Aus der Abteilung Zahnerhaltung, Präventive Zahnheilkunde und Parodontologie
(Ehem. Leiter: Prof. Dr. med. dent. T. Attin)
im Zentrum Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen

Bestimmung der Bürstabrasion durch Kalzium-Messung

Vergleich mit der konventionellen Profilometrie

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung des Doktorgrades für Zahnheilkunde

der Medizinischen Fakultät
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von
Natalja Leipi-Warkentin
geb. Leipi
aus
Schanatas (Kasachstan)

Göttingen 2009

Dekan: Prof. Dr. med. C. Frömmel

I. Berichterstatter: Prof. Dr. med. dent. T. Attin

II. Berichterstatter/in:

III. Berichterstatter/in:

Tag der mündlichen Prüfung:

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

1.1 Ziel der Studie 2

2 Literaturübersicht 3

2.1 Aufbau, physikalische und chemische Eigenschaften des Schmelzes 3

2.2 Definition nicht-kariesbedingter Zahnhartsubstanzverluste 6

2.3 Die Bürstabrasion und ihr Einfluss auf die Zahnhartsubstanz 8

2.4 Untersuchungsmethoden zur Quantifizierung des Substanzverlustes 11

3 Versuchsplan: Bürstabrasion 19

4 Material und Methoden 22

4.1 Herstellung der Schmelzproben 22

4.2 Vorbereitung der Proben 24

4.3 Die Bürstvorrichtung 25

4.4 Die abrasive Suspension 26

4.5 Oberflächenmessung 26

4.6 Bestimmung der Masse des abradierten Schmelzes 30

4.7 Herstellung des Imidazolpuffers 30

4.8 Vorbereitung der Suspension für den Kalzium-Nachweis 30

4.9 Photometrischer Kalzium-Nachweis 31

4.10 Bestimmung der Kalzium-Konzentration und Berechnung des Schmelzabtrags 33

5 Ergebnisse 35

5.1 Profilometrische Darstellung von Schmelzoberflächen vor und nach Bürstabrasion 35

5.2 Auswertungen der Bürstabrasion 38

6 Diskussion 48

6.1 Material und Methode 48

6.2 Ergebnisse 53

6.3 Schlussfolgerung 57

7 Zusammenfassung 59

8 Materialliste 60

9 Literaturverzeichnis 62

10 Anhang: Rohdaten 82

Abb.- und Tabellenverzeichnis

Abb. 3.1……Seite 21
Abb. 4.1……Seite 23
Abb. 4.2……Seite 24
Abb. 4.3……Seite 25
Abb. 4.4……Seite 27
Abb. 4.5……Seite 28
Abb. 4.6……Seite 28
Abb. 4.7……Seite 29
Abb. 4.8……Seite 31
Abb. 4.9……Seite 34
Abb. 5.1……Seite 35
Abb. 5.2……Seite 36
Abb. 5.3……Seite 37
Abb. 5.4……Seite 37
Abb. 5.5……Seite 38
Abb. 5.6……Seite 39
Abb. 5.7……Seite 40
Abb. 5.8……Seite 42
Abb. 5.9……Seite 43
Abb. 5.10……..…Seite 45
Abb. 5.11……..……Seite 46
Abb. 5.12……..……Seite 47

Tab. 5.1……Seite 41
Tab. 5.2……Seite 42
Tab. 5.3……Seite 44
Tab. 10.1……..Seite 82
Tab. 10.2……..Seite 83
Tab. 10.3……..Seite 83
Tab. 10.4……..Seite 84
Tab. 10.5……..Seite 84
Tab. 10.6……..Seite 85
Tab. 10.7……..Seite 85
Tab. 10.8……..Seite 86
Tab. 10.9……..Seite 86
Tab. 10.10..……..Seite 87
Tab. 10.11..……..Seite 87
Tab. 10.12..……..Seite 88
Tab. 10.13..……..Seite 88
Tab. 10.14..……..Seite 89

1 Einleitung

Der nicht kariöse Zahnhartsubstanzverlust wird häufig durch Faktoren wie Erosion, Abrasion, Attrition und Abfraktion verursacht. Sie wirken mechanisch durch Reibung (Abrasion, Attrition) oder chemisch durch Säureeinwirkung (Erosion) und beeinflussen sich gegenseitig, so dass der Substanzverlust meist ein Ergebnis aus der Kombination mehrerer Faktoren darstellt. Die Abrasion ist eine pathologische, durch Fremdkörper bedingte Abnutzung der Zahnhartsubstanz (Pindborg 1970). Die Abrasion der Zahnhartsubstanz kann durch übertriebene Mundhygiene und die Anwendung abrasiver Zahnpasten (Gross et al. 1996) verstärkt werden. Eine vorangegangene Säureeinwirkung führt neben einem flächenhaften Substanzabtrag zusätzlich zur Erweichung der Zahnoberfläche und verstärkt dadurch den mechanisch bedingten Substanzverlust (Davis and Winter 1980; Attin et al. 1997).

Für die Quantifizierung des Zahnhartsubstanzverlustes stehen zahlreiche Analysemethoden zur Verfügung, die überwiegend in In-vitro-Studien zum Einsatz kommen. Jede dieser Methoden weist Vor- und Nachteile auf. Die meisten zur Bestimmung des Substanzverlustes entwickelten Analyseverfahren sind chemischer oder physikalischer Natur. Bei den chemischen Methoden (ionenselektive Elektrode, photometrische Kalziumanalyse) wird die Menge des gelösten Minerals (Kalzium, Phosphat) quantitativ bestimmt. Unter den physikalischen Methoden findet man die Profilometrie, die Mikroradiographie, die gravimetrische Methode und die Rasterelektronenmikroskopie. Von den physikalischen Untersuchungsmethoden zur Bestimmung des Substanzverlustes durch Erfassung von Oberflächentopographien hat sich besonders die profilometrische Messmethode bewährt (Noordmans et al. 1991) und gilt auf diesem Gebiet als „Goldstandard“ (Hall et al. 1997).

Im Hinblick auf die fortschreitende Entwicklung im Bereich der Zahnmedizin ist es wichtig, exakte Auswertungsmethoden hinsichtlich der Bestimmung des Substanzverlustes zu besitzen, um die Ergebnisse der verschiedenen Studien besser vergleichen zu können. Die quantitative Bestimmung des Substanzverlustes ist mit den bisher genannten Methoden gut durchführbar. Inwieweit die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungsmethoden miteinander vergleichbar sind, wurde bislang nur wenig untersucht.

1.1 Ziel der Studie

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung war es daher, durch Bürstabrasion hervorgerufenen Substanzverlust des Schmelzes anhand der Profilometrie und der photometrischen Kalziumanalyse zu bestimmen, um anschließend die Ergebnisse gegenüberzustellen und zu beurteilen. Dazu wurden bei kurzen Abrasionszeiten an gesunden, nicht erodierten Schmelzproben Bürstabrasionen erzeugt. Der Substanzverlust jeder Probe wurde zuerst durch Erfassung der Oberflächenunebenheiten und anschließend durch den Nachweis des abradierten Kalziums bestimmt. Die Ergebnisse beider Methoden wurden auf ihre Übereinstimmung geprüft.

2 Literaturübersicht

2.1 Aufbau, physikalische und chemische Eigenschaften des Schmelzes

Die Kenntnisse von Aufbau und Eigenschaften des Schmelzes sind entscheidend für das Verständnis der Bürstabrasion sowie die Funktionsweise der untersuchten Messmethoden. Die chemischen Eigenschaften des Schmelzes sind von dessen einzelnen Bestandteilen abhängig. Der Zahnschmelz besteht zu 93-98% (Schröder 1992, Hellwig et al. 1995) aus anorganischen, zu 1% aus organischen Bestandteilen und 1,5-4% Wasser (Hellwig et al. 1995). Das im Schmelz enthaltene Wasser ist vorwiegend in Form einer Hydratationsschale an die Apatitkristalle gebunden, der Rest liegt lose in der organischen Schmelzmatrix (Diddin 1972). Die Menge des losen Wassers schwankt mit dem Feuchtigkeitsgehalt der Umgebung, dabei entsteht ein Flüssigkeitsstrom. Durch diesen Flüssigkeitsstrom wirkt der Schmelz als eine Art Molekularsieb bzw. Ionenaustauscher, bei welchem Ionen aus dem Schmelz heraus und wieder hinein diffundieren können. Wasser und Alkohol können im freien Fluss den Zahnschmelz durchströmen (Featherstone et al. 1979). Dadurch können im Zahnschmelz chemische Veränderungen stattfinden, die zur Aufrechterhaltung oder Änderung seiner Zusammensetzung beitragen. Diese Eigenschaft des Schmelzes wird unter anderem bei der Kariesprävention und Remineralisation genutzt. Die organischen Bestandteile des Zahnschmelzes setzen sich überwiegend aus kollagenen Proteinen und Lipiden zusammen und weisen Spuren von Kohlenhydraten (Glykoproteine und Glykosaminoglykane), Zitrat und Laktat auf (Hellwig et al. 1995; Weinstock 1972). Die organischen Bestandteile sind für die Ausbildung der Schmelzbüschel verantwortlich (Weatherell and Wiedmann 1968). Die Schmelzbüschel stellen die unvollständig mineralisierten Schmelzanteile da, welche sich im inneren Drittel der Schmelzschicht befinden (Schröder 1992). Die anorganischen Bestandteile des Zahnschmelzes sind neben verschiedenen Spurenelementen Kalzium, Phosphat, Magnesium, Karbonat und Natrium, wobei Kalzium zusammen mit dem Phosphat kleinste Apatitkristalle ausbildet. Die Konzentrationen der anorganischen Bestandteile variieren innerhalb der

Schmelzschicht. Fluorid-, Eisen-, Zinn-, Chlor- und Kalziumkonzentration nehmen zur Schmelz-Dentin-Grenze ab. Die Konzentrationen von Wasser, Karbonat, Magnesium und Natrium hingegen nehmen von der Oberfläche zur Schmelz-Dentin-Grenze zu (Hellwig et al. 1995). Der Schmelz ist aus nicht stöchiometrischen Apatitkristallen aufgebaut ($Ca_{10-x}(PO_4)_{6-x})\cdot X_2\cdot H_2O$) (Nikiforuk 1985). Das wird durch einen Mangel an Kalzium-, Phosphat- und Hydroxylionen sowie einen Überschuss an Karbonat und Hydrogenphosphat verursacht (Jenkins 1978). Die Kristalle des Hydroxylapatits sind durch interne Substitutionsreaktionen veränderbar, so kann z.B. Fluor oder Karbonat in die Kristallstruktur eingebaut werden. Dabei verändern sich auch die Eigenschaften des Schmelzes. Der gebildete Fluorapatit oder fluoridierter Hydroxylapatit ist stabiler als reiner Hydroxylapatit, bei Einlagerung von Karbonat in die Kristallstruktur hingegen sinkt die Kariesresistenz des Schmelzes (Hellwig et al. 1995).

Der Zahnschmelz ist der härteste und auch sprödeste Bestandteil des Körpers. Er weist eine mittlere Dichte von 2,8-3,0 kg/m³ und eine Druckfestigkeit von 300-450 MPa auf. Sein Elastizitätsmodul beträgt 50000-85000 MPa (Körber 1995; Hellwig et al. 1995). An der Schmelz-Dentin-Grenze wurde die Härte im Durchschnitt mit 250 Knoop-hardness-numbers (= KHN) und an der Schmelzoberfläche mit 390 KHN angegeben (Mott 1956; Hellwig et al. 1995). Andere Autoren fanden für unbehandelten Zahnschmelz bleibender Zähne Härtezahlen zwischen 320 und 380 KHN (Schweitzer-Hirt et al. 1978; Lussi et al. 1991), bzw. 260-350 KNH und 300-430 VH (VH= Vickers-Härte) (Schröder 1992). Die abweichenden Werte der Schmelzhärte sind auf schwankende Mineraldichten der jeweiligen Zahnproben zurückzuführen. Die Härte von Zahnschmelz kann durch den Einfluss äußerer Faktoren verändert werden. Durch die Zufuhr von Fluorid wird der Schmelz härter und seine Säureresistenz ist erhöht (Yong 1974). Bartlett et al. (1994) konnten nachweisen, dass Zähne von Personen aus Gegenden mit Trinkwasserfluoridierung eine etwa 10% höhere Vickers-Härte gegenüber denen ohne Trinkwasserfluoridierung aufweisen. Andere In-vitro-Studien konnten zeigen, dass die Schmelzhärte durch lokale Fluoridierung signifikant steigt ($p<0,05$) (Sorvari et al. 1994). Andererseits wird die Oberfläche des Schmelzes durch die Einwirkung von Säuren weicher. Schweitzer-Hirt et al. (1978) konnten eine Härteabnahme des Schmelzes von 13-20% nach 5minütigen Kontakt des Schmelzes mit frisch gepresstem Orangensaft nachweisen. Weitere Studien haben bestätigt, dass

auch die Dauer der Säureeinwirkung die Härte von Schmelz beeinflusst (Lussi et al. 1993; Sorvari et al. 1994).

Der Schmelz ist aus feinkristallinen Schmelzprismen aufgebaut. Jedes Prisma besteht aus ca. 100 Schmelzkristallen. Die Prismen verlaufen wellenförmig in horizontaler und vertikaler Richtung von der Schmelz-Dentin-Grenze zur Schmelzoberfläche (Osborn 1968 a, b). Nur die obersten 20-30 µm des Schmelzes weisen keine Prismenstruktur auf, hier sind die Kristallite parallel zur Zahnoberfläche angeordnet (Hellwig et al. 1995). Dieser prismenfreie Schmelz weist eine größere Säureresistenz auf, ist härter und dichter mineralisiert (Schröder 1992; Meurman and Ten Cate 1996). Die Schmelzprismen können verschiedene Formen aufweisen: schlüssellochartig, pferdehufförmig oder zylindrisch. Im Lichtmikroskop lassen sich einige optische Phänomene des Schmelzes wie Hunter-Schregersche-Streifen, Retzius-Streifen und Perikymatien erkennen. Durch den wellenförmigen Verlauf und durch die verschiedene räumliche Anordnung der Prismen wird das Licht an der Oberfläche eines Zahnschliffs unterschiedlich gebrochen und verursacht diese optischen Charakteristika (Nolden 1994; Hellwig et al. 1995). Die Prismen sind in eine interprismatische Substanz eingelagert, welche ebenfalls aus dicht aneinander gelagerten Kristalliten besteht. Die Kristalle des Schmelzes stellen eine Apatitverbindung dar, bestehend aus Kalzium und Phosphat. Es können aber auch andere Elemente wie Natrium, Kalium, Chlor, Magnesium, Kupfer, Zink und Fluor in der Kristallgitterstruktur eingebaut sein. Durch die Einlagerung der Elemente verändert sich (wie oben beschrieben) die Eigenschaft der Schmelzkristalle (Buddecke 1994). Neben dem Hydroxylapatit gibt es weitere wichtige Apatitverbindungen wie das beta-Trikalziumphosphat (Whitlockit), das Kalziumphosphatdihydrat (Brushit), das Kalziumphosphat (Monetit) und das Octakalziumphosphat (Hennemann 1982; Savage 1983). Die Apatitverbindungen sind säurelöslich, der kritische pH-Wert des Schmelzes liegt dabei zw. 5,2 und 5,7. Säureangriffe führen zu einer oberflächlichen Erweichung des Schmelzes, beim Fortbestehen des erosiven Angriffs kommt es zur vollständigen Auflösung des Schmelzes (Hannig M. 1993).

Die Säurelöslichkeit des Schmelzes hängt u.a. von seinem Mineralgehalt ab, dieser unterliegt einer großen biologischen Variation. So konnten Ganss et al. (2000) in einer Erosionsstudie deutliche Unterschiede zwischen einzelnen Zähnen beobachten.

Innerhalb des Schmelzes variiert der Mineralgehalt um 30-40% (Weatherell and Robinson 1973) bzw. um 77-90 Vol. % (Theuns et al. 1983). Wie oben beschrieben nimmt z.B. die Kalziumkonzentration und die Schmelzdichte von der Oberfläche zur Schmelz-Dentin-Grenze und von koronal nach zervikal ab. Allgemein geht man davon aus, dass der Mineralgehalt der in einer Studie verwendeten Schmelzproben abhängig von seiner Entnahmestelle stark von den durchschnittlichen Werten abweichen kann. Die hexagonalen Apatitkristalle haben eine Länge von 169 nm, eine Breite von 40–70 nm und eine Dicke von 26 nm und sind von einer Hydratationsschale umgeben. Der Hydratationsschale sind Lipide und Proteine angelagert. Die Längsachsen der Apatitkristalle sind zu den Prismen parallel angeordnet. Dabei greifen die Kristalle in die benachbarten Schmelzprismen über, es kommt zur Verzahnung der Prismen untereinander und zu einer höheren Festigkeit des Schmelzes gegenüber mechanischer Belastung (Frank 1968).

2.2 Definition nicht-kariesbedingter Zahnhartsubstanzverluste

Häufige Ursachen für nicht kariösen Zahnhartsubstanzverlust der Zähne sind Erosion, Abrasion, Attrition und Abfraktion. Diese Mechanismen werden mechanisch oder chemisch ausgelöst und beeinflussen sich gegenseitig, so dass der Substanzverlust oft ein Ergebnis aus der Kombination der einzelnen Mechanismen darstellt. In der Literatur (Imfeld 1996 a, b; Gallien et al. 1994) werden diese Mechanismen wie folgt definiert:

Abrasion:

Die Abrasion wird nach Pindborg als eine pathologische Abnutzung von Zahnhartsubstanz durch Reibung eines Fremdkörpers unabhängig vom Zahnreihenschluss definiert (Pindborg 1970). Der Fremdkörper kann dabei in Form von Zahnpastapartikeln, Staubkörnern oder Nahrungsbestandteilen vorliegen (Levitch et al. 1994; Pöllman et al. 1987), der Abrieb wird dabei mechanisch durch harte Partikel hervorgerufen. Die Stärke der Abrasion hängt von der Härte, der Form, dem Druck, der Geschwindigkeit, der Konzentration des einwirkenden Fremdkörpers ab.

Wird der Zahnabrieb durch Nahrungsbestandteile ausgelöst, so wird der Prozess als Demastikation bezeichnet, wobei der Substanzverlust von der Abrasivität der Nahrung abhängt (Imfeld 1996 b). Die bei der Abrasion entstehenden Defekte treten als Rillen bzw. als konkave Vertiefungen in Erscheinung (Kaidonis et al. 1992). Die Defekte sind meist auf die falsche Handhabung einer Zahnbürste zurückzuführen (König 1990).

Attrition:

Die Attrition beschreibt einen Substanzverlust, der durch den physiologischen Kontakt der Zähne untereinander (beim Schlucken, Sprechen) oder pathologisch durch Parafunktionen (Bruxismus) entsteht, ohne Beteiligung eines Fremdkörpers. Die dabei entstehenden Defekte manifestieren sich in Form von Schlifffacetten oder als begrenzte Oberflächendefekte im Okklusalbereich der Zähne (Xhonga 1977; Kraft 1961).

Erosion:

Die Erosion wird durch chemische, nicht bakterielle Faktoren ausgelöst (Lauterbach 1992). Die Faktoren können intrinsisch (Magensäure bei Reflux und Bulimie) oder extrinsisch (sauere Lebensmittel, Medikamente) sein (James and Parfitt 1953; Mistry and Greenby 1993; Scheutzel 1996). Die Erosion entsteht durch direkte Säureeinwirkung auf der Zahnoberfläche. Die matte demineralisierte Oberfläche weist einen Substanzverlust auf.

Abfraktion:

Der Begriff Abfraktion beschreibt ein multifaktorielles Geschehen des stomatognathen Systems, bei dem es zur Ausbildung von keilförmigen Defekten kommt (Ott et al. 1991). Die Ursache dieser Defekte wird überwiegend mechanisch–abrasiven Vorgängen zugeschrieben, ist aber noch nicht vollständig geklärt. Durch exzentrische Fehlbelastung der Okklusalflächen treten Spannungen auf, die zu Mikrofrakturen und Schmelzabsprengungen im Bereich der Schmelz-Zement-Grenze führen (Meyer et al. 1991; Imfeld 1996 a). Durch mechanische Belastung z.B. Bürstabrasion (Litonjua et al. 2004 a) und Säureeinwirkung, wird dieser Defekt verstärkt (Wang and Smith 1995, 1996). Erhebliche Bedeutung bei der Entstehung dieser Defektform haben abrasive

Zahnpasten, falsche Putztechniken, ungeeignete Zahnbürsten sowie Fehlbelastungen beim Bruxismus und okklusale Störkontakte (Litonjua et al. 2004 b; Pintado et al. 2000).

2.3 Die Bürstabrasion und ihr Einfluss auf die Zahnhartsubstanz

Die Bürstabrasion beschreibt mechanische Abrasionsvorgänge, die beim Bürsten der Zähne auftreten. Die Ausprägung der Bürstabrasion wird dabei von vielen verschiedenen Faktoren wie Beschaffenheit der Bürste, Abrasivität der verwendeten Zahnpasta (Kielbassa et al. 2005), Anpressdruck, Putztechnik (Attin et al. 1999), Dauer und Häufigkeit des Bürstens (Gross et al. 1996) beeinflusst (Wang and Smith, 1995, 1996).

Zahlreiche Untersuchungen haben bestätigt, dass der Substanzverlust beim Bürsten überwiegend auf die Abrasivität der verwendeten Zahnpasta zurückzuführen ist (Pickles et al. 2005; Barbakow et al. 1989; Gross et al. 1996, Wiegand et al. 2008). Bereits 1983 konnte Hotz nachweisen, dass bei Verwendung von Wasser als Abrasionsmedium es nur zum minimalen Substanzabtrag kommt, beim Bürsten der Zähne mit Zahnpasta hingegen kommt es zum deutlich höheren Substanzverlust. Beim Bürsten des Zahnschmelzes mit fluoridfreier Zahnpasta (Anpressdruck 2 N, 5000 Bürststriche) konnten Davis und Winter (1980) einen durchschnittlichen Schmelzverlust von 1,36 µm nachweisen. Bei einer mit der Zahnputzmaschine (Auflagegewicht 400 g) durchgeführten Untersuchung zeigten Attin et al. (2000) bereits nach 30-sekündiger Bürstabrasion einen Schmelzverlust von 0,22 ± 0,15 µm. Die Abrasivität einer Zahnpasta wird von der Form, Größe und Härte ihrer Putzkörper bestimmt. Dabei müssen die Putzkörper einen höheren Härtegrad aufweisen als der Schmelz, je größer und rauer die Partikel, desto höher ist deren Abrasivität. Als Maß für die Schmelzabrasivität einer Zahnpasta gilt der REA-Wert (REA = Relative Enamel Abrasivity). Je höher der REA-Wert der Zahnpasta, desto größer ist die Anrauung der Schmelzoberfläche. Um Defekte am Schmelz klein zu halten, wäre eine Zahnpasta mit einem niedrigen REA-Wert anzustreben. Es bleibt jedoch schwierig,

den Abrieb der Zahnhartsubstanz gering zu halten und gleichzeitig eine maximale Reinigungswirkung zu erzielen. Baehni et al. (1992) gaben zu bedenken, dass bei richtig angewandter Putztechnik die Abrasivität der Zahnpasta von zweitraniger Bedeutung ist. Andere Autoren fanden heraus, dass die Bürstabrasion durch Anwendung fluoridhaltiger Zahnpasten mit niedrigen REA-Werten (Bartlett et al. 1994) oder durch Anwendung hochkonzentrierter fluoridhaltiger Gele (Attin et al. 1999) verringert wird.

Inwieweit die Beschaffenheit und die Gestaltung der Zahnbürste sich auf die Bürstabrasion auswirken, wurde in mehreren Studien untersucht. So wiesen Silverstone and Featherstone (1988) nach, dass eine abgerundete Borstenform zu einem geringeren Substanzabtrag führt. Remizov und Pruzhanskii (1990) konnten feststellen, dass nicht nur die Borstenform, sondern auch die Beschaffenheit der Borsten sowie Art und Weise des Borstenschnitts die Zahnabrasion beeinflussen. Bezüglich des Härtegrades der Borsten wies eine Studie von Harte und Manly (1975) bei den härtesten Bürsten die größten Abrasionstiefen nach. Jedoch konnten Untersuchungen von Hotz (1983) und Wiegand et al. (2008) belegen, dass der Härtegrad der Borsten nur eine untergeordnete Rolle bei der Abrasion der Zahnhartsubstanz spielt. Abschließend lässt sich feststellen, dass sowohl die Bürstenform, als auch der Härtegrad der Borsten einen Einfluss auf die Ausprägung der Bürstabrasion nehmen können.

