In-vitro-Untersuchung zur Prävention von Erosionen und Abrasionen des Zahnschmelzes durch CO_2 Laserbestrahlung

Von der Medizinischen Fakultät
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades
einer Doktorin der Zahnmedizin
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Christina Pasaporti

aus

Siegburg

Berichter: Herr Universitätsprofessor
Dr.med.dent. Friedrich Lampert

Herr Universitätsprofessor
Dr.-Ing. Horst Fischer

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Februar 2013

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Zusammenfassung

Mit stetigem Rückgang der Karieshäufigkeit verstärkt sich das Interesse an Erosionen und Abrasionen. Ziel der vorliegenden Arbeit war es zu ermitteln, ob die Behandlung von Schmelz mit dem CO_2 Laser allein oder in Kombination mit Fluorid-Gel seine Widerstandsfähigkeit gegenüber Erosionen und Abrasionen *in vitro* erhöhen, und bereits durch Säure erweichten Schmelz wiedererhärten kann. In Studie 1 wurden 130 humane Schmelzproben in Kunststoff eingebettet, planparallel poliert und in 2 Prozeduren (A und B) eingeteilt. Jede Prozedur bestand aus 5 Gruppen (n = 13), mit verschiedenen Oberflächenbehandlungen: (L) CO_2 Laserbestrahlung (10,6 μm, 0,3 J/cm^2, 5 μs, 226 Hz), (F) Fluorid-Applikation (elmex® gelée, 1,25% F, pH 4,8-6,0, 3 min), (LF) Laserbestrahlung vor Fluorid-Applikation (FL) Fluorid-Applikation vor Laserbestrahlung, (C) unbehandelte Kontrollgruppe. In Prozedur A erfolgte ein Zitronensäure-Angriff (1%, pH 4, 3 min) nach der Oberflächenbehandlung, in Prozedur B davor. Die Mikrohärte des Schmelzes wurde zu Beginn, nach dem Säureangriff und nach der Oberflächenbehandlung gemessen. Zusätzlich wurde die Fluoridaufnahme der Proben mit einer Fluoridanalyse ermittelt. Für die Studie 2 wurden 66 humane Schmelzproben planparallel poliert und in 5 Gruppen (n = 12) eingeteilt. Nach den Oberflächenbehandlungen (wie in Studie 1) wurden die Proben in einem 25-tägigen Prozess 2 Mal täglich (90 s) einem Säureangriff in Sprite® Zero ausgesetzt und anschließend mit einer elektrischen Zahnbürste gebürstet (5 s). Die Tiefe der Schmelzläsionen wurde am Ende der Versuche profilometrisch analysiert. Für die statistische Auswertung wurde in Studie 1 eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung zu einem Signifikanzniveau von 5% durchgeführt, sowie Kontraste formuliert und getestet. Die Daten aus Studie 2 wurden mit einer einfaktoriellen Varianzanalyse und paarweisen Vergleichen analysiert. Die CO_2 Laserbestrahlung (10,6 μm) mit einer Energiedichte von 0,3 J/cm^2 (5 μs, 226 Hz) führte allein oder in Kombination mit einer Fluoridgel-Vorbehandlung, zu einer signifikanten Verringerung der Entstehung von Erosionen und Abrasionen *in vitro*. Des Weiteren konnte durch CO_2 Laserbestrahlung *in vitro* eine signifikante Wiedererhärtung von bereits durch Säure erweichtem Schmelz erreicht werden.

Abstract

Due to the decline in caries prevalence, the attention focused on tooth wear from erosion and abrasion is increasing. The aim of this study was to investigate whether irradiation of dental enamel with a CO_2 laser alone or in combination with fluoride gel can increase the resistance of enamel to erosion and toothbrush abrasion *in vitro,* and further whether laser irradiation is able to reharden erosively altered enamel. In the first study 130 human enamel samples were embedded in resin, grounded flat with silicon carbide abrasive papers and distributed to two procedures (A and B). Each procedure consisted of 5 groups (n = 13) receiving 5 different surface treatments: (L) laser irradiation (10.6 μm, 0.3 J/cm^2, 5 μs, 226 Hz), (F) fluoride application (elmex® gel, 1.25% F, pH 4.9-6.0, 3 min), (LF) laser prior to fluoride, (FL) fluoride prior to laser, (C) non-treated control. In procedure A the samples were submitted to demineralization (1% citric acid, pH 4, 3 min) after the surface treatments and in procedure B prior to the surface treatments. Surface microhardness (SMH) was measured at baseline, after surface treatments and after softening. Fluoride uptake was determined additionally. In the second study 66 human enamel samples were divided into 5 groups (n = 12). After receiving the same surface treatments as in the first study, the samples were submitted to an 25-day erosive-abrasive cycle twice a day comprising demineralization in 100 ml of sprite® zero (90 s) and brushing abrasion with an electric toothbrush immediately afterwards (5 s). Enamel surface loss was determined with a digital profilometer at the end of the experiments. The data of the first study were statistically analysed by two-way repeated measures ANOVA at a 5% significance level and testing of contrasts. The data of study 2 were statistically analysed by one-way ANOVA model and pairwise comparisons of treatments. Irradiation of dental enamel with CO_2 laser (10.6 μm) at 0.3 J/cm^2 (5 μs, 226 Hz) alone or in combination with a pretreatment with amine fluoride gel resulted in a significant reduction of erosive mineral loss due to erosion and abrasion *in vitro*. CO_2 laser irradiation was also able to significantly reharden already softened enamel *in vitro*.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1

