eigenschaften verlieren. So hat schon Hay et. al. [1962] herausgefunden, dass der Zusatz von Trikalziumphosphat in Getränken die erosiven Eigenschaften verringern oder sogar ganz verhindern kann. Hughes et al. [1999] bestätigten das Ergebnis. In einer 15tägigen Testreihe ergab sich, dass der Substanzverlust eines mit 195 ppm Kalzium angereicherten schwarzen Johannisbeersaftkonzentrat, bei 0,35 µm lag. Bei einer Kalziumkonzentration von 400 ppm war der Substanzverlust nicht mehr signifikant, er lag bei 0,29 µm. Allerdings waren im Vergleich zu nicht mit Kalzium angereicherten Säften wie Apfel-Johannisbeersaft oder Orangensaft mit Mineralwasser deutliche Unterschiede messbar. Der Substanzverlust bei

Apfel-Johannisbeersaft lag mit 2,04 µm sieben mal, der von Orangensaft mit Mineralwasser mit 8,29 µm zwanzig mal höher. Auch Larsen et al. [1999] konnten in einer Studie mit 18 Getränken nachweisen, dass Orangensaft ohne Kalzium- und Phosphatzusätze größere Läsionen verursacht als Orangensaft mit diesen Zusätzen. Mittlerweile gibt es schon Säfte, die diesem Umstand Rechnung tragen. So hat zum Beispiel der Orangensaft Hohes C Plus Calcium® eine ausreichende Kalziumkonzentration.

Allerdings kann man nicht jedem Produkt Zusätze zufügen, die die Erosionsgefahr mildern. Daher ist die symptomatische Therapie ebenfalls von großer Bedeutung. Hierbei soll die Resistenz gegen Säuren erhöht werden. Des Weiteren sollen Substanzverluste durch Abrasion reduziert oder gar vermieden werden. Hierbei kommt dem Zähneputzen eine entscheidende Rolle zu, da durch die mechanische Belastung erosive Läsionen oft verschlimmert werden. Dies bestätigten Davis und Winter [1980]. Sie zeigten, dass Zahnhartsubstanz durch Bürsten mit Wasser oder mit Zahnpaste und Wasser nach einem erosiven Angriff einer beschleunigten Abrasion unterliegt. Attin et al. [1997] untersuchten Rinderschmelzproben, die sie 1,5 und 15 Minuten erodierten und anschließend standardisiert abradierten. Dabei fanden sie mit abnehmender Oberflächenhärte der Zahnschmelzsubstanz eine überproportionale Zunahme des Substanzverlustes durch Zahnbürstenabrasion.

Als weitere Möglichkeit um Erosionen und Abrasionen zu vermeiden oder zu minimieren wird die Fluoridapplikation diskutiert. Attin et al. [1999] untersuchten Rinderschmelzproben, die de- und remineralisiert wurden und mit einem sauren Fluoridgelee-Speichel-Gemisch standardisiert abradiert wurden. Sie fanden heraus, dass Proben, die mit dem leicht sauren Elmex Fluoridgelee behandelt wurden, eine signifikant höhere Resistenz gegenüber Abrasion aufwiesen als Proben, die ohne Fluorid oder nur mit einem neutralen Fluoridgelee behandelt wurden. Ganss et al. [2001a] stellten einer in vitro Untersuchung mit einem zyklischen De- und Remineralisationsmodell ähnliche Ergebnisse fest. Es konnte gezeigt werden, dass der Mineralverlust nach fünf Tagen eine um 20% geringere Progression der Erosion bei den fluoridierten Proben erfuhr, als bei der unfluoridierten Kontrollgruppe.

2.2.6 Meßmethoden zur Feststellung von Erosionen

Wie dargestellt gibt es eine Vielzahl von Fragestellungen zum Thema Erosion und deren Ätiologie und Therapie. Daher ist es auch nicht verwunderlich, dass es bereits eine Vielzahl an Studien zu diesem Thema gibt. Dabei ist eine Reihe von Methoden entwickelt worden, um den Mineralgehalt von Zahnhartgeweben im allgemeinen und den erosiven Mineralverlust im speziellen abschätzen zu können [Grenby 1996]. So gibt es physikalische, chemische und optische Verfahren, die zur Anwendung gekommen sind. Ein Vergleich der einzelnen Studien ist allerdings schwierig, da zum einen ein großes Spektrum an Messmethoden vorliegt und zum anderen diese nicht standardisiert sind.

Des Weiteren lassen sich die Studien in *in vitro*, *in situ* und *in vivo* Versuche einteilen, wobei die häufigste in der Literatur zu findende Methode der *in vitro* Versuch ist. Ein großer Vorteil dieser Methode liegt darin, dass eventuelle störende Umwelteinflüsse ausgeschaltet werden können und dass ein größeres Probengut unter absolut gleichwertigen Bedingungen untersucht werden kann. Die Resultate von *in vitro* Versuchen unterscheiden sich von den *in situ* Versuchen teilweise erheblich.

Da die Erosion von vielen unterschiedlichen Parametern beeinflusst wird, werden entweder reine *in vitro* Modelle entwickelt oder spezielle *in situ* Modelle, bei denen gewisse Parameter standardisiert werden, um über andere Parameter eine Aussage treffen zu können [Lussi und Jäggi, 2002]. Eine Ausnahme bilden hierbei *in vitro* Modelle, die bei *in situ* Versuchen angewendet werden. In der Regel sind dann allerdings Replika erforderlich.

Das große Spektrum der Vor- und Nachteile dieser Methoden schließt daher die Empfehlung eines bestimmten Verfahrens aus.

Allerdings sollten spezielle Anforderungen an die Untersuchungsmethoden gestellt werden. Um den Prozess der Erosion und seiner symptomatischen Therapie richtig verstehen zu können, sollten die gleichen Versuchsanordnungen für *in vitro* wie für *in situ* Versuche gelten. Eine Methode, die alle Anforderungen erfüllt, sollte sich sowohl für *in vitro* wie *in situ* Versuche eignen, nicht destruktiv sein und sollte quantitativ für Mineralverlust aber auch für Mineralgewinn sein. Ebenfalls sollte diese Methode auf der natürlichen Zahnoberfläche durchführbar sein, da eine polierte Oberfläche signifikanten Einfluss auf die Anfälligkeit der Zahnschmelze auf erosiven Mineralverlust hat [Ganss et al., 2000].

Dieses Kapitel soll nun einen Überblick über die zur Zeit verwendeten Methoden liefern.

Profilometrie

Bei der Profilometrie wird ein erodierter Anteil einer Probe im Vergleich zu einem nicht-erodierten Anteil der gleichen Probe gemessen. Dies geschieht wahlweise mittels eines Lasers zur optischen Abtastung [Attin et al., 2003] oder aber auch mechanisch mit Hilfe eines Diamanten [Hammadeh et al., 2001]. Der Höhenunterschied der beiden Bereiche ist hierbei der Mineralverlust.

Es handelt sich um eine Methode, die sowohl qualitativ als auch quantitativ ist. Sie ist nicht destruktiv und wird in in vitro und in situ Versuchen angewendet. Des Weiteren kann man sie an der natürlichen, unbehandelten Zahnoberfläche anwenden.

Die Profilometrie kommt den oben genannten Forderungen sicherlich am nächsten und wurde auch als „Gold-Standard“ bezeichnet [Hall et al., 1997], obwohl dieses Verfahren keine Aussagen über demineralisierte Bereiche unterhalb der Oberfläche machen kann. Zahlreiche Autoren greifen auf diese Methode zurück [Attin et al., 1998; Davis und Winter, 1977; Eisenburger et al., 2000; Ganss et al., 2000; Rugg-Gunn et al., 1998; West et al., 1998].

Mikroradiographie

Die mikroradiographischen Analyseverfahren basieren auf der Absorption von Röntgenstrahlung im Zahnhartgewebe. Diese Absorption kann mit Hilfe eines Röntgenfilmes bestimmt werden. So entsteht ein Mikroradiogramm, das densitometrisch ausgewertet wird. Dabei wird der Mineralgehalt im Vergleich zu einer Aluminiumeichtreppe mit definierter Röntgenabsorption bestimmt. Nach der Versuchsdurchführung wird auf die gleiche Weise ein zweites Mikroradiogramm der gleichen Probe erstellt. Aus den Unterschieden der ersten und zweiten Messung lässt sich nun der Mineralverlust oder Mineralgewinn bestimmen.

Die Mikroradiographie fand breite Anwendung in der Kariologie.

Es gibt zwei unterschiedliche Verfahren der Mikroradiographie. Zum einen die transversale Mikroradiographie (TMR) und zum anderen die longitudinale Mikroradiographie (LMR). Bei der TMR werden senkrecht zur Probenoberfläche 50-100 µm dünn präparierte Proben gemessen. Die Proben müssen zuvor planparallel präpariert werden. Der Mineralgehalt wird als Funktion der Tiefe dargestellt, so dass De- und Remineralisationsvorgänge in Initialläsionen beurteilt werden können. Oberflächlicher Mineralverlust kann mit diesem Verfahren nur bedingt bestimmt werden. Es handelt sich hierbei um ein destruktives

Verfahren. Diese Methode erlaubt die Auswertung von Mineralverlust oder –gewinn bei in vitro und in situ Versuchen [Amaechi et al., 1999].

Bei der LMR werden die Proben parallel zur Zahnoberfläche gewonnen. Ein planparalleles präparieren ist nicht erforderlich. Die Proben können eine Dicke bis 400 µm aufweisen. Der Mineralgehalt wird quantitativ in Relation zum Ausgangswert erfasst, eine Charakterisierung des Mineralgehalts als Funktion der Tiefe ist hierbei nicht möglich. Die LMR kann einen oberflächlichen Mineralverlust oder –gewinn bestimmen.

Mit Hilfe einiger Modifikationen ist die Mikroradiographie auch zur Messung erosiven Mineralverlusts geeignet [Hall et al., 1997; Amaechi et al., 1998] Eine Modifikation der TMR wird von Hall et al. [1997] beschrieben. Hierbei werden Probenquerschnitte mit einer Dicke von 100-200 µm verwendet. Die Probe enthält ein zentrales Versuchsfenster mit einem Referenzgebiet von nicht erodiertem Schmelz aus dem sich der Mineralverlust nach der Ergebnismessung der Probe errechnen lässt. Sie ist nicht destruktiv und findet in situ und in vitro seine Anwendung [Hall et al., 1999]. Allerdings ist dieses Verfahren aufwendig und man muss polierte Zahnoberflächen verwenden. Eine weitere Modifikation wird von Amaechi et al. [1998] beschrieben, bei der der Probenquerschnitt zwischen 50 und 200 µm liegt und ähnlich wie bei der ursprünglichen Methode eine Messung senkrecht zur Oberfläche erfolgt. Es wird die Läsionstiefe mitsamt der erweichten Oberfläche der erodierten Probe gemessen. Bei diesem Verfahren werden Läsionstiefen von 20 µm und mehr gemessen.

Chemische Testverfahren

Bei den chemischen Testverfahren wird die Erosionslösung gemessen. Die darin enthaltenen Mineralien geben Auskunft über den Mineralverlust der Probe. Es sind sehr sensitive und quantitative Verfahren, die allerdings nur bei in vitro Studien Verwendung finden und zu den destruktiven Versuchsverfahren zählen [Grenby, 1996].

Die gängigen Verfahren sind die Kalziumanalyse, die Phosphatanalyse und die Fluoridanalyse [Lussi et al., 1995]

Messung des Härtegrades

Bei dieser Methode wird eine Diamantenspitze mit bekannter geometrischer Größe für eine bestimmte Zeit mit einer definierten Kraft auf die erodierte Zahnoberfläche gebracht. Aus der Tiefe der entstandenen Impression lässt sich der erosive Mineralverlust bestimmen.

Die Mikrohärtegradmessung spiegelt die physikalischen Veränderungen der durch Säure erweichten Oberfläche wider. Mit zunehmender Säureeinwirkung sinkt die Mikrohärte auf ein Minimum, während die Auflösung der Zahnhartsubstanz weiter zunimmt [Stösser und Nekrashevych, 1998]. Daher ist dieses Verfahren auf die initiale Phase der Erosion begrenzt. Man kann hiermit zwar De- und Remineralisationsprozesse beobachten, es handelt sich also um ein nicht destruktives Verfahren, allerdings ist es auch rein qualitativ. Man kann die Härtegradmessung in vitro und in situ einsetzen, benötigt allerdings plane und parallele Oberflächen, so dass die natürliche Zahnoberfläche als Untersuchungsmedium ausscheidet.

Als Modifikation wurde die Tiefe der Einkerbungen vor und nach Erosionsversuchen gemessen [Jaeggi und Lussi, 1999].

Elektronenmikroskopie (REM)

Bei der Rasterelektronenmikroskopie handelt sich um ein sehr teures und aufwendiges Verfahren [Grenby, 1996]. Hierbei können Oberflächenveränderungen nach Säureangriffen bestimmt werden.

Die Proben müssen nach der Erosion erst vollständig von der Säure befreit werden. Dies ist nötig um das Risiko von Artefakten bei der Messung zu reduzieren. Hierbei werden die Proben zuerst mit destilliertem Wasser gereinigt und über eine Alkoholreihe entwässert. Um ein Kollabieren der brüchigen erodierten Schmelzoberfläche zu verhindern wird ein Gefriertrocknen der Proben empfohlen [Eisenburger et al., 2004].

Die Rasterelektronenmikroskopische Abtastung ist ein rein qualitatives Verfahren, das zudem auch destruktiv ist [Meurman und Frank, 1991]. Es lässt sich in vitro anwenden und mit Hilfe von Replika auch in situ [Millward et al., 1995].

Konfokale Laser-Scanning-Mikroskopie (CLSM)

Die konfokale Laser-Scanning-Mikroskopie ist eine in der Hartgewebeforschung relativ neue Methode zur qualitativen Bestimmung von strukturellen Schmelzveränderungen nach Säureätzung oder remineralisierender Behandlung [Zentner und Duscher, 1996]

Bei der CLSM entstehen Bilder durch eine Lichtlaserquelle, die die Probe abtastet und das reflektierte Licht aufzeichnet. Hierbei beruht das konfokale Prinzip darauf, dass das gestreute Licht ausserhalb des Versuchsfeldes eliminiert wird und die Brennebene der Lichtquelle und die der Aufzeichnung der Lichtquelle die gleiche ist. Dieses Verfahren ist nicht destruktiv und kann auch auf unbehandelten Zahnoberflächen durchgeführt werden. Es ist sogar möglich, Proben bis auf eine Tiefe von maximal 100 μm zu untersuchen [Zenter und Duscher, 1996]. Dieses Verfahren kann man in vitro und in situ Studien anwenden. Da es ein relativ neues Verfahren darstellt sollten aber noch weitere Untersuchungen erfolgen.

Digitale Bildanalyse (DBA)

Bei der digitalen Bildanalyse wird ein Bild der zu untersuchenden Probe mit Hilfe einer Videokamera und eines Mikroskopes in einer Zweiphasenanalyse erzeugt, um so quantitative Aussagen treffen zu können [Mistry und Grenby, 1993]. Da dieses Verfahren Bilder der Oberfläche herstellt, lässt sich hierbei allerdings wie schon bei der Profilometrie der Mineralverlust in den demineralisierten Bereichen unterhalb der Oberfläche nicht bestimmen. Es sind in vitro und in situ Versuche bei dieser nicht destruktiven Methode möglich. Eine Oberflächenbearbeitung ist keine Voraussetzung.

Tab 1: die Tabelle zeigt eine Übersicht verschiedener Messmethoden. Hierbei wird dargestellt, ob es sich hierbei um qualitative (Qual.) oder quantitative (Quan.) Messmethoden handelt, die bei in vitro oder in situ Studien angewendet werden können und ob sie nicht destruktiv (N.des.) sind. Zusätzlich wird angegeben, ob die einzelne Methode an der natürlichen Zahnoberfläche angewendet werden kann (N.Zo.).

Methode	Qual.	Quan.	InVitro	In Situ	N.des.	N.Zo.	Bemerkungen
Profilometrie	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Keine Aussage über demineralisierte Bereiche
LMR	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Rel. Große Streuung in den Messergebnissen, aufwendig
TMR	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Rel. Große Streuung in den Messergebnissen, aufwendig
Chem. Analyse	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Sehr sensitiv
Härtemessung	Ja	Bedingt	Ja	Ja	Ja	Nein	Nur bei initialer Demineralisation anwendbar
REM	Ja	Bedingt	Ja	Ja (Replika)	Nein	Ja	Sehr sensitiv, aufwendig und teuer
CLSM	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	
DBA	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Keine Aussage über demineralisierte Bereiche

2.2.7 Fragestellung

Aufgrund der Vielzahl von Fragestellungen in der Erosionsforschung ergeben sich entsprechende Messprobleme, die mit den verschiedensten Messverfahren zu lösen versucht werden. Die Meßmethoden unterliegen unterschiedlichen Messprinzipien, des weiteren werden Verfahren teilweise nur von wenigen oder sogar nur einer Arbeitsgruppe angewandt (z.B. LMR) und die Verfahren sind weder standardisiert, wie die Profilometrie, noch validiert. Zusätzlich gibt es bislang keine vergleichenden Studien und ebenfalls kein Standardverfahren. Diese Studie ist Teil einer umfangreicheren Studie mit dem Ziel eine häufig verwendete Methode, die Profilometrie, mit einem mikroradiographischen Verfahren, das in der Kariologie etabliert, jedoch für Erosion neu ist und einem ebenfalls aus der Kariologie

stammenden chemischen Verfahren (Kalzium-, Phosphat-Analyse) zu vergleichen. Da es gegenwärtig kein Standardverfahren gibt, kann es hier zunächst nur um einen Vergleich von Verfahren gehen, die zur Bearbeitung der oben genannten Fragestellungen geeignet erscheinen. In der vorliegenden Studie werden die Versuche zum Vergleich von Profilometrie und Kalzium-Analyse bzw. Phosphat-Analyse dargestellt.

Material und Methoden

3.1 Versuchsaufbau

3.1.1 Vorbereitung der Schmelzproben

Um Unterschiede in der Schmelzzusammensetzung möglichst gering zu halten wurden für die Versuche ausschließlich obere und untere vollständig retinierte 3. Molaren verwendet. Nach der Osteotomie wurden diese unter fließendem Wasser abgespült und anschließend direkt in eine gesättigte Thymollösung (Chem.1) überführt, um sie dort bis zur weiteren Verarbeitung aufzubewahren.