Bei der Bürstabrasion ist neben der Putzdauer und Putzhäufigkeit die angewandte Putztechnik von entscheidender Bedeutung (Bergström and Eliasson 1988). Dabei weist die Horizontalbewegung gegenüber anderen Bewegungsformen den größten Substanzabrieb auf (Bergström and Lavstedt 1979). Es wurde von Björn und Lindhe (1966) bei der Ausübung der Horizontaltechnik eine längere Kontaktzeit der Bürste mit der Zahnhartsubstanz nachgewiesen. Auch das Erlernen und Anwenden richtiger Putztechnik bringt nicht immer den erwünschten Effekt. So fielen in einer Studie von Mierau et al. (1989), in welcher die Kraft, Dauer, Häufigkeit und Technik bei der Zahnreinigung untersucht wurden, 85% der Probanten in ihr altes Gewohnheitsmuster beim Zähneputzen zurück.

Die Abhängigkeit des Substanzverlustes von der beim Putzen angewandten Kraft wurde in mehreren In-vitro-Studien untersucht (Hotz 1983; Phaneuf et al. 1962), dabei

stieg der Substanzabtrag mit größer werdendem Anpressdruck an. Beim Bürsten ist die angewandte Kraft sehr starken Schwankungen unterworfen. In der Literatur finden sich verschiedene Angaben bezüglich des Anpressdrucks; so arbeitet Sander bei seinen Untersuchungen mit Gewichten zw. 110 g und 300 g (Sander et al. 2005), Tomofuji hingegen mit Gewichten bis maximal 250 g (Tomofuji et al. 2002). Van der Weijden stellte bei Untersuchungen zur Effizienz der Plaqueentfernung an 94 Probanden fest, dass die mittlere aufgewandte Kraft beim Putzen einem Gewicht von 330 g entspricht (Van der Weijden et al. 1998). Fraleigh et al. (1967) konnten in einer In-vivo-Studie nachweisen, dass Probanden mit einer elektrischen Zahnbürste einen geringeren Putzdruck (maximal 260 g) ausüben gegenüber einer manuellen Bürste. Andere Autoren fanden heraus, dass der Anpressdruck im geringen Maß von der Länge, Dicke und Anordnung der Borsten beeinflusst wird (de Trey 1983). Dagegen nimmt der Härtegrad der Borsten keinen Einfluss auf den Anpressdruck (Riethe 1974).

Schmelz als härteste Substanz des menschlichen Körpers verhält sich gegenüber der Bürstabrasion widerstandsfähiger als Dentin oder Wurzelzement (Hotz 1983). Die hohe Abrasionsresistenz des Schmelzes ist auf seine hohe Härte und seine chemische Beschaffenheit zurückzuführen (Wright 1969; Klimm 1993). So wird z.B. durch Einlagerung von Fluorid in die Prismenstruktur die Stabilität des Schmelzes erhöht. Wird jedoch der Schmelz einer Säureeinwirkung ausgesetzt, kommt es zur Erweichung der oberflächlichen Schicht. Die so vorgeschädigte Zahnoberfläche weist gegenüber einer intakten Oberfläche einen höheren Substanzverlust nach Bürstabrasion auf (Sorvari et al. 1996; Schweizer-Hirt et al. 1978; Davis and Winter 1980). In einer In-vitro-Studie stellten Attin et al. (1997) fest, dass es mit zunehmender Dauer der Säureeinwirkung zu einer überproportionalen Zunahme der Bürstabrasion kommt. Bartlett et al. (1994) fanden heraus, dass die Kombination aus Erosion und Bürstabrasion einen höheren Substanzverlust bewirkt als ein voneinander unabhängiges Auftreten beider Formen. Dabei führt die alleinige Erosion zu einem höheren Substanzverlust als die alleinige Bürstabrasion (Kelly and Smith 1988).

Insgesamt zeigten die Studien, dass die Ausprägung der Bürstabrasion überwiegend von der Abrasivität der Zahnpasta, vom Anpressdruck und von einer Säureexposition der Oberfläche abhängig ist. Die Beschaffenheit der Bürste, der Härtegrad der Borsten,

die angewandte Putztechnik sowie die Dauer und Häufigkeit des Bürstens spielen bei der Bürstabrasion eine eher untergeordnete Rolle.

2.4 Untersuchungsmethoden zur Quantifizierung des Substanzverlustes

Es gibt zahlreiche Untersuchungsmethoden zur Quantifizierung des Substanzverlustes nach Bürstabrasion. Die in vitro angewendeten Untersuchungsmethoden sind sowohl physikalische als auch chemische bzw. physikochemische Analyseverfahren. Zu den physikalischen Methoden zählen die Profilometrie, die Mikroradiographie, die gravimetrische Methode und die Rasterelektronenmikroskopie. Zu den chemischen/ physikochemischen Analysemethoden gehören die Atomabsorptionsspektroskopie, die kalziumsensitive Elektrode, die photometrische Kalziumanalyse und das Radiotracer-Verfahren.

Radiotracer

Das Radiotracer-Verfahren wird zur Bestimmung von Substanzverlusten verwendet (Grabenstetter et al. 1958). Bei dem Verfahren wird eine Zahnprobe mit Neutronen bestrahlt, dabei entsteht radioaktives P^{32} in dem Apatit. Die Probe wird anschließend einer Bürstabrasion unterzogen. Zunächst wird die Probe mit einer festgelegten Anzahl der Bürststriche und einem Standard-„slurry“ bekannter Abrasivität abradiert. Im aufgefangenen Standard-Bürst-„slurry“ wird die Radioaktivität des abradierten P^{32} gemessen. Dieser Messwert wird als 100% Abrasion angenommen. Dann wird der zu testende Bürst-„slurry“ unter denselben Abrasionsbedingung eingesetzt. Die Radioaktivität in der Testsuspension wird mit dem Standard verglichen und daraus die relative Abrasion in Prozent vom Standard ermittelt. Über den Unterschied der Radioaktivität lässt sich der Substanzverlust errechnen (Davis 1979). Hefferren (1976) benutzte diese Methode zur Bestimmung der Abrasivität von Zahnpasten und führte die Abrasionswete für Schmelz (REA = Relative Enamel Abrasivity) und für Dentin (RDA = Relative Dentine Abrasivity) ein. Die Radiotracer-Testmethode lässt

Zahnhartsubstanzverluste unabhängig vom Feuchtigkeitsgehalt bzw. vom Gewicht des Zahnes bestimmen. Barbakow et al. (1989) geben zu bedenken, dass der Substanzverlust in-vitro mit diesem Test sich zwar gut bestimmen lässt, die Ergebnisse aber nicht direkt auf das Mundmilieu übertragen werden können, da zu viele Einflussfaktoren im Test nicht berücksichtigt werden. Ein weiteres Problem ist die relativ kurze Habwertszeit von P^{32} von 14,28 Tagen. Das bedeutet, dass sich innerhalb von 5 Stunden der Messwert um 1% verändert, pro Tag sinkt der Messwert um 5%. Damit verschlechtert sich kontinuierlich das Messsignal bei gleich bleibender Abrasion. Besonders bei der Schmelzabrasion wird nur sehr wenig radioaktives Phosphor herausgelöst, was zu kleineren Messwerten führt als bei der Dentinabrasion. Das Messen der Radioaktivität von P^{32} als Beta-Strahler ist außerdem sehr zeitaufwendig und begrenzt damit den Umfang der Versuchsserien. Aufgrund der offenen radioaktiven Strahlen können solche Versuche nur in Spezialräumen und von besonders geschultem Personal durchgeführt werden. Die kurze Halbwertszeit von P^{32} verlangt zudem, dass die Versuchsdurchführung zeitlich exakt standardisiert werden muss, um Fehler zu vermeiden.

Mikroradiographie

Ein weiteres physikalisches Verfahren ist die Mikroradiographie. Sie ist eine Methode zur Beschreibung von De- und Remineralisationsvorgängen in Schmelz und Dentin und dient in erster Linie der quantitativen Erfassung von Kariesprozessen (Amaechi et al. 1998). Die Methode geht auf Thewlis (1940) zurück, der mit Hilfe von Röntgenstrahlen den Mineralgehalt von Knochen bestimmte. Die Röntgenstrahlen werden durch eine dünnschichtige Probe geschickt, deren Absorption gemessen und mit der Absorption einer gleichzeitig dargestellten Eichtreppe (Standard) verglichen wird. Daraus wird der Mineralgehalt der Probe errechnet. Die Mikroradiographie wurde von Angmar et al. (1963) zur Bestimmung des Mineralgehalts von Zahnhartsubstanzen weiterentwickelt. Es werden je nach Schnittebene zwei Verfahren unterschieden: die longitudinale (LMR) und die transversale Mikroradiographie (TMR). Bei der longitudinalen Mikroradiographie wird der Mineralgehalt zwar quantitativ erfasst, eine Charakterisierung der Läsionstiefe ist dabei aber nicht möglich. Mit dieser Methode wird ein oberflächlicher Mineralverlust oder -gewinn z.B. bei

Erosionsprozessen bestimmt, deshalb eignet sie sich zur Beurteilung von De- und Remineralisationsprozessen. Die untere Messgrenze der LMR liegt bei etwa 10 µm. Die Proben werden parallel zur Zahnoberfläche geschnitten, die Dicke der Proben sollte unter 450 µm liegen (de Josselin de Jong et al. 1987). Bei der transversalen Mikroradiographie wird der Mineralgehalt als Funktion der Tiefe dargestellt. Dabei werden die Läsionstiefe und der Mineralverlust beurteilt. Die Quantifizierung oberflächlicher Mineralverluste ist dagegen nur bedingt möglich (Featherstone et al. 1983; Dijkman et al. 1986). Die Probenpräparation für die TMR ist sehr aufwendig, die senkrecht zur Zahnoberfläche geschnittenen Proben dürfen eine Dicke von 100 µm nicht überschreiten. In einer Studie, bei der mehrere Analysemethoden zur Erfassung der Läsionstiefe und des Mineralverlustes einer kariösen Läsion untersucht wurden, konnten Arends und Ten Bosch (1992) bestätigen, dass die transversale Mikroradiographie neben der chemischen Analyse eine gute Methode zur direkten und quantitativen Bestimmung des Mineralverlust bei Kariesläsionen in Vol.-% und der Läsionstiefe ist.

Rasterelektronenmikroskopie

Mit der Rasterelektronenmikroskopie wird die Struktur von Oberflächen untersucht und die Oberflächenveränderung qualitativ bestimmt, es kann aber auch die Veränderung der chemischen Zusammensetzung sichtbar gemacht werden (Brady and Woody 1977). Um einen optischen Eindruck der bearbeiteten Oberflächen vermitteln zu können, werden häufig rasterelektronenmikroskopische Bilder angefertigt. Die Methode eignet sich gut, um Bilder mit hoher Vergrößerung und großer Tiefenschärfe erzeugen zu können, dabei werden Details mit Abmessungen bis zu 1 nm abgebildet (Joy et al. 1982; Meurman and Frank 1991; Sorvari et al. 1996). Voraussetzungen für eine rasterelektronenmikroskopische Untersuchung sind eine hinreichende Vakuumbeständigkeit und Resistenz der Proben gegenüber Elektronenbestrahlung. Dementsprechend ist die Vorbereitung der Proben sehr zeitaufwendig. Da die Untersuchung im Vakuum stattfindet, dürfen die Proben keine Gase oder Flüssigkeiten enthalten. Die Proben müssen außerdem mit einer leitenden Substanz (z.B. Gold) in einer dünnen Schicht bedampft werden, damit sich das Präparat nicht elektrostatisch auflädt und Artefakte erzeugt. Die Raster-Elektronenmikroskopie wird häufig für die

Oberflächenbeurteilungen (Kaplan et al. 1996, Tate and Powers 1996) von Erosionsschäden (Friedl et al. 1996) verwendet. Mit rasterelektronenmikroskopischen Bildern können abrasive Oberflächeneffekte differenziert dargestellt werden, der eigentliche Substanzverlust kann aber nicht quantifiziert werden.

Gravimetrische Methode

Ein weiteres Verfahren zur Messung des Substanzverlustes von Zahnproben ist die gravimetrische Methode. Das Ermitteln des Abriebs durch Wägen bietet ein leicht durchführbares quantitatives Auswertungsverfahren (Hengchang et al. 1990; Vrijhoff et al. 1985). Die Zahnprobe wird vor der Abrasion verpackt und gewogen. Nach der Bürstabrasion wird die Probe erneut gewogen. Aus der Differenz der Wägungen lässt sich der Substanzverlust ermitteln (Wicht et al. 2002). Der Vorteil dieser Methode liegt in der relativ einfachen Handhabung. Als Nachteil der Methode wird die geringe Genauigkeit angesehen. Je kleiner der zu ermittelnde Substanzverlust, desto größer schwanken die Messdaten. Zusätzlich müssen die Proben bei konstanter Feuchtigkeit gelagert werden. Bei Austrocknung der Proben kommt es zum Gewichtsverlust, welcher zur Verfälschung der Endergebnisse führt.

Profilometrie

In zahlreichen physikalischen Untersuchungsmethoden zur Bestimmung des Substanzverlustes nach Bürstabrasion hat sich besonders die profilometrische Messmethode bewährt (Noordmans et al. 1991). Die Profilometrie wurde 1966 von Ashmore (Ashmore 1966) zur Bestimmung des Substanzverlustes durch Erfassung von Oberflächenunebenheiten genutzt und fand seitdem in zahlreichen In-vitro-Studien Anwendung (Davis and Winter 1980; Valk et al. 1986; Ganss et al. 2000; Westerfeld 2002). Die Abtastung der Zahnoberfläche erfolgt dabei entweder optisch mit einem Laserstrahl (West et al. 2001) oder taktil mit einer Diamantnadel. Der Laser-Profilometer wird überwiegend bei Messungen an trockenen Probenoberflächen angewendet, da feuchte Oberflächen den Laserstrahl ablenken können und damit eine genaue Messung beeinträchtigen. Die Messapparatur des taktilen Profilometers besteht aus einem Vorschubgerät, einem Mikrotaster und einem Ausgabegerät. Die profilometrische Abtastung der abradierten Oberfläche und der Referenzfläche erfolgt

geradlinig mit einer Diamantnadel bei konstanter horizontaler Verschiebung. Die vertikale Auslenkung des Mikrotasters während der Messung wird von dem Ausgabegerät erfasst und zusammen mit den horizontalen Daten verarbeitet. Um die Fläche der gesamten Probe erfassen zu können, sind mehrere parallele Abtastungen notwendig. Aus den zweidimensionalen Einzelprofilen wird computergestützt eine dreidimensionale Topografie erstellt. Anschließend wird aus der Breite und Tiefe des Abrasionsgrabens die Fläche jedes Profils ermittelt und über den Abstand das Volumen des Substanzverlustes der Probe errechnet. Die Vergleichbarkeit verschiedener Studien zur Bestimmung des Substanzverlustes mit der profilometrischen Methode ist überwiegend von den verwendeten Ausmessungsparametern abhängig. In der vorliegenden Studie wurde der Substanzverlust über die durchschnittliche Tiefe des Abrasionsgrabens, wie bei Attin et al. (2003), berechnet. In anderen Studien wird der Substanzverlust als Fläche unter der Kurve definiert (Hall et al. 1997) oder durch Messung der maximalen Tiefe des Abrasionsgrabens (Rytömaa et al. 1988) ermittelt. Einige Autoren machen auf die begrenzte Sensitivität der profilometrischen Auswertung aufmerksam. So werden minimale Substanzverluste unter 1 µm Abtragstiefe (Hooper et al. 2004; Zhang et al. 2000) und unter 20 µm Abtragsbreite (Barbour and Rees 2004) profilometrisch nur unzureichend erfasst. Trotz der genannten Aspekte stellt die profilometrische Analyse eine genaue, reproduzierbare und weit verbreitete Methode zur Erfassung der Abrasionstiefe und zur Ermittlung des Volumens der abradierten Substanz dar und wurde deshalb als Vergleichsmethode zur photometrischen Bestimmung des Substanzverlustes herangezogen.

Kalzium-Analyseverfahren

Eine Möglichkeit, den Hartsubstanzverlust und die Menge der abradierten Mineralien zu bestimmen, ist die quantitative Analyse der herausgelösten Mineralien.

Zu den häufig angewendeten Verfahren zur Erfassung des Kalziums gehören die Atomabsorptionsspektroskopie, der Einsatz einer ionenselektiven Elektrode (Barbour and Rees 2004) und der photometrische Kalzium-Nachweis. Der Einsatz chemischer Analysemethode in der Zahnmedizin wird durch das konstante Verhältnis von Kalzium und Phosphat in der Zahnhartsubstanz ermöglicht. Der Zahnschmelz weist

einen Kalziumanteil von 35 % auf (Esser et al. 1998). Im Zahnschmelz liegen Kalzium und Phosphat in einem Verhältnis von 1:1,2 als Hydroxylapatit vor (Hellwig et al. 1995). Hydroxylapatit lässt sich durch Säureeinwirkung zersetzen, dabei werden unter anderem Kalziumionen freigesetzt (Patel et al. 1987). Die Konzentration des freigesetzten Kalziums kann mit den unterschiedlichen Analysemethoden ermittelt werden. Anhand des bekannten Kalziumanteils am Gesamtvolumen des Zahnschmelzes lassen sich Rückschlüsse auf die abradierte Schmelzmasse ziehen.

Kalziumsensitive Elektrode

Die kalziumsensitive Elektrode ist ein hoch sensitives Analyseinstrument. Sie erlaubt die quantitative Bestimmung der abradierten Zahnhartsubstanz über den Nachweis von Kalzium. Diese Elektrode zählt zu den ionensensitiven Elektroden. Mit der Entwicklung ionensensitiver Elektroden ist die Möglichkeit gegeben, aus Potentialmessungen die Aktivität einzelner Ionenenarten zu bestimmen, vorausgesetzt die Eichlösung weist die gleiche Ionenstärke wie die zu messende Lösung auf. An der Elektrode baut sich ähnlich wie bei der pH-Elektrode auf beiden Seiten einer Membran ein Diffusionspotential auf, das gemessen wird. Die chemische Struktur der Membran ähnelt häufig einem Ionenaustauscher und entscheidet über die Spezifität der Bestimmung. Die Elektroden werden mit zwei Standardlösungen kalibriert. Anhand der erstellten Kalibrationsgeraden wird die Elektrolytkonzentration in den Proben berechnet (Burchardi et al. 2007). Eine exakte Konzentrationsermittlung mit den Elektroden bei relativ großer Ionenstärke ist jedoch kaum möglich. Große Ionenstärke weist immer auf starke interionische Wechselwirkungen hin, welche die Gesamtmessung beeinflussen. Die Elektrode misst nur das ionisierte Ca^{2+}. Außerdem arbeitet die Elektrode für gelöste Zahnhartsubstanz hoch sensitiv nur in einem begrenzten pH-Bereich. Bei pH-Werten > 7 fällt Kalzium in Form von Phosphatverbindungen aus und ist damit nicht mehr der Elektrode zugänglich. Unterhalb von pH 3 machen sich Störungen der Protonen bei der Kalziumelektrode bemerkbar.

Atomabsorptionsspektroskopie (AAS)

Eine andere hochsensitive chemische Analysemethode ist die Atomabsorptionsspektroskopie (AAS). AAS ist ein Verfahren zur Gehaltsbestimmung von Elementen. Sie beruht auf der Messung der spezifischen Lichtabsorption des Atomdampfes der zu analysierenden Probe. Anhand von Proben mit bekanntem Kalziumgehalt wird die Messung geeicht. Aus der Absorption der Testprobe wird über die Eichkurve die Konzentration des zu bestimmenden Elementes in der eigentlichen Probe ermittelt (Burkhard 2003). Vorteil dieser Messmethode liegt in der genauen Gehaltsbestimmung der Substanz in der eigentlichen Probe (Meurman et al. 1990 b). Für die Messung muss die Kalziumlösung mit CsCl versetzt werden, um Störungen durch PO_4 auszuschalten. Bei der AAS-Messung wird nicht zwischen ionisiertem und gebundenem Kalzium in der Testlösung unterschieden. Die Messung erfordert ein großes Volumen (ml) der präparierten Kalziumlösung. Die Methode ist für die Kalziumbestimmung in sehr kleinen Testvolumina nicht geeignet und zeitaufwendig.

Photometrische Verfahren

Zu den moderneren chemischen Analyseverfahren zur Quantifizierung des Substanzverlustes nach Bürstabrasion gehört das photometrische Verfahren unter Anwendung einer Arsenazo-III-Lösung. Das photometrische Verfahren ermöglicht eine direkte Bestimmung von freigesetztem Kalzium in Säuren (Baykov et al. 1988). Bei der Herstellung der Lösung ist auf die zu verwendende Säure zu achten. Bei den Kalzium-bindenden Säuren wie Zitronensäure und Essigsäure ist die Arsenazo-III-Lösung nur eingeschränkt einsetzbar (Hannig C et al. 2005; Attin et al. 2005). Zum Kalziumnachweis wird eine Arsenazo-III-Lösung verwendet. Arsenazo III bildet mit Kalzium in saurer Lösung einen violetten Farbkomplex, dessen Intensität der Kalziumkonzentration proportional ist (Bablok 1988). Die Absorption der Messlösung wird bei einer Wellenlänge von 650 nm photometrisch gemessen. Die ermittelte Extinktion wird mit einer Kalzium–Kalibrationskurve verglichen und darüber die Kalzium–Konzentration der Testlösung bestimmt. Aus der Kalzium-Konzentration lässt sich anschließend die abradierte Schmelzmasse berechnen. Die Sensitivität der Arsenazo-III-Lösung wird in der Literatur mit 0,05 mmol/l angegeben (Mathias 1996; Passing and Bablok 1983). Attin et al. (2005) konnten nach Erosion der

Zahnoberfläche Kalziumkonzentrationen bis zu 12,4 µmol/l sicher wieder finden. Das photometrische Verfahren ermöglicht den Kalziumnachweis in sehr kleinen Proben. 1-10 µl der kalziumhaltigen Probe reicht für die Analyse mit Hilfe des Mikrotiterplatten-Systems aus. Somit stellt die photometrische Bestimmung der Kalziumkonzentration eine hochsensitive, schnelle und preiswerte Methode dar, bei der auch kleinste Testvolumina erfasst werden (Attin et al. 2005). Es ist keine zusätzliche Vorbereitung der kalziumhaltigen Lösung notwendig und der Zeitaufwand für die Probenvorbereitung und Messung ist gering.

3 **Versuchsplan:** Bürstabrasion

Für den Versuch wurden insgesamt 140 Schmelzproben aus Rinderfrontzähnen verwendet. Die Proben wurden mit einem diamantierten Hohlbohrer unter Wasserkühlung aus den Vestibulärflächen der Rinderincisivi entnommen, einzeln in Paladur eingebettet und anschließend mit Hilfe des Parallelisierungsschlittens plangeschliffen und poliert. Auf diese Weise entstanden 140 Probenblöcke, die im Leitungswasser gelagert wurden. Vor Versuchsbeginn wurden die Probenblöcke gleichmäßig auf 14 Versuchsgruppen mit je 10 Proben verteilt. Jede Gruppe wurde einer definierten Abrasionszeit ausgesetzt:

- Gruppe 1 → Bürstabrasion 5 s
- Gruppe 2 → Bürstabrasion 10 s
- Gruppe 3 → Bürstabrasion 15 s
- Gruppe 4 → Bürstabrasion 20 s
- Gruppe 5 → Bürstabrasion 25 s
- Gruppe 6 → Bürstabrasion 30 s
- Gruppe 7 → Bürstabrasion 45 s
- Gruppe 8 → Bürstabrasion 60 s
- Gruppe 9 → Bürstabrasion 75 s
- Gruppe 10 → Bürstabrasion 90 s
- Gruppe 11 → Bürstabrasion 105 s
- Gruppe 12 → Bürstabrasion 120 s
- Gruppe 13 → Bürstabrasion 135 s
- Gruppe 14 → Bürstabrasion 150 s

Die Proben jeder Gruppe wurden einer Bürstabrasion mit einem konstanten Anpressdruck von 0,1 N unterzogen. Alle Proben wurden mit 10 µl Bimsmehlsuspension gebürstet. Der „slurry“ aus Bimsmehlsuspension und abradierten Schmelzpartikeln jeder Probe wurde mit 10 µl Aqua bidest versetzt und anschließend aufgefangen. Mit einem Wasserdampfstrahl wurden die Schmelzproben von

eventuellen Verunreinigungen befreit, profilometrisch ausgemessen und die Masse des abradierten Schmelzes berechnet.