2. Literaturübersicht 3

2.1. Erosionen 3

2.2. Abrasionen 8

2.3. Abrasion erodierter Zahnhartsubstanz 10

2.4. Prävalenz von Erosionen und Abrasionen 11

2.5. Die Therapie und Prävention von Erosionen und Abrasionen 14

2.5.1. Prävention von Erosionen mit Fluoriden 16

2.5.2. Prävention von Abrasionen erosiv veränderter Zahnhartsubstanz mit Fluoriden 20

2.5.3. Prävention von Erosionen und Abrasionen mithilfe des CO_2 Lasers 22

3. Zielsetzung 31

4. Material und Methoden 32

4.1. Studie 1 32

4.1.1. Herstellung der Proben 32

4.1.2. Versuchsdurchführung 36

4.1.3. Beschreibung der Gruppen und Oberflächenbehandlungen 37

4.1.4. Härteprüfung nach Knoop 39

4.1.5. Säureangriff mit Zitronensäure 42

4.1.6. Fluoridanalyse 42

4.2. Studie 2 51

4.2.1. Herstellung der Proben 51

4.2.2. Versuchsdurchführung 53

4.3. Statistische Auswertung 60

5. Ergebnisse 62

5.1. Studie 1 62
5.1.1. Prozedur A: Ergebnisse der Mikrohärtemessung 62
5.1.2. Prozedur B: Ergebnisse der Mikrohärtemessung 66
5.1.3. Prozedur A: Ergebnisse der Fluoridanalyse 70
5.1.4. Prozedur B: Ergebnisse der Fluoridanalyse 72
5.2. Studie 2 74
5.2.1. Ergebnisse der profilometrischen Messungen 74
5.2.2. Ergebnisse der dreidimensionalen Konturenmessung 76
6. Diskussion 79
6.1. Studie 1 79
6.1.1. Prozedur A: Diskussion der Ergebnisse der Mikrohärtemessung 79
6.1.2. Prozedur A: Diskussion der Ergebnisse der Fluoridanalyse 85
6.1.3. Prozedur B: Diskussion der Ergebnisse der Mikrohärtemessung 87
6.1.4. Prozedur B: Diskussion der Ergebnisse der Fluoridanalyse 89
6.2. Studie 2: Diskussion der Ergebnisse der Profilmessung 91
6.3. Diskussion Studie 1 versus Studie 2 93
7. Schlußfolgerung 95
8. Literaturverzeichnis XCVII
Auflistung der eigenen Publikationen CXI
Danksagung CXII
Erklärung zur Datenaufbewahrung CXIV

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Histolux-Lichtpolymerisationsgerät (a), EXAKT-Klebepresse (b) ...32
Abb. 2: EXAKT-Mikroschleifsystem (a), Hochglanzpolitur (b) ...34
Abb. 3: Übersichtsaufnahme einer eingebetteten und polierten Schmelzprobe (a), Vergrößerung der Probe mit Darstellung des grün markiertem Schmelzbereiches für die Durchführung der Behandlungen und Mikrohärtemessungen (b) ...35
Abb. 4: CO_2 Laser ...38
Abb. 5: Skizze des Eindringkörpers und einer Indentation (Schumann 1991) (a), Foto des Eindringkörpers (b) ...39
Abb. 6: Skizze einer Probe mit Darstellung der Position der Mikrohärteeindrücke, Indentationen nach dem Säureangriff ①, Indentationen zur Messung der Ausgangsmikrohärte (Baseline) ②, Indentationen nach der Oberflächenbehandlung ③ ...40
Abb. 7: Digitales Lichtmikroskop zur Aufnahme der Indentationen (a), Vermessung einer fotografierten Indentation (b) ...41
Abb. 8: Ionenselektive Fluoridelektrode ...43
Abb. 9: Eichkurve ...44
Abb. 10: Präparierte Probe für die Fluoridanalyse ...47
Abb. 11: Messplatz für die Fluoridanalyse ...50
Abb. 12: Probe mit planparallel geschliffenem und poliertem Schmelzbereich (a), Aufkleber auf dem polierten Schmelzbereich (b), mit Nagellack bedeckter Referenzbereich und exponierter Schmelzbereich (c) ...52
Abb. 13: Sprite® Zero (a), Proben einer Gruppe in einem Behälter (b) ...55
Abb. 14: Erfassung des Probenprofils durch die Tastspitze des Profilometers (a), Profilometer mit Messplatz (b) ...57
Abb. 15: Profilverlauf mit Vermessung der Läsionstiefe, Substanzverlust (µm) ①, Referenzbereich ②, behandelte Schmelzoberfläche ③ ...58
Abb. 16: Lage und Anzahl der Messstrecken des Profilometers, Messstrecke ①, Referenzbereich ②, behandelte Schmelzoberfläche ③ ...59
Abb. 17: Veränderung der KHN im Verlauf der Prozedur A ...62
Abb. 18: Veränderung der KHN im Verlauf der Prozedur B ...67
Abb. 19: Fluoridgehalt der Gruppen aus Prozedur A ...70
Abb. 20: Fluoridgehalt der Gruppen aus Prozedur B ...72
Abb. 21: Substanzverlust (µm) der Schmelzproben durch Erosion und Abrasion ...74
Abb. 22: Topographiemessung einer Probe aus Gruppe C ...76
Abb. 23: Topographiemessung einer Probe aus Gruppe L ...77
Abb. 24: Topographiemessung einer Probe aus Gruppe F ...77
Abb. 25: Topographiemessung einer Probe aus Gruppe LF ...77
Abb. 26: Topographiemessung einer Probe aus Gruppe FL ...78