Es konnten nur Zähne mit einer homogenen Schmelzoberfläche verwendet werden, die keine iatrogenen Schäden durch die Osteotomie aufwiesen. Des Weiteren konnten auch keine Zähne in die Studie aufgenommen werden, die Schmelzschäden (Tetrazyclinverfärbungen, Amelogenesis imperfecta, Schmelzhyopomineralisationen und ähnliches) aufwiesen.

Abschließend fielen auch noch Zähne mit extremen Wölbungen der Schmelzoberfläche aus schnittechnischen Überlegungen aus der Versuchsreihe heraus, da bei diesen Zähnen keine große Schmelzfläche zu erzielen war.

Nach der Reinigung des Zahnes von Gewebsresten wurde die Zahnkrone von den Wurzeln getrennt. Dies geschah durch ein Trennschleifsystem der Firma Exakt, Norderstedt (Mat. 1). Die Zähne wurden auf einem Objektträger aus Plexiglas (Mat. 2) durch einen lichthärtenden Kunststoff (Chem. 2) fixiert, der durch eine Polymerisationslampe (Mat. 3) zum Aushärten gebracht wurde. Auf diese Weise war es möglich, bis zu vier Zähne auf einem Objektträger zu befestigen.

Der Objektträger wurde nun in das Trennschleifsystem eingespannt. Dies geschah durch eine Vakuumplatte, die sich an einem Metallschlitten des Trennschleifsystems befand. Der Objektträger an der Vakuumplatte wurde nun an der Bandsäge vorbeigeführt. Dies geschah mit Hilfe eines Gewichtes für eine konstante Sägeschwindigkeit und ausreichender Wasserkühlung. Auf diese Weise wurden alle Zahnkronen von ihren Wurzeln getrennt und im Anschluss nach der Reinigung vom Kunststoff direkt in Leitungswasser eingelegt, um eine Austrocknung der Zahnproben zu verhindern.

Aus einer Zahnkrone ließen sich im Idealfall bis zu 4 Schmelzproben herstellen, die für die Versuchszwecke geeignet waren. Diese waren eine vestibuläre, eine linguale oder palatinale Fläche, sowie eine mesiale und eine distale Fläche der Zahnkrone. Bei den mesialen bzw. distalen Flächen war allerdings häufig die Schmelzwölbung ein minimierender Faktor, der dazu führte, diese Schmelzproben nicht zu verwenden, da die im weiteren Versuchsverlauf entstehende plane Schmelzfläche zu klein geworden wäre.

Die Schmelzprobenherstellung erfolgte ebenfalls mit dem Trennschleifsystem. Hierbei wurde eine Approximalfläche der Zahnkrone mit dem Kunststoff parallel auf dem Objektträger fixiert. Nun wurde der Objektträger abermals an der Vakuumplatte befestigt. Die nicht in dem Kunststoff befestigte Approximalfläche wurde parallel zur Bandsäge eingestellt und von dieser von der Zahnkrone abgetrennt. Auf diese Weise erhielt man die erste Schmelzprobe. Daraufhin wurde die restliche Zahnkrone von der Bandsäge von dem Objektträger abgetrennt, so dass eine zweite Schmelzprobe auf dem Objektträger im Kunststoff verblieb. Diese Probe wurde anschließend mit einem Skalpell (Mat. 4) gelöst und von Resten des Kunststoffes gründlich gereinigt. Nun erfolgte die gleiche Prozedur mit der vestibulären und palatinalen bzw. lingualen Fläche des Kronenrestes. Es konnten auf diese Weise bis zu 4 Zahnkronen gleichzeitig auf dem Objektträger befestigt und vom Trennschleifsystem bearbeitet werden. Die nun abgetrennten Schmelzstücke blieben bis zur weiteren Verarbeitung in einem Wasserbad.

3.1.2 Herstellen der Schmelzschliffe

Um möglichst vergleichbare Werte bei der weiteren Versuchsdurchführung zu erhalten, wurden nun die Schmelzstücke so beschliffen, dass die entstandenen Präparate alle eine Dicke von 400 µm und eine plane, polierte Versuchsoberfläche von mindestens 3x3 mm hatten.

Dazu wurden die Proben mit der dem Dentin zugewandten Seite mit lichthärtendem Kunststoff auf dem Plexiglasträger fixiert und im Mikroschleifsystem (Mat. 5) mit Hilfe der Vakuumpumpe eingespannt.

Auf die Drehscheibe des Schleifgerätes wurde nun feuchtes Schleifpapier mit einer Körnung von 800 (Mat. 6) aufgelegt und der Träger mit Gewichten (50 g) versehen.

Die Mikrometerschraube (Mat. 8) der Schleifmaschine wurde so eingestellt, dass das Mikroschleifsystem bei einer Schmelztiefe von 0,2 mm sich automatisch abschaltete.

Wenn diese eine plane Fläche von 3x3 mm enthielt, wurde die Probe wieder eingespannt und das Schleifpapier gewechselt. Zur Politur wurde eine Körnung von 5000 (Mat. 7) verwendet. Jetzt wurde erneut geschliffen, um eine möglichst glatte, polierte Oberfläche zu erhalten. Falls nach der Begutachtung der Probenoberfläche allerdings noch nicht die erforderliche plane Fläche von 3x3 mm erreicht worden war, wurde noch mit dem Schleifpapier der Körnung 800 nachgearbeitet bis die Fläche erreicht war, um erst dann mit der bereits beschriebenen Politur fortzufahren.

Die Proben wurden nun mit einem Skalpell von dem Objektträger gelöst. Eine Messung der Dicke der Proben mit einer Mikrometerschraube ergab Werte zwischen 0,6 mm und 1,4 mm. Da eine gleiche Dicke aller Proben von 400 µm erreicht werden sollte, wurden nun die Proben so auf dem Objektträger mit Kunststoff fixiert, dass nun die dem Dentin zugewandte Seite oben lag. Nun wurde die Probe mit Hilfe des Schleifpapiers mit der Körnung 800 auf die gewünschten 400 µm heruntergeschliffen. Durch das Beschleifen der Rückseite des Schmelzschliffes konnte so gewährleistet werden, dass kein Dentin an der Versuchsoberfläche der Probe auftrat. Dadurch wurden reine Schmelzoberflächen für den weiteren Versuchsablauf erzielt.

Nachdem die Proben erneut von dem Objektträger entfernt und von Kunststoffresten befreit worden waren, wurde nochmals die Dicke der Proben mit der Mikrometerschraube kontrolliert. Eine Toleranz von 20 µm wurde noch akzeptiert. Proben die 379 µm und dünner waren mussten verworfen werden. Proben die dicker als 420 µm waren mussten erneut beschliffen werden.

Abschließend wurden die Proben in feuchten Kammern (Mat. 9) aufbewahrt. Für die 100%ige Luftfeuchtigkeit in den Kammern sorgte eine ständig feuchte Watterolle (Mat. 10), um so die Proben vor Austrocknung zu schützen.

Zum Schutz der Probe und um die Proben leichter händeln zu können wurden die Schmelzschliffe erneut auf einen Objektträger mit lichthärtendem Kunststoff fixiert. Diesmal jedoch wurde ein LMR Probehalter (Mat. 11) verwendet, da dieser für eine andere Versuchsreihe mit denselben Proben benötigt wurde und von seiner Größe her sehr gut zu benutzen war. In einigen Fällen war die Probe allerdings von ihrer Fläche her zu groß, so dass sie mit einem wassergekühlten Diamantbohrer (Mat. 12) in einem Winkelstück (Mat. 13) der Vertiefung des Probehalters angepasst werden musste.

Nachdem alle Proben fixiert waren, wurde ein quadratisches Stück Klebeband (Mat. 14) mit den Maßen 2x2 mm zentral auf die glatte polierte Oberfläche der Schmelzprobe angebracht. Dieser und die nachfolgenden Schritte erfolgten unter zur Hilfenahme eines Stereolichtmikroskops (Mat. 15). Daraufhin wurde die Schmelzoberfläche direkt neben den vier Ecken des Klebebandes durch den Diamantbohrer in einem roten Winkelstück mit einer Bohrung versehen. Dies geschah unter Wasserkühlung. Es war darauf zu achten, dass die Bohrung die Probe nicht perforierte, um die Bruchgefahr der Proben gering zu halten. Die Bohrungen waren notwendig um später bei der Profilometrie immer den gleichen Ausgangspunkt bei allen Proben zu haben.

Der nächste Schritt war nun, die nicht von dem Klebeband bedeckte Oberfläche der Proben mit Nagellack (Mat. 16) zu bestreichen. Im Anschluss konnte mit Hilfe eines Skalpell das Klebeband wieder von den Proben entfernt und die dann wieder freiliegende Oberfläche von Kleberesten befreit werden, wobei dieser Arbeitsschritt unter dem Mikroskop (Mat. 15) kontrolliert wurde.

Auf diese Weise wurde eine Versuchsfläche von ca. 4 mm² erreicht.

Jetzt erhielt jede Probe direkt auf dem LMR Probenhalter mit einem wasserunlöslichen Stift (Mat. 17) eine Probennummer und eine Versuchsreihennummer. Abschließend wurde die Versuchsreihennummer auf den Aufbewahrungsbehältern verzeichnet.

Somit waren alle 240 Proben in die 4 Versuchsreihen zu je 60 Proben per Zufall aufgeteilt worden.

3.1.3 Erzeugung von Erosionen

Zur Erosionserzeugung wurde jede Probe in jeweils ein verschraubbares Plastikröhrchen (Mat. 18) mit 10 ml 0,05 M Zitronensäure (Chem. 3) mit einem pH-Wert von 2,3 gelegt. Jede Probe hatte ihr eigenes, ebenfalls mit der Probennummer und der Nummer der Versuchsreihe versehenes Röhrchen, das nach der Erosionserzeugung zur Kalzium-Phosphat-Analyse zu Prof. Lussi (Universität Bern, Schweiz) geschickt wurde.

Die erosive Demineralisation erfolgte für 30, 60, 90 und 120 Minuten (Gruppen 1-4). Während dieser Zeit befanden sich die Proben in einem Schüttelbad (Mat. 19), die eine ständige Durchmischung der Zitronensäure in dem Plastikröhrchen gewährleisten sollte. Nach Ablauf der Erosionszeit wurden die Proben schnellstmöglich mit einer Pinzette (Mat. 20) aus den Plastikröhrchen entfernt und in ein Wasserbad gelegt. Nun wurde jede einzelne Probe

eine Minute lang unter fließendem Wasser abgespült, damit keine Säurerückstände an der Probe verbleiben konnten. Anschließend wurden die Proben wieder in ihre Behältnisse zur Aufbewahrung gelegt.

Abschließend musste der Nagellack wieder von den Proben entfernt werden. Dies gelang unter zur Hilfenahme des Mikroskops (Mat. 15), eines Skalpells und mit Aceton (Chem. 4). Nach einer weiteren Kontrolle unter dem Mikroskop (Mat. 15) konnte nun die Profilometrie durchgeführt werden.

3.2 Profilometrie

Zur Profilometrie wurde das Perthometer S8P (Mat. 21) unter Verwendung eines mechanischen Tastarmes (Mat. 22) verwendet. Die Spitze der Nadel des Tastarmes hatte einen Radius von 10 µm, die vertikale Auflösung des Systems lag bei 0,015 µm.

Um während des Ab tastens der Oberfläche Erschütterungen aus der Geräteumgebung abzufangen, wurde das Perthometer S8P auf einem pneumatisch gelagerten Spezialtisch (Mat. 23) positioniert.

Die Schmelzproben im LMR–Probenträger wurden mit Hilfe von Knetmasse (Mat. 24) der Reihe nach auf dem Messständer des Perthometers fixiert. Auch hierbei wurden jeweils 10 Proben pro Versuch zufällig ausgewählt bis alle Proben gemessen worden waren.

Jede Probe wurde sechs Messungen unterzogen, bei denen der Tastarm eine Strecke von 1,75 mm pro Messung zurücklegen musste und dabei mindestens 0,5 mm über nicht erodierten Schmelz gleiten sollte. Die verschiedenen Messungen fanden an genau definierten Stellen statt. Zuerst wurde die Nadel des Tastarmes in einem der Bohrlöcher positioniert. Anschließend wurde er um 0,5 mm vom Loch entfernt und um mindestens 0,5 mm von der Erosionsgrenzschicht zurückgefahren. Nun erfolgte die erste Messung. Da der Tastarm sich nach der Messung wieder in der gleichen Position wie vor der Messung befand, musste er nun nur noch weitere 0,5 mm vom ersten Bohrloch weiter entfernt werden, um die zweite Messung durchführen zu können. Die dritte Messung lief gleichermaßen ab. Sie war also 1,5 mm vom ersten und 0,5 mm vom entgegengesetzten Bohrloch der gleichen Seite entfernt. Für die Messungen vier bis sechs wurde eine zweite Probenseite gewählt und es wurden die gleichen Schritte wie bei den ersten drei Messungen durchgeführt.

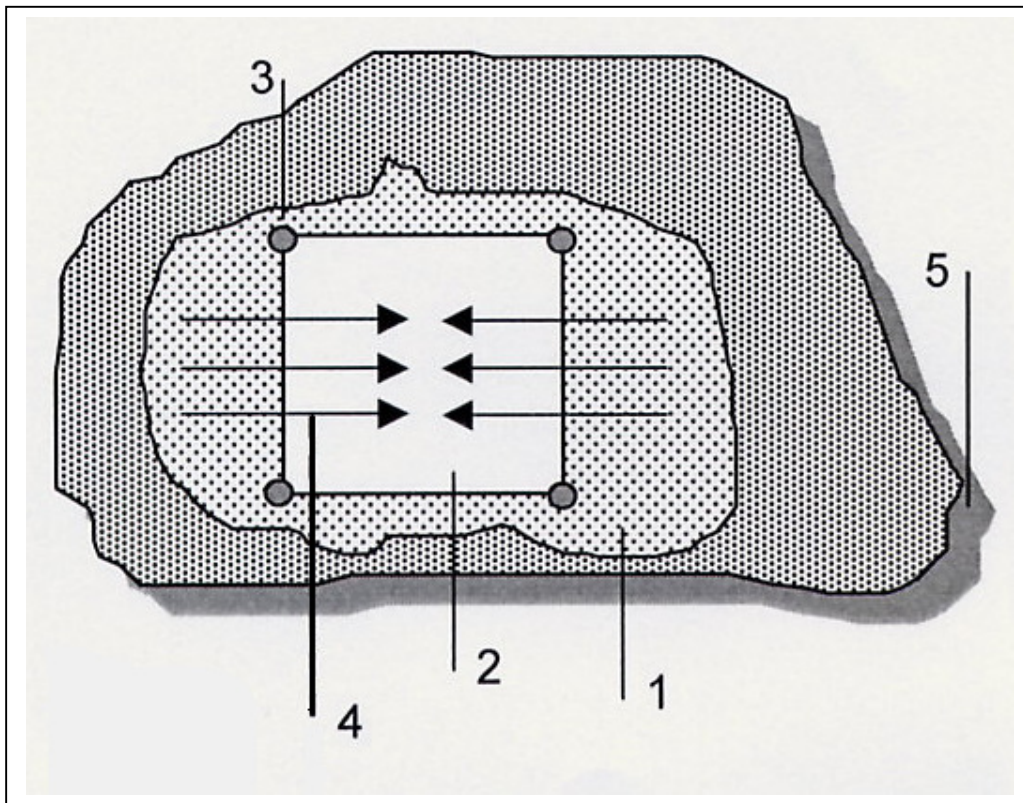


Abb.1 : Die Abbildung zeigt das Schmelzprobendesign und die Messfläche. Hierbei ist 1 die nicht - erodierte Referenzzone der Schmelzprobe für die Profilometrie, 2 die erodierte Zone, 3 sind die Bohrlöcher zum Erkennen der erodierten Zone bei der LMR, 4 die Messstrecke der Profilometrie und 5 die Schmelzprobendicke von 400 µm wie für die LMR benötigt.

Es wurde bewusst darauf verzichtet alle vier Probeseiten zu untersuchen, da es häufig vorkam, dass der nicht erodierte Bereich der Proben nicht auf allen vier Seiten gleichermaßen ausreichend groß war. Somit wurden die beiden Seiten ausgewählt, deren nicht erodierter Bereich am größten war.

Die Auswertung der Messstrecken erfolgte mit dem Computerprogramm Perthometer Concept 4,0 (Mat. 25). Hierbei musste der aufgezeichnete Profilschrieb zuerst ausgerichtet werden. Dazu wurde eine Strecke von 0,3 mm Länge im Referenzbereich der Probe, also im nicht erodierten Bereich der Probe, festgelegt und in einem x-y-Koordinatensystem ausgerichtet. Die zweite festzulegende Strecke war 1,0 mm lang und befand sich vollständig im erodierten Schmelzprobenbereich. Es war darauf zu achten, dass keine der beiden Strecken näher als 0,1 mm an den Anfangs- bzw. Endpunkt des Bereiches in dem sich der Übergang

von nicht erodiertem zu erodiertem Schmelz befand, heranreichen sollte. Aus den Mittelpunkten der beiden Strecken konnte nun der vertikale Abstand der beiden Strecken berechnet werden, was dem Substanzverlust durch die Erosion gleichkam. Für die Auswertung der Ergebnisse wurde der Mittelwert aller sechs Messstrecken genommen.