Der aufgefangene „slurry“ wurde zentrifugiert und der Wasserüberstand aufgefangen. Der verbliebene Bodensatz wurde mit 50 µl Salzsäure (1 mol/l) versetzt, um die abradierten Schmelzpartikeln aufzulösen. Nach erneutem zentrifugieren wurden 5 µl der Säure mit 5 µl NaOH (1mol/l) neutralisiert und mit 40 µl Imidazolpuffer auf den pH 6,5 gebracht. In 5 µl dieser Lösung wurde mit 25 µl des Kalzium-Indikators die Kalziumkonzentration bestimmt. Aus dem Kalziumgehalt wurde die Schmelzmasse errechnet und mit den Ergebnissen der profilometrischen Messung verglichen.

Die Abbildung 3.1 stellt die schematische Übersicht des Versuchsablaufs dar.

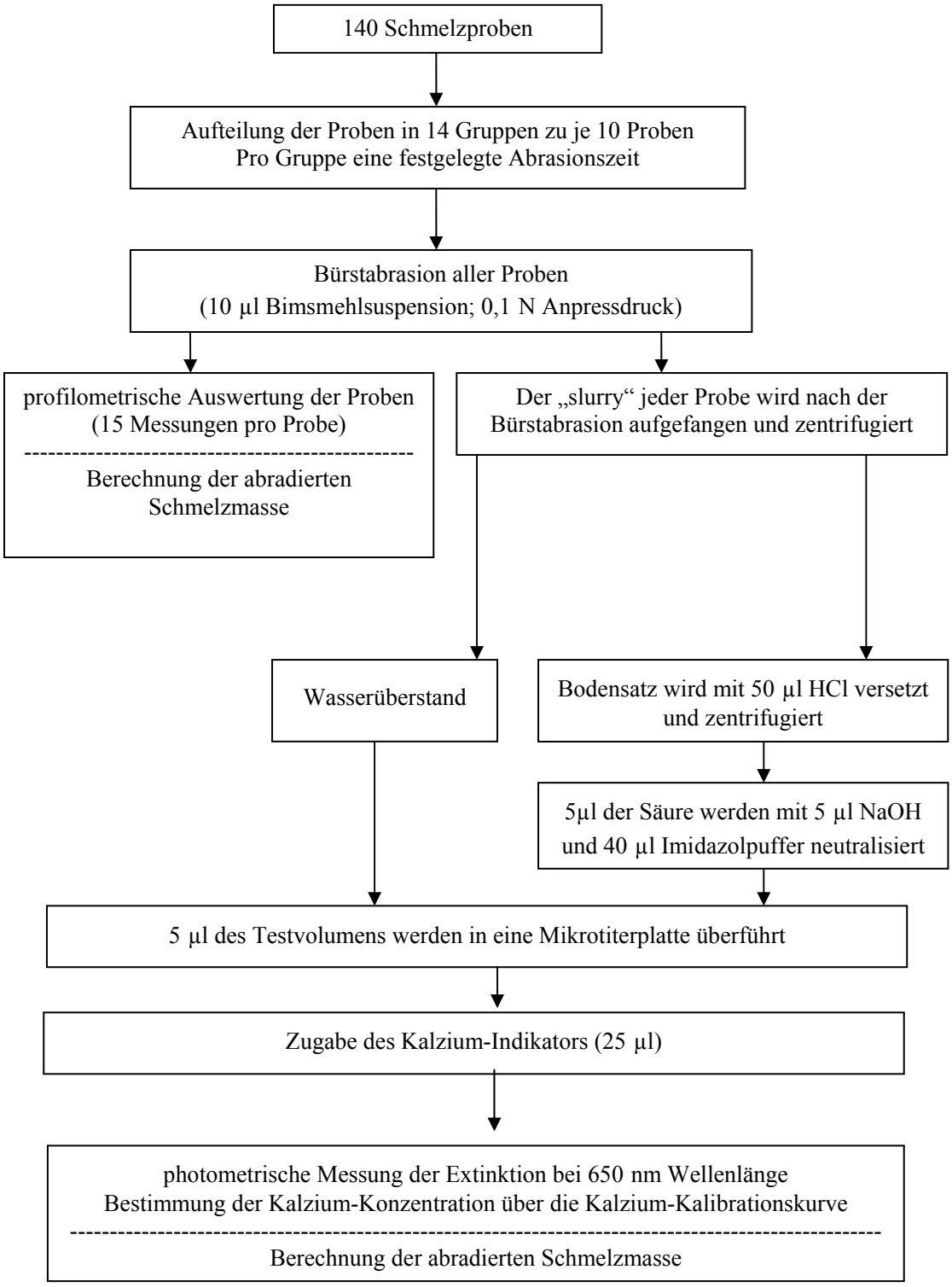


Abb. 3.1: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs

4 Material und Methoden

4.1 Herstellung der Schmelzproben

Die Entnahme der Schmelzproben erfolgte aus kariesfreien, permanenten Rinderincisivi. Bis zur weiteren Verarbeitung wurden die Rinderzähne im Leitungswasser, das mit Thymol (Material 1) versehen war, gelagert. Aus der Vestibulärfläche der Zähne wurden unter Wasserkühlung Schmelzproben herausgebohrt. Dazu wurde eine Standbohrmaschine (Mat. 2) mit einem diamantierten Hohlbohrer (Mat. 3) verwendet. Alle Schmelzproben wiesen eine zylindrische Form auf und hatten einen Durchmesser von 4 mm.

Die so gewonnenen Proben wurden mit der Schmelzoberfläche auf dem Boden einer Glasplatte mit Vaseline (Mat. 4) fixiert. Über jede Probe wurde eine runde Hohlform aus Messing platziert, die zuvor mit Vaseline isoliert wurde. Alle Formen wurden mit dem selbsthärtenden Kunststoff Paladur (Mat. 5) ausgefüllt. Auf diese Weise wurden 140 zylindrische Kunststoffblöcke mit einem Durchmesser von 7 mm hergestellt. Die Schmelzoberflächen lagen mittig in den Kunststoffblöcken.

Die eine Hälfte der Proben wurde manuell mit einem Siliziumcarbidpapier (Mat. 6) der Körnung 1200 grit unter Wasserkühlung plangeschliffen und anschließend mit einer Kornstärke von 2000/4000 grit hochglanzpoliert. Um eine maximale Planparallelität der Probenoberflächen zu erreichen, wurde die andere Hälfte der Proben in einem Parallelisierungsschlitten (Mat. 7) geschliffen, in den pro Durchgang 5 Proben eingespannt wurden.

In einem Parallelisierungsschlitten (Abbildung 4.1) wurden die Proben mit einem Siliziumcarbidpapier der Kornstärke 2000/4000 grit unter Wasserkühlung hochglanzpoliert. Unter fließendem Leitungswasser wurde anschließend die Schmierschicht sorgfältig entfernt. Um eine Austrocknung der Proben zu verhindern, wurden diese bis zur weiteren Verwendung im Leitungswasser gelagert.

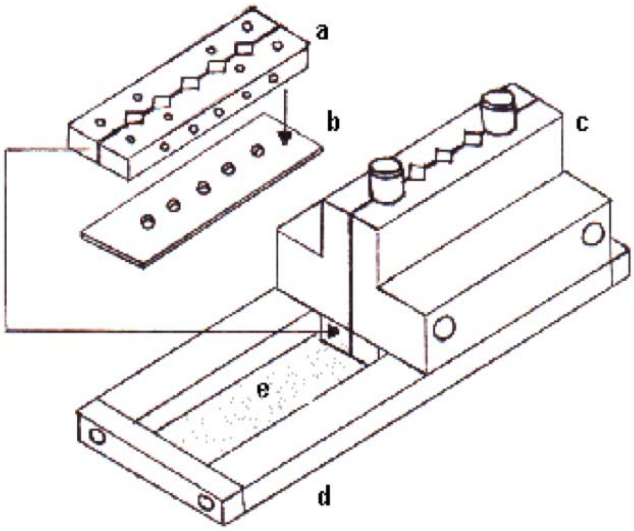


Abb. 4.1: Schematische Darstellung eines Parallelisierungsschlittens

In den **Block (a)** wurden fünf Proben eingespannt, wobei mit dem **Platzhalter (b)** die Abtragshöhe definiert wurde. Der Platzhalter wurde danach wieder entfernt. Der Block wurde im **Halter (c)** fixiert. Der Schlitten (a und c) wurde in der **Schlittenführung (d)** auf dem **Siliziumcarbidpapier (e)** bewegt und die Proben dabei plan geschliffen

4.2 Vorbereitung der Proben

Jede Probe wurde mit einem wasserfesten Stift (Mat. 8) im Bereich des Kunststoffs markiert und nummeriert. Für die Festlegung einer Referenzfläche wurde auf die Probe ein Messingrohr (Mat. 9) aufgestellt. Der vom Messingrohr nicht verdeckte Schmelzbereich von 2 mm Durchmesser stellte die Angriffsfläche für die Abrasion dar. Über das Messingrohr und den Kunststoffblock wurde ein Silikonschlauch (Mat. 10) gestülpt (Abb. 4.2). Auf diese Weise konnte das Rohr stabilisiert und das Auslaufen der abrasiven Suspension verhindert werden.

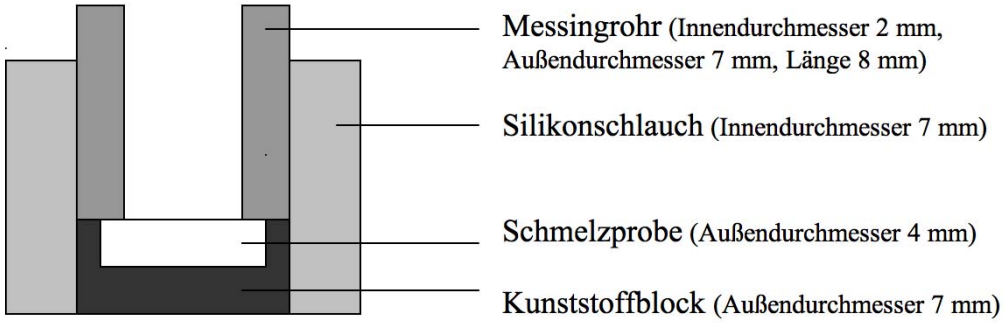


Abb. 4.2: Querschnitt einer für den Versuchsdurchlauf vorbereiteten Probe

4.3 Die Bürstvorrichtung

Die Bürstvorrichtung dient dazu, die abrasive Suspension auf der Schmelzoberfläche zu bewegen. Sie besteht aus einer elektrischen Zahnbürste (Mat. 11), die an einem Stativ befestigt ist. Die Zahnbürste ist mit einer niedrigen und normalen Geschwindigkeitsstufe ausgestattet. Die Versuche wurden mit der normalen Geschwindigkeit durchgeführt. Nach Einschalten der Zahnbürste führt der Bürstenkopf sanft pulsierende Vor- und Rückwärtsbewegungen kombiniert mit ultraschnellen Seitwärtsbewegungen aus.

Als Aufsatz für die elektrische Zahnbürste diente eine modifizierte Interdentalraumbürste (Mat. 12). Die Modifikation wurde wie folgt vorgenommen: Die äußeren drei Borstenbüschel wurden entfernt. Das verbleibende innere Büschel wurde im oberen Bereich in Kunststoff gefasst. Dadurch wurde erreicht, dass nur der untere Büschelbereich von ca. 1 mm Länge frei beweglich blieb. Die vorbereiteten Proben wurden so unter dem Bürstenkopf positioniert, dass das Büschel des Bürstenkopfes senkrecht zentriert auf die Schmelzprobe innerhalb des Messingrohres (s. Abb. 4.2) auftraf. Um ein Auflagegewicht von 10 g zu erreichen, wurde das Eigengewicht der Bürste mit einem Gegengewicht ausgeglichen (Abb. 4.3).

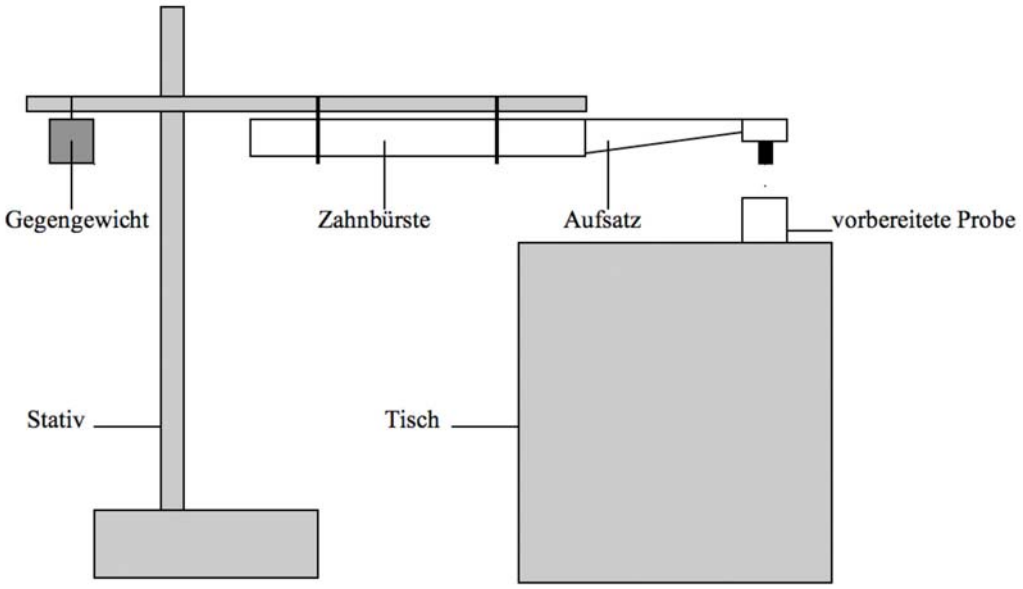


Abb. 4.3: Schematische Darstellung der Bürstvorrichtung

4.4 Die abrasive Suspension

Zum abrasiven Substanzabtrag an der Schmelzprobe wurde eine Suspension aus Bimsmehl (Mat. 13) und Aqua bidest verwendet.
Die abrasive Suspension wurde in mehreren Schritten hergestellt. Zum Entfernen des Kalziums wurden zunächst 100 g Bimsmehl mittlerer Körnung und 200 ml 1 mol/l Salzsäure (Mat. 14) gründlich durchmischt. Die Lösung wurde zwei Minuten lang zentrifugiert (Mat. 15). Die Salzsäure wurde verworfen. Dann wurde das Bimsmehl mehrmals mit Aqua bidest gespült. Dieser Vorgang wurde dreimal wiederholt. Danach wurde in der Lösung der pH-Wert kontrolliert. Bei einem pH-Wert von 6,7 wurde die Lösung zentrifugiert und das Wasser verworfen. Das Bimsmehl wurde getrocknet und anschließend mit einer Präzisionswaage (Mat. 16) abgewogen. Für die Versuche wurde das Bimsmehl im Verhältnis 1:2 mit Aqua bidest angesetzt.
Um eine Verunreinigung der Suspension durch Kalzium zu verhindern und einer Verdampfung des Wassers entgegenzuwirken, wurde die Suspension in einem dicht verschlossenen Plastikbehälter (Mat. 17) aufbewahrt.
Während der Versuche wurde die Suspension mit Hilfe eines Magnetrührers (Mat. 18) in ständiger Bewegung gehalten, um eine gute Durchmischung zu gewährleiste. Pro Probe wurden 10 µl der abrasiven Suspension mit einer Pipette (Mat. 19) auf der Schmelzoberfläche im Messingrohr platziert. Der Versuch wurde umgehend durchgeführt, um das Absinken der Bimsmehlanteile in der Suspension zu verhindern. Nach der jeweiligen Abrasionsdauer wurde die abrasive Suspension aufgefangen und das Messingrohr samt Silikonschlauch von der Schmelzprobe entfernt. Mit Hilfe des Wasserdampfs wurde die Probe von eventuellen Verunreinigungen befreit.

4.5 Oberflächenmessung

Nach der Abrasion wurde die Schmelzoberfläche mit einem Profilometer (Mat. 20) vermessen. Der Profilometer besteht aus einem Oberflächentaster mit einer abgerundeten Spitze von ca. 2 µm Durchmesser, einem beweglichen Positioniertisch

und einem Vorschubgerät. Ein angeschlossenes Computersystem dient sowohl zur Steuerung des Positioniertisches und des Vorschubgerätes als auch zur Messwerterfassung. Während der Oberflächentaster horizontal über die Probe bewegt wird, registriert die Software die vertikale Tasterauslenkung.

Die gereinigte Probe wurde mit Wachs (Mat. 22) auf dem Positioniertisch des Profilometers befestigt. Bei der Befestigung der Probe war darauf zu achten, dass die Schmelzoberfläche parallel zum Positioniertisch und der Oberflächentaster im rechten Winkel zur Abrasionsfläche ausgerichtet waren (Abb. 4.4).

Abb. 4.4: Profilometer

Für die Erfassung der Abrasionstiefe wurde ein Messbereich von 250 µm festgelegt. Pro Probe wurden 15 Profile gemessen. Die 15 Taststrecken wurden mit einem Oberflächentaster in einem Abstand von 150 µm abgefahren. Alle Taststrecken lagen parallel zueinander. Die 3,5 mm langen Taststrecken erfassten nicht nur die Abrasionsfläche, sondern auch die an diese angrenzenden Referenzflächen, die während des Bürstens von aufgesetztem Messingrohr geschützt waren (Abb. 4.5).

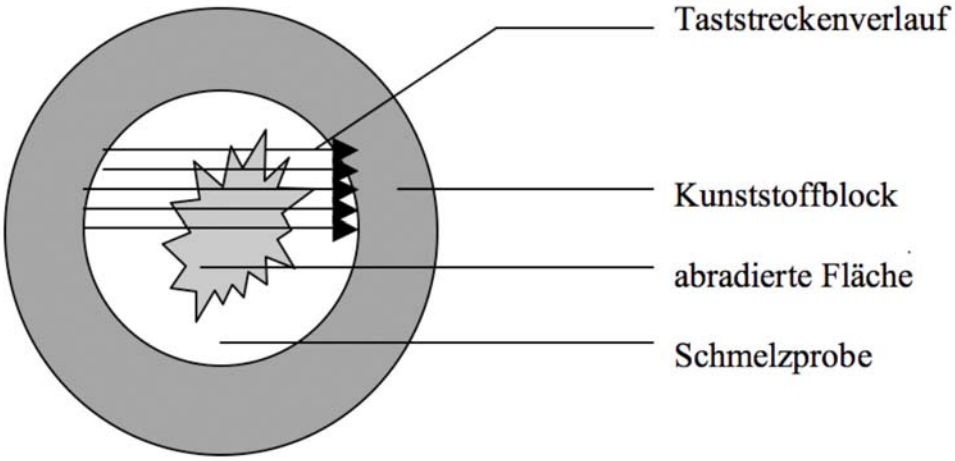


Abb. 4.5: Taststreckenverlauf des Oberflächentasters auf der Schmelzprobe

Aus den Messwerten erstellte das Programm eine Oberflächentopografie (Abb. 4.6). Die Topografie bestand aus 15 Einzelprofilen. Bei jedem Einzelprofil (Abb. 4.7) wurden mit Hilfe der Referenzflächen die Tiefe und die Breite festgelegt. Anhand dieser Daten wurde die Fläche jedes Einzelprofils errechnet.

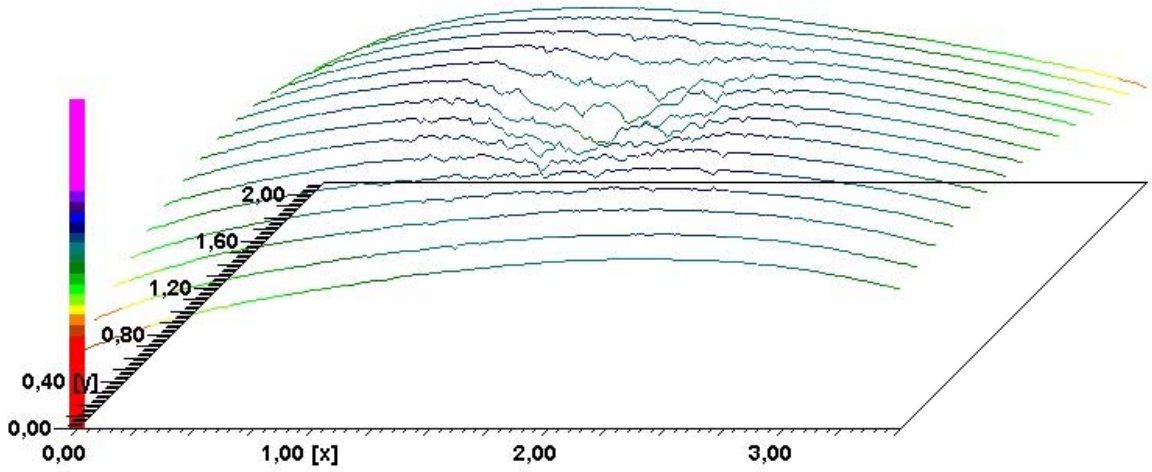


Abb. 4.6: Profilometrische Darstellung der Topografie

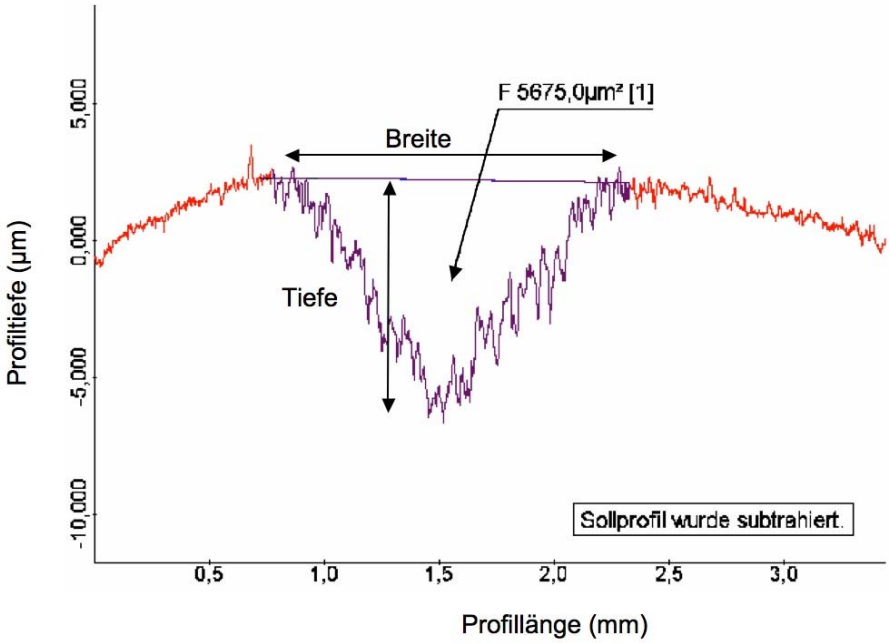


Abb. 4.7: Einzelprofil

4.6 Bestimmung der Masse des abradierten Schmelzes

Um die Masse der abradierten Substanz zu berechnen, wurde zunächst der Flächeninhalt der durch Abrasion entstandenen Vertiefung ermittelt. Der Abstand zwischen den Einzelprofilen (150 µm) wurde als Breite des Teilprofils angenommen. Das Produkt aus der gemessenen Fläche und der Profilbreite ergab das abradierte Volumen des Profils. Die Summe der Einzelprofile ergab das gesamte Abrasionsvolumen der Probe. Anschließend wurde der errechnete Flächeninhalt mit der Schmelzdichte von 2,9 g/cm³ multipliziert. Auf diese Weise wurde die abradierte Schmelzmasse ermittelt.