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Ursachen für Erosionen 4
Tab. 2: *In-vitro*-Studien (1998-2010) und *In-situ*-Studien (2004-2010) zur Prävention von Erosionen und Abrasionen des Zahnschmelzes mit Fluoriden und Laserbestrahlung 27
Tab. 3: Beschreibung des Versuchsablaufes von Prozedur A und B 37
Tab. 4: Laserparameter 38
Tab. 5: Fluoridkonzentration der Eichlösungen in mg/l und entsprechend umgerechnet in mol/l, sowie die kurze Beschreibung der Herstellung dieser Lösungen für die Erstellung der Eichkurve 47
Tab. 6: Darstellung der Gruppenbezeichnungen und der dazugehörigen Oberflächenbehandlung 54
Tab. 7: Mittelwerte der KHN mit Standardabweichung (±) je Messzeitpunkt 63
Tab. 8: p-Werte für den Vergleich der Gruppen untereinander und mit der Kontrollgruppe nach der Oberflächenbehandlung 63
Tab. 9: p-Werte für den Vergleich der Gruppen untereinander und mit der Kontrollgruppe nach dem Säureangriff 64
Tab. 10: p-Werte für den Vergleich der Ausgangsmikrohärte innerhalb einer Gruppe mit derjenigen nach der Oberflächenbehandlung 64
Tab. 11: p-Werte für den Vergleich der Mikrohärte nach der Oberflächenbehandlung mit derjenigen nach dem Säureangriff innerhalb einer Gruppe 65
Tab. 12: p-Werte für den Vergleich der Ausgangsmikrohärte innerhalb einer Gruppe mit derjenigen nach dem Säureangriff 65
Tab. 13: %Reduktion von ∆SMH im Vergleich zur Kontrollgruppe 66
Tab. 14: Mittelwerte der KHN mit Standardabweichung (±) je Messzeitpunkt 66
Tab. 15: p-Werte für den Vergleich der Gruppen untereinander und mit der Kontrollgruppe nach dem Säureangriff 67
Tab. 16: p-Werte für den Vergleich der Gruppen untereinander und mit der Kontrollgruppe nach der Oberflächenbehandlung 68
Tab. 17: p-Werte für den Vergleich der Ausgangsmikrohärte innerhalb einer Gruppe mit derjenigen nach dem Säureangriff 68
Tab. 18: p-Werte für den Vergleich der Mikrohärte nach dem Säureangriff mit derjenigen nach der Oberflächenbehandlung innerhalb einer Gruppe 69
Tab. 19: p-Werte für den Vergleich der Ausgangsmikrohärte innerhalb einer Gruppe mit derjenigen nach der Oberflächenbehandlung 69
Tab. 20: %Reduktion von ∆SMH im Vergleich zur Kontrollgruppe 70
Tab. 21: Mittelwerte und Standardabweichungen (±) des Fluoridgehaltes im Schmelz 71

Tab. 22: p-Werte für den Vergleich des Fluoridgehalts der Gruppen untereinander und mit der Kontrollgruppe....72
Tab. 23: Mittelwerte und Standardabweichungen (±) des Fluoridgehaltes im Schmelz....72
Tab. 24: p-Werte für den Vergleich des Fluoridgehalts der Gruppen untereinander und mit der Kontrollgruppe....73
Tab. 25: Höhe des Substanzverlustes in µm mit Standardabweichung (±)..75
Tab. 26: p-Werte für den Vergleich der Gruppen untereinander und mit der Kontrollgruppe....75
Tab. 27: %Reduktion des Substanzabtrages an Schmelz durch Erosion und Abrasion im Vergleich zur Kontrollgruppe....75

Abkürzungsverzeichnis

µm	Mikrometer
µs	Mikrosekunde
µg	Mikrogramm
µg/cm^2	Mikrogramm pro Quadratzentimeter
°C	Grad Celsius
<	kleiner als
%	Prozent
α	alpha
β	beta
α-TCP	alpha-Trikalziumphosphat
TetCP	Tetrakalziumphosphat
ΔSMH	Differenz der Oberflächen-Mikrohärte
AmF	Aminfluorid
APF	Acidulated phosphate fluoride (saures Phosphatfluorid)
aqua dest.	destilliertes Wasser
$CaCl_2$	Kalziumchlorid
CaF_2	Kalziumfluorid
cm	Zentimeter
cm^2	Quadratzentimeter
cm^{-1}	reziproke Längeneinheit des Absorptionskoeffizienten
CO_2	Kohlendioxid
Er:YAG	Erbium:Yttrium-Aluminium-Garnet
F	Fluorid
g	Gramm
HCl	Chlorwasserstoff
HfF_4	Hafniumtetrafluorid
Hz	Hertz
ISO	Internationale Organisation für Normung
J	Joule
J/cm^2	Joule pro Quadratzentimeter
KHN	Knoop-Härte-Nummer

kg	Kilogramm
KOH	Kaliumhydroxid
l	Liter
M	Molarität, entspricht 1 mol/l
mg	Milligramm
mg/l	Milligramm pro Liter
mJ	Millijoule
ml	Milliliter
mm	Millimeter
mmol	Millimol
mol/l	mol pro Liter
mN	Millinewton
mV	Millivolt
n	Unbekannte Variable
N	Newton
NaCl	Natriumchlorid
NaF	Natriumfluorid
NaOH	Natriumhydroxid
NaOH/l	Natriumhydroxid pro Liter
Nd:YAG	Neodym:Yttrium-Aluminium-Garnet
p	p-Wert
ppm	Parts per million
RDA	Radioactive Dentin Abrasion
REA	Radioactive Enamel Abrasion
s	Sekunde
SMH	Surface Microhardness (Oberflächen-Mikrohärte)
SnF_2	Zinnfluorid
$SnCl_2$	Zinnchlorid
W	Watt
TiF_4	Titaniumtetrafluorid
ZrF_4	Zirkoniumtetrafluorid

1. Einleitung

Während über einen stetigen Rückgang der Karieserfahrung in der Bevölkerung berichtet wird, rückt das Interesse an nicht kariesbedingten Zahnhartsubstanzdefekten, wie Erosionen und Abrasionen, immer mehr in den Vordergrund. Es gibt Anzeichen für einen Anstieg der Prävalenz von Erosionen, die meist mit dem steigenden Konsum saurer Lebensmittel, wie Limonaden oder sauren Früchten, in Verbindung gebracht werden. Der direkte Kontakt von Säuren mit der Zahnhartsubstanz führt zu einer Demineralisation und Erweichung des Schmelzes, die ihn anfälliger für mechanische Belastungen macht. Dies wiederum kann zu einem stärkeren Verlust von Zahnhartsubstanz durch anschließendes Zähneputzen führen.

Da Erosionen, so wie auch die Karies, durch Säuren entstehen, werden Therapieansätze aus der Kariologie oftmals auch auf die Behandlung von Erosionen übertragen. Es darf jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass sich die Ätiologie, die Entstehung und Erscheinungsform von Erosionen von derjenigen der Karies unterscheidet und sie somit auch einer anderen Therapie und anderer präventiver Maßnahmen bedürfen.

Für die Prävention von Erosionen wird heute eine regelmäßige Verwendung hochkonzentrierter Fluoridpräparate wie Fluoridlösungen und -gelees empfohlen. Dabei hängt der Erfolg der Behandlung stark von der Mitarbeit des Patienten ab. Es könnte für manche Patienten schwer sein die Empfehlungen im Alltag aufgrund des höheren zeitlichen und finanziellen Aufwandes umzusetzen. Außerdem wird von einem limitierten präventiven Effekt konventioneller Fluoridpräparte berichtet. Daher verstärkt sich das Interesse an Behandlungsmöglichkeiten, die weder zu aufwendig sind, noch zu stark von der Patienten-Compliance abhängen und zusätzlich noch zu einer höheren Verbesserung der Erosions- beziehungsweise Abrasionsresistenz führen.