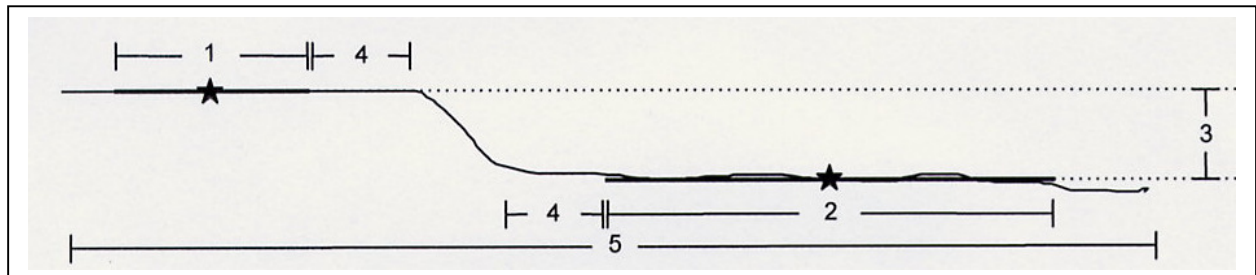


Abb. 2: Auswertung einer Messstrecke bei der 1 den Ausrichtungsbereich der Messstrecke im nicht erodierten Bereich (0,3 mm) und 2 den Ausrichtungsbereich der Messstrecke im erodierten Bereich (1,0 mm) darstellt. 3 ist hierbei die vertikale Distanz der Mittelpunkte der Strecken 1 und 2 und entspricht dem berechneten Substanzverlust, 4 ist der Abstand zum Übergang von nicht erodiertem Schmelz zu erodiertem Schmelz und 5 die Länge der gesamten Messstrecke (1,75 mm). Der * markiert den Mittelpunkt der Strecken 1 und 2

Reproduzierbarkeit der Messungen

Um die Messgenauigkeit der Geräte und Materialien zu testen war es notwendig, in einem Parallelversuch die Genauigkeit des Perthometer S8P zu überprüfen. Hierzu wurde zuerst dieselbe Messstrecke ohne Veränderung der Einstellungen zehnmal abgetastet und ausgewertet. Bei einer Probe, die 90 Minuten erodiert wurde, ergab sich dabei ein Mittelwert von 42,4 μm Substanzverlust bei einer Standardabweichung von $\pm 0,4 \mu\text{m}$. Zusätzlich wurde eine Seite einer Probe zehnmal gemessen, wobei sämtliche Einstellungen des Perthometers nach jeder Messung erneut durchgeführt wurden. Hierzu wurde eine Probe verwendet, die 60 Minuten erodiert worden war. Der Mittelwert dieser Messung lag bei 28,2 μm Substanzverlust mit einer Standardabweichung von $\pm 0,2 \mu\text{m}$.

Das Perthometer wurde an jedem Versuchstag, spätestens aber nach 40 Proben erneut geeicht.

3.3 Kalzium- und Phosphat-Analyse

Das Kalzium wurde mit Hilfe einer Atomabsorptionsspektroskopie (Instrumentation Laboratory AA/AE Spectrophotometer IL 157) bestimmt, welche in einer Lanthaniumumgebung (0,1%) durchgeführt wurde. Wiederholte Messungen ergaben eine Standardabweichung von $\pm 2\%$.

Die Phosphat-Analyse wurde nach dem Ammonium-Molybdän-Verfahren von Chen et al. [1956] durchgeführt. Die wiederholten Messungen ergaben hierbei eine Standardabweichung von $\pm 1\%$.

Der erosive Substanzverlust (μm) wurde aus der Kalzium- und Phosphatkonzentration unter der Voraussetzung, dass Zahnschmelz aus stoichiometrischem Hydroxylapatit besteht, wie folgt errechnet:

$$\text{Mineralverlust } (\mu\text{g}) = \frac{\text{Konz. (Ca bzw. P) x Vol. der Erosionslösung x relative Atommasse}}{\text{Anteil von Ca bzw. P im Hydroxylapatit}}$$

Das Volumen der Erosionslösung lag bei 10 ml.

Die relative Atommasse von Kalzium beträgt 40,08, die von Phosphat 30,97.

Der Anteil von Kalzium im Hydroxylapatit wurde mit 36,1 Gew.%, der von Phosphat mit 18,5 Gew.% angenommen [Weatherell and Robinson, 1973].

Mit dem Ergebnis dieser Gleichung ließ sich nun der erosive Substanzverlust errechnen, der sich aus der Formel

$$\text{Erosiver Substanzverlust } (\mu\text{m}) = \frac{\text{Mineralverlust}}{\text{Dichte des Zahnschmelzes x Versuchsfläche}}$$

ergab.

Die Dichte des Hydroxylapatits wird mit 3.15g/cm^3 angegeben [Nikifurok, 1985].

Die Versuchsfläche (mm^2) wurde mit Hilfe eines Mikroskops (Leica M 420, Leitz, Wetzlar, D), das an eine Messvorrichtung (Mitutoyo, Tokyo, Japan) angeschlossen war, errechnet. Hierbei ergab sich eine Durchschnittsfläche von $4,86\text{ mm}^2$.

3.4 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Programm SPSS 10.0 für Windows. Zum Vergleich der Versuchsgruppen wurden aus den jeweils gemessenen Werten die arithmetischen Mittelwerte, Mediane, Standardabweichungen sowie Minima und Maxima errechnet. Der Kolmogoroff-Smirnoff-Test ergab keine signifikanten Abweichungen von der Normalverteilung. Mit dem t-Test für abhängige Stichproben erfolgte der Vergleich innerhalb der Gruppen. Für den Vergleich unter den Gruppen wurde eine einfache Varianzanalyse (ANOVA) mit Anschlussstest nach Tukey durchgeführt. Für die Auswertung der Beziehung zwischen den einzelnen Methoden und der Erosionszeit und jeder Methode wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt. Die Korrelationen der einzelnen Meßmethoden wurden nach Pearson bestimmt.

Das Signifikanzniveau wurde bei 0,05 festgelegt.

3.5 Materialien- und Chemikalienliste

Materialien

Mat. 01 :	Trennschleifsystem:	Exakt-Trennschleifsystem, Exakt-Apparatebau O. Herrmann, Norderstedt (D)
Mat. 02 :	Objektträger :	Plexiglasobjektträger 5 x10 cm, Exakt-Apparatebau O. Herrmann, Norderstedt (D)
Mat. 03 :	Polymerisationslampe :	Halogenlampe Optilux 401, Kerr, Rastatt (D)
Mat. 04:	Skalpell:	Einmalskalpell, Aesculap, Tuttlingen (D)
Mat. 05:	Mikroschleifsystem :	Exakt Mikroschleifsystem, Exakt-Apparatebau O. Herrmann, Norderstedt (D)
Mat. 06:	Schleifpapier 800:	Schleifpapier Silikon Carbide, „C“ weight paper, Körnung P 800, Leco Corporation, St. Joseph, Michigan (USA)
Mat. 07:	Schleifpapier 4000:	Schleifpapier Silikon Carbide, „C“ weight paper, Körnung P 4000, Leco Corporation, St. Joseph, Michigan (USA)

Mat. 08:	Mikrometerschraube:	Mikrometerschraube mit Digitalanzeige (0 – 35 mm; 0,001 mm), Mitutoyo (J)
Mat. 09:	Behältnis:	Plexiglasbehälter, Greiner Labortechnik, Solingen (D)
Mat. 10:	Watterollen:	Gr. 2, Pluradent, Offenbach, (D)
Mat. 11:	LMR Probehälter:	Probehälter LMR, Inspektor Rescand Systems, Amsterdam (NL)
Mat. 12:	Diamantbohrer:	Zylinderdiamant (ISO No. 806314111514), Komet, Stuttgart (D)
Mat. 13:	Winkelstück:	rotes Winkelstück, schnelldrehend, Siemens, Bensheim (D)
Mat. 14:	Klebeband:	Tapeband Tesafilm beidseitig klebend, Tesa, Hamburg (D)
Mat. 15:	Stereolichtmikroskop:	Leitz, Stuttgart (D)
Mat. 16:	Nagellack:	Astor, Mainz (D)
Mat. 17:	Wasserfester Stift:	Lumocolor permanent, Staedtler, Nürnberg (D)
Mat. 18:	Plastikröhrchen:	Art. Nr. 62553041, Sarstedt, Nürnberg (D)
Mat. 19:	Schüttelplatte:	GFL Typ 2006, Burgwedel, (D)
Mat. 20:	Pinzette:	Zahnärztliche Pinzette, College RS 2002, Orbis Dental, Offenbach (D)
Mat. 21:	Perthometer S8P:	Perthometer S8P, Feinprüf, Göttingen (D)
Mat. 22:	Tastarm:	Taster FRW-750; 6851401, Perthen Mahr, Göttingen (D)
Mat. 23:	Spezialtisch:	Spezialtisch pneumatisch gelagert, Newport Mt. Baldy, Kalifornien (USA)
Mat. 24:	Knetmasse:	Kinderknete crealight 227/7, blau, Pelikan, Hannover (D)
Mat. 25:	Concept 4,0:	Perthometer Concept 4.0, Perthen Mahr, Göttingen (D)

Chemikalien

Chem. 01:	Thymollösung:	Thymol Pulver, Fluka Chemie AG, Buchs (CH)
Chem. 02:	lichthärt. Kunststoff:	Fixationskleber Technovit 7230 VLC, Kulzer – Exakt, Wehrheim (D)
Chem. 03:	Zitronensäure:	Citronensäure – Monohydrat, Art. 242.1000, Merck, Darmstadt (D)
Chem. 04:	Aceton:	Merck, Darmstadt (D)

4 Ergebnisse

4.1 Allgemeines

Von den 240 erstellten Schmelzproben konnten 3 Proben aufgrund ungünstiger Probengeometrie nicht ausgewertet werden. Bei allen Proben fanden sich nach Durchführung der Versuche makroskopische Veränderungen, wobei sich die Versuchsareale als kreidig weiße, opake Oberflächen darstellten, teilweise war im Grenzbereich zwischen Referenz- und Versuchsfläche eine Stufe zu erkennen.

4.2 Deskriptive Betrachtung und Vergleich der Messmethoden

Allgemein ließ sich sowohl profilometrisch als auch bei der Kalzium - bzw. Phosphatanalyse ein gleichmäßiger Mineralverlust feststellen (Abb. 3 und Tab. 2).

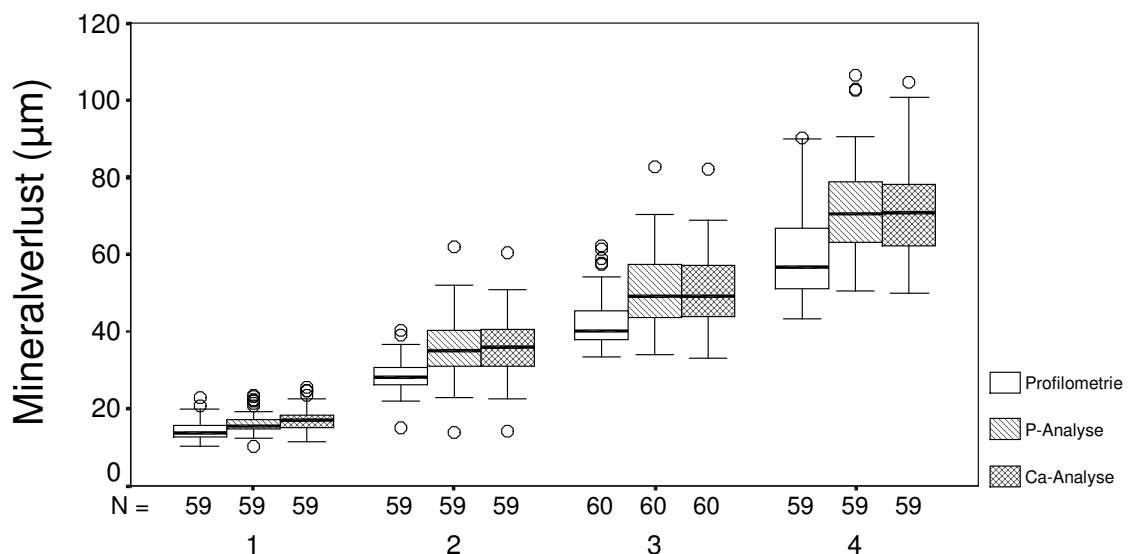


Abb.3: Mineralverlust (μm) für die Profilometrie, Phosphatanalyse (P) und Kalziumanalyse (Ca) nach Erosion in einer 0,05 M Zitronensäurelösung (pH 2,3) für 30 (1), 60 (2), 90 (3) und 120 (4) Minuten. Die Boxen repräsentieren das 2. und 3. Quartil sowie den Median, die Linien das 1. und 4. Quartil sowie Minima und Maxima sofern sie keine Ausreißer sind. Ausreißer (o) sind definiert als Werte, die mehr als eineinhalb Boxenlängen außerhalb liegen.

Es fand sich kein signifikanter Unterschied zwischen dem mit der Kalzium- und der Phosphatanalyse gemessenen Mineralverlust, die mittlere Differenz war bei allen Versuchen

sehr gering und lag insgesamt bei $0,08 \pm 1,24 \mu\text{m}$. Die profilometrisch ermittelten Werte lagen dagegen bei allen Versuchen signifikant niedriger als die mit der Kalzium- und Phosphatanalyse gemessenen Werte (p gegenüber beiden chemischen Messmethoden und bei allen Versuchen immer $\leq 0,001$). Die mittlere Differenz zwischen Profilometrie und Kalziumanalyse lag nach 30, 60, 90 und 120 Minuten Erosionszeit bei $-2,9 \pm 2,5 \mu\text{m}$ (83%), $-7,5 \pm 5,7 \mu\text{m}$ (79%), $-8,2 \pm 5,8$ (84%) und $-11,3 \pm 10,0 \mu\text{m}$ (84%), zwischen Profilometrie und Phosphatanalyse bei $-2,0 \pm 2,5 \mu\text{m}$ (88%), $-7,2 \pm 5,9 \mu\text{m}$ (80%), $-8,3 \pm 5,8$ (84%) und $-12,1 \pm 10,1 \mu\text{m}$ (83%).

Tab. 2: Mineralverlust (μm) für Profilometrie, Phosphatanalyse (P) und Kalziumanalyse (Ca) nach Erosion in einer 0,05 M Zitronensäurelösung (pH 2,3) für 30 (1), 60 (2), 90 (3) und 120 (4) Minuten.

Versuch		Profilometrie	P-Analyse	Ca-Analyse
1	n	59	59	59
	Mittelwert	14,3	16,3	17,2
	Median	13,6	15,5	16,9
	Standardabweichung	2,6	2,9	3,1
	Minimum	10,2	10,2	11,3
	Maximum	22,9	24,2	25,5
2	n	59	59	59
	Mittelwert	28,6	35,8	36,1
	Median	28,1	35,1	35,8
	Standardabweichung	4,2	7,6	7,4
	Minimum	15,1	13,8	14,1
	Maximum	40,2	62,0	60,3
3	n	60	60	60
	Mittelwert	42,9	51,2	51,2
	Median	40,1	49,2	49,0
	Standardabweichung	7,6	9,6	9,4
	Minimum	33,5	34,0	33,0
	Maximum	69,1	82,7	82,0
4	n	59	59	59
	Mittelwert	59,8	71,9	71,1
	Median	56,7	70,4	70,7
	Standardabweichung	11,1	12,1	11,8
	Minimum	43,4	50,4	50,0
	Maximum	90,3	106,5	104,6

4.3 Zusammenhang und Übereinstimmung der Messmethoden

Die beiden chemischen Testverfahren (Abb. 2) zeigten sowohl über alle Werte ($r=0,99$; $p\leq 0,001$), als auch für die einzelnen Versuchsgruppen ($r=0,96$ bei 30 Minuten, $r=0,99$ bei 60 Minuten, $r=0,99$ bei 90 Minuten und $r=0,99$ bei 120 Minuten; p für alle Versuche $\leq 0,01$) eine sehr hohe Korrelation.

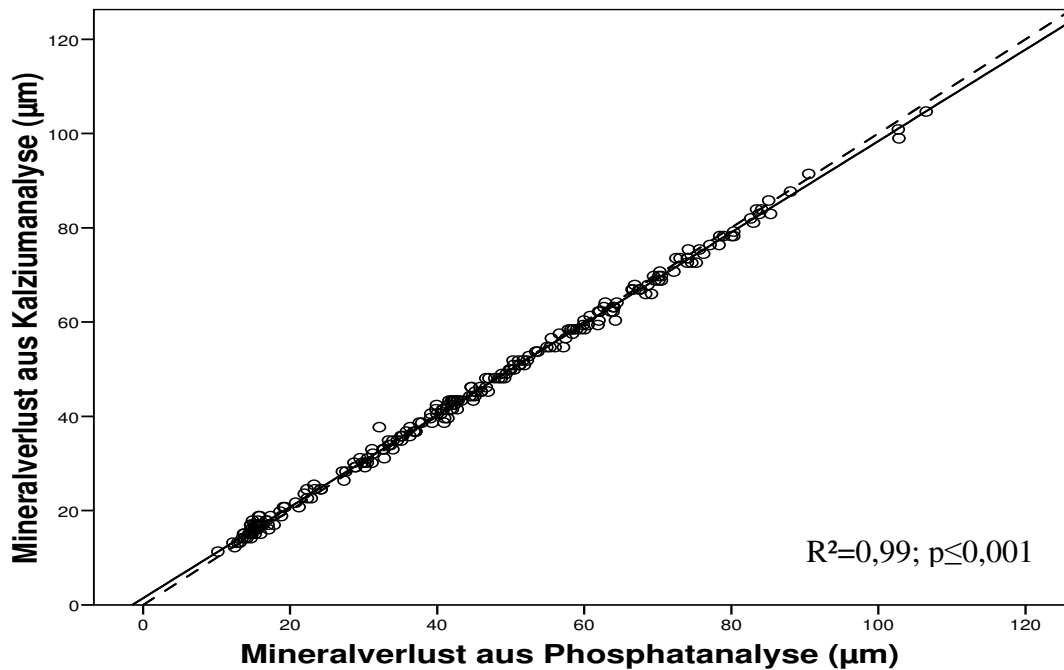


Abb. 4 Scatterplot für den Mineralverlust aus den beiden chemischen Analyseverfahren. Die gestrichelte Linie entspricht $y=x$, die Regressionsgerade (Methode der kleinsten Quadratsumme; $y=0,97x + 1,4$) ist durchgezogen dargestellt, R^2 - Regressionskoeffizient.

Im Bland-Altman Plot (Abb. 5) zeigt sich ein sehr geringer Bias bei geringer Streuung, allerdings ein Trend zu einem proportionalen Fehler.