4.7 Herstellung des Imidazolpuffers

1,362 g Imidazol (Mol-Gewicht: 68,1 g/mol) wurden in 180 ml Aqua bidest gelöst.
Mit ca. 14 ml HCl (1 mol/l) wurde der pH auf 6,5 eingestellt und das Volumen auf 200 ml mit Aqua bidest aufgefüllt. Dazu wurden 100 µl Triton-X 100 gegeben.

4.8 Vorbereitung der Suspension für den Kalzium-Nachweis

Nach dem Bürsten der Schmelzproben wurde die Suspension mit dem abradierten Schmelz vollständig in ein Reagiergefäß (Mat. 23) übertragen und zentrifugiert. Der Überstand wurde mit einer Mikropipette abgenommen und in ein weiteres Reagiergefäß überführt.
Um die abradierten Schmelzpartikel aufzulösen, wurden 50 µl einer 1 mol/l Salzsäure in das Reagiergefäß gegeben. Das Reagiergefäß wurde mit Hilfe eines Rüttelgerätes (Mat. 24) durchgemischt. Nach 30 min Wartezeit wurde das Reagiergefäß zentrifugiert und 5 µl des Überstandes entnommen.
Die entnommene Säure wurde mit 5 µl einer 1 mol/l NaOH (Mat. 25) neutralisiert und mit 40 µl Imidazolpuffer gemischt. Der anschließend gemessene pH-Wert lag bei 6,5.

Mit einer Mikropipette wurden 5 µl dieser Lösung in eine Mikrotiterplattenkammer gegeben und 25 µl des Reaktionsgemisches aus Arsenazo III und Imidazolpuffer (Mat. 26) hinzugefügt. Die Mikrotiterplatte (Mat. 27) wurde innerhalb der nächsten halben Stunde photometrisch gemessen (Mat. 28) und ausgewertet (Abb. 4.8). Mit dem Wasserüberstand wurde in derselben Weise verfahren.

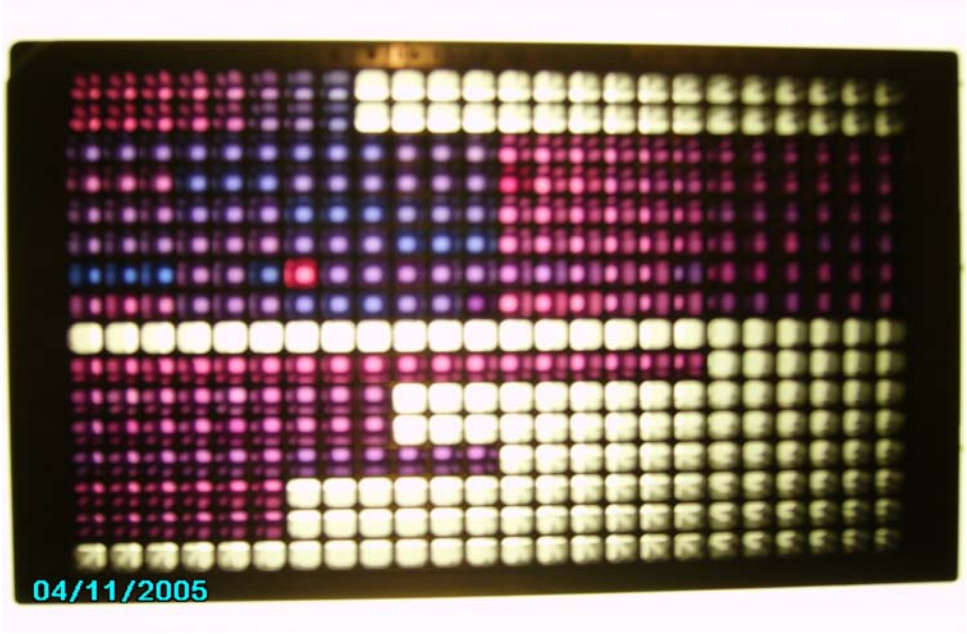


Abb. 4.8: Mikrotiterplatte

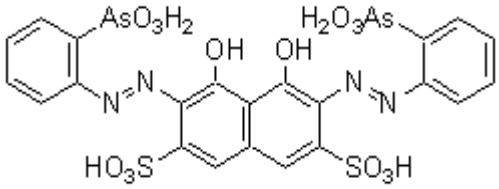
4.9 Photometrischer Kalzium-Nachweis

Für den Kalzium-Nachweis wurde ein Spektralphotometer für Mikrotiterplatten verwendet. In dem Gerät wird das weiße Licht einer Xenon-Lampe über ein Gitter in Spektralfarben zerlegt und über eine Optik von unten senkrecht durch die Mikrotiterplatte gestrahlt. Über der Platte befindet sich eine Einheit, die die Intensität des durchgehenden Lichts misst. Das Gerät ist an einen Computer angeschlossen, mit dem die Steuerung, Messung und Auswertung der Messwerte durchgeführt wird.

Für die Bestimmung der Kalzium-Konzentration mit dem photometrischen Verfahren mit dem Spektralphotometer genügen wenige Mikroliter der neutralisierten Lösung. Als Indikator für den Kalzium-Nachweis diente eine Arsenazo-III-Lösung (2,7-Bis(2-

arsonophenylazo)-1,8-dihydroxynaphthalin-3,6-disulfonsäure) mit der molaren Masse von 776,36 g/mol.

Dieses Arsenazo III hat folgende Strukturformel:



Der Indikator reagiert mit Kalzium. Dabei entstehen Farbkomplexe, deren Konzentration von der Kalzium-Konzentration abhängig ist. Die Konzentration der Farbkomplexe lässt sich durch photometrische Messungen der Absorption bei einer Wellenlänge von 650 nm ermitteln. Die Absorption korreliert mit der Kalzium-Konzentration. Als Referenzwellenlänge wird bei 750 nm gemessen. In diesem Bereich zeigt Arsenazo III/Ca keine spezifische Absorption.

4.10 Bestimmung der Kalzium-Konzentration und Berechnung des Schmelzabtrags

Die Kalzium-Konzentration der Proben wurde anhand einer Kalzium-Kalibrationskurve bestimmt, die aus einer Kalzium-Stammlösung (2,5 mmol/l) erstellt wurde. Die Stammlösung wurde in sechs Schritten jeweils um den Faktor 2 verdünnt. In jedem Verdünnungsschritt wurde 1 ml der vorherigen Konzentration eingesetzt und mit 1 ml Imidazolpuffer gemischt. In die Kalibrationskurve wurde zudem ein Nullwert mit aufgenommen. Auf diese Weise entstanden sieben Standardlösungen mit folgenden Konzentrationen:

1) 12,5 nmol/10 µl
2) 6,25 nmol/10 µl
3) 3,125 nmol/10 µl
4) 1,5625 nmol/10 µl
5) 0,7813 nmol/10 µl
6) 0,3906 nmol/10 µl
7) 0 nmol/10 µl.

Von jeder Standardlösung wurden 5 µl in eine Mikrotiterplattenkammer gegeben und 25 µl des Reaktionsgemisches aus Arsenazo III und Imidazolpuffer hinzugefügt. Die photometrisch ermittelten Extinktionen der Standardlösungen wurden mit dem Softmax-Programm (Mat. 29) ausgewertet. Die Extinktionen wurden auf die Ordinate und die Kalzium-Konzentrationen der Standardlösungen auf die Abszisse eines Koordinatensystems aufgetragen. Aus diesen Angaben erstellte das Softmax-Programm eine Standardkalibrationkurve (Abb. 4.9) mit einer 4-Parameter-Kurvenanpassung.

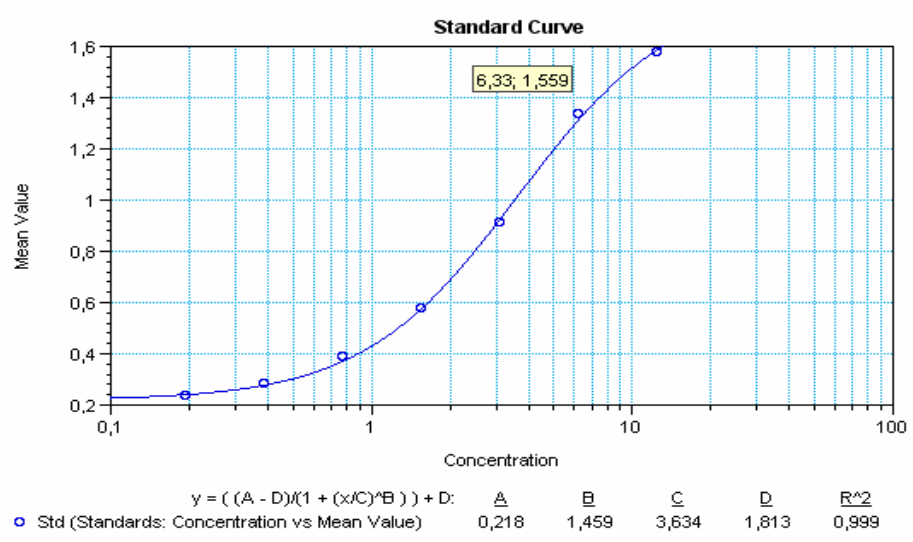


Abb. 4.9: Kalzium-Kalibrationskurve

Die Kalzium-Konzentration der Proben wurde bestimmt, indem den Extinktionen der Proben anhand der Kalibrationskurve die entsprechenden Konzentrationen zugeordnet wurden.

Die Masse des Schmelzabtrags wurde über die Formel

$$m = \frac{c_x * 40 \text{ g/mol}}{0{,}32}$$

berechnet. Dabei ist

m = Masse in g

40 g/mol = Mol-Gewicht Kalzium

0,32 = 32 % = Kalziumanteil in bovinem Schmelz

$c_x = c * 100$ = Konzentration der unverdünnten Lösung

Die mit Hilfe der Kalzium-Messung errechnete Schmelzmasse wurde nach der Umrechnung in µg Schmelz mit der profilometrisch errechneten Schmelzmasse verglichen.

5 Ergebnisse

5.1 Profilometrische Darstellung von Schmelzoberflächen vor und nach Bürstabrasion

Vor Versuchsbeginn zeigten alle Proben makroskopisch eine glatte und spiegelnde Oberfläche. Zunächst wurden die Oberflächen der planparallel fein geschliffenen Schmelzproben profilometrisch erfasst. Die dreidimensionale Darstellung einer polierten Schmelzprobe vor Bürstabrasion zeigt Abbildung 5.1.

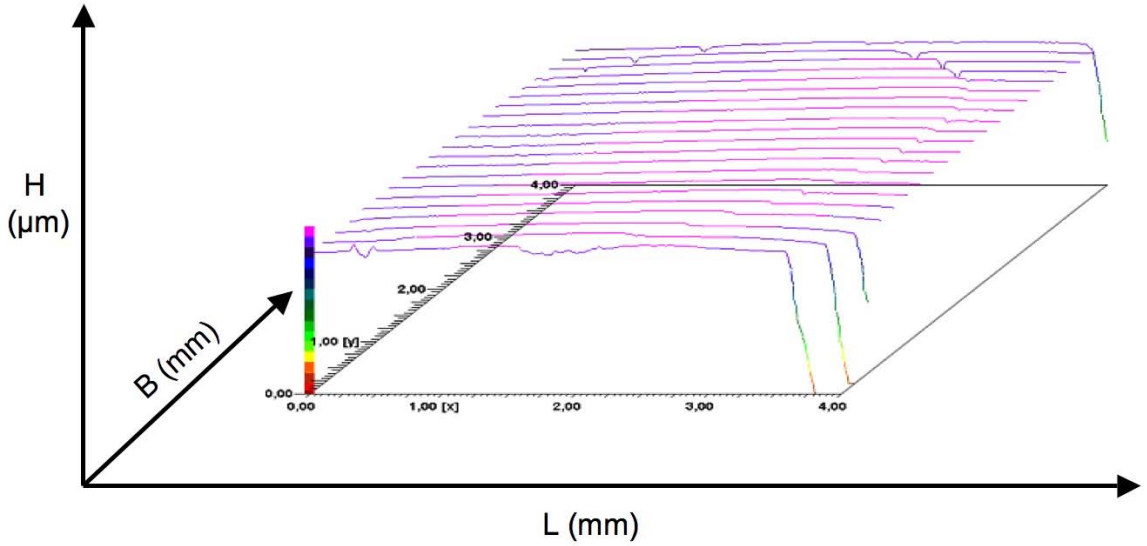


Abb. 5.1: Dreidimensionale Darstellung einer auf Hochglanz polierten Schmelzprobe vor Bürstabrasion

B= Breite der abgetasteten Fläche (4 mm), L= Länge der abgetasteten Strecke (4 mm)
H= Höhe der abgetasteten Fläche (µm)

Zentral ist die Schmelzprobe und peripher sind die Flächen des Kunststoffblocks dargestellt. Bei Vergrößerung eines Einzelprofils der geschliffenen Schmelzprobe erscheint die Tastlinie mikroskopisch rau und uneben, zeigt keinen geradlinigen Verlauf und stellt das „Grundrauschen“ einer polierten Schmelzoberfläche dar (Abbildung 5.2). Auf der Abszisse ist die Taststrecke in mm angegeben, die Ordinate

zeigt die Auslenkung des Tasters in µm, wodurch die Auslenkung des Tasters 5000-fach überhöht dargestellt wird.

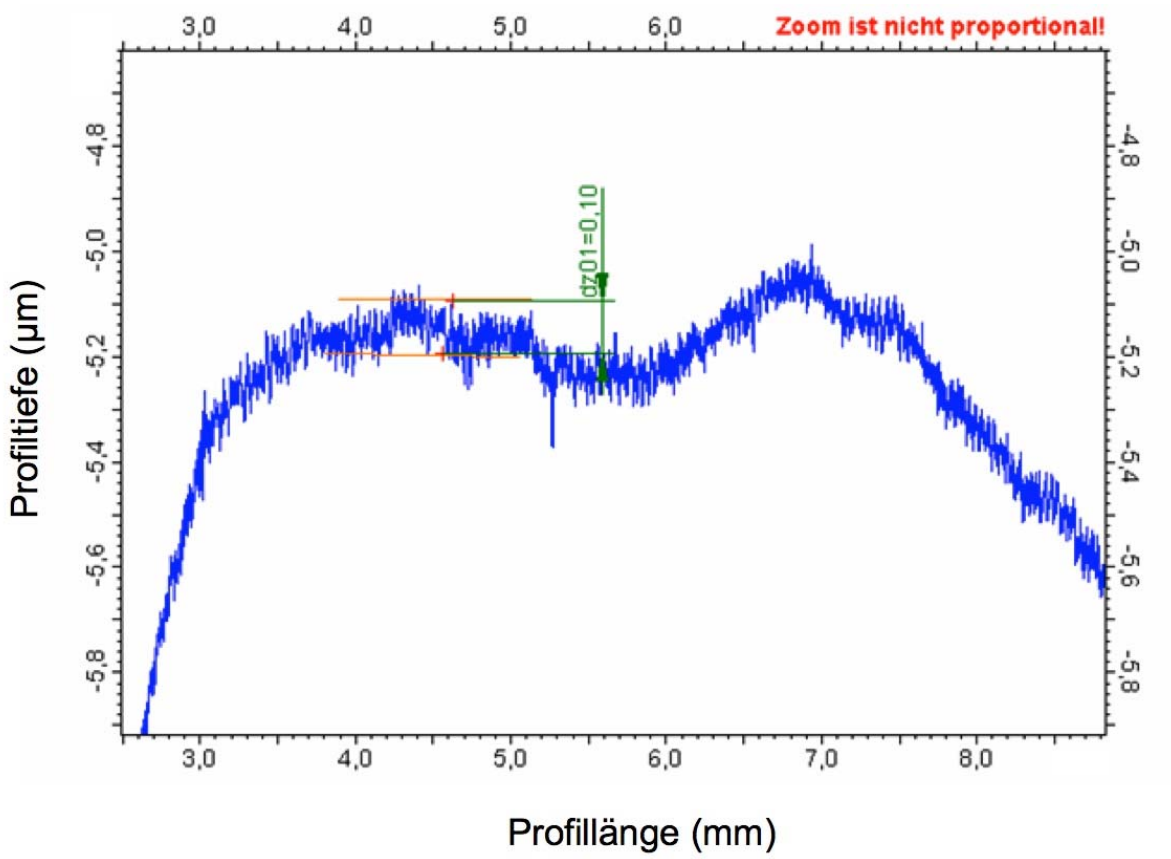


Abb. 5.2: Darstellung des Grundrauschens einer polierten Schmelzprobe anhand eines Einzelprofils bei 5000-facher Vergrößerung

Nach der Bürstabrasion zeigten Proben aller Gruppen makroskopisch eine matte und aufgeraute Schmelzoberfläche. Die veränderte Oberfläche nach 15 s, 75 s und 150 s Bürstzeit sind hier exemplarisch dreidimensional aus den profilometrischen Messungen der abradierter Schmelzproben dargestellt (Abbildung 5.3-5.5). In den Abbildungen werden die Abgrenzung zwischen unbehandelter Außenfläche und abradierter Schmelzoberfläche, sowie die Tiefe des Abrasionsgrabens dargestellt. Auch hier ist die Einheit der Profilhöhe µm, während Länge und Breite der Probenfläche in mm angegeben sind. Nur durch diese Verzerrung um 1000–fache Höhenauflösung werden die extrem kleinen Abrasionen sichtbar.

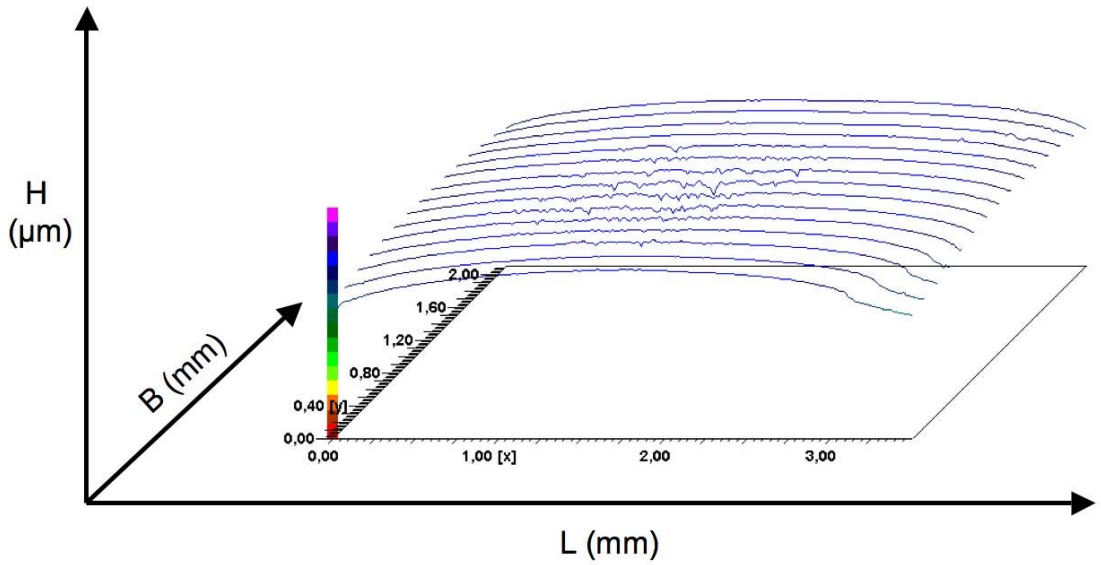


Abb. 5.3: Dreidimensionale Darstellung einer gebürsteten Schmelzprobe (Gruppe 3, Abrasionsdauer 15s)

B= Breite der abgetasteten Fläche (2 mm), L= Länge der abgetasteten Strecke (3 mm), H= Höhe der abgetasteten Fläche (µm)

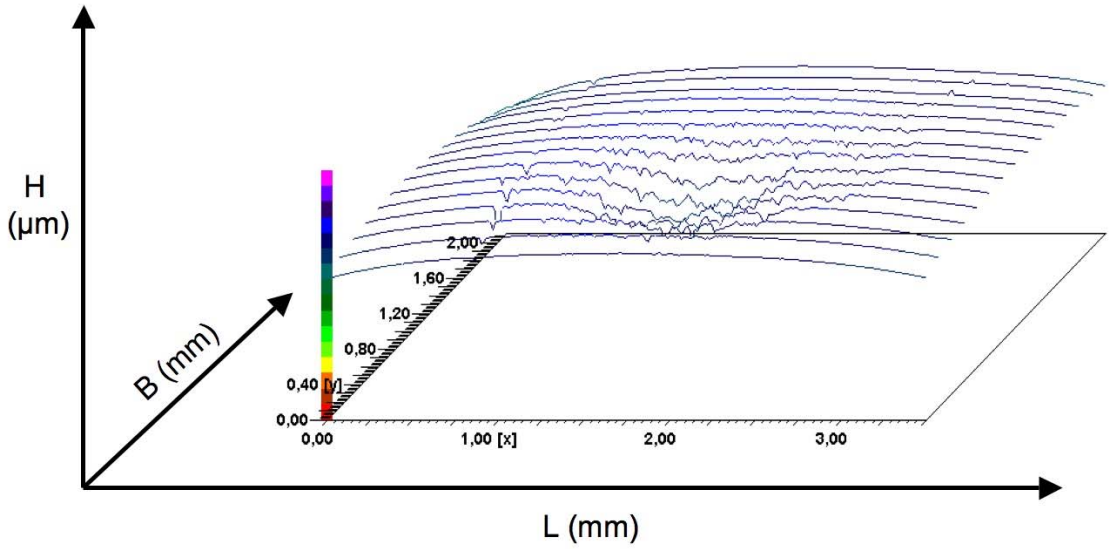


Abb. 5.4: Dreidimensionale Darstellung einer gebürsteten Schmelzprobe (Gruppe 9, Abrasionsdauer 75s)

B= Breite der abgetasteten Fläche (2 mm), L= Länge der abgetasteten Strecke (3 mm), H= Höhe der abgetasteten Fläche (µm)

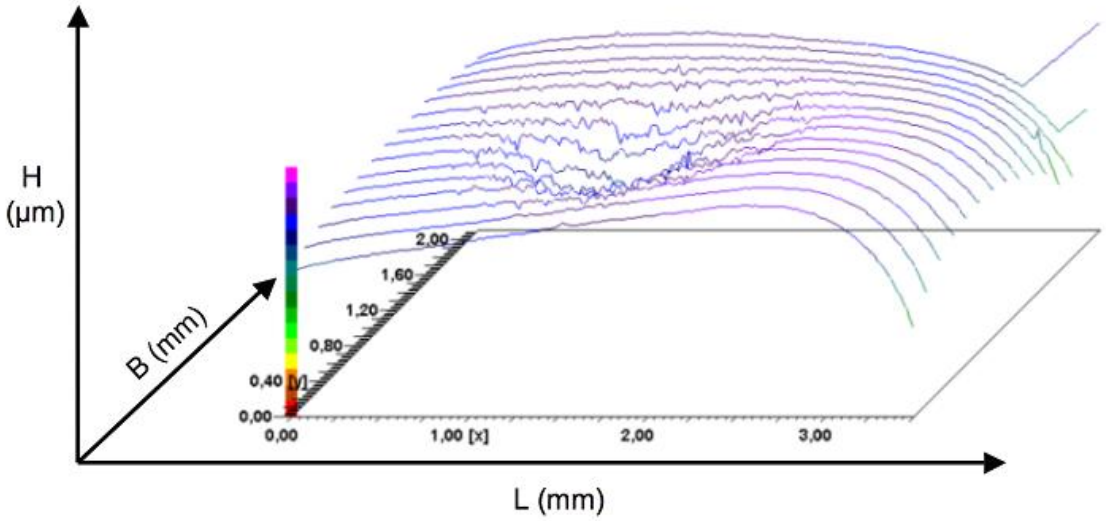


Abb. 5.5: Dreidimensionale Darstellung einer gebürsteten Schmelzprobe (Gruppe 14, Abrasionsdauer 150 s)

B= Breite der abgetasteten Fläche (2 mm) L= Länge der abgetasteten Strecke (3 mm), H= Höhe der abgetasteten Fläche (µm)

5.2 Auswertungen der Bürstabrasion

In Abbildung 5.6 wird das Prinzip der Höhendifferenzmessung dargestellt. Beim Schleifen der Proben auf einer rotierenden Scheibe entstand immer eine gewisse Balligkeit, die bei 2 µm Höhendifferenz auf einer Länge von 4 mm lag. Die Probe in Abbildung 5.6 stammt nicht aus dieser Studie. Sie zeigt eine wesentlich stärkere Abrundung und eignet sich daher besser zur Veranschaulichung der Messverfahren. Die Profile sind als Messstrecke in µm auf der Abszisse und vertikale Bewegung des Tasters in µm auf der Ordinate dargestellt. Die Tasterauslenkung ist stark überhöht dargestellt(um ca. den Faktor 100), um die Differenzen über die gesamte Messtrecke erkennen zu können.