In einigen Studien zur Kariesprävention konnte bereits beobachtet werden, dass die Behandlung von Zahnhartsubstanz mit dem Laser die Schmelzlöslichkeit verringern kann. Durch die Verwendung eines CO_2 Lasers (λ = 10,6 µm) mit geringer Energiedichte konnte eine hohe Reduktion der Schmelzlöslichkeit erreicht werden, ohne thermische Schädigungen zu verursachen. Die Erhöhung der Resistenz von Schmelz gegenüber Erosionen

und Abrasionen mithilfe des Lasers wurde bisher jedoch kaum untersucht. In den wenigen vorhandenen Studien zur Prävention von Erosionen mithilfe des Lasers wurde keine hohe Erosionsresistenz erreicht.

In der ersten Studie der vorliegenden Arbeit wurde daher untersucht, ob die Behandlung von humanem Zahnschmelz mit dem CO_2 Laser allein oder in Kombination mit einer Fluoridbehandlung *in vitro* zu einer Erhöhung der Erosionsresistenz führt, und ob die Behandlung bereits von Säure erweichtem Schmelz mit Fluorid und dem Laser den Schmelz wiedererhärten kann. Zusätzlich wurde der Fluoridgehalt der Proben analysiert, um zu ermitteln, ob durch die Laserbestrahlung die Fluoridaufnahme in den Zahnschmelz erhöht wird und ob eine höhere Fluoridkonzentration auch zu einer stärkeren Erosionsresistenz führt.

In einer zweiten *In-vitro*-Studie wurde der Einfluss der Behandlung von humanem Zahnschmelz mit dem CO_2 Laser allein oder in Kombination mit Fluorid-Gel, auf die Resistenz erosiv veränderten Schmelzes gegenüber Bürstabrasionen untersucht.

2. Literaturübersicht

2.1. Erosionen

Erosionen werden definiert als Zahnhartsubstanzverlust, der durch einen chemischen Prozess ohne Bakterienbeteiligung verursacht wird (Zipkin und Mc Clure 1949). Bei diesem chronischen und schmerzlosen Prozess kommt es zu einer Defektbildung durch Auflösung des Schmelzes, die im fortgeschrittenen Stadium auch bis ins Dentin reicht (Schweizer-Hirt et al. 1978), und so zu einer schmerzhaften Hypersensitivität führen kann (Absi et al. 1992).

Erosionen gehören, zusammen mit Abrasionen und Attritionen, zu den nicht-kariesbedingten, chronisch-destruktiven Prozessen, die unter dem Begriff „Zahnabnutzung“ zusammengefasst werden (Imfeld 1996; Bartlett und Shah 2006). Ein weiterer Begriff, der oft im Zusammenhang mit der Zahnabnutzung genannt wird, ist die Abfraktion. Sie ist das typische Bild eines keilförmigen Defektes (Bartlett und Shah 2006) und soll durch Herausbrechen von zervikalem Schmelz aufgrund von Überbelastungen in der Zervikalregion entstehen, wobei hierfür bis heute noch kein eindeutiger klinischer Beweis geliefert werden konnte (Addy und Shellis 2006).

Am chemischen Prozess bei der Entstehung von Erosionen sind Säuren und/ oder Komplexbildner beteiligt, durch die die Zahnhartsubstanz regelrecht abgeätzt wird (ten Cate und Imfeld 1996). Durch den Kontakt mit der Säure kommt es zum Verlust des oberflächlichen Schmelzes und zu einem Zurückbleiben einer demineralisierten und erweichten Schmelzoberfläche, die sehr empfindlich gegenüber mechanischen Kräften reagiert (Eisenburger et al. 2004).

Die Erosion der Zahnhartsubstanz ist eine Erkrankung mit multifaktorieller Genese (Zero 1996). Wie in Tabelle 1 zusammengefasst, wird ätiologisch zwischen intrinsischen und extrinsischen Ursachen unterschieden (ten Cate und Imfeld 1996). Zu den intrinsischen Ursachen für die Entstehung von Erosionen zählt die Magensäure, die bei chronischen Magen-Darm-Störungen oder auch bei mit häufigem Erbrechen einhergehenden psychogenen Essstörungen, wie Bulimia und Anorexia nervosa, in die Mundhöhle gelangt und den Schmelz angreift (Scheutzel 1992). Der pH Wert von Magensäure liegt bei unter 1 und befindet sich damit weit unter dem für Zahnschmelz kritischen Wert

von 5,5 (Jarvinen et al. 1988). Järvinen und Kollegen (1988) untersuchten Patienten mit gastrointestinalen Störungen auf Erosionen hin und kamen zu dem Schluss, dass Patienten mit gastrointestinalem Reflux und Duodenalulkus ein höheres Risiko haben irreversible Zahnschäden durch Erosionen zu bekommen als gesunde Patienten. Die Erosionen waren hier häufig an den Palatinal- und Okklusalflächen der Zähne im Oberkiefer lokalisiert.

Zu den extrinsischen Ursachen zählt der hohe Konsum säurehaltiger Getränke und Lebensmittel, die häufige Einnahme bestimmter Medikamente wie Aspirin beziehungsweise Acetylsalicylsäure (McCracken und O'Neal 2000), Vitamin C Tabletten (Al-Dlaigan et al. 2001a) und auch eine berufsbedingte Säureexposition (ten Bruggen Cate 1968).