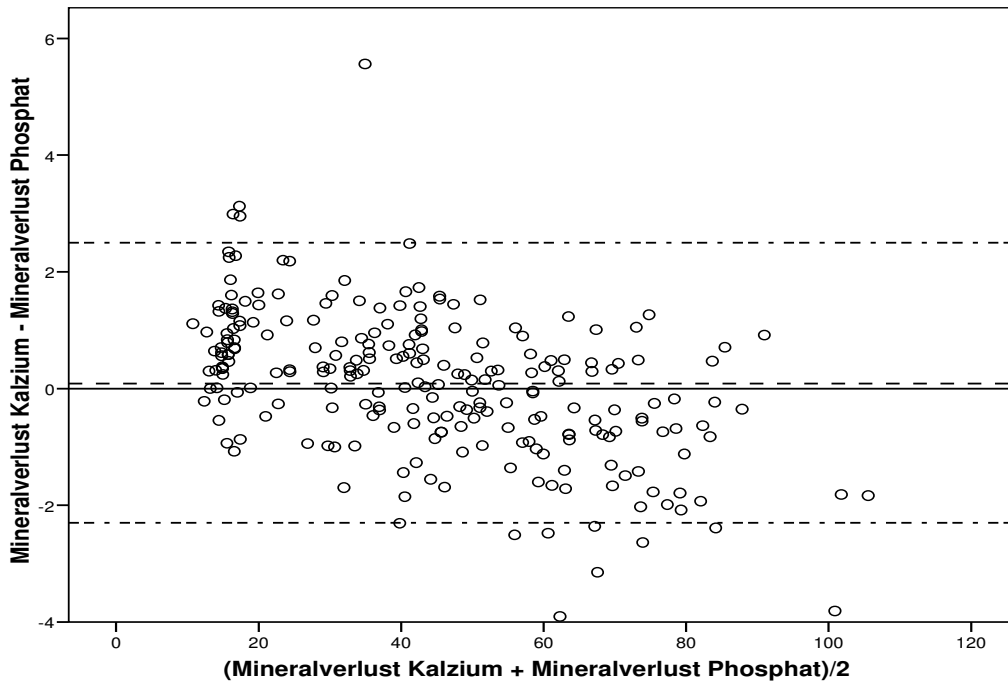


Abb. 5 Bland-Altman Plot zur Darstellung der Übereinstimmung der beiden chemischen Methoden zur Bestimmung des Mineralverlusts (μm). Dargestellt ist die Referenzlinie für Differenz aus beiden Methoden = 0 (durchgezogene Linie) sowie der arithmetische Mittelwert für die Differenz aus beiden Methoden (gestrichelte Linie) $\pm 1,96 \cdot \text{SA}$ (gestrichelt-gepunktete Linien).

Beim Vergleich von Profilometrie und Kalziumanalyse (Abb. 4) zeigte sich insgesamt eine sehr hohe (r über alle Werte 0,95; $p \leq 0,001$), für die einzelnen Versuchsgruppen jedoch nur eine mittlere Korrelation ($r=0,63$ bei 30 Minuten, $r=0,65$ bei 60 Minuten, $r=0,79$ bei 90 Minuten und $r=0,62$ bei 120 Minuten; p immer $\leq 0,001$). Aufgrund der guten Übereinstimmung der Messungen aus der Kalzium- und Phosphatanalyse stellt sich die Korrelation von Profilometrie und Phosphatanalyse (Abb. 4) ähnlich wie zur Kalziumanalyse dar (r über alle Werte 0,95 bei $p \leq 0,001$; $r=0,61$ bei 30 Minuten, $r=0,63$ bei 60 Minuten, $r=0,80$ bei 90 Minuten und $r=0,62$ bei 120 Minuten; p immer $p \leq 0,001$).

Die Darstellung als Bland-Altman Plot (Abb. 6) zeigt für die Übereinstimmung der chemischen Verfahren mit der Profilometrie einen deutlichen Bias sowie eine größere Streuung mit zunehmendem Mineralverlust, weiterhin lässt sich ein Trend zu einem proportionalen Fehler vermuten.

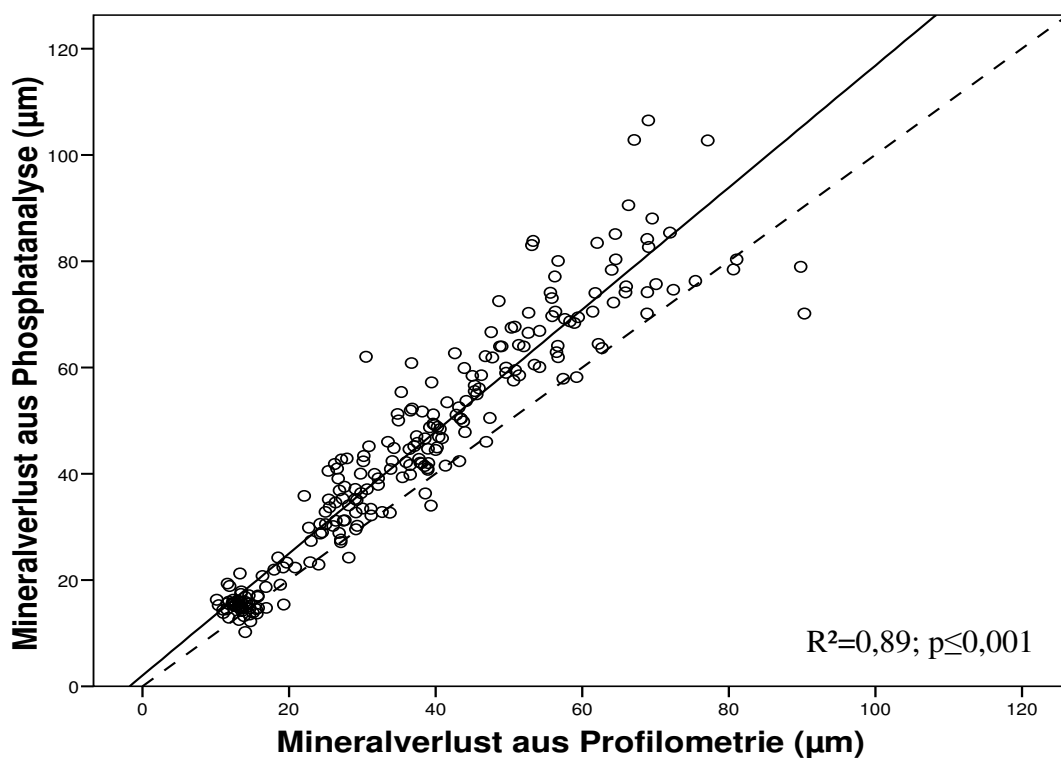
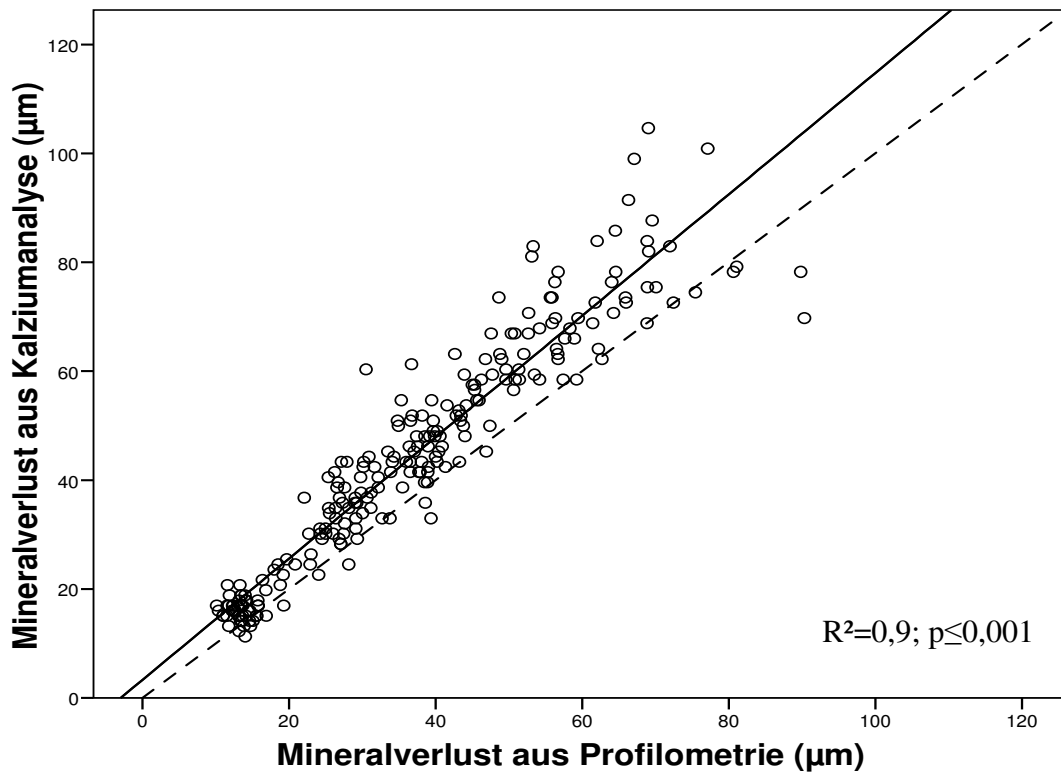


Abb. 6 Scatterplot für den Mineralverlust aus den beiden chemischen Analyseverfahren (oben: Kalziumanalyse, unten: Phosphatanalyse) und dem profilometrisch ermittelten Mineralverlust. Die gestrichelte Linie entspricht $y=x$, die Regressionsgerade (Methode der kleinsten Quadratsumme. Oben: $y=1,1x+3,3$; unten: $y=1,2x+2,0$) ist durchgezogen dargestellt. R^2 -Regressionskoeffizient.

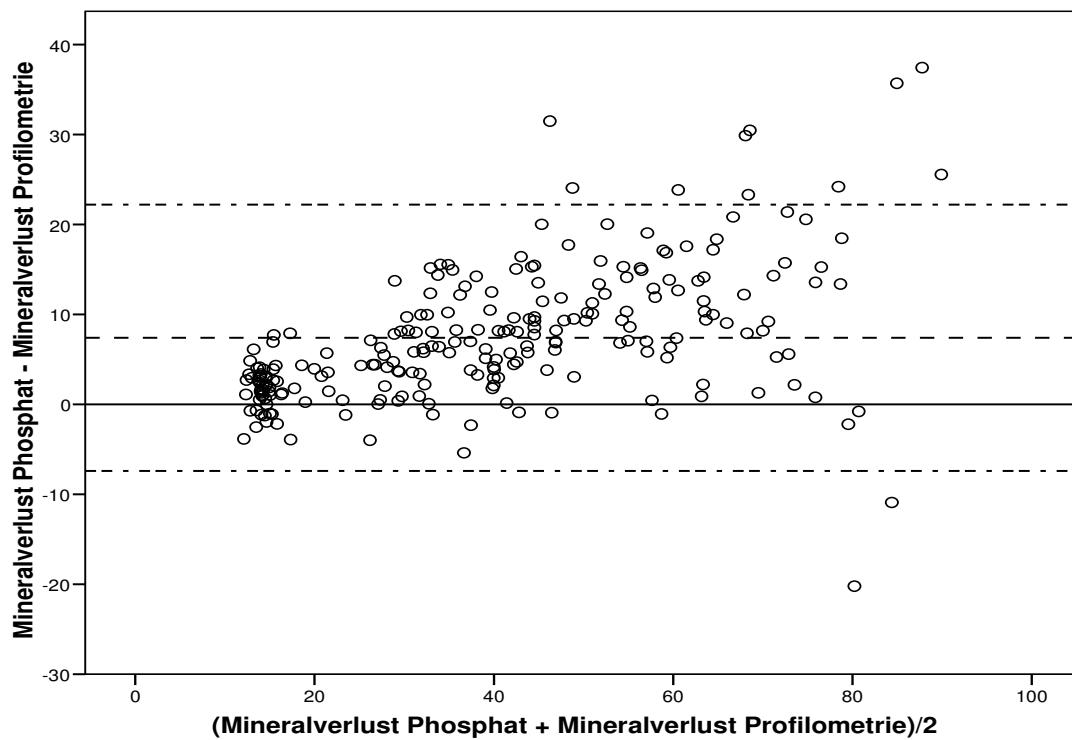
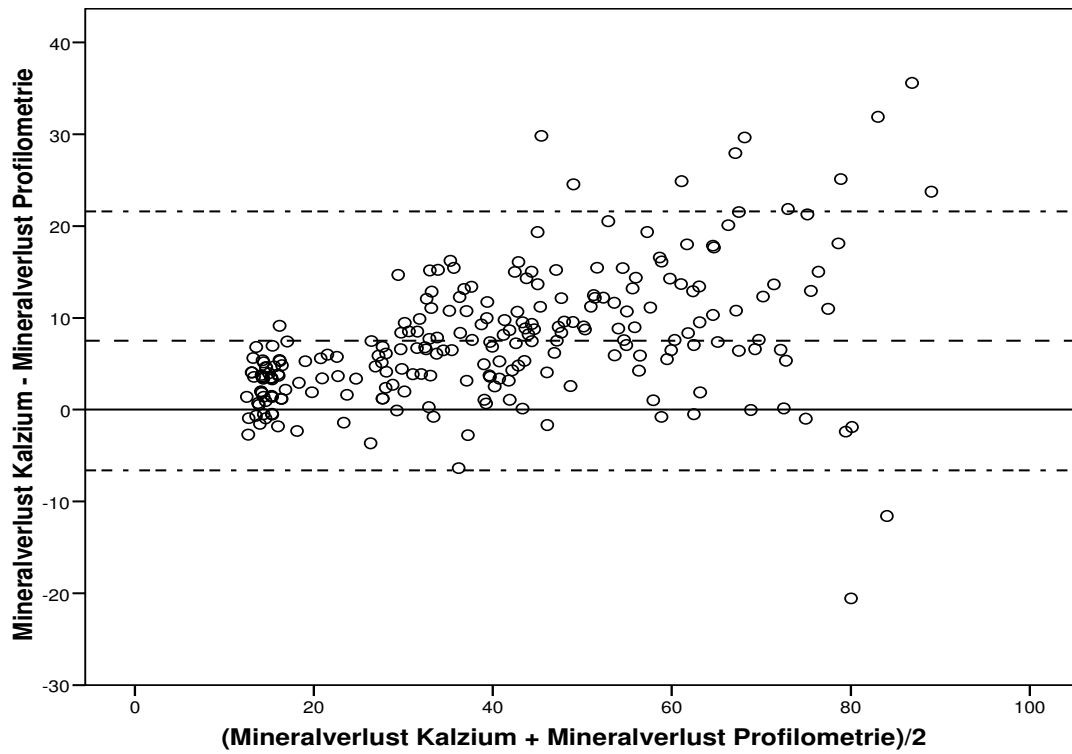


Abb. 7 Bland-Altman Plot zur Darstellung der Übereinstimmung der beiden chemischen Methoden zur Bestimmung des Mineralverlusts (oben: Kalziumanalyse, unten: Phosphatanalyse) mit der Profilometrie (μm). Dargestellt ist die Referenzlinie für Differenz aus beiden jeweiligen Methoden = 0 (durchgezogene Linie) sowie der arithmetische Mittelwert für die Differenz aus beiden jeweiligen Methoden (gestrichelte Linie) $\pm 1,96 \cdot \text{SA}$ (gestrichelt-gepunktete Linien).

4.4 Verhältnis von Kalzium und Phosphat in der Erosionslösung

Da zur Berechnung des räumlichen Mineralverlusts ausgedrückt in μm von dem theoretischen Anteil von Kalzium und Phosphat in stöchiometrischem Hydroxylapatit ausgegangen wurde, ist nun das tatsächlich gemessene Verhältnis von Kalzium zu Phosphat in den Erosionslösungen ($\mu\text{mol/l}$) in Abhängigkeit vom Mineralverlust von Interesse.

Dazu wurden die Proben nach dem profilometrisch gemessenen Mineralverlust betrachtet und arbiträr in vier Gruppen im Abstand von $20 \mu\text{m}$ aufgeteilt (Tab. 3) sowie das Verhältnis von Kalzium und Phosphat berechnet.

Tab. 3: Verhältnis von Kalzium und Phosphat in der Erosionslösung ($\mu\text{mol/l}$; \bar{x} - arithmetischer Mittelwert, SA- Standardabweichung) in Abhängigkeit vom profilometrisch bestimmten Mineralverlust (μm).

Gruppe 1 $\leq 20 \mu\text{m}$	n $\bar{x} \pm \text{SA}$ Minimum Maximum	58 $1,76 \pm 0,10$ 1,6 2,0
Gruppe 2 $> 20-40 \mu\text{m}$	n $\bar{x} \pm \text{SA}$ Minimum Maximum	88 $1,68 \pm 0,05$ 1,6 2,0
Gruppe 3 $> 40-60 \mu\text{m}$	n $\bar{x} \pm \text{SA}$ Minimum Maximum	63 $1,66 \pm 0,03$ 1,6 1,7
Gruppe 4 $> 60 \mu\text{m}$	n $\bar{x} \pm \text{SA}$ Minimum Maximum	28 $1,64 \pm 0,02$ 1,6 1,7

Über alle Proben war das Verhältnis von Ca zu P $1,69 \pm 0,07$, was nahe an den Wert für stöchiometrisches Hydroxylapatit (1,67) herankommt, jedoch höher ist, als für Schmelz angegeben (1,61, [Nikiforuk, 1985]).

Wie aus der Tabelle 3 und der Abbildung 8 hervorgeht, hat sich das Verhältnis von Ca zu P mit zunehmender Demineralisierung verändert, wobei initial war offenbar relativ zu P mehr

Ca in Lösung gegangen war. In der Gruppe mit dem geringsten Mineralverlust lag der Faktor mit $1,76 \pm 0,06$ signifikant höher als in allen anderen Gruppen (p immer $\leq 0,001$), in der Gruppe mit einem Mineralverlust $>20-40 \mu\text{m}$ ($\text{Ca/P } 1,69 \pm 0,05$) fand sich noch ein signifikanter Unterschied zu der Gruppe mit dem höchsten Mineralverlust ($\text{Ca/P } 1,65 \pm 0,03$; $p \leq 0,05$).