Es gab zum Zeitpunkt der Durchführung der Studie zwei Verfahren, um die Höhendifferenz zu berechnen. Das erste Verfahren verwendet nur eine Referenzfläche und einen Teil der behandelten Fläche (5.6 a und b). Die gestrichelten Linien zeigen die Regressionsgeraden der Referenz- bzw. Abrasionsbereiche, deren Abstand als Tiefendifferenz angenommen wird. Bei der zweiten Methode (5.6 c und d) werden zwei Referenzflächen neben der Versuchsfläche mit einer Linie verbunden. Die

Profiltiefe wird aus der Differenz der Versuchsfläche zu dieser Geraden berechnet. Dieses Verfahren wurde in der vorliegenden Studie eingesetzt.

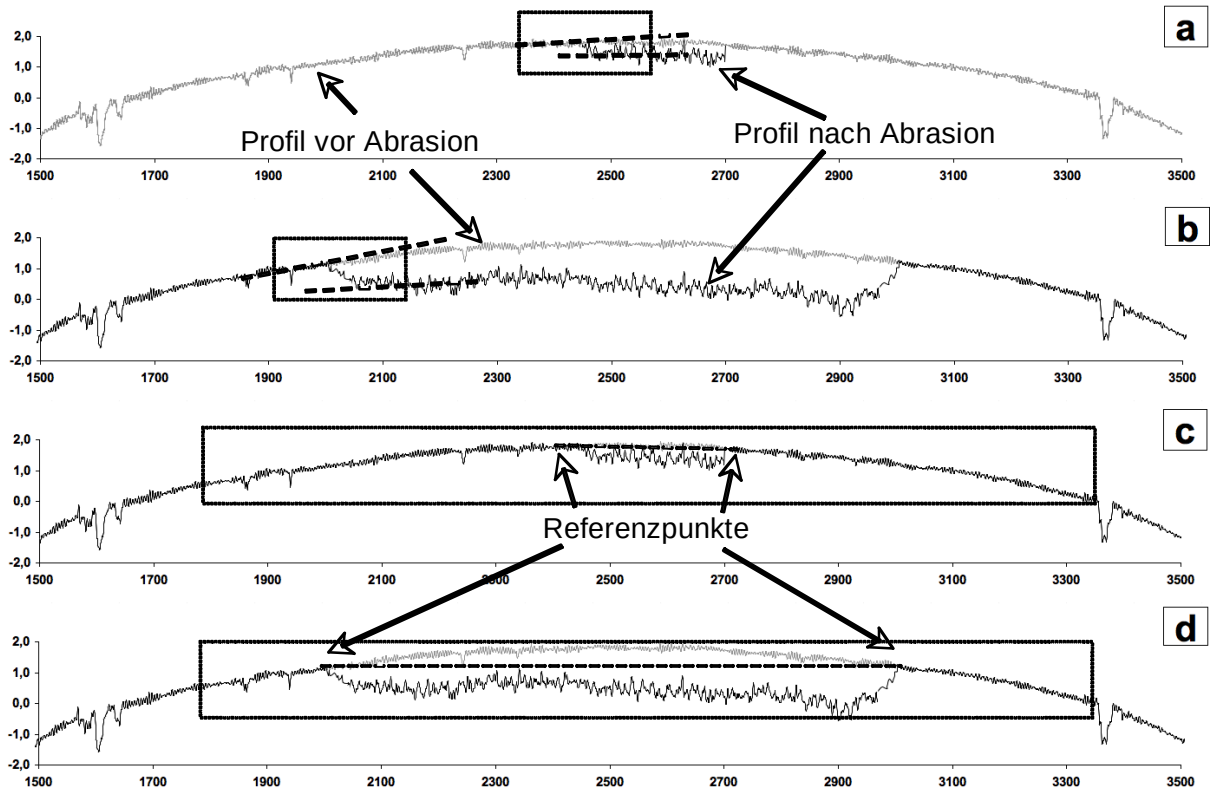


Abb. 5.6: Unterschiedlichen profilometrische Auswertungsverfahren. Einheiten in µm; die Ordinate ist ca. 100-fach überhöht dargestellt. Die gepunkteten Linien markieren den jeweiligen gemessenen Profilbereich.

1) Methode mit einer Referenzfläche (a, b): Über den Referenzbereich und den abradierten Bereich wird jeweils eine Regressionsgerade gelegt (gestrichelte Linien). Der mittlere Abstand der Geraden ist die Abrasionstiefe.

2) Methode mit zwei Referenzpunkten (c, d): Die Endpunkte der Referenzflächen werden mit einer Geraden verbunden (gestrichelte Linien). Die Differenz des Profils im abradierten Bereich zu der Geraden ist die Abrasionstiefe.

Abrasionstiefen und errechneter Schmelzverlust der Gruppen 3-14 nach profilometrischen Auswertung

Die Messgrenze für die Tiefendifferenz zweier profilometrisch gemessener Oberflächen lag bei 1 µm. Abradierte Flächen der Gruppen 1 (Bürstzeit 5 s) und 2 (Bürstzeit 10 s) zeigten in der Profilometrie keinen Unterschied im Vergleich zur Oberfläche einer fein geschliffenen Probe. An diesen beiden Gruppen konnte keine profilometrische Auswertung vorgenommen werden. In Abbildung 5.7 und der Tabelle 5.1 sind die durchschnittlichen Tiefen der Abrasionsgräben in µm für 15 – 150 s Abrasionsdauer angegeben. In allen Gruppen konnte eine Zunahme der Abrasionstiefen mit zunehmender Dauer der Bürstabrasion festgestellt werden. Die Abrasionstiefe der Gruppe 10 nach 90 s Abrasionsdauer (14,26 ± 6,4 µm) unterschied sich wesentlich von den Abrasionstiefen nach 75 s (9,61 ± 3,9 µm) und 105 s (11,58 ± 6,6 µm) Bürstabrasion.

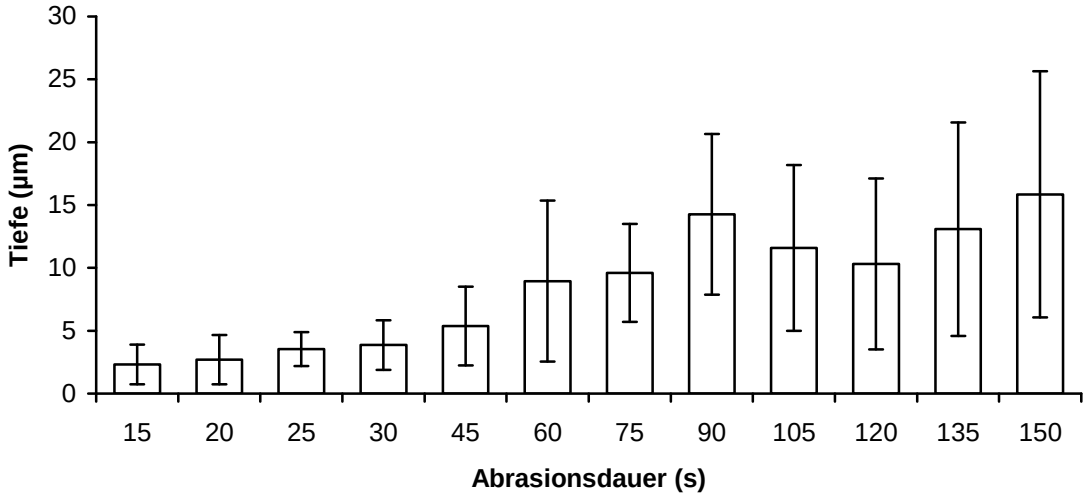


Abb. 5.7: Darstellung der mittleren profilometrisch ermittelten Abrasionstiefe (µm) (Mittelwert ±SD) nach Bürstabrasion (s) der Gruppen 3-14

Gruppen	Zeit (s)	MW (µm)	SD (µm)
3	15	2,32	1,57
4	20	2,7	1,97
5	25	3,53	1,35
6	30	3,86	1,97
7	45	5,37	3,14
8	60	8,95	6,4
9	75	9,61	3,9
10	90	14,26	6,4
11	105	11,58	6,6
12	120	10,31	6,8
13	135	13,08	8,5
14	150	15,85	9,8

Tab. 5.1: Mittelwert und Standardabweichung der Abrasionstiefen (µm) in Gruppen 3-14

Aus der profilometrisch ermittelten Tiefe konnte die abradierte Schmelzmasse in µg berechnet werden (Abbildung 5.8). Der Mittelwert, die Standardabweichung und der Variationskoeffizient dieser Gruppen sind in Tabelle 5.2 wiedergegeben.

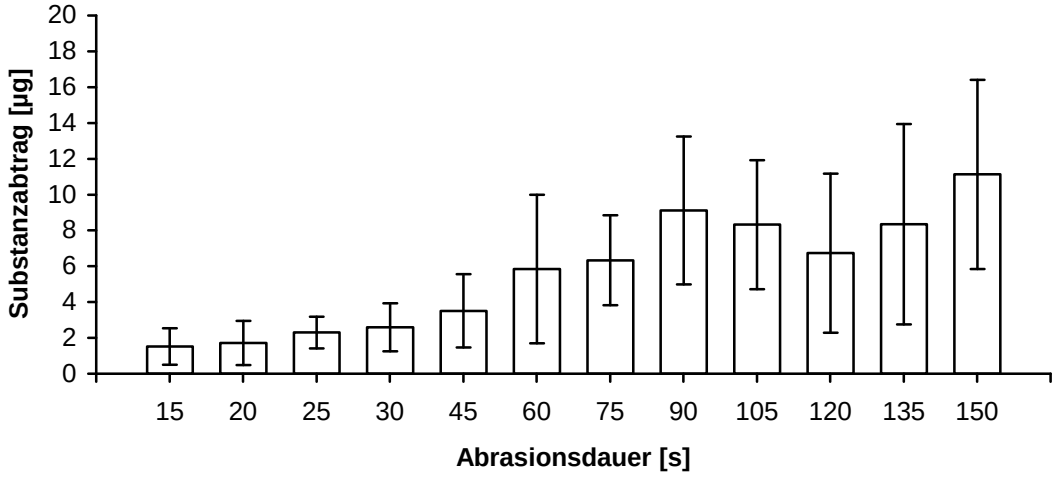


Abb. 5.8: Darstellung des profilometrisch ermittelten Schmelzverlustes (µg) (Mittelwert ± SD) nach Bürstabrasion (s) der Gruppen 3-14

Gruppen	Zeit (s)	MW (µg)	SD (µg)	VK%
3	15	1,52	1,02	67,5
4	20	1,72	1,34	71,7
5	25	2,30	0,88	38,4
6	30	2,59	1,33	51,5
7	45	3,51	2,05	17,8
8	60	5,85	4,15	30
9	75	6,33	2,51	17,5
10	90	9,11	4,13	24,1
11	105	8,32	3,60	22,1
12	120	6,73	4,44	30,2
13	135	8,35	5,59	34,2
14	150	11,13	5,28	27,6

Tab. 5.2: Profilometrisch ermittelter Schmelzverlust der Gruppen 3-14 in µg

Errechneter Schmelzverlust aller Gruppen (1-14) nach photometrischer Kalziummessung

Bei der photometrischen Kalziummessung ist zu beachten, dass die verwendete Bimsmehlsuspension selbst Kalzium enthielt. In 10 µl des Abrasionsmediums wurde ein Kalziumgehalt von 23 nmol nachgewiesen. Dieser Leerwert wurde von der photometrisch ermittelten Kalziumkonzentration abgezogen, bevor der Schmelzverlust berechnet wurde. Die Abbildung 5.9 gibt den Substanzverlust der Schmelzoberflächen aller Gruppen nach der jeweiligen Abrasionsdauer wieder. In Tabelle 5.3 sind die dazugehörigen Mittelwerte und Standardabweichungen angegeben. In allen Gruppen konnte eine Zunahme des Substanzverlustes mit zunehmender Dauer der Bürstabrasion festgestellt werden, wobei die Gruppen 1-6 (5-30 s) eine gleichmäßigere Zunahme des Schmelzverlustes zeigten als der Bereich zwischen 45 und 150 s.

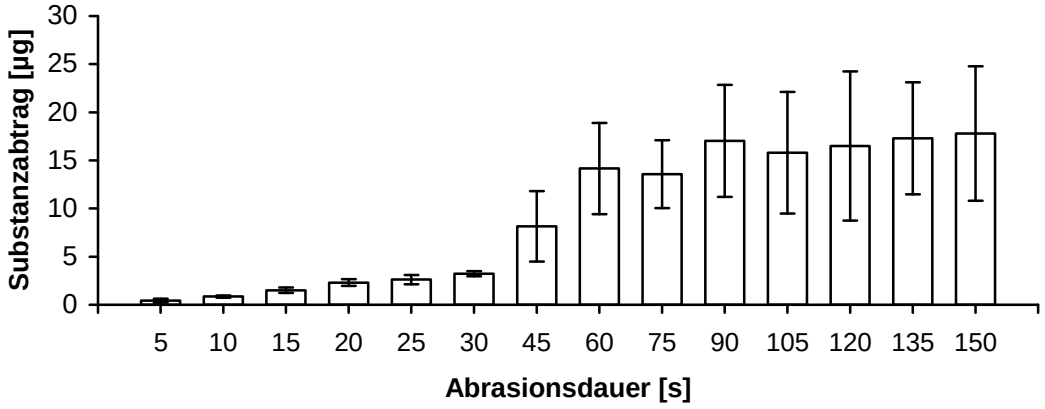


Abb. 5.9: Darstellung des durch Kalzium-Bestimmung ermittelten Schmelzverlustes der Gruppen 1-14 in µg (Mittelwert ± SD) nach Bürstabrasion in s

Gruppen	Zeit (s)	MW (µg)	SD (µg)	VK%
1	5	0,44	0,19	43,5
2	10	0,85	0,12	14,5
3	15	1,51	0,3	19,5
4	20	2,31	0,34	14,7
5	25	2,61	0,48	18,5
6	30	3,22	0,27	8,5
7	45	8,15	3,65	44,8
8	60	14,15	4,75	33,6
9	75	13,57	3,54	26,1
10	90	17,02	5,82	34,2
11	105	15,81	6,32	40
12	120	16,49	7,75	47
13	135	17,29	5,84	33,7
14	150	17,8	6,97	39,2

Tab. 5.3: Aus der Kalziumanalyse ermittelter Schmelzverlust der Gruppen 3-14 in µg

Vergleich der profilometrischen und photometrischen Messmethode zur Erfassung von Substanzverlusten

Der profilometrisch und photometrisch errechnete Substanzverlust aller Gruppen ist in der Abbildung 5.10 gegenübergestellt. Die dazugehörigen Messwerte wurden aus den Tabellen 5.2 und 5.3 entnommen. Beide Messmethoden wiesen eine Zunahme des Substanzabtrags mit zunehmender Abrasionsdauer auf. Die Abrasionsverluste verliefen anfangs parallel. Bei Abrasionszeiten zwischen 60 s und 150 s wurde deutlich weniger abradierte Schmelzmasse mit der Profilometrie gemessen als über die Analyse des abradierten Kalziums.

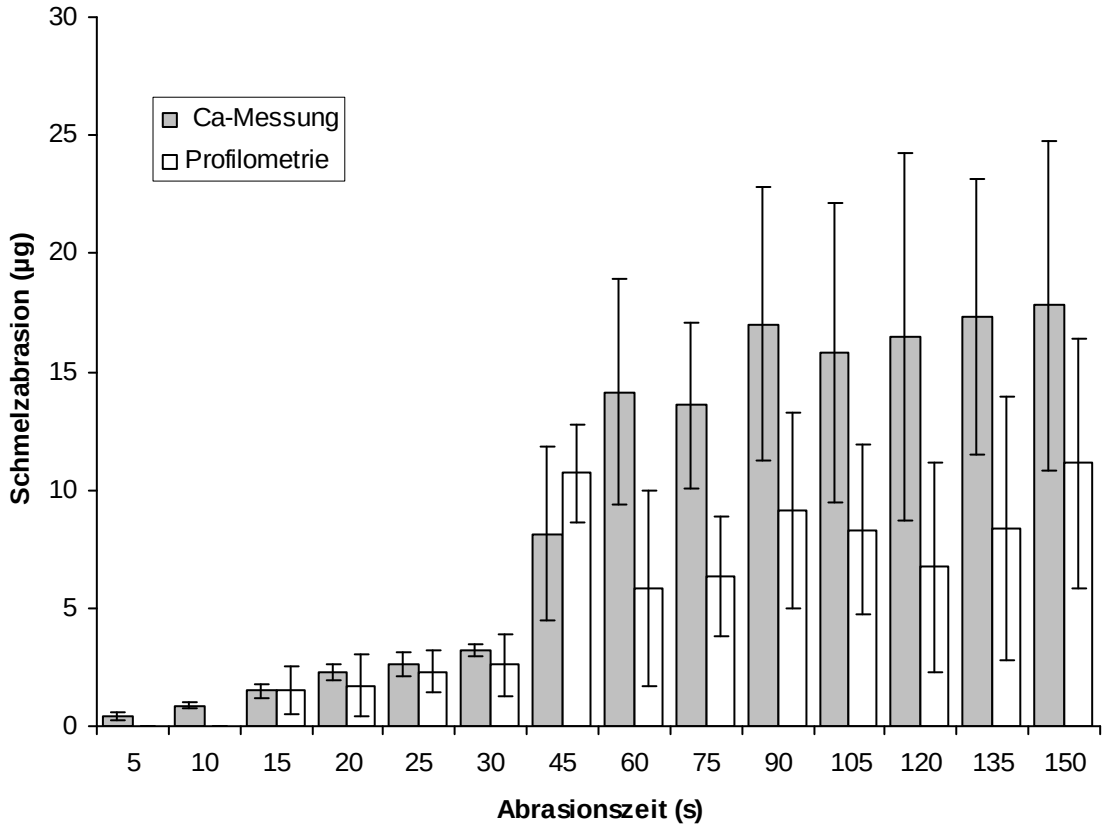


Abb. 5.10: Darstellung des Schmelzabtrags (MW ± SD) der profilometrisch (Profil.) und photometrisch (Ca) ausgewerteten Proben, nach entsprechender Abrasionsdauer (s)

Um die Übereinstimmung der beiden Methoden bei kürzerer Abrasionsdauer genauer zu betrachten, wurde der Substanzabtrag nach kurzer Abrasionsdauer detailliert dargestellt (Abbildung 5.11). Auf Grund der unteren profilometrischen Messgrenze von 1 µm beginnen die profilometrischen Messdaten erst ab 15 s Abrasionsdauer. Alle profilometrischen Messpunkte wiesen gegenüber den Ca-Messpunkten eine deutlich höhere Standardabweichung auf. Die höchste profilometrische Standardabweichung betrug ± 1,34 µg bei einer Abrasionsdauer von 20 s, die höchste Standardabweichung der Ca-Messmethode lag hingegen bei ± 0,48 µg (Abrasionsdauer 25 s).
Die Korrelation der Resultate zur Abrasionszeit war bei der Ca-Messmethode in der ersten 30 s besser (r = 0,99) als bei der Profilometrie (r = 0,97).

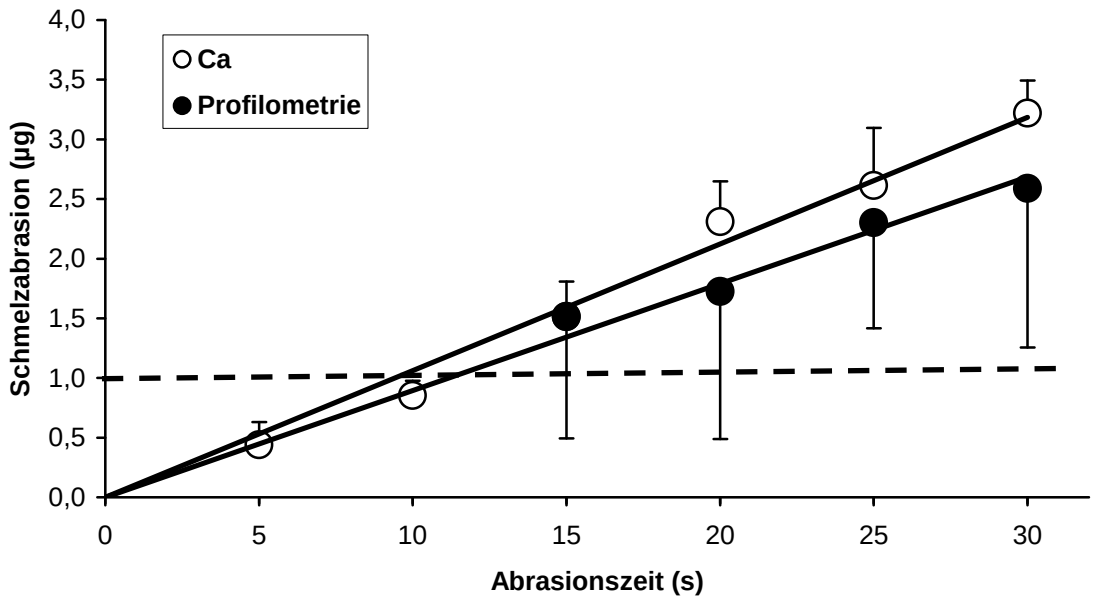


Abb. 5.11: Substanzabtrag in µg beider Messmethoden bei niedrigen Abrasionszeiten; Profil. (MW-SD); Ca (MW+SD); Abrasionszeit in s; gestrichelte Linie: untere Messgrenze der Profilometrie

In Abbildung 5.12 sind die Streuungen der profilometrischen Messmethode und der Ca-Messmethode gegenübergestellt. Die Messdaten wurden den Tabellen 5.2 und 5.3 entnommen. Der Variationskoeffizient aus normalverteilten Grundgesamtheiten liegt maximal bei 33% (Sachs 2007). Mit steigender Abrasionsdauer ab 60 s bis 150 s war die Streuung der beiden Messmethoden nahezu gleich. Im Bereich der niedrigen Abrasionszeiten bis 30 s wies die Profilometrie gegenüber der Ca-Messmethode eine deutlich höhere Streuung auf.