Tab. 1: Ursachen für Erosionen

Extrinsische Ursachen	Intrinsische Ursachen
Ess- und Trinkgewohnheiten	Gastrointestinale Dysfunktionen
Medikamente, Vitamin C Präparate	Reflux und Erbrechen
Berufsbedingte Säureexposition	

Es ist schon sehr lange bekannt, dass säurehaltige Lebensmittel und Getränke Erosionen hervorrufen können (Holloway et al. 1958). Ihr übermäßiger Genuss zählt zu dem wichtigsten ätiologischen Faktor in der Entstehung und Progression von Erosionen (Jarvinen et al. 1991; Lussi et al. 2000; Dugmore und Rock 2004a). Heutzutage zählt vor allem auch das steigende Ernährungsbewusstsein sowie die Einhaltung von Diäten und der damit verbundene zunehmende Konsum von potentiell erosiver Nahrung, wie Zitrusfrüchte, Fruchtsäfte und Sportgetränke, zu den Ursachen, die zu einem erhöhten Risiko für den Verlust von Zahnhartsubstanz führen können (Jarvinen et al. 1991; Lussi et al. 1991; Lussi et al. 1993; Milosevic 1997). Der Konsum von Zitrusfrüchten in Deutschland stieg von 30 kg pro Person im Jahr 1980, auf 32 kg im Jahr 1990 an und der Genuss von Fruchtsäften erhöhte sich sogar von 24 Liter auf 40 Liter pro Person (Ganss et al. 2001a). Ganss et al. (1999) untersuchten in einer Studie Patienten, die eine Diät machten, bei der sie zu 95% Rohkost, wie Zitrusfrüchte, zu sich nahmen und stellten fest, dass diese Personen eine signifikant höhere Anzahl an Erosionen aufwiesen als Personen, die sich normal ernährten. Auch kohlensäurehaltige Erfrischungsgetränke,

sogenannte Soft Drinks, sind dafür bekannt, dass sie bei regelmäßigem Konsum den Zahnschmelz angreifen können (Grenby et al. 1989). Der pH Wert solcher Getränke ist üblicherweise sehr niedrig und liegt mit einem Wert von 2,4 bis 3,3 im sauren Bereich (Maupome et al. 1998). Der Konsum von Soft Drinks spielt auch deshalb eine große Rolle in der Ätiologie von Erosionen, weil auch er stark gestiegen ist. Cavadini und Kollegen (2000) verzeichneten einen starken Anstieg des Konsums solcher Getränke in den USA. Aber auch in Deutschland erhöht sich ihr Verzehr. Im Zeitraum von 1980 bis 1990 konnte hier ein Zuwachs des Konsums von 71 Liter auf 91 Liter pro Person ermittelt werden (Ganss et al. 2001a). Weitere Analysen im Zeitraum von 1993 bis 1994 ergaben einen Anstieg des Genusses von Soft Drinks von 85,2 Liter auf 89,8 Liter pro Person und im Jahre 1997 lag der Pro-Kopf-Konsum sogar schon bei 98,7 Liter (Attin et al. 2000a). In England lag im Jahr 2000 der Jahreskonsum bei über 120 Liter pro Kopf, was 50% der gesamten Flüssigkeitszufuhr einer Person bedeutete (Lussi et al. 2004).

Lussi und Kollegen (1993) untersuchten das erosive Potential verschiedener Getränke. Dabei stellte sich heraus, dass das Erfrischungsgetränk Sprite® light (Coca-Cola GmbH, Berlin, Deutschland) eine signifikante Reduktion der Mikrohärte von humanem Schmelz hervorruft. Viele Studien verwendeten Sprite® beziehungsweise Sprite® light für die Bildung von Erosionen (Lussi et al. 1993; Lussi et al. 2000; Wiegand et al. 2010). Attin und Kollegen (1997) beschrieben Sprite® light als ein kohlensäurehaltiges Getränk mit einem pH Wert von 2,91 und einem Zitronensäuregehalt von 18,4 g pro 100 ml, welches mehr titrierbare Säuren enthält, als die meisten anderen Getränke. Zitronensäure ist stark erosiv (Featherstone und Lussi 2006). Die darin enthaltenen Wasserstoff-Ionen können die Kristallstruktur des Schmelzes direkt angreifen und den Schmelz auflösen, indem sie sich mit dem Karbonat oder dem Phosphat-Ion des Kristallgitters verbinden und es so herauslösen. Ferner ist Zitronensäure ein guter Chelator, das heißt sie hat die Fähigkeit Kalzium aufzunehmen. So kann sie das Kalzium aus dem Speichel binden und den Speichel in eine dem Zahnschmelz gegenüber ungesättigte Lösung überführen, wodurch dem Schmelz Mineralien entzogen werden (Meurman und ten Cate 1996).

Bei säurehaltigen Lebensmitteln und Getränken trägt nicht nur der niedrige pH Wert der Säuren zur Entstehung von Erosionen bei, vielmehr sind drei

weitere modifizierende Faktoren daran beteiligt. Sie lassen sich einteilen in chemische und biologische Faktoren, sowie in Faktoren, die das individuelle Verhalten betreffen (Lussi et al. 2004).

Die chemischen Faktoren beziehen sich auf die Eigenschaften der jeweiligen Lebensmittel. Larsen und Nyvad (1999) stellten fest, dass zwischen dem pH Wert eines Getränkes und seinem erosiven Potential ein umgekehrt proportionaler Zusammenhang besteht. Je saurer das Getränk und je niedriger dementsprechend sein pH Wert ist, desto erosiver ist es auch. Das erosive Potential eines sauren Getränkes hängt außerdem von der Pufferkapazität (Gehalt titrierbarer Säuren) des Produktes, von der Stärke der Säure, der Möglichkeit einer Komplexbildung und von der Kalzium-, Phosphat- und Fluoridkonzentration des Produktes ab (Lussi und Jaeggi 2006). Je höher die Pufferkapazität, desto länger braucht der Speichel, um die Säure zu neutralisieren (Lussi et al. 2004). Bei einem Getränk mit hohem Kalzium- und Phosphatgehalt wird der Schmelz nicht angegriffen. So hat zum Beispiel Joghurt einen niedrigen pH Wert, ist jedoch aufgrund seines im Vergleich zu Schmelz höheren Gehaltes an Kalzium und Phosphat übersättigt und daher nicht erosiv (Lussi et al. 2000).