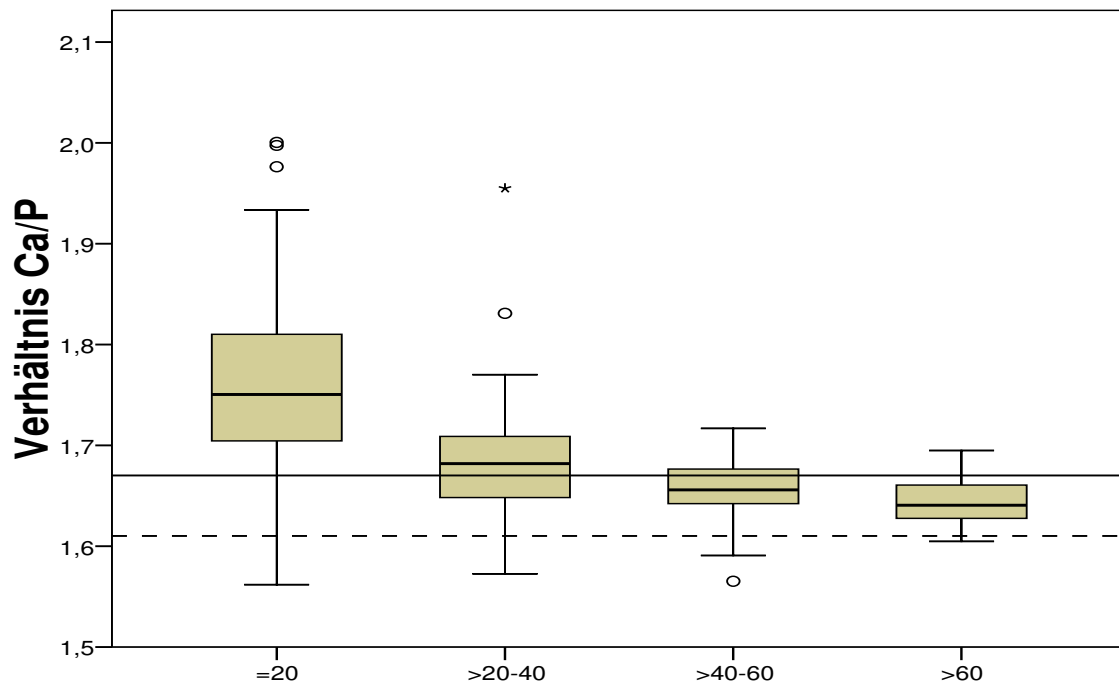


Abb. 8: Verhältnis von Kalzium und Phosphat in der Erosionslösung in Abhängigkeit vom Mineralverlust (μm). Die gestrichelte Referenzlinie repräsentiert das Verhältnis von Kalzium und Phosphat in Schmelz (1,61), die durchgezogene in stöchiometrischem Hydroxylapatit (1,67) [Nikiforuk, 1985]. Die Boxen repräsentieren das 2. und 3. Quartil sowie den Median, die Linien das 1. und 4. Quartil sowie Minima und Maxima sofern sie keine Ausreißer sind. Ausreißer (o) sind Werte, die mehr als eineinhalb, Extremwerte (*) sind Werte, die mehr als drei Boxenlängen außerhalb liegen.

5 Diskussion

5.1 Versuchsaufbau- und Durchführung

5.1.1 Probenmaterial und Erzeugung der Erosionen

Um eine gute Vergleichbarkeit der einzelnen Proben zu erreichen, sollten diese eine möglichst gleiche Beschaffenheit aufweisen, welche allerdings von vielen Faktoren abhängig ist.

Die Zahnoberfläche insgesamt und die äußere Schicht des Schmelzmantels im Besonderen ist nach dem Durchbruch ständigen wechselnden Bedingungen ausgesetzt. Im Sinne einer posteruptiven Schmelzreifung und in Abhängigkeit von Alter und Lebensumständen kommt es zur Einlagerung von Kalzium, Phosphat und Fluorid und damit zu einer individuell unterschiedlichen Verringerung der Säurelöslichkeit. Als Beispiel hierfür soll eine Studie von Takeuchi et al. [1996] dienen, die extrahierte Prämolaren von Schulkindern aus Deutschland und Japan untersuchten. Die Fluoridkonzentration der Zahnproben von Kindern aus der Stadt Chemnitz war sowohl im Schmelz als auch im Dentin zwei bis dreimal höher als die der Proben von Kindern aus den Städten Erfurt und Nagoya. Eine Erklärung hierfür bot die unterschiedliche Fluoridkonzentration des Trinkwassers, welche in Chemnitz bei 1,0 ppm lag und in Erfurt und Nagoya unter 0,2 ppm.

Es finden ständig Ionenaustauschprozesse zwischen Speichel, den Flüssigkeiten in der Mundhöhle und der an der Zahnoberfläche haftenden Plaque statt. Die Stärke und die Richtung dieses Ionenaustausches hängen von verschiedenen Faktoren ab. Die Speichelfließrate, der pH- Wert des Speichels und der der Plaque, aber auch die Fluoridkonzentration der Umgebung des Zahnes sind einige dieser Faktoren. Da diese wiederum lokal sehr unterschiedliche Werte aufweisen, kann man schon aus diesem Grund die Schmelzqualität der Zahnoberfläche bei der sich in der Mundhöhle befindenden Zähnen nicht als gleichmäßig mineralisiert betrachten. Des Weiteren ist allein schon die Lage einer Zahnfläche für eine unterschiedliche Stärke der Schwankungen der Faktoren verantwortlich. Die frei zur Mundhöhle liegenden Flächen (oral, vestibulär und okklusal) sind eindeutig stärkeren Schwankungen ausgeliefert als die Flächen die in Kontakt zum Nachbarzahn stehen (Approximalflächen) [Schröder, 1992].

Daher wurden in dieser Versuchsreihe nur Zähne verwendet, die keinen Kontakt zur Mundhöhle aufwiesen. Es handelte sich dabei um vollständig retinierte Weisheitszähne, die operativ entfernt worden waren. So konnte man möglichst gleiche Testbedingungen erhalten. Ganss et al. [2000] konnten zeigen, dass an den verschiedenen polierten Glattflächen (mesial, distal, oral, vestibulär) eines Zahnes der Substanzverlust annähernd gleich ist. Deshalb wurden auch vier Schmelzproben aus einem Zahn hergestellt, die longitudinal auf die vier Versuchsgruppen aufgeteilt wurden.

Zur Erzeugung von Erosionen wurde in dieser Studie Zitronensäure verwendet, die in Getränken und Früchten am häufigsten zu finden ist [Imfeld, 1983]. Die Konzentration wurde mit 0,05 M so gewählt, wie sie auch in Getränken wie z. B. Sprite Light vorkommt [Attin et al., 1996]. Die Zitronensäure ließ sich leicht herstellen und zeigte während des Versuches einen konstanten pH- Wert von 2,3. Da die Zitronensäure zudem auch noch in der Herstellung relativ günstig ist, erfüllte sie die an sie gestellten Anforderungen hinreichend.

Die Erosivität von Zitronensäure ist schon lange bekannt und auch mehrfach untersucht worden. Schon McClure und Ruzicka [1946] konnten in ihrer Studie nachweisen, dass Zitronensäure noch bei einem pH-Wert von 6,5 bis 6,7 Rattenmolaren zu entkalken vermag, während Milchsäurefütterung bei gleichem pH- Wert zu keinen erosiven Veränderungen führte. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Zitronensäure eine dreiwertige Säure ist und komplexbildende Eigenschaften besitzt [Brosowsky, 1966]. Die Komplexierung von Kalzium führt zu einer anhaltenden Untersättigung der Lösung in Bezug auf das Apatit. Durch diese Verschiebung des Ionengleichgewichtes kann somit vermehrt Kalzium aus dem Zahn herausgelöst werden, was die Demineralisation weiter verstärkt. Auf diese Weise kann Zitronensäure Hydroxylapatit in fast neutralem Milieu demineralisieren [Attin et al., 1996].

5.1.2 Betrachtung der Methoden

Bei der Vielzahl der verschiedenen Meßmethoden erscheint es sinnvoll diese in Beziehung zueinander zu setzen, um die Ergebnisse einzelner Studien miteinander vergleichen zu können. Daher wurden in dieser Studie drei quantitative Verfahren miteinander verglichen. Dies waren die chemischen Testverfahren der Kalzium- und Phosphatanalyse sowie die Profilometrie.

5.1.2.1 Profilometrie

Die Profilometrie ist eine etablierte Meßmethode, die von vielen Autoren angewendet wird. Ein Vorteil der Profilometrie ist der geringe zeitliche Aufwand und die einfache Durchführung. Sie kann bei in vitro und in situ Studien angewendet werden und es sind Mehrfachmessungen möglich.

Das Prinzip der Profilometrie ist, den oberflächlichen Mineralverlust in Relation zur unversehrten Oberfläche zu messen, um so den Substanz- bzw. Mineralverlust bestimmen zu können.

Mit Hilfe eines Mikrotasters werden dabei die Höhenunterschiede der einzelnen Probenareale in proportionale Auslenkungen einer Tastspitze umgewandelt, die wiederum in einem zweiten Schritt in ein elektrisches Signal transferiert werden. Die Messgröße ist im Falle von Erosion also ein räumlicher Substanzverlust im Sinne einer Stufe. Diese Messgröße ist durchaus anschaulich, da sie dem klinischen Erscheinungsbild von Erosionen entspricht. Das Abtasten der Oberfläche kann dabei mechanisch mit einem Mikrotaster oder alternativ berührungslos mit einem Lasertaster erfolgen.

Ein Nachteil der Profilometrie ist darin zu finden, dass es sich bei diesem Verfahren um eine reine Oberflächenabtastung handelt. Es kann somit keine Aussage über die Schmelzschichten gemacht werden, die zwar partiell entmineralisiert, jedoch als Struktur noch vorhanden sind. Daher ist dieses Verfahren auch nur bedingt für Remineralisationsversuche geeignet, da sie diese eben nur bei einem absoluten Mineralgewinn im Sinne von Auflagerungen berücksichtigen kann. Alle etwaigen Remineralisationsprozesse der Demineralisationsschicht bleiben unberücksichtigt. Um solche Versuche dennoch durchführen zu können, schlägt Eisenburger ein 30 Sekunden dauerndes Ultraschallbad vor, das die partiell entmineralisierten Areale nahezu vollständig entfernen soll [Eisenburger et al., 2000]. Diese Maßnahme ist allerdings nie sinnvoll begründet worden.

Profilometrische Messungen erlauben grundsätzlich reproduzierbare Messungen unter 1 µm. Daher wird dieses Analyseverfahren vor allem in der Industrie zur Messung von Oberflächenrauigkeiten verwendet, bei der noch deutlich geringere Unterschiede in der Oberflächengeometrie erfasst werden müssen, als bei Fragestellungen in der Erosionsforschung.

Das Grundproblem der Profilometrie bei Serienmessungen liegt also nicht im Messbereich, sondern bei dem Wiederauffinden der gemessenen Areale.

Bei der quantitativen Bestimmung eines Mineralverlusts ist es nun erforderlich, ein Versuchsareal in Relation zu einem Referenzareal zu beurteilen. Die Genauigkeit und Sensitivität profilometrischer Messungen wird somit wesentlich mehr von der Probenqualität und von Ungenauigkeiten bei der Konstruktion von Referenzpunkten, oder bei sequentiellen Messungen von Fehlern bei deren Re-Identifikation, als durch die vertikale Auflösung des Systems bestimmt. Darüber hinaus müssen bei der Auswertung der Profilschriebe bestimmte Konstruktionsmerkmale per Hand am Bildschirm definiert werden, was ebenfalls zu Messungenauigkeiten führen kann.

Friedrich [2001] maß zur Feststellung der Reproduzierbarkeit je eine Schmelzprobe, die ein „leicht“ ablesbares Profil aufzeigte (deutliche Stufenbildung, geringe Wellenbildung im erodierten Anteil des Profils), und eine Probe, die als „schwierig“ auswertbar angesehen wurde (Stufenbildung vorhanden, aber stark welliges Profil im erodierten Bereich). Beide Proben wurden zehnmal ausgewertet und dabei jeweils aus dem Messsystem entfernt und neu justiert, profilometrisch vermessen und ausgewertet. Um eine Fläche zu erfassen, wurden immer fünf parallel liegende Spuren im Abstand von 0,1 mm abgetastet. Die „leichte“ Probe hatte einen durchschnittlichen Substanzverlust von 81,0 μm , mit einem Minimum von 79,4 μm und einem Maximum von 83,0 μm bei einer Standardabweichung von 1,3. Die „schwierige“ Probe hatte hierbei einen durchschnittlichen Substanzverlust von 63,4 μm , mit einem Minimum von 59,2 μm und einem Maximum von 74,1 μm bei einer Standardabweichung von 4,6 [Friedrich, 2001].

In der vorliegenden Studie lag die Standardabweichung bei der Auswertung von wiederholten Profilschrieben derselben Probe bei einem Messwert von 28,3 μm ($n=10$, Max. 30,2 μm , Min. 26,7 μm) bei 0,3 μm und damit bei etwa 1%. Insgesamt erscheint also die sichere Unterscheidung eines Substanzverlusts von etwa 3 μm möglich.

Damit liegen die in der vorliegenden Untersuchung gemessenen Werte von etwas über 20 μm weit über der Messgrenze des Systems. Darüber hinaus ist die Profilometrie ein sehr robustes System, das wenig fehleranfällig ist. Allein die optische Kontrolle des Tasters und des entsprechenden Profilschriebs während des Abtastvorgangs ermöglicht die direkte Vermeidung von Messfehlern beispielsweise aufgrund von Verunreinigungen oder Unregelmäßigkeiten auf der Probenoberfläche oder Erschütterungen des Tastsystems.

Zur Zeit wird die Profilometrie vielerorts angewendet. Allerdings existieren verschiedene Parameter für die Probengeometrie und die Analyse der Profilschriebe.

Zur Analyse von Profilschrieben hat sich bislang kein Standardverfahren durchgesetzt. So wurde der Substanzverlust als vertikale Differenz zweier vorher definierter Punkte [Rugg-Gunn et al., 1998; West et al., 1998] oder als maximale Tiefe des Profils in Relation zur Referenzebene [Rytömaa et al., 1989] definiert, was besonders bei kurzen Erosionszeiten zu einer Über- oder Unterschätzung des Substanzverlusts führen kann. Andere Autoren haben Parameter wie die mittlere Tiefe eines Versuchsareals in Relation zur Referenzebene [Attin et al., 1998] oder als Fläche über einer Kurve [Hall et al., 1997] verwendet, die sicherlich eine validere Beurteilung von Substanzverlusten erlaubt.

Neben unterschiedlichen Auswertverfahren für die Profilschriebe finden verschiedene Tastsysteme Verwendung. Optische Tastsysteme sind als berührungslose Verfahren sensibler gegenüber Verunreinigungen der Probenoberfläche, erfassen aber auch fragile Oberflächenstrukturen [Attin et al., 1999; Zhang et al., 2000]. Mechanische Tastsysteme dagegen senken sich bis zu einem gewissen Betrag in teilweise demineralisierte Probenoberflächen ein und erfassen damit zumindest annähernd auch partielle Mineralverluste ohne räumliche Strukturveränderungen [Eisenburger und Addy, 2002; Hall et al., 1997; Rugg-Gunn et al., 1998; West et al., 1998].

Weiterhin finden sich verschiedene Methoden der Probenvorbehandlung sowohl bei der Politur als auch bei der Gestaltung der Referenz- und Versuchsareale.

So wurden die Proben von Attin et al. [1998] mit einer Körnung von bis zu P 4000 poliert, die von Eisenburger et al. [2000] und West et al. [1998] noch mit einer Körnung von P 800 und die von Rugg-Gunn et al. [1998] „so wenig wie möglich“.

Die Verwendung unterschiedlicher Probendesigns und Auswertmethoden macht allerdings einen Vergleich von Studien schwierig, so dass die Erarbeitung von Standards für profilometrische Messungen von Substanzverlusten notwendig erscheint.

5.1.2.2 Chemische Testverfahren

Das Messprinzip der chemischen Testverfahren besteht in der Bestimmung der in Lösung gegangenen Ionen (Kalzium oder Phosphat) als Konzentration. Die Verfahren sind sehr sensitiv.

Die Kalzium-Analyse erfolgt absorptionspektrometrisch, die Phosphat-Analyse wird nach dem Ammonium-Molybdän-Verfahren nach Chen et al. [1956] durchgeführt.

Die Messgröße bezieht sich auf das, was von der Zahnschmelze entfernt wurde und bleibt als Konzentrationsangabe abstrakt und ohne klinischen Bezug. Der in Lösung gegangene Menge an Kalzium und Phosphat kann je nach Mineralisationsgrad durchaus einem unterschiedlichen räumlichen Substanzverlust entsprechen (siehe Problem der Umrechnung, Seite 51 Kap. 5.2.2 – Vergleich der Messergebnisse aus Phosphat- und Kalziumanalyse mit der Profilometrie).

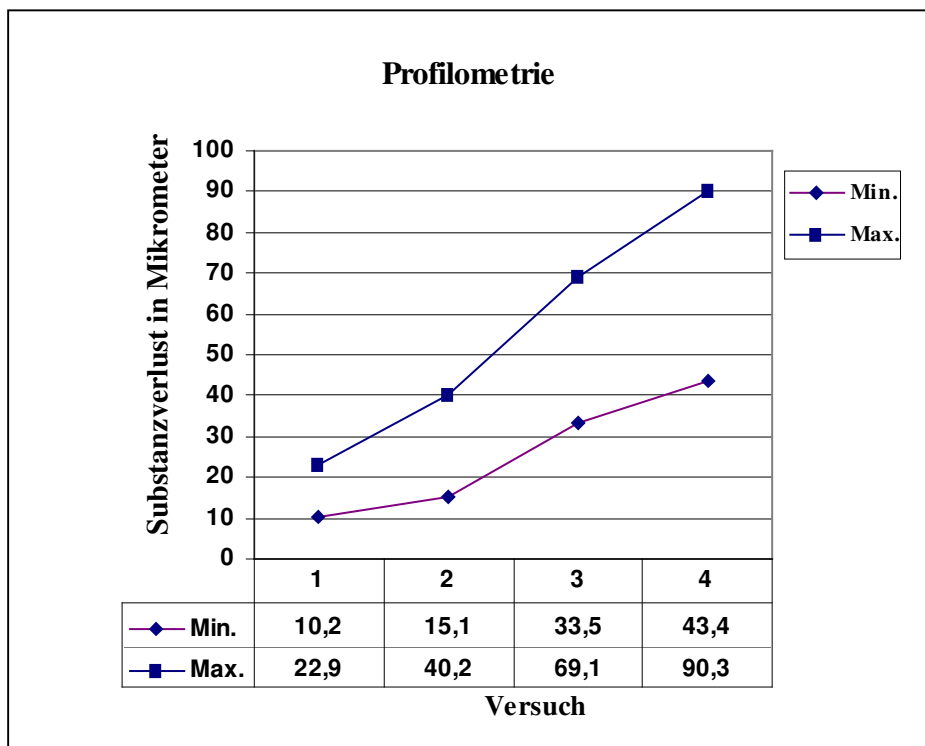
5.2 Diskussion der Ergebnisse

5.2.1 Charakteristik des erosiven Mineralverlustes

Alle Messmethoden zeigten im Vergleich einen nahezu linearen Mineralverlust. So lag der durchschnittliche Substanzverlust der Profilometrie nach 30 Minuten bei 14,3 μm bei einer Standardabweichung (SD) von 2,6. Nach 60 Minuten lag er bei 28,1 μm (SD 4,2), nach 90 Minuten bei 42,9 μm (SD 7,7) und nach 120 Minuten bei 59,8 μm (SD 11,1). Bei der Phosphatanalyse war der durchschnittliche Substanzverlust nach 30 Minuten 16,3 μm (SD 2,9), nach 60 Minuten 35,8 μm (SD 7,6), nach 90 Minuten 51,2 μm (SD 9,6) und nach 120 Minuten 71,9 μm (SD 12,1) groß. Bei der Kalziumanalyse wiederum lag der durchschnittliche Substanzverlust nach 30 Minuten bei 17,2 μm (SD 3,1), nach 60 Minuten bei 36,1 μm (SD 7,4), nach 90 Minuten bei 51,2 μm (SD 9,4) und nach 120 Minuten bei 71,1 μm (SD 2,9)..