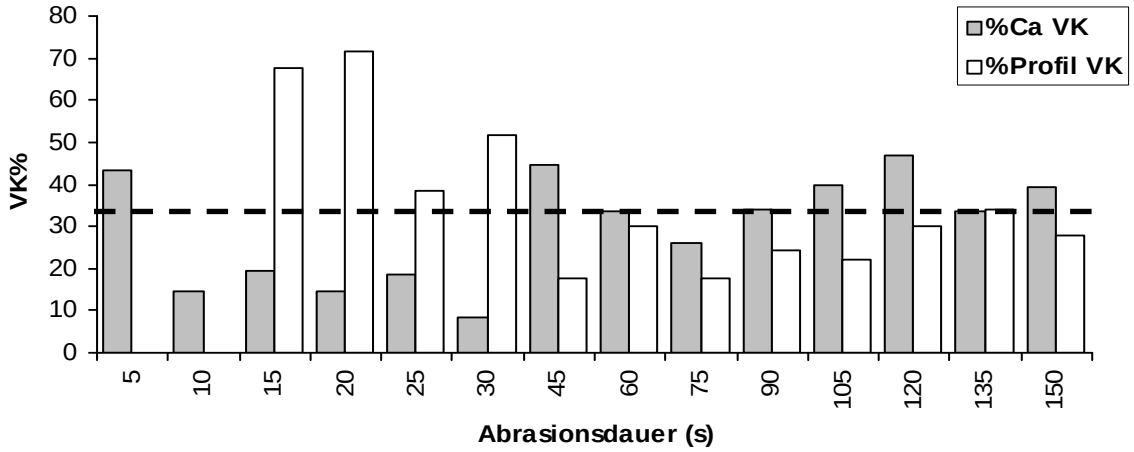


Abb. 5.12: Variationskoeffizienten (SD/MW%) beider Messmethoden in Abhängigkeit von der Abrasionsdauer (s); gestrichelte Linie: maximaler VK% bei normalverteilten Proben

6 Diskussion

6.1 Material und Methode

Für die vorliegenden Versuche wurde eine große Menge an kariesfreien Schmelzproben benötigt. Da die Menge an humanen, kariesfreien Zähnen begrenzt ist, wurden für diese Studie die Schmelzproben aus Rinderzähnen gewonnen (Attin et al. 2003, Hannig C et al. 2005). Der chemische Aufbau und die physikalischen Eigenschaften von Rinderschmelz und humanem Schmelz sind sich sehr ähnlich (Davidson et al. 1973, Arends et al. 1979, Arends et al. 1980). Auch die für diese Studie relevanten Parameter wie Kalziumgehalt, Schmelzdichte und Schmelzhärte von bovinen und humanen Zähnen weichen nur minimal voneinander ab (Esser et al. 1998). Aufgrund dieser Ähnlichkeit kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse dieser Studie auf humanen Schmelz übertragbar sind.
Die in Kunststoff eingebetteten Schmelzproben wurden mit Hilfe des Parallelisierungsschlittens und Schleifpapierscheiben abnehmender Körnung plan geschliffen. Dieses Vorgehen ist für eine genaue profilometrische Auswertung erforderlich (Barbour and Rees 2004). Allgemein geht man davon aus, dass durch die Politur der Schmelz seine prismenfreie Oberflächenschicht verliert. Attin et al. (1996) konnten jedoch zeigen, dass der Verlust der prismenfreien Schmelzschicht weitgehend der intraoralen Mundsituation entspricht, da auch hier die oberflächliche Schmelzschicht durch Abrasion, Erosion, Attrition abgetragen wird.

Die Bürstabrasion der Schmelzproben wurde mit Hilfe einer elektrischen Zahnbürste mit modifiziertem Aufsteckkopf erzeugt. Die elektrische Zahnbürste führt gegenüber manuellen Zahnbürsten zu einem erhöhten Substanzabtrag (Wiegand et al. 2006). Die Modifikation des Bürstkopfes bestand in der Entfernung aller Borstenbüschel bis auf ein verbleibendes Büschel. Die Verwendung einzelner Borstenbüschel bzw. einer stabilen Abrasionsspitze zur Bewertung von Abrasionen an Zahnhartsubstanzen wird von einigen Autoren empfohlen (Ashmore et al. 1972). In einem Vorversuch wurde sichergestellt, dass die Borsten des Aufsteckkopfes kein Kalzium enthielten.

In einem Vorversuch wurden Bürstabrasionen innerhalb 60 s mit Auflagegewichten von 200 g, 150 g, 50 g, 30 g und 10 g erzeugt. Für die Studie war es einerseits erforderlich, Abrasionen mit dem kleinstmöglichen Schmelzverlust zu erzeugen, andererseits sollte dieser Schmelzabtrag profilometrisch noch messbar sein. Das Auflagegewicht wurde für die Versuche auf 10 g festgelegt. In der Literatur finden sich verschiedene Angaben bezüglich des Anpressdrucks; so arbeitet Sander bei seinen Untersuchungen mit Gewichten zw. 110 g und 300 g (Sander et al. 2005), Tomofuji hingegen mit Gewichten bis maximal 250 g (Tomofuji et al. 2002). Fraleigh et al. (1967) fand bei einer In-vivo-Studie, dass bei elektrischen Zahnbürsten der Putzdruck höchstens 260 g beträgt. Handelsübliche Aufsteckköpfe für elektrische Zahnbürsten verfügen über ca. 26 Borstenbüschel. Folglich wird jedes Büschel mit einer Anpresskraft von ca. 10 g belastet. Durch die Festlegung des Auflagegewichts auf 10 g wurde in den Versuchen dieser Studie somit eine Putzkraft erzeugt, die mit anderen Studien vergleichbar ist.

Als Abrasionsmedium wurde in den vorliegenden Versuchen eine Bimsmehlsuspension verwendet. In zahlreichen Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass die mechanische Abrasion der Zahnhartsubstanz von vielen verschiedenen Faktoren wie Putztechnik (Attin et al. 1999), Häufigkeit und Dauer des Bürstens (Gross et al. 1996), Abrasivität der verwendeten Zahnpasta (Kielbassa et al. 2005) abhängig ist (Barbakow et al. 1989). Pickles et al. (2005) haben gezeigt, dass die Abrasion am gesunden Schmelz überwiegend von Putzkörpern der verwendeten Zahnpasta erzeugt wird. Dabei müssen die Putzkörper einen höheren Härtegrad aufweisen als der Schmelz, je größer und rauer die Partikel sind, desto höher ist deren Abrasivität. Als Maß für die Schmelzabrasivität einer Zahnpasta gilt der REA-Wert (REA = Relative Enamel Abrasivity). Der Wert wird bezogen auf einen Vergleichsstandard von 100% angegeben. Je höher der REA-Wert der Zahnpasta ist, umso größer ist die Anrauung der Schmelzoberfläche. In einem Vorversuch wurde die Abrasivität von Bimsmehl gegenüber einer konventionellen Zahnpasta (Elmex®) mit einem REA-Wert von 4,2 ± 0,3 (Barbakow et al. 1989) verglichen. Dabei konnte ermittelt werden, dass die Abrasivität der Bimsmehlsuspension 6,3-fach höhere Abrasivität aufweist als Elmex-Zahnpasta. Weitere Vorversuche zeigten, dass der

Substanzverlust der Schmelzproben bei einem Auflagegewicht von 10 g und kurzen Bürstzeiten ab 15 s und Verwendung von Bimsmehl im profilometrisch messbaren Bereich lagen.

Für die Versuche war zusätzlich ein kalziumarmes Abrasionsmedium erforderlich. Die handelsüblichen Zahnpasten sind kalziumhaltig und weisen meist bis zu zehn weitere Komponenten auf (Hellwig et al. 1995). In dieser Studie wurde Bimsmehl als Abrasionsmedium verwendet. In einem Vorversuch wurde das Bimsmehl mehrmals mit Salzsäure gewaschen bis kein Kalzium mehr nachweisbar war. Dieses gereinigte Bimsmehl wurde mit Aqua bidest in einem Verhältnis von 1:2 gemischt und so eine Suspension hergestellt. Nach Abschluss der Versuche wurde die Bimsmehlsuspension erneut auf ihren Kalziumgehalt untersucht. Die Untersuchung ergab, dass 10 µl der Bimsmehlsuspension 23 nmol Kalzium enthielten. Um das Absinken der Bimsmehlanteile in der Suspension zu verhindern wurde die Bimsmehlsuspension während der Versuche mit Hilfe eines Magnetrührers in ständiger schneller Bewegung gehalten. Das könnte zum Zermahlen von Bimsmehlpartikeln und damit verbundener geringer Kalziumfreisetzung geführt haben. Der Kalziumwert von 23 nmol wurde als Leerwert bei allen Proben abgezogen, um als Differenz das aus der Schmelzabrasion stammende Kalzium zu erhalten.

Die Schmelzproben wurden anschließend mit je 10 µl Bimsmehlsuspension und unterschiedlichen Bürstzeiten gebürstet. Der „slurry“ wurde aufgefangen und die abgespülten Proben einer profilometrischen Auswertung unterzogen. Die Profilometrie wurde bereits von Ashmore (1966) zur Bestimmung des Substanzverlustes durch Erfassung von Oberflächenunebenheiten beschrieben und fand seitdem in zahlreichen In-vitro-Studien ihre Anwendung (Davis and Winter 1980, Valk et al. 1986, Ganss et al. 2000, Westerfeld 2002). In der vorliegenden Studie wurde die Oberfläche der Proben in 15 parallel zueinander liegenden Bahnen gleichen Abstands (150 µm) und gleicher Länge (3 mm) vermessen. Dabei wurden die abradierte Oberfläche und die Referenzfläche mit einer Diamantnadel abgetastet und die Differenz der Oberflächen registriert. Von jeder Probe wurden so 15 Profile erfasst und zu einer Topografie zusammengestellt. Aus der Länge und Tiefe des Abrasionsgrabens wurde die Fläche

jedes Profils ermittelt und über den Abstand das Volumen der Substanzverlust der Probe errechnet. Die Vergleichbarkeit verschiedener Studien zur Bestimmung des Substanzverlustes mit der profilometrischen Methode ist überwiegend von den verwendeten Ausmessungsparametern abhängig. In der vorliegenden Studie wurde der Substanzverlust über die Tiefe des Abrasionsgrabens wie bei Attin et al. (2003) berechnet. In anderen Studien wird der Substanzverlust als Fläche unter der Kurve definiert (Hall et al. 1997) oder durch Messung der maximalen Tiefe des Abrasionsgrabens (Rytömaa et al. 1988) ermittelt. Einige Autoren machen auf die begrenzte Sensitivität der profilometrischen Auswertung aufmerksam. So werden minimale Substanzverluste unter 1 µm Abtragstiefe (Hooper et al. 2004, Zhang et al. 2000) profilometrisch nur ungenau erfasst. Im Vorversuch wurde die profilometrische Messbarkeit von geschliffenen, unbehandelten Flächen mit Proben nach Bürstabrasion verglichen. Die optisch glänzend geschliffenen Proben wiesen bereits ein so genanntes Hintergrundrauschen auf. Aufgrund der verbliebenen minimalen Rauheit und der Welligkeit der Oberfläche streuten die vertikalen Auslenkungen des Tasters um ± 0,13 µm. Bei sehr kurzen Abrasionszeiten nahm zunächst nur die Rauheit und Welligkeit der Oberfläche zu. Das hatte kontinuierlich zunehmende Streuungen zu Folge, ohne dass das Niveau der Oberflächen messbar tiefer lag. Um die Tiefendifferenz zweier Messungen sicher quantifizieren zu können, müssen sich die Messungen um ein mehrfaches des Rauschens unterscheiden. In der vorliegenden Studie wurde 1 µm Tiefendifferenz als Messgrenze ermittelt. Geringere Tiefendifferenzen wiesen Variationskoeffizienten von mehr als 100% auf und wurden deshalb als nicht messbar eingestuft. Trotz der genannten Aspekte stellt die profilometrische Analyse eine genaue, reproduzierbare und weit verbreitete Methode zur Erfassung der Abrasionstiefe und zur Ermittlung des Volumens der abradierten Substanz dar und wurde deshalb als Vergleichsmethode zur photometrischen Bestimmung des Substanzverlustes herangezogen.

Für den Kalziumnachweis im „slurry“ wurde in dieser Studie ein photometrisches Verfahren nach Smith and Bauer (1979) angewandt, welches eine direkte Bestimmung von freigesetztem Kalzium in Säuren ermöglicht (Baykov et al. 1988). Die photometrische Bestimmung der Kalziumfreisetzung stellt eine hochsensitive, schnelle

und preiswerte Methode dar, bei der auch kleinste Testvolumina erfasst werden (Attin et al. 2005). Es ist keine zusätzliche Vorbereitung der kalziumhaltigen Lösung notwendig. Der Zeitaufwand für die Probenvorbereitung und Messung ist sehr gering. Dies ist ein Vorteil dieser Methode zur Bestimmung der Kalziumfreisetzung gegenüber anderen Methoden. Die Kalziumbestimmung mit einer ionenselektiven Elektrode ist störanfällig gegenüber H^+ -Ionen, benötigt ein größeres Probenvolumen und ist sehr zeitaufwendig. Die Atomabsorptionsspektroskopie erfordert ebenfalls ein größeres Probenvolumen und eine vorgeschaltete Probenaufarbeitung (Hannig M et al. 2003, Larsen and Richards 2002, Grobler et al. 1990, Attin et al. 2005). Die in dieser Studie angewandte photometrische Methode ermöglicht bei Kurzzeitabrasionen des Schmelzes eine hochsensitive, im Nanometerbereich liegende Bestimmung des abradierten Kalziums.

In den Versuchen wurde der „slurry“ nach der Bürstabrasion aufgefangen und zentrifugiert. Im entnommenen Wasserüberstand war kein Kalzium nachweisbar. Der verbliebene Bodensatz wurde mit 50 µl Salzsäure (1 mol/l) versetzt. Salzsäure greift das Hydroxylapatit des Schmelzes an. Die Protonen der Säure neutralisieren dabei die Hydroxid-Ionen im Apatit, das Kristallgitter zerfällt und Kalzium und Phosphationen werden nach dem Reaktionsmuster

$$Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 + 8H^+ \leftrightarrow 10\ Ca^{2+} + 6HPO_4^{2-} + 2H_2O$$

freigesetzt (Patel et al. 1987). Die Salzsäure wird in vielen In-vitro-Studien zur Erzeugung von Erosionen auf Zahnhartsubstanzen verwendet. Bartlett führte Untersuchungen mit Magensäure durch und stellte dabei fest, dass die Salzsäure im Vergleich zu Phosphor- und Zitronensäure (Bestandteile von säurehaltigen Getränken) stärkere Erosionen an Zähnen hervorruft (Bartlett and Coward 2001).

Für die Auflösung der Schmelzpartikel nach Bürstabrasion wurde 1 molare Salzsäure verwendet. Im Vorversuch wurde sichergestellt, dass der Protonenüberschuss der 1 molaren Salzsäure für die zu lösenden Schmelzmassen ausreicht und hierbei kein relevanter Säureverbrauch entsteht. Das erosive Potential der Salzsäure wurde bereits in zahlreichen Studien eingehend untersucht (Grobler et al. 1990, Lussi et al. 1993, West et al. 2001, Yoshida et al. 2001). Meurman et al. (1990 a) und Larsen and Nyvad

(1999) konnten nachweisen, dass die Erosivität der Säuren mit abnehmenden pH-Werten steigt. Zum Kalziumnachweis wurde eine Arsenazo-III-Lösung verwendet. Der eigentliche Anwendungszweck des Indikators liegt in der quantitativen Bestimmung von Kalzium in Humanserum, -plasma und -urin. Die Sensitivität der Arsenazo-III-Lösung wird in der Literatur mit 0,05 mmol/l angegeben (Mathias 1996, Passing and Bablok 1983). Attin et al. (2005) konnten nach Erosion der Zahnoberfläche Kalziumkonzentrationen bis zu 12,4 µmol/l sicher wiederfinden. Arsenazo III bildet mit Kalzium in saurer Lösung einen Farbkomplex, dessen Intensität der Kalziumkonzentration proportional ist (Bablok 1988). Im vorliegenden Versuch wurden 5 µl der Salzsäure vom Gesamtvolumen entnommen, durch 5 µl NaOH (1 mol/l) neutralisiert und mit 40 µl Imidazolpuffer gemischt. Davon wurde ein Testvolumen von 5 µl in eine Mikrotiterplatte überführt. Der für die Messung vom Hersteller empfohlene pH-Wert von 6,5 wurde eingehalten. Zum Testvolumen wurden 25 µl des Kalzium-Indikators hinzugefügt. Die Mikrotiterplatte wurde anschließend bei einer Wellenlänge von 650 nm photometrisch gemessen, die ermittelte Extinktion mit der Kalzium-Kalibrationskurve verglichen und der Kalzium-Gehalt der jeweiligen Probe bestimmt. Aus dem Kalzium-Gehalt wurde anschließend die abradierte Schmelzmasse berechnet.

6.2 Ergebnisse

Zahlreiche Studien beschäftigen sich mit den Ursachen der Zahnhartsubstanzverluste. Die quantitative Bestimmung des Substanzverlustes erfolgt mit einer oder mehreren der zur Verfügung stehenden Analysemethoden.

Für die jeweilige Studie werden die Versuchsparameter festgelegt (z.B. Dauer der Abrasion, Menge des Abrasionsmediums usw.) und Analyseverfahren gewählt und deren Parameter so modifiziert, dass sie zur Quantifizierung des zu erwartenden Substanzverlustes geeignet erscheinen. Dabei werden im Allgemeinen die Effekte bei den Proben einer Versuchgruppe mit Messungen an Kontrollproben verglichen. Auf diese Weise wird der Vergleich der Substanzverluste unterschiedlicher Versuchsgruppen innerhalb einer Studie ermöglicht. Gleichzeitig ist jedoch der

Vergleich der Ergebnisse mit anderen Studien erschwert, die ihrerseits eigene Messspezifikationen anwenden.
In der vorliegenden Studie wurden zwei Analysemethoden (Profilometrie und photometrische Kalziumanalyse) zur Erfassung des Substanzverlustes untersucht und die Ergebnisse beider Methoden auf ihre Übereinstimmung geprüft.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zeigen, dass beide Messmethoden eine Zunahme des Substanzverlustes mit zunehmender Dauer der Bürstabrasion aufwiesen. Bei der photometrischen Analyse zeigten die Gruppen 1-6 (5-30 s) eine gleichmäßigere Zunahme des Schmelzverlustes als die Gruppen 7-14 (45-150 s).
Die Schmelzhärte und damit auch die Abrasionsresistenz einer Probe hängen von ihrer Mineraldichte ab. Die Zusammensetzung und Härte der Zähne unterliegen einer großen biologischen Variation. Es gibt deutliche Unterschiede zwischen einzelnen Zähnen. Auch innerhalb einer Schmelzfläche hängt die Härte von der Entnahmestelle ab. Ältere Studien zeigen Streuungen des Kalziumgehaltes von 30-40% (Weatherell and Robinson 1973) bzw. des Gesamtmineralgehaltes von 77-90 Vol.-% (Theuns et al. 1983). Die Kalziumkonzentration und die Schmelzdichte nehmen von der Oberfläche zur Schmelz-Dentin-Grenze und von koronal nach zervikal ab (Schweitzer-Hirt et al. 1978, Lussi et al. 1991, Schröder 1992, Hellwig et al. 1995). So können Proben, die aus einem Zahn gewonnen wurden, unterschiedliche Substanzverluste durch Abrasion aufweisen. Zusätzlich kann die Härte des Zahnschmelzes durch den Einfluss äußerer Faktoren verändert werden. Die Schmelzhärte wird durch den Fluoridgehalt erhöht (Yong 1974, Sorvari et al. 1994).
Aus der Summe dieser Variationen können die Messergebnisse in einer Versuchsreihe sehr unterschiedlich ausfallen. Bei Studien, die abrasive Effekte unterschiedlicher Behandlung der Test-Proben quantifizieren sollen, wird im Allgemeinen vor der Zuteilung der Proben zu den einzelnen Gruppen einer Härtemessung durchgeführt, anhand derer die Proben gleichmäßig auf die verschiedenen Gruppen verteilt werden. In der vorliegenden Studie wurden als einziger Parameter die Abrasionsdauer verändert und das Ergebnis jeder Abrasion mit zwei verschiedenen Methoden quantifiziert. Deshalb war eine homogene Verteilung der Proben nicht notwendig. Der Schwerpunkt der Untersuchung war, die Übereinstimmung bzw. Differenzen der

beiden Verfahren in einem möglichst breiten Spektrum zu validieren. Durch die zufällige Verteilung von 140 Proben auf 14 Gruppen ist keine Homogenität der Gruppenzusammensetzung gewährleistet. Das wird dazu geführt haben, dass in der Gruppe 10 (90 s Bürstabrasion) ein höherer Substanzabtrag nachgewiesen wurde, als es zu erwarten war. Dafür spricht, dass mit beiden Methoden die Abweichung gegenüber den benachbarten Gruppen (75 s und 105 s) bestätigt wurde.

Die Analyse der beiden Messmethoden ergab eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse im Bereich bis 30 s Abrasionszeit. Mit der Profilometrie wurde bei Abrasionszeiten zwischen 60 s und 150 s deutlich weniger abradierte Schmelzmasse gemessen als über die Analyse des abradierten Kalziums. Dieses lässt sich auf das Prinzip der profilometrischen Höhendifferenzmessung zurückführen. Bei dem in dieser Studie angewendeten Messverfahren wurden zwei Referenzflächen neben der Versuchsfläche mit einer Linie verbunden und die Differenz zur Versuchsfläche berechnet (vergl. Abb. 4.7). Beim Schleifen der Proben auf einer rotierenden Schleifscheibe entsteht eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Balligkeit. Wenn die Abrasion wie bei den sehr kurzen Bürstzeiten (vergl. Abb. 5.3) nur auf einer kleinen, zentralen Fläche stattgefunden hat, wirkt sich die Balligkeit kaum messbar aus. In Abbildung 5.6 (c und d) ist an einer sehr stak gewölbten Schmelzoberfläche demonstriert, dass mit zunehmender Breite des abradierten Areals durch das angewandte Verfahren ein wachsender Anteil der gewölbten Oberfläche oberhalb der Geraden liegt, die über die Endpunkte der Referenzfläche gelegt wurde. Die für die Abbildung gemessene Probe wies eine stärkere Wölbung auf, als die in dieser Studie verwendeten Schmelzproben. Doch selbst eine Wölbungshöhe von 2 µm auf 4 mm Länge (0,5/1000) ist selbst mikroskopisch nicht wahrnehmbar. Dennoch wirken sich diese Krümmungen bei einem Radius der Abrasionsfläche von 1,5 mm und Abrasionstiefen von 10-20 µm aus, indem die abradierte Tiefe mit zunehmender Abrasionsdauer unterschätzt wird (vergl. Abb. 5.6 c und d). Das hat zur Folge, dass auch das Abrasionsvolumen systematisch zu niedrig berechnet wird.

Zum Zeitpunkt der Durchführung dieser Studie konnten die Profildifferenzen mit der verfügbaren Software nur in der beschriebenen Weise gemessen werden. Eine

Alternative wäre die Messung nach Abb. 5.6 (a und b) gewesen, wie sie in anderen Studien üblich ist. Dabei wird eine Regressionsgerade über einen Referenzbereich neben der Abrasionsfläche gelegt und eine weitere Regressionsgerade durch den angrenzenden Teil der Abrasionsfläche. Die Differenz aus den beiden Geraden wird als Profildifferenz angenommen (Ganss et al. 2005). Wie aus Abb. 5.6 (a und b) zu erkennen ist, wird bei diesem Verfahren die Tiefendifferenz systematisch überschätzt, wobei sich der Fehler bei geringen Abrasionsvolumina stärker auswirkt.

Alle profilometrischen Messdaten wiesen gegenüber den Kalzium-Messdaten eine deutlich höhere Standardabweichung auf. Die höchste profilometrische Standardabweichung betrug ± 1,34 µg bei einer Abrasionsdauer von 20 s, die höchste Standardabweichung der Kalzium-Messmethode lag hingegen bei ± 0,48 µg (Abrasionsdauer 25 s).

Mit steigender Abrasionsdauer zwischen 60 s und 150 s war die Streuung der beiden Messmethoden nahezu gleich groß. Im Bereich der Abrasionszeiten bis 30 s wies die Profilometrie gegenüber der Kalzium-Messmethode eine deutlich höhere Streuung auf (Variationskoeffizient bei 20 s Bürstzeit: Profilometrie = 71,7%, Kalzium = 14,7%). Dieses liegt an der profilometrischen Messbarkeit der Probenoberfläche.

Bei sehr kurzen Abrasionszeiten nimmt zunächst nur die Rauheit und Welligkeit der geschliffenen Oberfläche zu. Das Niveau der Probenoberflächen bleibt dabei nahezu unverändert. Daraus folgt die kontinuierlich zunehmende Streuung der Messwerte. Diese Unschärfe der Oberfläche erscheint als wachsendes Rauschen der Messsignale, wodurch es schwieriger wird, die tatsächliche Tiefe einer Testfläche exakt anzugeben. Um die Tiefendifferenz zweier Messungen sicher quantifizieren zu können, müssen sich die Messungen um ein mehrfaches des Rauschens unterscheiden. In der vorliegenden Studie wurde 1 µm Tiefendifferenz als untere Messgrenze ermittelt. Geringere Tiefendifferenzen wiesen Variationskoeffizienten von mehr als 100% auf und wurden deshalb als nicht messbar eingestuft. Auf Grund dieser Ergebnisse beginnen die profilometrischen Messdaten in dieser Studie erst ab 15 s.