Unter biologischen Faktoren fasst man die Fließrate und Pufferkapazität des Speichels, die Pellikelbildung, die Zahnanatomie, sowie die Zahnstellung zusammen (Lussi et al. 2004). Es wird berichtet, dass Speichel aufgrund seines Mineralgehaltes frisch erodierten Schmelz remineralisieren kann (Amaechi und Higham 2001). *In vitro* und *in situ* wurde gezeigt, dass auch die Bildung eines erworbenen Schmelzoberhäutchens auf dem Zahn die darunterliegende Zahnhartsubstanz in einem gewissen Maße vor einem Säureangriff schützen kann (Meurman und Frank 1991; Amaechi et al. 1999; Hannig und Balz 1999). In einer Studie aus dem Jahr 2008 wurde außerdem festgestellt, dass ein solches an der Zahnoberfläche haftendes Pellikel sogar einen protektiven Effekt gegenüber Bürstabrasionen haben soll (Joiner et al. 2008).

Faktoren, die sich auf das individuelle Verhalten beziehen, sind unter anderem Einflüsse, wie ungewöhnliches Ess- und Trinkverhalten mit hohem Konsum saurer Lebensmittel, bestimmte Trinkgewohnheiten, wie das lange Belassen von sauren Getränken in der Mundhöhle, sowie exzessive Mundhygiene mit abrasiven Zahnpasten (Zero 1996; Moazzez et al. 2000).

In ihrer Erscheinungsform weisen Erosionen im Anfangsstadium an glatten Oberflächen sowie an okklusalen oder inzisalen Flächen eine flächenhafte Demineralisation mit Verlust der Perikymatien und eine klinisch nicht feststellbare Erweichung des Schmelzes auf. Der Schmelz erscheint matt und kann Eindellungen sowie Stufenbildungen aufzeigen (Lussi und Jaeggi 2001; Lussi et al. 2005). Die Ränder der Läsion sind abgerundet (Levine 1973). Anfängliche Läsionen befinden sich koronal der Schmelz-Zement-Grenze und weisen zervikal eine typische intakte marginale Schmelzleiste auf (Lussi et al. 1991). Ursache hierfür könnte die nicht entfernte Plaque am Zahnfleischrand sein, die als schützende Diffusionsbarriere zwischen der Säure und der Zahnhartsubstanz steht (Schweizer-Hirt et al. 1978) oder die Sulkusflüssigkeit, die mit einen pH Wert von 7,5-8 (Stephen et al. 1980) die Säuren im Bereich des Sulkus neutralisieren könnte (Lussi et al. 2004). Bei fortgeschrittenen Erosionen kommt es zu weiterem Verlust von Zahnhartsubstanz und einer Freilegung des Dentins. In extremen Fällen kann sogar die Pulpa exponiert sein (Eccles 1979). Abrasive Prozesse, wie zu hoher Druck beim Zähneputzen oder eine zu abrasive Zahnpasta, beschleunigen den Verlust von Zahnhartsubstanz in den erodierten Bereichen (Schweizer-Hirt et al. 1978). Bei fortgeschrittenen okklusalen Erosionen kommt es zur Abflachung der Höcker und Bildung von Gruben, die bis in das Dentin reichen können (Lussi und Jaeggi 2001). Füllungen können durch den Verlust der sie umgebenden Zahnhartsubstanz über das Niveau des Zahnes hinausragen (Levine 1973) und in ganz ernsten Fällen ist die okklusale Morphologie des Zahnes nicht mehr zu erkennen (Ganss und Lussi 2006).

Erosionen müssen von keilförmigen Defekten unterschieden werden, da aufgrund der unterschiedlichen Ätiologie auch unterschiedliche präventive und therapeutische Maßnahmen durchgeführt werden müssen. Keilförmige Defekte sind entweder auf oder apikal der Schmelz-Zement-Grenze lokalisiert, haben scharfkantige Begrenzungen (Ganss und Lussi 2006) und weisen keine intakte marginale Schmelzleiste auf (Lussi et al. 2005).

2.2. Abrasionen

Wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, lassen sich Erosionen, Abrasionen und die Attrition unter der Bezeichnung „Zahnabnutzung“ ,im Englischen „Tooth Wear“ genannt, zusammenfassen (Bartlett und Shah 2006). Die Abrasion wird definiert als ein durch mechanische Prozesse verursachter, pathologischer Verlust von Zahnhartsubstanz (Levitch et al. 1994). Anders als bei Attritionen entstehen Abrasionen nicht durch das Aneinanderreiben antagonistischer Zähne, sondern durch Fremdkörperabrieb und können je nach ätiologischem Faktor diffus oder lokalisiert auftreten (Imfeld 1996). Als diffus wird ein kaufunktioneller Abrieb bezeichnet, der bei der Zerkleinerung von Nahrung entstehen kann und unter lokalisiertem Abrieb versteht man den Abrieb von Zahnhartsubstanz durch Zahnbürste und Zahnpasta (Schweizer-Hirt et al. 1978). Auch bestimmte Angewohnheiten, sogenannte „Habits“, wie das Kauen und Beißen auf Gegenständen (z. B. Kugelschreiber, Fingernägel) oder ein berufsbedingter Kontakt mit abrasiven Staubpartikeln (z. B. Bergarbeiter), können Abrasionen verursachen (Meyer-Lueckel und Kielbassa 2002). In ihrer Erscheinungsform sind Abrasionen flache und glänzende Bereiche mit deutlichen Rändern, wobei zum Teil entsprechende Spuren an den Antagonisten zu erkennen sind (Lussi und Jaeggi 2008).

Das Zähneputzen ist eine der am weitesten verbreiteten Methoden, um Mundhygiene zu betreiben (Slop et al. 1983) und kann ein wichtiger Faktor in der Entstehung von Abrasionen, vor allem bei erosiv geschädigten Zähnen, sein (Schweizer-Hirt et al. 1978). Je nachdem wie exzessiv die Mundhygiene betrieben wird, das heißt wie viel Kraft, wie viel Zeit und welche Zahnputztechnik angewendet wird, und je nachdem wie hoch die Abrasivität der Zahnpasta ist, kann es zu einer unterschiedlich hohen Abnutzung der Zahnhartsubstanz kommen (Imfeld 1996).