Dies deckt sich mit anderen Untersuchungen, die ebenfalls einen linearen Zusammenhang in Bezug zur Zeit bei erosivem Substanzverlust festgestellt haben [Eisenburger et al, 2000; Hughes et al., 1999; Meurman und Frank, 1991; West et al., 1998].

Es muss allerdings auch erwähnt werden, dass die Spannweite der einzelnen Messergebnisse in einer Versuchsgruppe teilweise doch sehr beträchtlich war. Daher ist die Anfälligkeit des Schmelzes verschiedener Proben auf Säureangriffe relativ unterschiedlich ausgefallen, was sich durch die bereits erwähnte unterschiedliche Schmelzzusammensetzung erklären lässt. Dieses Ergebnis ist klinisch relevant. Es lässt sich feststellen, dass es erhebliche individuelle Unterschiede in der Ausprägung des Substanzverlustes bei gleicher Säureeinwirkung gibt. Bei bestimmten Patienten liegt somit eine hohe Prädisposition für Zahnhartgewebeverlust vor. Die Spannweite wird auch aus den folgenden Abbildungen deutlich.



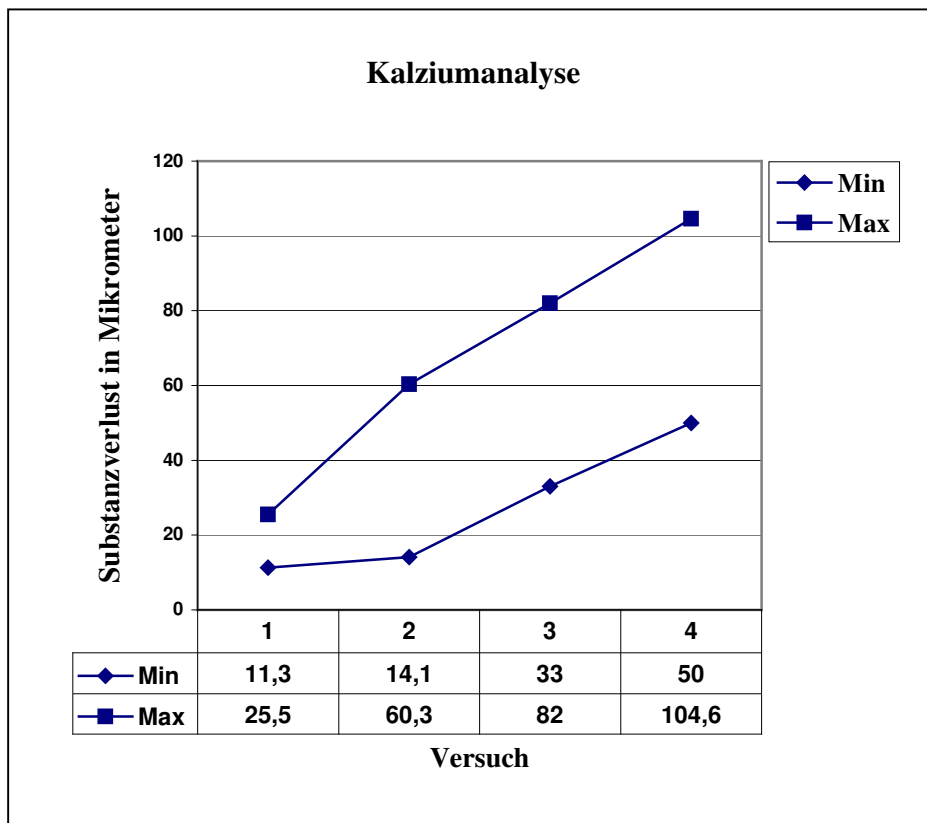
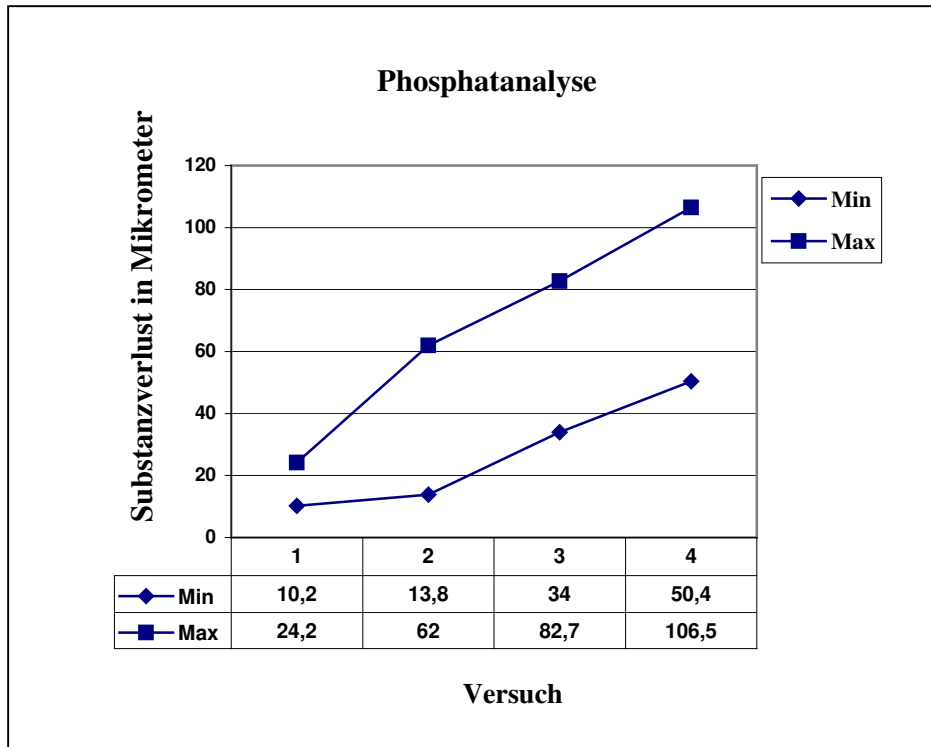


Abb. 9: Minimaler und maximaler Substanzverlust für die Profilometrie, Phosphat- und Kalziumanalyse nach 30, 60, 90 und 120 Minuten Erosionszeit

Aber auch innerhalb einer Probe lassen sich Unterschiede feststellen. Die Ergebnisse einer Probe von einer Seite zu einer anderen Seite wichen voneinander ab. Die Schwankung der Werte basiert wahrscheinlich auf der unterschiedlichen Schmelzzusammensetzung an den vier Grenzen. Je nachdem von welcher Richtung die Abtastung erfolgte, kam entweder ein höherer Mineralverlust zustande, was auf eine geringere Mineralisation beispielsweise im zervikalen Bereich hindeutet, oder es war ein geringerer Verlust im koronalen Schmelz (stärkere Mineralisation) vorhanden. Betrachtet man dagegen die Einzelwerte jeder Seite einer Probe für sich, so sind nur geringe Unterschiede zwischen Minimal- und Maximalwert festzustellen. Als Beispiel hierfür soll eine Probe dienen, die zur Reproduzierbarkeit der Messungen verwendet wurde. Hierbei wurde eine Seite einer Probe die 60 Minuten erodiert wurde, für drei Messstrecken jeweils 10 mal, also insgesamt 30 mal gemessen. Der Mittelwert dieser Messung lag bei 28,3 μm Substanzverlust (SD 0,3), bei einem Minimalwert von 26,7 μm und einem Maximalwert von 30,2 μm . Die Messung einer anderen Seite der gleichen Probe ergab bei 3 Messungen einen Mittelwert von 20,3 μm (SD 1,1).

Aus diesen Schwankungen ergibt sich die Konsequenz die Messstellen am Zahn zu standardisieren, damit eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse möglich ist.

Das Verhältnis von Kalzium zu Phosphat im Zahnschmelz wird im allgemeinen mit 1,61 angegeben und ähnelt dem Verhältnis bei Hydroxylapatit, welches der in der Literatur mit 1,67 angegeben wird [Nikiforuk, 1985].

Bei der statistischen Betrachtung nach Substanzverlust ergab sich ein interessanter Aspekt. Es stellte sich heraus, dass das Verhältnis von Kalzium zu Phosphat nicht konstant war. In dieser Versuchsreihe nahm der Wert mit zunehmender Demineralisierung signifikant ab. Bei der ersten Gruppe, die einen Substanzverlust bis 20 μm aufwies, lag das Verhältnis noch bei 1,76 und war damit höher als in der Literatur angegeben. Schon bei der zweiten Gruppe, die einen Substanzverlust von 20 bis 40 μm hatte, lag es mit 1,68 in dem Bereich des Hydroxylapatits. Die Abnahme der Demineralisation setzte sich fort, so dass in der Gruppe mit einem Substanzverlust über 60 μm ein Wert von 1,65 das Ergebnis war. Es löst sich also relativ gesehen immer mehr Phosphat oder weniger Kalzium.

5.2.2 Vergleich der Messergebnisse aus Phosphat und Kalzium mit der Profilometrie

Die chemischen Testverfahren unterliegen in der vorliegenden Arbeit bestimmten Annahmen, ohne die die quantitative Berechnung des Mineralverlustes nicht möglich wäre. Zum Vergleich der Messungen war es erforderlich die Konzentrationsangaben für das gelöste Kalzium bzw. Phosphat in einen räumlichen Substanzverlust umzurechnen. Diese Annahmen sind ein homogener Mineralverlust, ein Mineralgehalt von 87 vol% im Schmelz und dass der Schmelz aus stöchiometrischem Hydroxylapatit besteht. Letzteres basiert auf Studien, bei denen das durchschnittliche Ca/P Verhältnis bei 1,69 liegt, was mit Hydroxylapatit vergleichbar ist [Nikiforuk, 1985]. Aus diesen Annahmen ergeben sich folgende Probleme : Der Mineralgehalt ist nicht im ganzen Schmelz homogen. Die Dichte nimmt von außen nach innen ab [Wilson und Beynon, 1989]. Zusätzlich nimmt die Kalziumkonzentration von koronal zur Schmelz-Dentingrenze mit Schwankungen von 30-40% ab [Robinson et al., 1971]. Im Allgemeinen schwankt der Mineralgehalt von 77-90 vol.% mit der niedrigsten Mineralisation im zervikalen Anteil [Theuns et al., 1983]. Es wurden aber auch schon höhere Werte veröffentlicht [Elliott, 1997].

Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt bezieht sich auf die Berechnung des Substanzverlustes selbst, welcher sich aus der Formel

$$\text{Erosiver Substanzverlust } (\mu\text{m}) = \frac{\text{Mineralverlust}}{\text{Dichte des Zahnschmelzes} \times \text{Versuchsfläche}}$$

ergibt.

Die Dichte des Hydroxylapatits wird mit 3.15g/cm³ angegeben [Nikifurok, 1985].

Die Versuchsfläche (mm²) wurde mir Hilfe eines Mikroskops (Leica M 420, Leitz, Wetzlar, D), dass an eine Messvorrichtung (Mitutoyo, Tokyo, Japan) angeschlossen war, errechnet.

Hierbei ergab sich eine Durchschnittsfläche von 4,9 mm².

Die Versuchsfläche wird als konstante Größe angenommen. Es ist allerdings bei dem Herstellungsprozess der Proben nicht möglich die Versuchsfläche bei jeder Probe gleich groß zu erzeugen, wodurch ebenfalls Ungenauigkeiten bei der Errechnung des Substanzverlustes entstehen können.

Interpretationen der Messergebnisse der chemischen Testverfahren müssen daher immer unter der Berücksichtigung erfolgen, dass die biologischen Proben von den oben genannten

Vorraussetzungen mehr oder weniger stark abweichen können. Daher können diese Probleme zum Beispiel die Differenz der Ergebnisse der verschiedenen Methoden erklären.

Der größte Mineralverlust wurde bei der Kalziumanalyse festgestellt und lag beispielsweise nach 60 Minuten Erosionszeit bei $36,1 \mu\text{m} \pm 7,4 \text{ SD}$. Damit war er allerdings nahezu identisch mit der Phosphatanalyse ($35,8 \mu\text{m} \pm 7,6 \text{ SD}$). Bei der Profilometrie jedoch war der Substanzverlust insgesamt um 20% niedriger ($28,6 \mu\text{m} \pm 4,2 \text{ SD}$). Dies lässt sich damit erklären, dass die Profilometrie eine Oberflächenabtastung vornimmt und somit im Gegensatz zu den chemische Testverfahren keine Aussage über die Demineralisationsschicht treffen kann. Zentner und Duschner [1996] zeigten, dass der Mineralverlust in dieser Schicht durchaus nicht unerheblich ist. Sie ätzten Schmelzproben mit 37%iger Orthophosphorsäure 60 Sekunden lang und konnten einen oberflächlichen Substanzverlust von 10 bis 20 μm feststellen. Des weiteren waren durch ihr Verfahren der Konfokalen Laser-Scanning-Mikroskopie Strukturveränderungen unterhalb der geätzten Oberfläche, die sich als hyporeflexible Bereiche bis in eine Tiefe von 60 μm des Schmelzmantels hinein ausbreiteten, nachzuweisen.

Der Korrelationskoeffizient der beiden chemischen Methoden war somit auch am höchsten und lag bei 0,997 ($p < 0,001$). Ähnliche Ergebnisse lassen sich in einer älteren Studie finden, die ebenfalls diese beiden Analyseverfahren miteinander verglichen haben [Zero et al., 1990]. In der Studie von Zero et al. [1990] wurde die Beziehung des Iodid-Permeabilitäts-Test, der Oberflächenhärtegradmessung sowie der chemischen Testverfahren der Schmelzdemineralisation analysiert. Dies geschah an Hand von bovinen Schmelzproben mit einer Demineralisationszeit von 5, 15, 30 und 45 Minuten unter Verwendung einer 0,05 molaren Milchsäure mit einem pH-Wert von 4,75. Der Korrelationskoeffizient lag hierbei bei den beiden chemischen Testverfahren bei 0,95 und war somit im Vergleich zu der Oberflächenhärtegradmessung (0,64) und dem Iodid-Permeabilitäts-Test (0,58) höher. Die Profilometrie zeigte in dieser Studie eine gute Korrelation zu den chemischen Analyseverfahren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Ergebnisse der chemischen Testverfahren und die der Profilometrie auf hohem Niveau übereinstimmen, selbst wenn bedacht werden muss, dass die Werte der Profilometrie aufgrund der Nichtberücksichtigung der Demineralisationsschicht um 20% niedriger liegen.

5.3 Goldstandard

In der vorliegenden Studie sind zwei Methoden, die als sogenannter „Goldstandard“ bezeichnet worden sind, verglichen worden. Ten Bosch und Angmar-Manson [1991] bezeichneten die chemischen Testverfahren als „Golden Standard“, Hall et al. [1997] die Profilometrie.

Da die Profilometrie, wie bereits erwähnt, ein Verfahren ist, das selbst noch nicht hinreichend standardisiert angewendet wird, stellt sich die Frage, in wie weit ein Goldstandard in diesem Fall und auch allgemein überhaupt sinnvoll ist. Um diese Frage zu beantworten sollte man sich erst einmal mit der Frage auseinandersetzen, was bei einem Messvorgang überhaupt in bezug auf die Fragestellung, bzw. der Hypothese die zu dieser Messung führte, geschieht. Messergebnisse sollen eine Hypothese bestätigen, sie verifizieren.

In der Wissenschaftstheorie versteht man unter der Verifizierung einer Hypothese den Nachweis, dass diese Hypothese richtig ist. Auf dieser Grundlage basiert der durch Francis Bacon begründete Empirismus, der vorrangig im Angelsächsischen Anwendung findet. Wichtige Vertreter dabei waren George Berkeley und David Hume. Der Empirismus steht im Gegensatz zum Rationalismus, der die Vernunft als für den Erkenntnisprozess wesentlich hervorhebt. Der Empirismus hingegen legt seinen Schwerpunkt auf die Erfahrung und sinnliche Wahrnehmung. Unabhängig von seinem philosophischen Wahrheitsgehalt hat der Empirismus als Grundlage wissenschaftlicher Arbeit eine große Bedeutung bis in die Gegenwart. Neben der Deduktion bildet die Induktion als typische Schlussweise des Empirismus das Fundament wissenschaftlicher Theoriebildung. Als Induktionsschluß bezeichnet man den Schluß von besonderen Sätzen, wie z. B. Experimente und Beobachtungen, auf allgemeine Sätze, wie z. B. Hypothesen oder Theorien [Popper, 1989]. Die Einschränkung der Erkenntnis auf den Bereich der bloßen Erfahrung lässt sich nach Meinung von Kritikern des Empirismus jedoch letztlich nicht halten. So beschreibt Karl Popper als erstes Grundproblem der Erkenntnislogik das „Problem der Induktion“. Ein Induktionsschluß könne sich auch als falsch erweisen und man müsse sich fragen, ob und wann induktive Schlüsse gerechtfertigt seien.

Zum Verständnis ein Beispiel, das Karl Popper anführt: Angenommen, die Hypothese lautet: »Alle Schwäne sind weiß«, so hilft es nichts, sich auf die Suche nach möglichst vielen weißen

Schwänen zu machen. Auch wenn wir eine Million weißer Schwäne gefunden haben, ist die Hypothese damit nicht verifiziert [Popper, 1989].

Daher wird jedoch allgemein im Rahmen des kritischen Rationalismus davon ausgegangen, dass bestimmte Formen von Hypothesen (z. B. unbeschränkt universelle Hypothesen) nie letztgültig verifiziert, sondern theoretisch immer durch neueres Wissen überholt werden können [Popper, 1989].