Im Bereich der niedrigen Abrasionszeiten bis 30 s wies die Kalzium-Messmethode eine niedrige Streuung (8,5-19,5 %) auf mit einer Ausnahme. Bei der Abrasionsdauer von 5 s lag die Streuung mit 43,5% deutlich höher. Die hohe Streuung in diesem

Bereich hängt mit der Versuchsdurchführung zusammen. Die für die Abrasionserzeugung verwendete elektrische Zahnbürste musste manuell für den Versuchsdurchlauf ein- und ausgeschaltet werden, was mit einer nicht exakt definierbaren Streuung der tatsächlichen Rotationsdauer verbunden ist. Bei hohen Abrasionszeiten ist diese Zeitspanne vernachlässigbar, bei niedrigen Abrasionszeiten hingegen führt sie zu einer erhöhten Streuung der Messergebnisse.
Die Hauptursache für die Abweichung der Ergebnisse der beiden verglichenen Methoden scheint die systematische Unterschätzung der Profiltiefe nach Abrasion zu sein, die in der verwendeten einfachen Auswertung der Differenzen begründet ist.
Das Verfahren zum Vergleich zweier Profile zur Tiefen-Differenzberechnung ist unter anderem aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Studie weiter entwickelt worden. Moderne leistungsfähige Computer und Speichermedien mit den erforderlichen großen Kapazitäten ermöglichen es, viele Profile einer Probenfläche mit ca. 10.000 Punktepaaren/Profil zu speichern und diese Punkte mit später gemessenen Profilen derselben Spur zu verrechnen. Diese Software wurde bereits in neueren Studien erfolgreich zur Differenzierung sehr kleine Profilveränderungen eingesetzt (Attin et al. 2009).

6.3 Schlussfolgerung

In der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass beide Messmethoden in allen Gruppen eine Zunahme des Substanzverlustes mit zunehmender Dauer der Bürstabrasion aufweisen. Die Ergebnisse der Profilometrie und der photometrischen Kalziumanalyse stimmen im Bereich niedriger Abrasionsdauer (unter 30 s) weitgehend überein, wobei die photometrische Analyse des Kalziums bei niedrigen Abrasionszeiten (5-30 s) eine gleichmäßigere Zunahme des Schmelzverlustes gegenüber der Profilometrie aufweist. Bei höheren Abrasionszeiten (60-150 s) wurde mit der Profilometrie weniger abradierte Schmelzmasse gemessen als über die Analyse des abradierten Kalziums. Zudem wiesen alle profilometrischen Messdaten gegenüber den Kalzium-Messdaten eine deutlich höhere Streuung auf.

Die Analyse der abradierten Schmelzmasse über die Kalziumbestimmung erlaubt zuverlässigere Ergebnisse, als das bisher übliche profilometrische Verfahren zur Tiefendifferenzmessung. Durch die Weiterentwicklung der Hard- und Software des profilometrischen Analysesystems konnten inzwischen diese Messungen deutlich verbessert werden.

7 Zusammenfassung

Ziel der Studie: Ziel der vorliegenden In-vitro-Studie war es, die Profilometrie und das photometrische Verfahren der Kalzium-Bestimmung zur Erfassung von Schmelz-Substanzverlusten durch Bürstabrasion zu untersuchen und zu vergleichen.

Material und Methode: Für den Versuch wurden 140 Schmelzproben planparallel geschliffen. Anschließend wurden die einzelnen Proben zufällig auf 14 Gruppen (n = 10) verteilt und einer definierten Abrasionsdauer (5 s, 10 s, 15 s, 20 s, 25 s, 30 s, 45 s, 60 s, 75 s, 90 s, 105 s, 120 s, 135 s und 150 s) unterzogen mit einer modifizierten elektrischen Zahnbürste (10 g Anpressdruck). Als Abrasionsmedium diente eine Suspension aus Bimsmehl und Aqua bidest (1:2; 10 µl/Probe). Nach Abschluss der Bürstabrasion wurde der Abtrag profilometrisch bestimmt. Im aufgefangenen „slurry“ wurde die Menge des freigesetzten Kalziums photometrisch bestimmt und die abradierte Schmelzmasse berechnet. Der errechnete Substanzverlust beider Methoden wurde verglichen.

Ergebnisse: In allen Gruppen konnte mit beiden Messmethoden eine Zunahme des Substanzverlustes mit zunehmender Dauer der Bürstabrasion nachgewiesen werden. Die Analyse der beiden Messmethoden ergab eine Übereinstimmung der Ergebnisse im Bereich der niedrigen Abrasionszeiten, wobei die photometrische Analyse in diesem Bereich eine gleichmäßigere Zunahme des Schmelzverlustes ergab. Bei Abrasionszeiten zwischen 60 s und 150 s wurde deutlich weniger abradierte Schmelzmasse mit der Profilometrie gemessen als über die Analyse des abradierten Kalziums (z.B. bei 105 s Abrasionszeit: Profilometrie 8,32 µg, Kalzium-Messung 15,81 µg). Alle profilometrischen Messdaten wiesen gegenüber den Kalzium-Messdaten eine höhere Standardabweichung auf. Die höchste profilometrische Standardabweichung betrug ± 1,34 µg, die höchste Standardabweichung der Kalzium-Messmethode lag hingegen bei ± 0,48 µg.

Zusammenfassung: Die Ergebnisse zeigen, dass bei kurzen Abrasionszeiten (bis 30 s) mit beiden Methoden eine Übereinstimmung hinsichtlich des gemessenen Substanzverlustes vorliegt. Dies gilt aber nicht für längere Abrasionszeiten.

8 Materialliste

Mat. 1 Thymollösung 0,1% Tymol, Synopharm, Barsbuettel, Deutschland

Mat. 2 Standbohrmaschine, Typ T6, Metabo, Nürtingen, Deutschland

Mat. 3 Diamantierter Hohlbohrer; Eigenproduktion, Wissenschaftliche Werkstätten des Klinikums Göttingen, Deutschland

Mat. 4 Vaseline, Lichtenstein Pharmazeutika GmbH & Co, Mühlheim-Kärlich, Deutschland

Mat. 5 Paladur, Heraeus Kulzer GmbH & G.KG, Hanau, Deutschland

Mat. 6 Siliziumcarbid-Schleifpapierscheiben, Körnung 1200, 2500 und 4000, Struers, Erkrat, Deutschland

Mat. 7 Parallelisierungsschlitten, Eigenproduktion, Wissenschaftliche Werkstätten des Klinikums Göttingen, Deutschland

Mat. 8 Wasserfester Filzstift, Faber-Castell, Multimark 1523 permanent, Stein Deutschland

Mat. 9 Messingrohr, Eigenproduktion, Wissenschaftliche Werkstätten des Klinikums Göttingen, Deutschland

Mat. 10 Silikonschlauch, Fa. Krannich, Göttingen, Deutschland

Mat. 11 Elektrische Zahnbürste, Braun Oral-B 3D Excel, D 17511, Type 4729, Kronberg, Deutschland

Mat. 12 Interdentalraumbürste, Braun Oral-B, Kronberg, Deutschland

Mat. 13 Bimsmehl, Ernst Heirichs GmbH, Goslar, Deutschland

Mat. 14 Salzsäure (1 mol/l), Merck, Darmstadt, Deutschland

Mat. 15 Zentrifuge, Heraeus Christ GmbH, Osterode, Deutschland

Mat. 16 Präzisionswaage, Sartorius, C-1530 Teltow, Deutschland

Mat. 17 Zentrifugenröhre (PP), Sarstedt, Nümbrecht, Deutschland

Mat. 18 Magnetrührer, Janke & Kunkel-IKA-Labortechnik, Staufen, Deutschland

Mat. 19 Pipetten: Pipetman P 10 µl, P 100 µl, P 1000 µl, Gilson, Frankreich

Mat. 20 Profilometer, Perthometer Conzept V7.00, Mahr GmbH, Göttingen, Deutschland

Mat. 21 Oberflächentaster, Taster MFW-250, 6851804, 90°/2 µm, Mahr GmbH, Göttingen

Mat. 22 Ausblockwachs blau, Renfert, Singen, Deutschland

Mat. 23 Reagiergefäße, Safe-Lock-Tubes, Eppendorf AG, Hamburg, Deutschland

Mat. 24 Rüttelgerät, Eigenproduktion, Wissenschaftliche Werkstätten des Klinikums Göttingen, Deutschland

Mat. 25 Natriumhydroxid, (NaOH, 1 mol/l), Merck, Darmstadt, Deutschland

Mat. 26 Kalzium- Reagenz, Fluitest Ca-A-III (0,12 mmol Arsenazo III/1), Biocon, Vöhl/Marienhagen, Deutschland

Mat. 27 Mikrotiterplatte, 384 well Flachboden, Corning incorporated, USA

Mat. 28 Spectra Max® M2 Microplate Reader, Molekular Devices, München, Deutschland

Mat. 29 Softmax-Programm, Molekular Devices, München, Deutschland

Mat. 30 pH-Meter, Typ 761 Calimatic, Knick, Berlin, Deutschland

9 Literaturverzeichnis

Amaechi BT, Highami SM, Edgar WM (1998):
Use of transverse microradiography to quantify mineral loss by erosion in bovine enamel.
Caries Res 32, 351-356

Angmar B, Carlström D, Glas J (1963):
Studies on the ultrastructure of dental enamel. IV The mineralisation of normal human enamel.
J Ultrastruct Res 8, 12-23

Arends J, Ten Bosch J (1992):
Demineralization and remineralization evaluation techniques.
J Dent Res 71 (Spec Iss), 924-928

Arends J, Schulthof J, Jonglebloed WL (1979):
Microhardness indentations on artifical white spot lesions.
Caries Res 13, 290-297

Arends J, Lodding A, Petersson LG (1980):
Fluoride uptake in enamel in comparison of topical agents.
Caries Res 14, 403-413

Ashmore H (1966):
Dental enamel abrasion – an in vitro method using interference microscopy.
Br Dent J 120, 309-314

Ashmore H, Van Abbe NJ, Wilson SJ (1972):
The measurement in vitro of dentine abrasion by toothpaste.
Br Dent J 133, 60-66

Attin T (1999):
Erosion und Abrasion von Zahnhardsubstanz- Einflussfaktoren, Pathogenese und Therapie.
Dtsch Zahnärztekalender 58, 1-31

Attin T, Hilgers RD, Hellwig E (1996):
Einfluss von Muzin im Speichel auf die Entstehung von Schmelzerosionen.
Dtsch Zahnärztl Z 51, 506-510

Attin T, Schaller HG, Hellwig E (1997):
Fluoride uptake in dentin with and without simulating dental fluid flow.
Clin Oral Investig 1(3), 125-130

Attin T, Deifuss H, Hellwig E (1999):
Influence of acidified fluoride gel on abrasion resistance of eroded enamel.
Caries Res 33, 135-139

Attin T, Buchalla W, Gollner M,Hellwig E (2000):
Use of variable remineralisation periods to improve the abrasion resistance to previously erodied enamel.
Caries Res 34, 48-52

Attin T, Meyer K, Hellwig E, Buchalla W, Lennon AM (2003):
Effect of mineral supplements to citric acid on enamel erosion.
Arch Oral Biol 48(11), 753-759

Attin T, Becker K, Hannig C, Buchalla W, Hilgers R (2005):
Method to detect minimal amounts of calcium dissolved in acidic solutions.
Caries Res 39(5), 432-436

Attin T, Becker K, Roos M, Attin R, Paqué F (2009):
Impact of storage conditions on profilometry of eroded dental hard tissue.
Clin Oral Investig [epub ahead]

Bablok W (1988):
A General Regression Procedure for Method Transformation.
J Clin Chem Clin Biochem 26, 783-790

Baehni P, König K, Saxer UP (1992):
Kein Risikofaktor bei sorgfältiger Putztechnik.
Zahnärztl Mitt 82, 36-39

Barbakow F, Imfeld T, Lutz F, Stookey G, Schemehorn B (1989):
Dentin abrasion (RDA), enamel abrasion (REA) and polishing scores of dentifrices sold in switzerland.
Schweiz Monatsschr Zahnmed 99, 408-413

Barbour ME, Rees JS (2004):
The laboratory assessment of enamel erosion: a review.
J Dent 32(8), 591-602

Bartlett DW, Coward PY (2001):
Comparison of the erosive potentials of gastric juice and a carbonated drink in vitro.
J Oral Rehabil 28, 1045-1047

Bartlett DW, Smith BGN, Wilson RF (1994):
Comparison of the effect of fluoride and non-fluoride toothpaste on tooth wear in vitro and the influence of enamel fluoride concentration and hardness of enamel.
Br Dent J 176, 346-348

Baykov AA, Evtuschenko OA, Avaeva SM (1988):

A malachite green procedure for orhophosphate determination and its use in alkaline phosphate- based enzyme-immunoassay.
Anal Biochem 171, 266-270

Bergström J, Lavstedt S (1979):
An epidemiologic approach to toothbrushing and dental erosion.
Community Dent Oral Epidemiol 7, 57-64

Bergström J, Eliasson S (1988):
Cervical abrasion in relation to toothbrushing and periodontal health.
Scand J Dent Res 96, 405-411

Björn H, Lindhe J (1966):
On the mechanics of toothbrushing.
Odontol Revy 17, 9-16

Brady JM, Woody RD (1977):
Scanning microscopy of cervical erosion.
J Am Dent Assoc 94, 726-729

Buddecke E:
Grundriss der Biochemie. 9. Auflage; Walter de Gruyter,
Berlin 1994

Burchardi H, Larsen R, Kuhlen R, Jauch K-W, Schölmerich J:
Die Intensivmedizin. 10 Ausgabe; Springer Verlag
Heidelberg 2007, S. 227

Burkhard H:
Werkstoffprüfung. Hanser Verlag
München-Wien 2003, S.50

Davidson CL, Boom G, Arends J (1973):
Calcium distribution in human and bovine surface enamel.
Caries Res 7, 349-359

Davis WB (1979):
A comparison of dentine abrasion data generated by radiotracer and surface profilometer methods.
J Oral Rehabil 6, 177-181

Davis WB, Winter PJ (1980):
The effect of abrasion on enamel and dentine after exposure to dietary acid.
Br Dent J 148, 253-256

De Josselin de Jong E, Van der Linden AHIM, Ten Bosch J (1987):
Longitudinal microradiography; a non – destructive automated quantitative method to follow mineral changes in mineralised tissue slices.
Phys Med Biol 32, 1209-1220

De Trey ER (1983):
Einfluss der Borstensteifheit von Zahnbürsten auf Kraftausübung, Gingivatraumatisierung und Plaqueentfernung.
Schweiz Monatsschr Zahnheilkd 93; 1007-1016

Diddin GH. (1972):
The stability of water in human dental enamel studied by proton nuclear magnetic resonance.
Arch Oral Biol 17, 433-437

Dijkman AG, Schuthof J, Arends J (1986):
In vivo remineralization of plaque-induced initial enamel lesions a microradiographic investigation.
Caries Res 20, 202-208

Esser M, Tinschert J, Marx R (1998):
Materialkennwerte der Zahnhartsubstanz des Rindes im Vergleich zur humanen Zahnhartsubstanz.
Dtsch Zahnärztl Z 53, 713-717

Featherstone J, Duncan JF, Cutress TW (1979):
A mechanism for dental caries based on chemical processes and diffusion phenomena during in vitro caries simulation on human tooth enamel.
Arch Oral Biol 24, 101-112

Featherstone J, Ten Cate J, Shariati M, Arends J (1983):
Comparison of artificial caries-like lesions by quantitative microradiography and microhardness profiles.
Caries Res 17, 385-391

Fraleigh CM, McElhaney JH, Heiser RA (1967):
Toothbrushing force study.
J Dent Res 46, 209-214

Frank RM (1968):
The ultrastructure of the Tooth from the point of view of mineralization, demineralization and remineralization.
Int Dent J 18(5), 661-683

Friedl KH, Schmalz G, Hiller KA, Saller A (1996):
In-vivo evaluation of a feldspathic ceramic system: 2-year results.
J Dent 24, 25-31

Gallien GS, Kaplan I, Owens BM (1994):
A review of noncarious dental cervical lesions.
Compend Contin Educ Dent 15, 1366-1372

Ganss C, Klimek J, Schwarz N (2000):
A comparative profilometric in vitro study of the susceptibility of polished and natural human enamel and dentine surfaces to erosive demineralization.
Arch Oral Biol 45, 897-902

Ganss C, Lussi A, Klimek J (2005):
Comparison of calcium/phosphorus analysis, longitudinal microradiography and profilometry for the quantitative assessment of erosive demineralisation.
Caries Res 39(3), 178-184

Grabenstetter RJ, Broge RW, Jackson FL, Radike AW (1958):
The measurement of the abrasion of human teeth by dentifrice abrasives: a test utilizing radioactive teeth.
J Dent Res 37, 1060-1068

Grobler SR, Senekal PJ, Laubscher JA (1990):
In vitro demineralization of enamel by orange juice, apple juice, Pepsi Cola and Diet Pepsi Cola.
Clin Prev Dent 12(5), 5-9

Gross D, Lindner S, Mayer R (1996):
Der Einfluß von Zahnputztechniken und Zahnpasten auf die Entstehung von Zahnhalsdefekten.
Zahnärztl Welt 105, 108-111

Hall AF, Sadler JP, Strang R, de Josselin de Jong E, Foye RH, Creanor SL (1997):
Application of transverse microradiography for measurements of mineral loss by acid erosion.
Adv Dent Res 11, 420-425

Hannig C, Hamkens A, Becker K, Attin R, Attin T (2005):
Erosive Effects of different acids on bovine enamel: release of calcium and phosphate in vitro.
Arch Oral Biol 50(6), 541-552

Hannig M (1993):
Mikromorphologische Veränderungen an der Schmelzoberfläche durch verschiedene Säuren.
Zahnärztl Welt 102, 604-611

Hannig M, Hess NJ, Hoth-Hannig W, De Vrese M (2003):
Influence of salivary pellicle formation time on enamel demineralization- an in situ pilot study.
Clin Oral Investig 7(3), 158-161

Harte DB, Manly RS (1975):
Effect of toothbrush variables on wear of dentin produced by four abrasives.
J Dent Res 54(5), 993-998

Hefferren JJ (1976):
A laboratory method for assessment of dentifrice abrasivity.
J Dent Res 55, 563-573

Hellwig E, Klimek J, Attin T:
Einführung in die Zahnerhaltung. 1 Auflage; Urban und Fischer,
München-Jena 1995

Hengchang X, Vingerling PA, Wenzyi L (1990):
Wear of composite resin in vitro: a testing machine with a rubber plate. Prelminary results.
J Oral Rehabil 17, 107-115

Hennemann K:
Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Zahnoberflächen bei der Schmelzkonditionierung.
Med. Diss. Köln 1982

Hooper S, West NX, Sharif N, Smith S, North M, De`Ath J, Parker DM, Roedig-Penman A, Addy M (2004):
A comparison of enamel erosion by a new sports drink compared to two proprietary products: a controlled, crossover study in situ.
J Dent 32, 541-545

Hotz PR (1983):
Untersuchung zur Abrasivität von Zahnpasten.
Schweiz Monatsschr Zahnheilkd 93, 93-99

Imfeld T (1996 a):
Dental erosion. Definition, Classifikation and links.
Eur J Oral Sci 104, 151-155

Imfeld T (1996 b):
Prevention of progression of dental erosion by professional and individual prophylactic measures.
Caries Res 104, 215-230

James PMC, Parfitt GJ (1953):
Local effects of certain medicaments on the teeth.
Br Med J 4848, 1252-1253

Jenkins GN:
The physiology and biochemistry of the mouth.
Blackwell, Oxford 1978, 288-357, 395-412

Joy DC, Newbury DE, Davidson DL (1982):
Electron Channeling Pattern in the Scanning Electron Microscope.
J Appl Phys 53(8), 439 - 461

Kaidonis JA,Townsend GC, Richards LC (1992):
Abrasion: an evolutionary and clinical view.
Aust Prosthet J 6, 9-16

Kaplan BA, Goldstein GR, Vijayaraghavan TV, Nelson IK (1996):
The effect of three polishing systems on the surface roughness of four hybrid composites: A profilometric and scanning electron microscopy study.
J Prosthet Dent 76, 34-38

Kelly MP, Smith BGN (1988):
The effect of remineralizing solutions on tooth wear in vitro.
J Dent 16, 147-9

Kielbassa AM, Gillmann L, Zanter C, Meyer-Lueckel H, Hellwig E, Schulte-Mönting J (2005):
Profilometric and microradiographic studies on the effects of toothpaste and acidic gel abrasivity on sound and demineralized bovine dental enamel.
Caries Res 39, 380-386

Klimm W:
Der keilförmige Defekt, Quintessenz,
Berlin 1993

König KG (1990):
Root lesions.
Int Dent J 40, 283-288

Körber K:
Funktionslehre. In: Zahnärztliche Prothetik. Georg Thieme Verlag, New York,
Stuttgart 1995, S. 3-7

Kraft E (1961):
Über die Beziehung zwischen Zahnabrieb und Kaumuskeltätigkeit.
Dtsch Zahnärztl Z 16, 307-309

Larsen MJ, Nyvad B (1999):
Enamel erosion by some soft drinks and orange juices relative to their pH, buffering effect and contents of calzium phosphate.
Caries Res 33, 81-87

Larsen MJ, Richards A (2002):
Fluoride is unable to reduce dental erosion from soft drinks.
Caries Res 36(1), 75-80

Lauterbach E:
Wörterbuch Zahnmedizin. Verlag für Zahnmedizin,
Hanau 1992

Levitch LC, Bader JD, Shugars DA, Heymann HO (1994):
Non-carious cervical lesions.
J Dent 22, 195-207

Litonjua LA, Andreana S, Bush PJ, Tobias TS, Cohen RE (2004 a):
Wedged cervical lesions produced by toothbrushing.
Am J Dent 17(4), 237-240

Litonjua LA, Bush PJ, Andreana S, Tobias TS, Cohen RE (2004 b):
Effects of occlusal load on cervical lesions.
J Oral Rehabil 31(3), 225-232

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

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

Mathias D (1996):
Labordiagnostik bei Störungen des Knochenstoffwechsels.
Clin Lab 42, 1069-1073

Meurman JH, Ten Cate JM (1996):
Pathogenesis and modifying factors on dental erosion.
Eur J Oral Sci 104, 199-206

Meurman JH, Frank RM (1991):
Progression and surface ultrastructure of in vitro caused erosive lesions in human and bovine enamel.
Caries Res 25, 81-87

Meurman JH, Harkonen M, Naveri H, Koskinen J, Torkko H, Rytömaa I, Järvinen V, Turunen R (1990 a):
Experimental sports drinks with minimal dental erosion effect.
Scand J Dent Res 98, 120-128

Meurman JH, Torokko H, Hirvonen J, Koskinen J, Rytömaa I (1990 b):
Application of a new mechanical properties microprobe to study hardness of eroded bovine enamel in vitro.
Scand J Dent Res 98, 568-570

Meyer G, Dawid E, Schwartz P (1991):
Zur Pathomorphologie keilförmiger Defekte.
Dtsch Zahnärztl Z 46, 629-632

Mierau H-D, Haubitz I, Völk W (1989):
Gewohnheitsmuster beim Gebrauch der Handzahnbürste.
Dtsch Zahnärztl Z 44, 836-841

Mistry M, Greenby TH (1993):
Erosion by soft drinks of rat molar teeth assessed by digital image analysis.
Caries Res 27, 21-25

Mott BW:
Micro-indentation hardness testing. Butterworths Scientific Publications,
London 1956

Nikiforuk G:
Understanding dental caries. Prevention-basic and clinical aspects.
Karger Verlag, Basel 1985

Nolden R:
Zahnerhaltungskunde. Georg Thieme Verlag,
Stuttgart 1994, S. 12-114, 24-32

Noordmans J, Pluim LJ, Hummel J, Arends J, Busscher HJ (1991):
A new profilometric method for determination of enamel and dentinal abrasion in vivo using computer comparisons: a pilot study.
Quintessence Int 22, 653-657

Osborn JW (1968 a):
The cross-sectional outlines of human enamel prisms.
Acta Anat (Basel) 70, 493-508

Osborn JW (1968 b):
Directions and interrelationship of prisms in cuspal and cervical enamel of human teeth.
J Dent Res 47, 395-402

Ott RW, Neudert T, Raab H-M, Boegershausen H-M (1991):
Einflüsse der Zahnputztechnik auf die Entstehung keilförmiger Defekte.
Dtsch Stomatol 41, 463-465