Die Abrasivität von Zahnpasta wird durch den RDA-Wert (Radioactive Dentin Abrasion) beziehungsweise durch den REA-Wert (Radioactive Enamel Abrasion) angegeben (Hefferren 1976; Barbakow et al. 1989). Je höher diese Werte sind, desto größer ist die Abrasivität. Wiegand und Kollegen (2008b) beobachteten, dass die Abrasion von erodiertem Schmelz hauptsächlich vom REA-Wert der Zahnpasta abhängt. Ein hoher REA-Wert erzeugte mehr Abrasionen. Die Härte der Zahnbürste konnte den Prozess zwar modifizieren,

spielte jedoch eher eine nebensächliche Rolle. Ähnliche Ergebnisse lieferte auch eine Studie zur Abrasion erodierten Dentins, in der die Höhe des Substanzabtrages auch hauptsächlich von der Höhe des RDA-Wertes abhing. Jedoch nahm hier mit der Abnahme des Durchmessers der Filamente die Abrasion zu (Wiegand et al. 2009a). Dyer (2000) verwendete Proben aus Acryl und handelsübliche Zahnpasta, um die Entstehung von Bürstabrasionen zu untersuchen und stellte fest, dass weiche Zahnbürsten signifikant mehr Abrasionen verursachen, als harte. Er vermutete einen Zusammenhang darin, dass die schmaleren und dichteren Borsten weicher Zahnbürsten mehr Zahnpasta aufnehmen können und die höhere Biegsamkeit der Borsten einen größeren Kontakt mit der Zahnoberfläche ermöglicht. Jedoch wird der Gebrauch von harten Zahnbürsten, aufgrund der Gefahr das Zahnfleisch zu verletzen, auch nicht empfohlen (Dyer et al. 2000).

In manchen Studien wird berichtet, dass das Bürsten von gesunder Zahnhartsubstanz ohne Zahnpasta kaum einen Effekt auf die Entstehung von Abrasionen im Schmelz oder Dentin hat (Davis und Winter 1980; Absi et al. 1992) und dass somit die Abrasionen das Resultat der Zahnpasta sind. Die Zahnbürste sei nur ein Hilfsmittel mit dem die abrasiven Putzkörper der Zahnpasta hin und her bewegt würden (Dyer et al. 2000). Kuroiwa et al. (1993) behaupteten sogar, dass das Zähneputzen ohne Zahnpasta zur Bildung einer protektiven Membran aus Mineralien auf der Schmelzoberfläche führt, die den Zahn vor Karies und Säuren schützen kann. In einem Übersichtsartikel fassten auch Addy und Kollegen (2003) zusammen, dass Zähneputzen ohne Zahnpasta keinen negativen Effekt auf Schmelz und einen nur geringen Effekt auf Dentin hat. Sie berichteten auch darüber, dass sogar viele Zahnpasten kaum einen Effekt auf die Zahnhartsubstanz haben, und dass es im Laufe eines Lebens bei richtiger Zahnputztechnik und einer Zahnpasta mit geringer Abrasivität zu fast keiner Abnutzung kommen würde. Wülknitz (1997) untersuchte Zahnpasten auf dem europäischen Markt. Dabei beobachtete er einen Trend, der in Richtung geringerer Abrasivität bei gleichbleibender Effizienz in der Säuberung der Zähne geht. Zudem lag die Abrasivität der Zahnpasten meist weit unter den nach ISO-Normen festgelegten Grenzwerten. Dennoch kann das Zähneputzen den Verlust von Zahnhartsubstanz dramatisch erhöhen, und zwar dann, wenn exzessiv geputzt wird, oder das Zähneputzen unmittelbar nach erosiven Angriffen erfolgt (Addy und Hunter 2003).

2.3. Abrasion erodierter Zahnhartsubstanz

Es ist schon lange bekannt, dass erodierter Schmelz und erodiertes Dentin anfälliger für Abrasionen sind, als Zahnhartsubstanz, die nicht mit Säure in Kontakt gekommen ist (Schweizer-Hirt et al. 1978; Davis und Winter 1980). Zahnschmelz reagiert sehr empfindlich auf Säureangriffe und bereits ein kurzer Kontakt von Schmelz mit manchen Säuren führt zu seiner Erweichung. Zitronensaft führte in einer Studie von Aeschbacher (1967) schon nach einer Expositionszeit von 2,5 Minuten zu einer Reduktion der Mikrohärte des Schmelzes um 21%. Die erweichte oberflächliche Schmelzschicht ist sehr empfindlich gegenüber mechanischen Belastungen und kann schon durch milde abrasive Kräfte entfernt werden (Eisenburger et al. 2003).

Attin und Kollegen (1997) untersuchten die Beziehung zwischen der Mikrohärte von bovinem Zahnschmelz und der Zahnabnutzung. Nach einem 1-, 5- oder 15-minütigen Säureangriff mit einem sauren Getränk (Sprite® light) wurden die Proben mit einem Zahnpasta-Speichel-Gemisch in einer Bürstmaschine gebürstet. Je länger der vorherige Säureangriff gedauert hatte, desto mehr reduzierte sich die Mikrohärte und je geringer die Mikrohärte war, desto tiefer waren auch die Bürstabrasionen. Eisenburger et al. (2003) simulierten *in vitro* das Zähneputzen oder Kauen vor und während eines erosiven Angriffes. Die profilometrische Analyse ergab hierbei einen signifikant höheren Zahnhartsubstanzverlust bei einer Kombination erosiver und abrasiver Prozesse. Simultan verlaufende erosive und abrasive Angriffe führten sogar zu 50% mehr Zahnabnutzung, als zeitlich versetzte. Das Kauen von Lebensmitteln, die sauer und zugleich abrasiv sind, könnte demnach den Zahnhartsubstanzverlust erhöhen (Eisenburger et al. 2003).

Bei derartigen Prozessen kommt *in vivo* der protektive Effekt des Speichels hinzu. Speichel hat mehrere schützende Eigenschaften, die bei einem Säureangriff eine wichtige Rolle spielen können. Dies sind die Verdünnung der Säure durch den Speichelfluss, die Neutralisation von Säuren, die Verminderung der Auflösung von Zahnhartsubstanz durch den hohen Gehalt an Kalzium- und Phosphat-Ionen, die Repräzipitation von Mineralien während der Remineralisation einer erosiven Läsion und die Bildung eines vor Säure schützenden Pellikels (Meurman und ten Cate 1996).