Popper schlägt als Abgrenzungskriterium für den empirischen Gehalt und wissenschaftlichen Charakter von Hypothesen die Falsifizierbarkeit als Herangehensweise vor [Popper, 1989].

Falsifizierbarkeit einer Aussage ist gegeben, wenn eine Hypothese durch empirische Beobachtung widerlegt werden kann [Duden - Das Fremdwörterbuch, 2004].

Eine Hypothese kann somit zwar falsifiziert werden, sich also als ungültig erweisen, jedoch kann nie mit Sicherheit angegeben werden, dass sie gültig sei.

Findet man auch nur einen andersfarbigen Schwan, so ist die Hypothese widerlegt.

Allerdings: Solange kein andersfarbiger Schwan gefunden wurde, kann die Hypothese als vorläufig gültig betrachtet werden.

Mit diesem Hintergrund steht man bei wissenschaftlichen Arbeiten vor dem Problem, dass die Hypothesen, die man aufstellt zwar widerlegt, aber nicht sicher belegt werden können.

Daher ist es ein Trugschluss, dass ein Messverfahren, sei es auch noch so gut, eine Hypothese belegen kann.

Dies trifft in besonderem Maße auf den Goldstandard zu, der auch als das am besten geeignete Messverfahren angesehen wird. Wenn aber selbst dieses „optimale“ Verfahren keine Sicherheit geben kann, stellt sich die Frage, worin die Berechtigung des Wortes „Goldstandard“ besteht. Würde es nicht reichen, einfach von dem „Standardverfahren“ zu sprechen ? Warum wurde also der Mythos „Goldstandard“ in die Wissenschaft eingeführt ?

Gold ist wahrscheinlich in allen Kulturen seit alters her Symbol für Macht, Heiligkeit und Reichtum. Das spiegelt sich in Liedern und Mythen wider, hat aber auch handfeste Wirkung in der Wirklichkeit.

Die Fahrt der Argonauten zum Goldenen Vlies nach Kolchis stellt die wohl früheste dokumentierte weite Seefahrt der Griechen dar. Das Alte Testament spricht vom Goldenen Kalb, das sich die Israeliten als Götzenbild herstellten, während Moses die Zehn Gebote empfing, und vom Goldland Ophir. Die Gier nach Gold wurde zum Grund für Kriege und Eroberungszüge.

Das Neue Testament erwähnt Gold im Zusammenhang mit den weihnachtlichen Huldigungsgeschenken, die die drei Weisen aus dem Morgenland dem neugeborenen Jesus nach Bethlehem (neben Weihrauch und Myrrhe) mitbringen.

Im byzantinischen Reich war das „goldene Siegel“ den byzantinischen Kaisern vorbehalten.

Der Traum der Alchemisten des Mittelalters war die Herstellung von Gold.

Die ersten Goldfunde in Mittel- und Südamerika lockten nach den Fahrten von Christoph Kolumbus europäische, insbesondere spanische Eroberer an, die die ortsansässigen Kulturen zerstörten und das Gold in Galeonen nach Europa schafften. Spanien wurde so vorübergehend zur reichsten Nation Europas.

Immer wieder lockten Goldfunde große Mengen an Abenteurern an. Im 19. Jahrhundert kam es auf verschiedenen Kontinenten zu Goldrausch genannten Massenbewegungen in die Fundgebiete großer Goldmengen. Beispiele sind der kalifornische Goldrausch im Jahre 1849 oder der Goldrausch 1897 am Klondike River in Alaska. Auch in Australien und Südafrika kam es zum Goldrausch.

Auch heute noch bezeichnet man mit „Gold“ etwas besonders wertvolles, nicht nur im materiellen Sinne. So ist zum Beispiel die Goldmedaille der Siegespreis für den ersten Platz bei einem Wettkampf, z. B. bei Olympischen Spielen, bei denen der symbolische Wert in Anerkennung für die erbrachte Leistung im Vordergrund steht. Ebenso werden Goldmedaillen aber auch für kulinarische Höchstleistungen, für technische und handwerkliche Erfolge oder für schulische Höchstleistungen verliehen. So ist es einleuchtend, dass ein Goldäquivalent zur Absicherung der Geldwirtschaft geeignet war.

Der Begriff Goldstandard hat seinen Ursprung im Finanzwesen. 1844 wurde durch den Peel's Act der englischen Regierung für die Bank of England der Gold Standard eingeführt. Auf dem Höhepunkt des Gold Standards, am Anfang des 20. Jahrhunderts, waren ca. 50 Nationen, alle führenden Industrieländer, dem Gold Standard angeschlossen. Sie bildeten eine einzige große Zahlungsgemeinschaft. Die Grundregel des Gold Standards war ein fester Preis für das Gold, das heißt jede Währung stand in einem festen Verhältnis zu einer bestimmten Menge Gold. Die Währungen waren durch Gold gedeckt und jederzeit in Gold einlösbar. Die Währungsreserven der Staaten bestanden nur aus Gold. Auf internationaler Ebene bestand völlige freie Ein- und Ausfuhr von Gold. Alle Zahlungsbilanzdefizite wurden mit Gold abgedeckt. Damit sorgte Gold für Disziplin in der Volkswirtschaft. Es limitierte die Staatsausgaben. Es gab den Bürgern eine Währung, welche ihren Wert hielt und international

anerkannt war [Lips, 2003]. Diese Art der internationalen Finanzpolitik wurde 1931 wieder aufgegeben. Seit dieser Zeit sind die Staaten erst wieder in der Lage Schulden zu machen. Der in der Wirtschaft abgeschaffte Goldstandard wurde dann von der Wissenschaft „wiederentdeckt“. Heute bezeichnet der Ausdruck Goldstandard laut Definition in einem übertragenen Sinn das zuverlässigste überprüfte Verfahren zum Erreichen eines Zieles [Harten, 2007].

Mit der Einführung der Bezeichnung „Goldstandard“ bzw. des Wortes „Gold“ in eine wissenschaftliche Studie wurde einer angestrebten neutralen Untersuchung ein positives Ergebnis suggeriert, welches zusätzlich auch für Werbezwecke gut geeignet ist. Daher wäre es vielleicht besser von einem validierten Verfahren zu sprechen, da dieses nicht von vorn herein eine positive Grundstimmung vermittelt, sondern neutral verwendet werden kann.

Wenn man den oben genannten Ausführungen Poppers nicht folgen möchte und eher der empiristischen Theorie folgen möchte, ergeben sich allerdings selbst bei diesem Ansatz grundsätzliche Probleme.

Es gibt zwar in vielen Bereichen genügend Verfahren, die „zuverlässig und überprüft“ sind, aber gerade im Bereich der Forschung, in dem man durch spezielle Messverfahren neue Erkenntnisse gewinnen will, tritt immer ein grundsätzliches Problem der Messung selbst auf. Messungen erfolgen immer durch vom Menschen festgelegte Werte.

Eine Messung ist laut Definition eine quantitative Bestimmung des Wertes einer Messgröße [Harten, 2007]. Die meisten physikalischen Messungen bestehen aber nicht in einem einfachen Vergleich der Messgrößen mit ihrer Einheit, sondern erfordern eine mehr oder weniger komplizierte Vergleichsapparatur. In vielen Fällen macht man sich die Gesetzmäßigkeiten komplizierter Vorgänge zunutze und berechnet die zu messende Größe aus einer Gleichung. Bei vielen Messungen wird die Messung der Messgröße in die Messung einer Länge (Ablesung eines Zeigerausschlages auf einer Skala) übersetzt (z.B. Strommesser, Spannungsmesser, Uhr, Kraftmesser, Thermometer).

Die Messung einer Messgröße bedeutet also den Vergleich mit einer Einheit dieser Größe. Wird dieser Vergleich unter gleichen Bedingungen wiederholt vorgenommen, so werden die Messwerte voneinander, also auch von dem zu erwartenden wahren Wert der Messgröße abweichen. Die Aufgabe besteht dann darin, aus den Messwerten den bestmöglichen Schätzwert für den wahren Wert der Messgröße, sowie ein Maß für die Unsicherheit des

Schätzwertes zu ermitteln. Das Messergebnis wird dann aus der Angabe dieses Schätzwertes und seiner Unsicherheit bestehen. Diese Unsicherheit trifft eine wichtige Aussage über ein spezielles Messverfahren. Je kleiner die Messunsicherheit, desto genauer ist das gewählte Messverfahren.

Die Messwerte einer Größe fallen also nicht mit dem wahren Wert dieser Größe zusammen. Die Differenz zwischen dem Wert einer Einzelmessung und dem wahren Wert der Messgröße wird als Messfehler bezeichnet [Harten, 2007] und setzt sich aus mehreren unterschiedlichen Komponenten zusammen.

Zum einen sind an dieser Stelle die zufälligen Messfehler zu nennen, die eine Streuung der Einzelmessungen verursachen. Diese Messfehler sind nicht kontrollierbar und daher unvermeidlich, da sie die Summe aller minimalen Abweichungen während einer Analyse darstellen. Dies können Temperaturschwankungen, Dichtefluktuationen, Ablesefehler durch Menschen bei Zeigerinstrumenten, kleine Ungenauigkeiten beim Pipetieren und viele weitere Dinge sein. Im allgemeinen ist der aktuelle Wert eines zufälligen Fehlers durch Überlagerungen mehrerer oder sogar vieler kleinerer Störungen erzeugt worden und kann als normalverteilt betrachtet werden [Harten, 2007].

Eine weitere Fehlerquelle sind die systematischen Fehler, die grundsätzliche Abweichungen vom wahren Wert darstellen. Man hat in diesem Fall immer zu hohe oder zu niedrige Werte. Man kann aufgrund dieser Studie zu dem Schluss kommen, dass die Profilometrie einem solchen systematischem Fehler unterliegt, da die Ergebnisse im Durchschnitt 20 % unterhalb der Ergebnisse der chemischen Testverfahren liegen. Die Nichtberücksichtigung der Demineralisationsschicht könnte auch den Grund für dieses Phänomen liefern. Somit wäre dieser Fehler dann ein bekannter systematischer Fehler, den man im allgemeinen durch Addition bzw. Subtraktion eliminieren kann.

Andere unbekannte systematische Fehler sind zeitkonstante, unbekannte Störgrößen, die nicht eliminierbar sind und damit das Ergebnis negativ beeinflussen.

Da also Messungen im allgemeinen nicht den wahren Wert angeben können, werden Ergebnisse häufig mit einer Standardabweichung angegeben, die zumindest die zufälligen Messfehler berücksichtigen soll, da sie als die positive Quadratwurzel aus der Varianz definiert ist [Harten, 2007]. Die Varianz ist in der Statistik ein Streuungsmaß, d.h. ein Maß für die Abweichung einer Zufallsvariable X von ihrem Erwartungswert.

Es gibt jedoch auch Messreihen, die als Grundlage ihrer Messung Ergebnisse anderer Messungen enthalten.

In dieser Arbeit wurde zum Beispiel für die chemischen Testverfahren bei Hydroxylapatit ein Verhältnis von Kalzium zu Phosphat von 1,67 angenommen. Dieser Wert selbst unterliegt einer bestimmten Fehlertoleranz, die bei der weiterführenden Messung nicht mehr berücksichtigt wird. Allein dadurch entstehen schon Ungenauigkeiten, die die Messergebnisse negativ beeinflussen. Die Profilometrie kann als Meßmethode gar nicht den vollständigen Mineralverlust angeben, da sie keine Aussage über die Demineralisationsschicht treffen kann. Beide Methoden haben dadurch Probleme das wahre Ergebnis zu bestimmen. Verwendet man nun den mythisch aufgeladenen Begriff „Goldstandard“ für diese beiden zuverlässig und überprüften Verfahren, so besteht die Gefahr, dass man die Ungenauigkeiten vernachlässigt und diese als gegeben und unveränderbar hinnimmt. Auch aus diesem Grund kann ein Begriff wie Goldstandard, der eine gewisse Sicherheit impliziert nur eine trügerische Sicherheit bieten, die mit Vorsicht zu genießen ist. Daher muss zuerst das Ziel eindeutig definiert sein, damit sich die Messverfahren nach der Fragestellung richten können.

6 Zusammenfassung

6.1 Zusammenfassung

Ziel dieser Studie war es drei verschiedene Meßmethoden zur Quantifizierung von erosiv bedingten Zahnhartsubstanzverlusten im Schmelz zu vergleichen.

Zu diesem Zweck wurden aus retinierten menschlichen Weißheitszähnen longitudinale planparallele Schmelzproben präpariert, die bis auf ein definiertes Versuchsfeld von 2x2 mm² mit Nagellack abgedeckt wurden. Die Proben wurden einzeln in je 10 ml 0,05 molarer Zitronensäure (pH 2,3) für 30 (Gruppe 1), 60 (Gruppe 2), 90 Minuten (Gruppe 3) oder 120 Minuten erodiert (n jeweils 60). Anschließend wurde der Mineralverlust einerseits als Kalzium- bzw. Phosphatkonzentration in der Erosionslösung, andererseits als räumlicher Substanzverlust durch profilometrische Abtastung der Probenoberfläche bestimmt.

Die Kalziumkonzentration wurde mit der Atomabsorptionsspektroskopie, die Phosphatkonzentration mit dem Ammonium-Molybdän-Verfahren nach Chen [1956] bestimmt (Prof. Lussi, Universität Bern). Die profilometrischen Messungen wurden mit einem Perthometer S8P unter Verwendung eines mechanischen Taster (FRW-750; 6851401, Perthen Mahr, Göttingen (D)) durchgeführt. Die Auswertung der Profilschriebe erfolgte mit einem speziellen Computerprogramm Perthometer Concept 4,0, der Substanzverlust (μm) wurde für jede Probe als Mittelwert aus 6 Messungen bestimmt, die Menge an gelöstem Kalzium und Phosphat wurde in μm Verlust an Zahnhartsubstanz umgerechnet.

Alle Messmethoden zeigten im Vergleich einen nahezu linearen Mineralverlust. So lag der durchschnittliche Substanzverlust der Profilometrie nach 30 Minuten bei 14,3 μm bei einer Standardabweichung (SD) von 2,6. Nach 60 Minuten lag er bei 28,1 μm (SD 4,2), nach 90 Minuten bei 42,9 μm (SD 7,7) und nach 120 Minuten bei 59,8 μm (SD 11,1). Bei der Phosphatanalyse war der durchschnittliche Substanzverlust nach 30 Minuten 16,3 μm (SD 2,9), nach 60 Minuten 35,8 μm (SD 7,6), nach 90 Minuten 51,2 μm (SD 9,6) und nach 120 Minuten 71,9 μm (SD 12,1) groß. Bei der Kalziumanalyse wiederum lag der durchschnittliche Substanzverlust nach 30 Minuten bei 17,2 μm (SD 3,1), nach 60 Minuten bei 36,1 μm (SD 7,4), nach 90 Minuten bei 51,2 μm (SD 9,4) und nach 120 Minuten bei 71,1 μm (SD 2,9).

Bei der Betrachtung der Ergebnisse ließ sich sowohl profilometrisch als auch bei der Kalzium- bzw. Phosphatanalyse ein gleichmäßiger Abtrag feststellen. Der größte Mineralverlust wurde bei der Kalziumanalyse festgestellt, der allerdings nahezu identisch mit der Phosphatanalyse war. Bei der Profilometrie jedoch war der Substanzverlust insgesamt um 20% niedriger. Dies lässt sich damit erklären, dass die Profilometrie eine Oberflächenabtastung vornimmt und somit im Gegensatz zu den chemischen Testverfahren keine Aussage über die Demineralisationsschicht treffen kann. Man kann also sagen, dass die Ergebnisse der Profilometrie, der Kalziumanalyse und der Phosphatanalyse vergleichbar sind, jedoch für die Profilometrie um 20% niedriger ausfallen.

6.2 Abstract

The study was aimed to compare three different measurement methods for the quantification of the loss of dental enamel caused by erosion.

For this purpose, longitudinal coplanar enamel samples were prepared from human third molars. These samples were covered with nail varnish except for a defined test area of 2x2 mm². Each of the samples was eroded in 10 ml of 0.05 molar citric acid (pH 2.3) for 30 (group 1), 60 (group 2), 90 minutes (group 3) or 120 minutes (n 60 each). Subsequently, tissue loss was determined as calcium or phosphate concentration in the erosion solution on the one hand and as spatial substance loss by profilometric scanning of the sample surface on the other hand.

The calcium concentration was determined using the atomic absorption spectroscopy, whereas the phosphate concentration was determined with the ammonium molybdenum method according to Chen [1956] (Prof. Lussi, University of Bern). The profilometric measurements were carried out with the perthometer S8P using a mechanical stylus (FRW-750, 6851401, Perthen Mahr, Göttingen, Germany). The evaluation of the profilometric measurement was accomplished with the special computer program Perthometer Concept 4.0. The substance loss (μm) was determined for each sample as average value from 6 measurements. The amount of dissolved calcium and phosphate was converted in μm loss of enamel.

When compared, all measurement methods showed a nearly linear mineral loss. The average substance loss determined by profilometry was 14.3 μm after 30 minutes at a standard deviation (SD) of 2.6. After 60 minutes, the average substance loss was 28.1 μm (SD 4.2), after 90 minutes it was 42.9 μm (SD 7.7) and after 120 minutes it was 59.8 μm (SD 11.1). Phosphate analysis revealed loss value of 16.3 μm after 30 minutes (SD 2.9), 35.8 μm after 60 minutes (SD 7.6), 51.2 μm after 90 minutes (SD 9.6) and 71.9 μm after 120 minutes (SD 12.1). Respective value from calcium analysis were 17.2 μm after 30 minutes (SD 3.1), 36.1 μm after 60 minutes (SD 7.4), 51.2 μm after 90 minutes (SD 9.4) and 71.1 μm after 120 minutes (SD 2.9).

With regard to the results, a linear substance loss was determined both from profilometry and from calcium or phosphate analysis. The highest mineral loss could be determined in the

calcium analysis which was, however, almost identical to the phosphate analysis. In case of the profilometry, however, the substance loss was all in all 20% lower. An explanation here is that in contrast to chemical test methods, the profilometry scans the surface and thus cannot make a statement concerning the demineralisation layer.

Thus it may be summarised that the results of the profilometry, the calcium analysis and the phosphate analysis are comparable but are by 20% lower for the profilometry.

7 Literaturverzeichnis

Amaechi, B.T.; Higham, S.M.; Edgar W.M.:

Use of transverse microradiography to quantify mineral loss by erosion in bovine enamel.
Caries Res 1998; 32: 351-356.