Passing H, Bablok W (1983):
A New Biometrical Procedure for Testing the Equality ot Measurements from Two Different Analytical Methods.
J Clin Chem Clin Biochem 21, 709-720

Patel MV, Fox JL, Higuchi WI (1987):
Effect of acid type on kinetics and mechanism of dental enamel demineralization.
J Dent Res 66, 1425-1430

Phaneuf EA, Harrington JH, Ashland AB, Dale PP, Shklar G (1962):
Automatic toothbrush: a new reciprocating action.
J Am Dent Assoc 65, 13-25

Pickles MJ, Joiner A, Weader E, Cooper YL, Cox TF (2005):
Abrasion of human enamel and dentine caused by toothpastes of differing abrasivity determined using an in situ wear model.
Int Dent J 55, 188-193

Pindborg JJ:
Pathology of the dental hard tissues.
Munksgaard Copenhagen 1970, S. 48

Pintado MR, Delong R, Ko CC, Sakaguchi RL, Douglas WH (2000):
Correlation of noncarious cervical lesion size and occlusal wear in a single adult over a 14-year time span.
J Prosthet Dent 84(4), 436-443

Pöllmann L, Berger F, Pöllmann B (1987):
Age and dental abrasion.
Gerodontics 3, 94-96

Remizov SM and Pruzhanskii LI (1990):
The effect of toothbrushes on human dental enamel and dentin wear.
Stomatologiia (Mosk) 4, 4-6

Riethe P:
Die Quintessenz der Mundhygiene. Quintessenz,
Berlin 1974

Rytömaa I, Meuermann JH, Koskinen J, Laakso T, Gharazi L, Turunen R (1988):
In vitro erosion of bovine enamel caused by acidic drinks and other foodstuffs.
Scand J Dent Res 96, 324-333

Sachs L:
Angewandte Statistik. 11. Auflage, Springer Verlag,
Berlin 2007, S.140

Sander FM, Sander C, Sander FG (2005):
Dental care with manual toothbrushes during fixed orthodontic treatment-a new testing procedure.
J Orofac Orthop 66(4), 299-306

Savage NW (1983):
Some physicochemical phenomena affecting demineralization and remineralization: a review.
Aust Dent J 28(4), 215-220

Scheutzel P (1996):
Etiology of dental erosion - instrinsic factors.
Eur J Oral Sci 104, 178-189

Schröder HE:
Orale Strukturbiologie. Georg Thieme Verlag,
Stuttgart 1992, S. 37-84

Schweitzer-Hirt CM, Schait A, Schmid R, Imfeld T, Lutz F, Mühlemann HR (1978):
Erosion und Abrasion des Schmelzes. Eine experimentelle Studie.
Schweiz Monatsschr Zahnheilkd 5, 497-529

Silverstone LM and Featherstone MJ (1988):
A scanning electron microscope study of the end rounding of bristles in eight toothbrush types.
Quintessence Int 19, 87-107

Smith HG, Bauer PJ (1979):
Light-induced permeability changes in sonicated bovine disks: Arsenazo III and flow system measurements.
Biophys J 46(1), 111-116

Sorvari R, Meurman JH, Alakuijala P, Frank RM (1994):
Effect of fluoride varnish and solution on enamel erosion in vitro.
Caries Res 28, 227-232

Sorvari R, Pelttari A, Meurman JH (1996):
Surface ultrastructure of rat molar teeth after experimentally induced erosion and attrition.
Caries Res 30, 163-168

Tate WH, Powers JM (1996):
Surface roughness of composites and hybrid ionomers.
Oper Dent 21, 53-58

Theuns HM, Van Dijk JWE, Jongebloed WL (1983):
The mineral content of human enamel studied by polarizing microscopy, microradiography and scanning electron microscopy.
Arch Oral Biol 28, 797-803

Thewlis J (1940):
The structure of teeth as shown by x-ray examination.
Med Res Coun Sp Rep Ser London 238, 5-28

Tomofuji T, Morita M, Horiuchi M, Sakamoto T, Ekuni D, Yamamoto T (2002):
The effect of duration and force of mechanical toothbrushing stimulation on proliferative activity of the junctional epithelium.
J Periodontol 73(10), 1149-1152

Valk JWP, Duijsters PPE, Davidson CL (1986):
Toothbrush resistance and fluoride retention of sound, etched, fluoridated, and remineralized bovine enamel.
Am J Orthod 89, 298-301

Van der Weijden GA, Timmerman MF, Danser MM (1998):
Relationship between the plaque removal efficacy of a manual toothbrush and brushing force.
J Clin Periodontol 25(5), 413-416

Vrijhoff MM, Hedriks FH, Letzel H (1985);
Loss of substance of dental composite restorations.
Dent Mater 1, 101-105

Wang J, Smith BG (1995):
The effect of occlusal force on the formation of experimental cervical wedge-shaped defects on human teeth (Abstract).
Chung Hua Kou Chiang Hsueh Tsa Chih 30, 268-70, 319

Wang J, Smith BG (1996):
Study on experimental cervical defect of human tooth by SEM (Abstract).
Chung Hua Kou Chiang Hsueh Tsa Chih 31, 31-33

Weatherell HA, Wiedmann SM (1968):
Histological appearance and chemical composition of enamel protein from mature human molars.
Caries Res 2, 281-293

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

Weinstock A:
Matrix developement in mineralizing tissues as shown by radioautography. Formation of enamel an dentin. In: Salvkin HC and Bavetta LA: Developemental aspects of oral biology.
Academic Press, New York 1972

West NX, Hughes JA, Addy M (2001):
The effect of pH on the erosion of dentine and enamel by dietary acids in vitro.
J Oral Rehabil 28, 860-864

Westerfeld F:
In vitro Untersuchung zur Prophylaxe von Bürstabrasionen erodierter Schmelzoberflächen.
Med. Diss. Gießen 2002

Wicht MJ, Haak R, Fritz UB, Noack MJ (2002):
Primary preparation of class II cavities with oscillating systems.
Am J Dent 15, 21-25

Wiegand A, Begic M, Attin T (2006):
In vitro evaluation of abrasion of eroded enamel by different manual, power and sonic toothbrushes.
Caries Res 40, 60-65

Wiegand A, Schwerzmann M, Sener B, Magalhaes AC, Roos M, Ziebolz D, Imfeld T, Attin T (2008):
Impact of toothpaste slurry abrasivity and toothbrush filament stiffness on abrasion of eroded enamel-an in vitro study.

Acta Odontol Scand 66, 231-235

Wright KHR (1969):
The abrasive wear resistance of human dental tissues.
Wear 14, 263-284

Xhonga FA (1977):
Bruxism and ist effect on the teeth.
J Oral Rehabil 4, 65-76

Yong RA (1974):
Implikations of atomic substitutions and other structural details in apatites.
J Dent Res 53, 193-203

Yoshida Y, Van Meerbeek B, Nakayama Y, Yoshioka M, Snuawaert J, Abe Y, Lambrechts P, Vanherle G, Okazaki M (2001):
Adhesion to and decalcification of hydroxyapatite by carboxylic acids.
J Dent Res 80, 1565-1569

Zhang XZ, Anderson P, Dowker SE, Elliot JC (2000):
Optical profilometric study of changers in surface and roughness of enamel during in vitro demineralization.
Caries Res 34, 164-174

10 Anhang: Rohdaten

Einzelmesswerte des Substanzabtrags in Gruppen 1-14; Kalziumgehalt der abradierten Schmelzmasse und Abrasionstiefen der behandelten Proben.

Gruppe 1

Proben Nr.	Ca (nmol)	Schmelzmasse (µg) Ca-Methode	Abrasions-tiefen (µm)	Schmelzmasse (µg) Profilometrie
1	3,16	0,4		
2	1,64	0,2		
3	3	0,4		
4	2,36	0,3		
5	6,48	0,8		
6	2,04	0,3		
7	5,52	0,7		
8	4,36	0,5		
9	3,16	0,4		
10	3.48	0,4		

Gruppe 1	Ca-Methode	Abrasions-tiefen	Profilo-metrie
Zeit (s)	5		
Mittel-wert (µg)	0,4		
Standard-abweichung (µg)	0,191		
Variations-koeffizient (%)	43,47		
Median	0,4		
Minimum	0,2		
Maximum	0,8		

Tab. 10.1: Einzelmesswerte der Proben in Gruppe 1; die Abrasionen lagen unterhalb der Profilometrie-Messgrenze

Gruppe 2

Proben Nr.	Ca (nmol)	Schmelzmasse (µg) Ca-Methode	Abrasions-tiefen (µm)	Schmelzmasse (µg) Profilometrie
11	5,04	0,6		
12	4,56	0,6		
13	7,32	0,9		
14	7,44	0,9		
15	6,08	0,8		
16	8,32	1,0		
17	6,6	0,8		
18	6,24	0,8		
19	7,68	1,0		
20	5,52	0,7		

Gruppe 2	Ca-Methode	Abrasions-tiefen	Profilo-metrie
Zeit (s)	10		
Mittel-wert (µg)	0,9		
Standard-abweichung (µg)	0,124		
Variations-koeffizient (%)	14,49		
Median	0,8		
Minimum	0,7		
Maximum	1,0		

Tab. 10.2: Einzelmesswerte der Proben in Gruppe 2; die Abrasionen lagen unterhalb der Profilometrie-Messgrenze

Gruppe 3

Proben Nr.	Ca (nmol)	Schmelzmasse (µg) Ca-Methode	Abrasions-tiefen (µm)	Schmelzmasse (µg) Profilometrie
21	9,76	1,2	0,92	0,6
22	11,68	1,5	6,16	4,02
23	9,46	1,2	1,05	0,69
24	10,36	1,3	2,39	1,56
25	10,66	1,3	3,68	2,41
26	11,5	1,4	1,69	1,1
27	11,74	1,5	1,96	1,28
28	14,68	1,8	2,43	1,59
29	14,98	1,9	1,48	0,97
30	16,24	2,0	1,5	0,95

Gruppe 3	Ca-Methode	Abrasions-tiefen	Profilo-metrie
Zeit (s)	15	15	15
Mittel-wert (µg)	1,5	2,32	1,5
Standard-abweichung (µg)	0,296	1,57	1,024
Variations-koeffizient (%)	19,54	67,35	67,53
Median	1,4		1,2
Minimum	1,2		0,6
Maximum	2,0		4,0

Tab. 10.3: Einzelmesswerte der Proben in Gruppe 3

Gruppe 4

Proben Nr.	Ca (nmol)	Schmelzmasse (µg) Ca-Methode	Abrasions-tiefen (µm)	Schmelzmasse (µg) Profilometrie
31	16,36	2,0	7,12	4,56
32	15,7	2,0	2,09	1,36
33	15,1	1,9	1,57	1,02
34	17,92	2,2	3,02	1,97
35	17,08	2,1	2,03	1,33
36	17,2	2,2	3,87	2,52
37	19,54	2,4	1,33	0,87
38	22,78	2,8	0,42	0,28
39	21,16	2,6	4,37	2,5
40	21,88	2,7	1,27	0,83

Gruppe 4	Ca-Methode	Abrasions-tiefen	Profilo-metrie
Zeit (s)	20	20	20
Mittel-wert (µg)	2,3	2,7	1,7
Standard-abweichung (µg)	0,338	1,97	1,235
Variations-koeffizient (%)	14.65	72,81	71,66
Median	2,2		1,3
Minimum	1,9		0,3
Maximum	2,8		4,6

Tab. 10.4: Einzelmesswerte der Proben in Gruppe 4

Gruppe 5

Proben Nr.	Ca (nmol)	Schmelzmasse (µg) Ca-Methode	Abrasions-tiefen (µm)	Schmelzmasse (µg) Profilometrie
41	19,7	2,5	4,98	3,26
42	25,9	3,2	2,76	1,8
43	18,6	2,3	1,07	0,69
44	19,5	2,4	3,72	2,4
45	25,6	3,2	5,49	3,58
46	26,6	3,3	3,65	2,38
47	21,5	2,7	3,59	2,35
48	15,8	2,0	4,88	3,18
49	18,8	2,4	2,9	1,89
50	17	2,1	2,27	1,48

Gruppe 5	Ca-Mrthode	Abrasion-tiefen	Profilo-metrie
Zeit (s)	25	25	25
Mittel-wert (µg)	2,6	3,53	2,3
Standard-abweichung (µg)	0,483	1,35	0,883
Variations koeffizient (%)	18,48	38,28	38,41
Median	2,5		2,4
Minimum	2,0		0,7
Maximum	3,3		3,6

Tab. 10.5: Einzelmesswerte der Proben in Gruppe 5

Gruppe 6

Proben Nr.	Ca (nmol)	Schmelzmasse (µg) Ca-Methode	Abrasions-tiefen (µm)	Schmelzmasse (µg) Profilometrie
51	26,2	3,3	2,7	1,77
52	26,4	3,3	4,87	3,8
53	24,2	3,0	4,78	3,12
54	22,4	2,8	6,56	4,28
55	26,1	3,3	4,97	3,28
56	28,5	3,6	1,33	0,87
57	25,6	3,2	1,57	1,03
58	29,6	3m7	2,9	1,89
59	25,2	3,2	6,678	4,36
60	23,3	2,9	2,27	1,48

Gruppe 6	Ca-Methode	Abrasions-tiefen	Profilo-metrie
Zeit (s)	30	30	30
Mittel-wert (µg)	3,20	3,86	2,6
Standard-abweichung (µg)	0,273	1,97	1,33
Variations-koeffizient (%)	8,49	50,88	51,51
Median	3,2		2,5
Minimum	2,8		0,9
Maximum	3,7		4,4

Tab. 10.6: Einzelmesswerte der Proben in Gruppe 6

Gruppe 7

Proben Nr.	Ca (nmol)	Schmelzmasse (µg) Ca-Methode	Abrasions-tiefen (µm)	Schmelzmasse (µg) Profilometrie
61	57,35	7,2	5,12	3,34
62	54,8	6,9	1,76	1,15
63	42,2	5,3	2,93	1,92
64	24,35	3,0	2,56	1,67
65	36,5	4,6	6,54	4,27
66	116,25	14,5	12,62	8,24
67	65,55	8,2	6,5	4,25
68	91,8	11,5	3,61	2,36
69	63,5	7,9	4,86	3,17
70	99,65	12,5	7,24	4,7

Gruppe 7	Ca-Methode	Abrasions-tiefen	Profilo-metrie
Zeit (s)	45	45	45
Mittel-wert (µg)	8,1	5,37	3,5
Standard-abweichung (µg)	3,65	3,14	2,051
Variations-koeffizient (%)	44,85	58,52	58,48
Median	7,6		3,3
Minimum	3,0		1,2
Maximum	14,5		8,2

Tab. 10.7: Einzelmesswerte der Proben in Gruppe 7

Gruppe 8

Proben Nr.	Ca (nmol)	Schmelzmasse (µg) Ca-Methode	Abrasions-tiefen (µm)	Schmelzmasse (µg) Profilometrie
71	56,55	7,1	6,47	4,23
72	110,5	13,8	14,3	9,35
73	162,45	20,3	4,66	3,04
74	134,6	16,8	9,2	6,01
75	150	18,8	10,3	6,73
76	123,1	15,4	23,8	15,54
77	96,15	12,0	4,99	3,26
78	146,6	18,3	3,36	2,21
79	101,55	12,7	9,84	6,42
80	50,75	6,3	2,57	1,71

Gruppe 8	Ca-Methode	Abrasions-tiefe	Profilo-metrie
Zeit (s)	60	60	60
Mittel-wert (µg)	14,2	8,95	5,9
Standard-abweichung (µg)	4,75	6,4	4,148
Variations-koeffizient (%)	33,56	71,06	70,91
Median	14,6		5,1
Minimum	6,3		1,7
Maximum	20,3		15,5

Tab. 10.8: Einzelmesswerte der Proben in Gruppe 8

Gruppe 9

Proben Nr.	Ca (nmol)	Schmelzmasse (µg) Ca-Methode	Abrasions-tiefen (µm)	Schmelzmasse (µg) Profilometrie
81	55,5	6,9	7,88	5,14
82	138,7	17,3	18,2	11,9
83	113,2	14,2	9,08	5,93
84	87,55	10,9	7,57	4,94
85	99	12,4	9,2	6
86	96,4	12,1	14,2	9,26
87	124,95	15,6	10,5	6,87
88	89,85	11,2	6,69	4,38
89	131,25	16,4	7,6	5,52
90	149,1	18,6	5,16	3,37

Gruppe 9	Ca-Methode	Abrasions-tiefen	Profilo-metrie
Zeit (s)	75	75	75
Mittel-wert (µg)	13,6	9,61	6,3
Standard-abweichung (µg)	3,536	3,9	2,510
Variations-koeffizient (%)	26,06	40,40	39,65
Median	13,3		5,7
Minimum	6,9		3,4
Maximum	18,6		11,9

Tab. 10.9: Einzelmesswerte der Proben in Gruppe 9

Gruppe 10

Proben Nr.	Ca (nmol)	Schmelzmasse (µg) Ca-Methode	Abrasions-tiefen (µm)	Schmelzmasse (µg) Profilometrie
91	141,5	17,7	10,3	6,75
92	245,55	30,7	27,8	17,7
93	141	17,6	9,4	5,71
94	101,15	12,6	10,4	6,77
95	120,5	15,1	17,4	11,37
96	78,45	9,8	4,69	3,06
97	152	19,0	14,1	9,23
98	151,25	18,9	14,3	9,35
99	141,1	17,6	19,7	12,9
100	89,3	11,2	14,5	8,26

Tab. 10.10: Einzelmesswerte der Proben in Gruppe 10

Gruppe 10	Ca-Methode	Abrasions-tiefen	Profilo-metrie
Zeit (s)	90	90	90
Mittel-wert (µg)	17,0	14,26	9,1
Standard-abweichung (µg)	5,821	6,4	4,126
Variations-koeffizient (%)	34,2	44,88	45,29
Median	17,6		8,7
Minimum	9,8		3,1
Maximum	30,7		17,7

Gruppe 11

Proben Nr.	Ca (nmol)	Schmelzmasse (µg) Ca-Methode	Abrasions-tiefen (µm)	Schmelzmasse (µg) Profilometrie
101	153,22	19,2	12,59	8,21
102	106,27	13,3	19,2	12,5
103	142,66	17,8	13,9	9,13
104	211,57	26,4	9,4	6,15
105	149,74	18,7	16,4	10,7
106	120,82	15,1	22,2	14,5
107	143,29	17,9	9,1	5,95
108	142,45	17,8	3,6	2,36
109	67,12	8,4	8,1	5,31
110	27,73	3,5	1,3	8,42

Tab. 10.11: Einzelmesswerte der Proben in Gruppe 11

Gruppe 11	Ca-Methode	Abrasions-tiefen	Profilo-metrie
Zeit (s)	105	105	105
Mittel-wert (µg)	15,8	11,58	8,3
Standard-abweichung (µg)	6,321	6,6	3,604
Variations-koeffizient (%)	39,98	57,06	43,30
Median	17,8		8,3
Minimum	3,5		2,4
Maximum	26,4		14,5

Gruppe 12

Proben Nr.	Ca (nmol)	Schmelzmasse (µg) Ca-Methode	Abrasions-tiefen (µm)	Schmelzmasse (µg) Profilometrie
111	86,25	10,8	8,5	5,55
112	260,9	32,6	25,1	16,4
113	144,9	18,1	16,7	10,9
114	87,05	10,9	10,48	6,83
115	136,45	17,1	2,03	1,32
116	118,4	14,8	13,2	8,59
117	211,45	26,4	7,2	4,72
118	129,75	16.2	8,35	5,44
119	71,95	9,0	9,2	6,01
120	72,05	9,0	2,4	1,58

Tab. 10.12: Einzelmesswerte der Proben in Gruppe 12

Gruppe 12	Ca-Methode	Abrasions-tiefen	Profilo-metrie
Zeit (s)	120	120	120
Mittel-wert (µg)	16,5	10,31	6,7
Standard-abweichung (µg)	7,752	6,8	4,444
Variations-koeffizient (%)	47,01	65,99	65,99
Median	15,5		5,8
Minimum	9,0		1,3
Maximum	32,6		16,4

Gruppe 13

Proben Nr.	Ca (nmol)	Schmelzmasse (µg) Ca-Methode	Abrasions-tiefen (µm)	Schmelzmasse (µg) Profilometrie
121	213,65	26,7	9,2	6,03
122	217,45	27,2	9,3	6,04
123	108,75	13,6	9,66	6,3
124	100,65	12,6	12,6	6,9
125	151,15	18,9	12,6	8,2
126	97,25	12,2	19,6	12,59
127	152,45	19,1	5,42	3,54
128	83,25	10,4	34,8	22,7
129	136,95	17,1	6,98	4,55
130	121,8	15,2	10,7	6,61

Tab. 10.1: Einzelmesswerte der Proben in Gruppe 13

Gruppe 13	Ca-Methode	Abrasions-tiefen	Profilo-metrie
Zeit (s)	135	135	135
Mittel-wert (µg)	17,3	13,08	8,3
Standard-abweichung (µg)	5,832	8,5	5,593
Variations-koeffizient (%)	33,72	65,31	67,01
Median	16,2		6,5
Minimum	10,4		3,5
Maximum	27,2		22,7

Gruppe 14

Proben Nr.	Ca (nmol)	Schmelzmasse (µg) Ca-Methode	Abrasions-tiefen (µm)	Schmelzmasse (µg) Profilometrie
131	111,15	13,9	5,8	12,5
132	268,4	33,6	35,3	3,78
133	162,45	20,3	22,4	23
134	207,8	26,0	9,6	14,6
135	117,25	14,7	17,4	6,28
136	138,45	17,3	10,7	11,4
137	104,85	13,1	16	6,99
138	112,25	14,0	12,1	10,3
139	97,4	12,2		11,9
140	103,9	13,0	19,2	10,5

Gruppe 14	Ca-Methode	Abrasions-tiefen	Profilo-metrie
Zeit (s)	150	150	150
Mittel-wert (µg)	17,8	15.85	11,1
Standard-abweichung (µg)	6,973	9,8	5,283
Variations-koeffizient (%)	39,18	61,5	47,49
Median	14,3		11,0
Minimum	12,2		3,8
Maximum	33,6		23,0

Tab. 10.14: Einzelmesswerte der Proben in Gruppe 14

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Prof. Dr. Thomas Attin, ehem. Leiter der Abteilung Zahnerhaltung, Präventive Zahnheilkunde und Parodontologie des Zentrums Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Medizinischen Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen für die Überlassung des Themas, für die fachliche Betreuung sowie sein geduldiges Zuwarten bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Klaus Becker für seine unermüdliche Unterstützung, seine Ideen und Anregungen während der Durchführung dieser Arbeit, sowie für seine Bereitschaft, auftauchende Fragen und Probleme zu besprechen.

Meiner Schwester Veronika Leipi und meinem Mann Alexander Warkentin danke ich für das Korrekturlesen und für die Betreuung meines zwei Monate alten Sohnes. Danke!

Lebenslauf

Ich wurde am 12. Februar 1978 in Schanatas (Kasachstan) als zweites Kind von Jakob Leipi, Maschinenbauingenieur, und Paulina Leipi geb. Melmann, Buchhalterin, geboren. Im Jahr 1990 wanderte meine Familie in die Bundesrepublik Deutschland ein. Nach einem Umzug der Familie in die Stadt Salzgitter (Niedersachsen) besuchte ich die Jugenddorf-Christophorusschule in Braunschweig (Niedersachsen), wo ich am 24.06.1998 die allgemeine Hochschulreife erworben habe.

Im Oktober 1998 begann ich zunächst das Humanmedizinstudium an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Im April 2001 wechselte ich mein Studienfach und begann das Zahnmedizinstudium an der Georg-August-Universität Göttingen. Das Studium der Zahnmedizin habe ich Dezember 2006 mit dem Staatsexamen erfolgreich abgeschlossen und erhielt die Approbation als Zahnärztin.

Im April 2007 begann meine Zeit als Vorbereitungsassistentin in der Praxis A. Kettenring (Salzgitter), ab Oktober 2007 in der Praxis Dr. Langheim, Dr. Kurtze & Partner (Salzgitter).

Seit März 2007 bin ich verheiratet. Am 27.04.2009 kam mein Sohn Maximilian zur Welt. Momentan befinde ich mich im Erziehungsurlaub.