Amaechi, B.T.; Higham, S.M.; Edgar W.M.; Milosevic, A.:

Thickness of acquired salivary pellicle as a determinant of the sites of dental erosion.
J Dent Res 1999; 78: 1821-1828.

Attin, T.; Deifuss, H.; Hellweg, E.:

Influence of acidified fluoride gel on abrasion resistance of eroded enamel.
Caries Res 1999; 33: 135-139.

Attin, T. ; Hilgers, R.-D. ; Hellwig, E. :

Einfluss von Muzin im Speichel auf die Entstehung von Schmelzerosionen.
Dtsch Zahnärztl Z 1996; 561: 506-510.

Attin, T.; Koidl, U.; Buchalla, W.; Schaller, H.G.; Kielbassa, A.M.; Hellweg, E.:

Correlation of microhardness and wear in differently eroded bovine dental enamel.
Arch Oral Biol 1997; 42: 243-250.

Attin, T.; Meyer, K.; Hellwig, E.; Buchalla, W.; Lennon, A.M.:

Effect of mineral supplements to citric acid on enamel erosion.
Arch Oral Biol 2003 Nov; 48(11): 753-759.

Attin, T.; Zirkel, C.; Hellwig, E.:

Brushing abrasion of eroded dentin after application of sodium fluoride solutions.
Caries Res 1998; 32: 344-350.

Bergstroem, J.; Lavstedt, S.:

An epidemiologic approach to toothbrushing and dental abrasion.
Community Dent Oral Epidemiol 1979; 7: 57-64.

Brosowsky, A.:

Die Wirkung von organischen und Mineralsäuren auf die Zahnhartsubstanz bei verschiedenen pH-Werten.
Dtsch Zahnärztl Z 1966; 21: 1139-1147.

Centerwall, B.S.; Armstrong, C.W.; Funkhouser, G.S.; Elzay, R.P.:

Erosion of dental enamel among competitive swimmers at a gas-chlorinated swimming pool.
Am J Epidemiol 1986; 123: 641-647.

Chen, P.S.; Toribara T.V.; Warner, H.:

Microdetermination of phosphorous.
Anal Chem 1956; 28: 1756-1758.

Cooper, P.J.; Charnock, J.; Taylor, M.J.:
The prevalence of bulimia nervosa.
Br J Psychiatry 1987; 151: 684-686.

Davis, W.B.; Winter, P.J.:
Dietary erosion of adult dentine and enamel. Protection with a fluoride toothpaste.
Br Dent J 1977; 143: 116-119.

Davis, W.B.; Winter, P.J.:
The effect of abrasion on enamel and dentine after exposure to dietary acid.
Br Dent J 1980; 148: 253-256.

Dawid, E.; Meyer, G.; Kollman, W.:
Keilförmige Defekte als mögliche Folge von Stress ?
Dtsch Zahnärztl Z 1994; 49: 522-524.

Duden :
Das Fremdwörterbuch.
Dudenverlag, Mannheim-Leipzig-Wien-Zürich, 2004.

Eccles, J.D.:
Dental erosion of non industrial origin: A clinical survey and classification.
J Prosthet Dent 1979; 42: 649-653.

Eccles, J.D.; Jenkins, W.G. :
Dental erosion and diet.
J Dent 1974; 2: 153-159.

Eisenburger, M.; Addy, M.:
Erosion and attrition of human enamel in vitro Part I: Interaction effects.
J Dent 2002; 30: 341-347.

Eisenburger, M.; Hughes, J.; West, N.X.; Jandt, K.D.; Addy, M.:
Ultrasonication as a method to study enamel demineralisation during acid erosion.
Caries Res 2000; 34: 289-94.

Eisenburger, M.; Shellis, R.P.; Addy, M.:
Scanning electron microscopy of softened enamel.
Caries Res 2004; 38: 67-74.

Elliott, J.C.:
Structure, crystal chemistry and density of enamel apatites; in Chadwick, D.; Cardew G.
(eds): Dental enamel.
Chichester, Wiley (Ciba Foundation No. 205), 1997; S.54-72.

Friedman, L.S.; Isselbacher K.J.:
Anorexia, nausea, vomiting and indigestion.
In: Wilson, J.D.: Harrison's Principles of Internal Medicine.
Mc Graw-Hill, New York 1991; 12. Auflage: 251-256.

Friedrich, D.J.:

In-situ-Studie zur Ausprägung von Bürstabrasionen an erodiertem Schmelz in Abhängigkeit von Putzzeitpunkt und Fluorideinsatz.

URN: urn:nbn:de:hebis:26-opus-7156

URL: <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2002/715/>.

Ganss, C.; Klimek, J.; Giese, K.:

Dental erosions in children and adolescents: a cross-sectional and longitudinal investigation using study models.

Community Oral Epidemiol 2001; 29: 264- 271.

Ganss, C.; Klimek, J.; Schäfer, U.; Spall, T.:

Effectiveness of two fluoridian measures on erosion progression in human enamel and dentin in vitro.

Caries Res 2001a; 35: 325-330.

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.; Schlechtriemen, M.; Klimek, J.:

Dental erosions in subjects living on raw food diet.

Caries Res 1999; 33: 74-80.

Grenby T.H.:

Methods of assessing erosion and erosive potential.

Eur J Oral Sci 1996 Apr;104(2):207-214.

Hall, A.F.; Buchanan, C.A.; Millett, D.T.; Creanor, S.L.; Strang, R.; Foye, R.H. :

The effect of salvia on enamel and dentine erosion.

J Dent 1999; 27: 333-339.

Hall, A.F., Sadler, J.P., Strang R., de Josselin de Jong, E., Foye, R.H., Creanor, S.L.:

Application of transverse microradiography for measurement of mineral loss by acid erosion.

Adv Dent Res 1997;11: 420-425.

Hammadeh, M., Rees ,J.S.:

The erosive susceptibility of cervical versus occlusal enamel.

Eur J Prosthodont Restor Dent 2001; 9: 13-17.

Harten, Ulrich :

Physik – Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler.

Springer Verlag, Berlin-Heidelberg 2007.

Hay, D.I.; Pinsent, B.R.W.; Schram, C.J.; Wag, B.J.:

The protective effect of calcium and phosphate ions against acid erosion of dental enamel and dentin.

Br Dent J 1962; 112: 283-287.

Hellwig, E.; Klimek, J.; Attin, T.:
Einführung in die Zahnheilkunde.
Urban & Fischer, München-Jena 1999.

Hinds, K.; Gregory, J.R.:
National diet and nutrition survey: children aged 1 ½ to 4 ½ years.
Volume 2: Report of the dental survey.
London: Her Majesty's Office 1995.

Hotz, P.R.:
Erosion des Zahnschmelzes.
Schweiz Monatsschr Zahnmed 1987; 2: 219-222.

Howden, G.F.:
Erosion as the presenting symptom in hiatus hernia.
Br Dent J 1971; 131: 455-456.

Hughes, J.A.; West, N.X.; Parker, D.M.; Newcombe, R.G.; Addy, M.:
Development and evaluation of a low erosive blackcurrant juice drink 3. Final drink and concentrate, formulae comparisons in situ and overview of the concept.
J Dent 1999; 27: 345-350.

Hughes, J.A.; West, N.X.; Parker, D.M.; van den Braak, M.H.; Addy, M.:
Effects of pH and concentration of citric, malic and lactic acids on enamel, in vitro.
Journal of Dentistry 2000; 28: 147-152.

Imfeld, T.:
Identification of low caries risk dietary components.
Karger, Basel 1983, S. 165-174.

James, P.M.C.; Parfitt, G.J.:
Local effects of certain medicaments on the teeth.
Br Med J 1953; 2: 1252-1253.

Järvinen, V.; Rytömaa, I.; Heinonen, O.P.:
Risk factors in dental erosion.
J Dent Res 1991; 70: 942-947.

Jaeggi, T.; Lussi, A.:
Toothbrush abrasion of erosively altered enamel after intraoral exposure to saliva: an in situ study.
Caries Res 1999; 33: 455-461.

Jaeggi, T.; Schaffner, M.; Burgin, W.; Lussi, A.:
Erosionen und keilförmige Defekte bei Rekruten der Schweizer Armee.
Schweiz Monatsschr Zahnmed 1999; 109: 1170-82.

Larsen, M.J.; Nyvad, B.:
Enamel erosion by some soft drinks and orange juices relative to their pH, buffering effect
and contents of calcium phosphate.
Caries Res 1999; 33: 81-87.

Levine, R.S.:
Fruit juice erosion – an increasing danger ?
J Dent 1973; 2: 85-88.

Levitch, L. C.; Bader, J.D.; Shagars D.A.; Heymann, H.O.:
Non-carious cervical lesions.
J Dent 1994; 22 : 195-207.

Linkosalo, E.; Markkanen, H.:
Dental erosions in relation to lactovegetarian diet.
Scand J Dent Res 1985; 93: 436-441.

Lips, F. :
Die Goldverschwörung – ein Blick hinter die Kulissen der Macht von einem Privatbankier
aus der Schweiz.
Kopp, Rottenburg a.N., 2003.

Lussi, A.; Jäggi, T.:
Die Abrasion erosiv veränderter Zahnhartsubstanz – eine Literaturübersicht.
Schweiz Monatsschr Zahnmed 2002; 112: 629-639.

Lussi, A.; Jäggi, T.; Jaeggi-Schärer, S.:
Prediction of the erosive potential of some beverages.
Caries Res 1995; 29: 349-54.

Lussi, A.; Jäggi, T.; Schärer, S.:
The influence of different factors on in vitro enamel erosion.
Caries Res 1993; 27: 387-393.

Lussi, A.; Schaffner, M.; Hotz, P.; Suter, P.:
Dental erosion in a population of Swiss adults.
Community Dent Oral Epidemiol 1991; 19: 286-290.

McClure, F.J.; Ruzicka, S.J.:
The destructive effect of citrate vs. lactate ions on rat's molar tooth surfaces in vivo.
J Dent Res 1946; 25: 1-12.

McIntyre, J.M.:
Erosion.
Aust Prosth J 1992; 6: 17-25.

Meurman, J.H.; Frank, R.M.:
Progression and surface ultrastructure of in vitro caused erosive Lesions in human and bovine Enamel.
Caries Res 1991; 25: 81-87.

Meurman, J.H.; 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.

Meurman, J.H.; ten Cate, J.M.:
Pathogenesis and modifying factors of dental erosion.
Eur J Oral Sci 1996; 104: 199-206.

Miller, W.D.:
Experiments and observations on the wasting of tooth tissue erroneously designated as erosion, abrasion, denudation, etc.
Dent Cosmos 1907; 49: 109-124.

Millward, A.; Shaw, L.; Smith, A.J.:
In Vitro techniques for erosive lesion formation and examination in dental enamel.
J of Oral Rehabilitation 1995; 22: 37-42.

Milosevic, A.; Young, P.J.; Lennon, M.A.:
The prevalence of tooth caries in 14-year-old school children in Liverpool.
Community Dent Health 1994; 11: 83-86.

Mistry, M.; Grenby, T.H.:
Erosion by soft drinks of rat molar teeth assessed by digital image analysis.
Caries Res 1993; 27: 21-25.

Nikiforuk, G.:
Understanding dental caries : Part I Etiology and mechanisms.
Basel, New York, Karger, 1985.

Nunn, J.H.:
Prevalence of dental erosion and the implications for oral health.
Eur J Oral Sci 1996; 104: 156-161.

Parry-Jones, B. :
Merycism or rumination disorder. A historical investigation and current assessment.
Br J Psychiatry 1994; 165: 303-314.

Petersen, P.E. ; Gormsen, C. :
Oral conditions among german battery factory workers.
Community Dent Oral Epidemiol 1991; 19: 312-325.

Popper, K. :
Logik der Forschung.
J.C.B. Mohr (Paul Siebeck) Tübingen, 1989.

Robb, N.D.; Smith, B.G.N.:
Prevalence of pathological tooth wear in patients with chronic alcoholism.
Br Dent J 1990; 169: 367-369.

Robinson, C.; Weatherell, J.A.; Hallsworth, A.S.:
Variation in composition of dental enamel within thin ground tooth sections.
Caries Res 1971; 5: 44-57.

Rugg-Gunn, A.J.; Maguire, A.; Godon, P.H.; McCabe, J.F.; Stephenson, G.:
Comparison of erosion of dental enamel by four drinks using an intra-oral appliance.
Caries Res 1998; 32: 337-343.

Rytömaa, I.; Meurman, J.H. ; Franssila, S., Torkko, H. :
Oral hygiene products may cause dental erosion.
Proc Finn Dent Soc 1989; 85: 161-166.

Sangnes, G.; Gjermo, P.:
Prevalence of oral soft and hard tissue lesions related to mechanical toothcleansing procedures.
Community Dent Oral Epidemiol 1976; 4: 77-83.

Scheutzel, P.:
Etiology of dental erosion – intrinsic factors.
Eur J Oral Sci 1996; 104: 178-190.

Scheutzel, P.:
Zahnmedizinische Befunde bei psychologischen Eßstörungen.
Dtsch Zahnärztl Z 1992; 47: 119-123.

Scheutzel, P.; Meermann, R.:
Anorexie und Bulimie aus zahnärztlicher Sicht.
Urban und Schwarzenberg, München-Wien-Baltimore 1994; S. 64-78.

Schröder, H.E.:
Orale Strukturbiologie.
Georg Thieme Verlag, Stuttgart-New York, 1992.

Schröder, H.E.:
Pathobiologie oraler Strukturen.
Karger 1997; S. 99-100.

Smith, B.N.G.:
Toothwear: aetiology and diagnosis.
Dent Update 1989; 16: 204-212.

- Smith, B.N.G.; Knight, J.K.:
A comparison of patterns of tooth wear with aetiological factors.
Br Dent J 1984; 157: 16-19.
- Smith, B.G.N.; Robb, N.D.:
Dental erosion in patients with chronic alcoholism.
J Dent 1989; 17: 219-221.
- Sognaes, R.F.; Wolcott, R.B.; Xhonga, F.A.:
Erosion-like patterns occurring in association with other dental conditions.
J Am Dent Assoc 1972; 84: 571-576.
- Stösser, L.; Nekrashevych, Y.:
Erosion of dental enamel in vitro and rehardening by saliva in vivo.
Caries Res 1998; 32: 310 (Abstract).
- Sullivan, R.E.; Kramer, W.S.:
Iatrogenic erosion of teeth.
J Dent Child 1983; 50: 192-196.
- Takeuchi, K.; Nakagaki, H.; Toyama, Y.; Kimata, N.; Ito, F.; Robinson, C.; Weatherell, J.A.;
Stösser, L.; Kunzel, W.:
Fluoride concentrations and distribution in premolars of children from low and optimal
fluoride areas.
Caries Res 1996; 30: 76-82.
- Taylor, G.; Taylor, S.; Abrams, R.; Mueller, W.:
Dental erosion associated with asymptomatic gastroesophageal reflux.
ASDC J Dent Child 1992; 59: 182-185.
- Ten Bosch, J.J.; Angmar-Mansson, B.:
A review of quantitative methods for studies of mineral content of intra-oral incipient caries
lesions.
J Dent Res 1991; 70: 2-14.
- Ten Bruggen Cate, H.J.:
Dental erosion in industry.
Br J Ind Med 1968, 25: 249-266.
- Ten Cate, J.M.; Imfeld, T.N.:
Dental erosion, summary.
Eur J Oral Sci 1996; 104: 241-244.
- Theuns, H.M., van Dijk, J.W.E.; Jongebloed, W.L.; Groeneveld, A.:
The mineral content of human enamel studied by polarizing microscopy, microradiography,
and scanning microscopy.
Arch Oral Biol 1983; 28: 797-803.

Tuominen, M.L.; Tuominen, R.J.; 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.

Weatherell, J.A.; Robinson, C.:
The inorganic composition of teeth. In Zipkin I (ed): Biological mineralization.
New York, John Wiley and Sons, 1973; S. 43-74.

West, N.X.; Maxwell, A.; Hughes, J.A.; Parker, D.M.; Newcombe, R.G.; Addy, M.:
A method to measure clinical erosion: the effect of orange juice consumption on erosion of
enamel.
J Dent 1998; 26: 329-335.

Wilson, P.R.; Beynon, A.D.:
Mineralization differences between human deciduous and permanent enamel measured by
quantitative microradiography.
Arch Oral Biol 1989; 34: 85-88.

Xhonga, F.A.; Valdmanis, S.:
Geographic comparisons of the incidence of dental erosion : a two centre study.
J Oral Rehab 1983; 10: 269-277.

Young, W.G.:
Diet and nutrition for oral health: advice for patients with tooth wear.
Aust Dent J 1995; 8-10.

Zentner, A.; Duschner, H.:
Structural changes of acid etched enamel examined under confocal laser scanning
microscope.
J Orofac Orthop 1996; 57: 202-209.

Zero D.T.:
Etiology of dental erosion – extrinsic factors.
Eur J Oral Sci 1996; 104: 162-177.

Zero, D.T. ; Rahbek, I. ; Proskin, H.M. ; Featherstone, J.D. :
Comparison of the iodide permeability test, the surface microhardness test, and mineral
dissolution of bovine enamel following acid challenge.
Caries Res 1990; 24: 181-188.

Zipkin, I.; McClure, F.J.:
Salivary citrate and dental erosion.
J Dent Res 1949; 28: 613-626.

Zhang, X.Z.; Anderson, P.; Dowker, S.E.P.; Elliott, J.C. :
Optical profilometric study of changes in surface roughness of enamel during in vitro
demineralization.
Caries Res 2000; 34: 164-174.

8 Anhang

8.1 Danksagung

Mein Dank gilt Prof. Dr. Joachim Klimek, Leiter der Poliklinik für Zahnerhaltungskunde und Präventive Zahnheilkunde des Medizinischen Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde des Universitätsklinikums Gießen und Marburg GmbH, sowie Frau Prof. Dr. Ganss für die Überlassung des Themas dieser Arbeit und die sehr hilfreiche Betreuung bei der Erstellung dieser Studie.

Weiterhin bin ich Frau Birgit Meier für ihre Unterstützung im medizinisch-technischen Labor der Zahnklinik zu Dank verpflichtet.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei dem Kollegen Bastian Rötzel für seine Unterstützung bei der praktischen Durchführung dieser Arbeit, meiner Frau Dr. med. dent. Yvonne Köster sowie bei meinem Schwager Björn Brost für seine Hilfe bei der Übersetzung.

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

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