Es wird häufig empfohlen nach dem Verzehr saurer Lebensmittel und Getränke eine gewisse Zeit mit dem Zähneputzen zu warten, da eine Wartezeit zu einer Remineralisation von Schmelz und Dentin mithilfe des Speichels führen kann (Jaeggi und Lussi 1999; Attin et al. 2001a; Attin et al. 2004). In einer 21-tägigen *In-situ*-Studie von Attin et al. (2001b) zu diesem Thema, wurden Schmelzproben zwei Mal täglich in einem Abstand von vier Stunden für 90 Sekunden in Sprite® light einem erosiven Angriff unterzogen. Die Proben wurden entweder sofort nach dem Säureangriff mit einer geringen Menge Zahnpasta und einer elektrischen Zahnbürste gebürstet, oder erst nach einer Remineralisationszeit von 10, 20, 30 oder 60 Minuten. In dieser Zeit wurde die Apparatur mit den Proben im Mund getragen. Mit dem Anstieg der Remineralisationszeit erhöhte sich auch die Abrasionsresistenz des Schmelzes. Eine Remineralisation von 60 Minuten ergab 31% weniger Substanzverlust, als sofortiges Zähneputzen. Dennoch war die Abrasion des erodierten Schmelzes nach dieser Zeit höher, als bei denjenigen Proben, die dem Säureangriff ausgesetzt, jedoch nicht gebürsteten wurden.

2.4. Prävalenz von Erosionen und Abrasionen

In der vierten deutschen Mundgesundheitsstudie aus dem Jahr 2006 wurde über einen Rückgang der Karieserfahrung berichtet (Micheelis und Schiffner 2006). Dieses Ergebnis ist dem gesteigerten Gesundheitsbewusstsein in der Bevölkerung und den erfolgreichen Maßnahmen zur Bekämpfung von Karies durch Verwendung von Fluoriden zu verdanken, deren kariespräventiver Effekt unumstritten ist (Ten Cate 2004).

Während ein stetiger Rückgang in der Prävalenz und Inzidenz von Karies zu verzeichnen ist, steigt im Praxisalltag das Interesse an nicht kariesbedingten Zahnhartsubstanzdefekten wie Erosionen und Abrasionen, da immer mehr Patienten heutzutage davon betroffen zu sein scheinen (Lussi et al. 1992; ten Cate und Imfeld 1996; de Carvalho Sales-Peres et al. 2008). Es gibt einige Belege die zeigen, dass die Prävalenz von Zahnabnutzungen steigt, jedoch sind Studien zur Prävalenz erosiver Zahnhartsubstanzverluste in der deutschen Bevölkerung selten. Auch die Vergleichbarkeit von Studien ist aufgrund der Verwendung einer Vielzahl verschiedener Indizes erschwert (Jaeggi und Lussi

2006). Oft wird der gestiegene Konsum von säurehaltigen Lebensmitteln und Getränken für den Anstieg der Prävalenz von Erosionen verantwortlich gemacht (Nunn 1996; Ganss et al. 2001a). Auch Lussi und Kollegen (1991) erkannten einen Zusammenhang zwischen dem Konsum von Fruchtsäften sowie Zitrusfrüchten und der Entstehung von Erosionen. In dieser Studie wurde die Prävalenz von Erosionen in der schweizerischen Bevölkerung bei einer Altersgruppe von 26 bis 30 Jahren und 46 bis 50 Jahren untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass Erosionen bei den untersuchten Personen in diesen Altersgruppen tatsächlich nicht selten waren und mit zunehmendem Alter sogar zunahmen. Außerdem wurde beobachtet, dass Erosionen und Abrasionen (z. B. Bürstabrasionen) vor allem mit dem Alter sowie durch fortwährenden Konsum saurer Lebensmittel und durch zu häufiges Zähneputzen immer weiter fortschreiten können (Lussi und Schaffner 2000). Auch in einer deutschen Prävalenzstudie konnte festgestellt werden, dass mit zunehmenden Alter die Prävalenz nicht kariesbedingter Zahnhartsubstanzdefekte steigt (Schiffner et al. 2002).

Auch bei jüngeren Patienten konnten Zahnabnutzungen beobachtet werden. Jeaggi et al. (1999) untersuchten die Prävalenz von Erosionen und keilförmigen Defekten bei 417 Rekruten der schweizerischen Armee im Alter zwischen 19 und 25 Jahren. Läsionen waren zwar vorhanden, jedoch noch nicht weit fortgeschritten. Mit 82% waren okklusale Erosionen ohne Dentinbeteiligung am häufigsten. Aber auch okklusale Erosionen mit Dentinbeteiligung sowie bukkale Erosionen, vor allem an den Eckzähnen und Prämolaren, kamen vor. Orale Erosionen traten dahingegen nur sehr selten auf. Weiterhin hatten 20% der Untersuchten ein oder mehrere initiale keilförmige Defekte. Jaeggi und Kollegen (1999) merkten noch an, dass trotz der Tatsache, dass die beobachteten Erosionen und keilförmigen Defekte bei den Jugendlichen noch nicht weit fortgeschritten waren, schon früh mit den präventiven Maßnahmen zur Vorbeugung einer Progression der Läsionen begonnen werden solle, um die Zähne langfristig erhalten zu können.

Es wird berichtet, dass Erosionen in Deutschland ein signifikantes, aber momentan noch kein ernsthaftes Problem für die allgemeine Zahngesundheit von Jugendlichen darstellen (Ganss und Schlueter 2010). Bemerkenswert sind jedoch die Ergebnisse der Querschnittsstudie von Ganss und Kollegen (2001a). Hier wurde die Prävalenz und Inzidenz von Erosionen bei Kindern und

Jugendlichen in Deutschland mit einem durchschnittlichen Alter von 11,4 ± 3.3 Jahren untersucht. Eintausend kieferorthopädische Schaumodelle aus einem Zeitraum von 1977 bis 1999 wurden in die Studie einbezogen. Im Zeitraum von 1977 bis 1989 hatten 6,3% der Probanden Erosionen an mindestens einem Zahn. Im Zeitraum von 1990 bis 1999 dagegen erhöhte sich dieser Wert um mehr als das Doppelte auf 15,1%. Vor allem die Okklusalflächen der ersten Unterkiefermolaren waren betroffen. Der signifikante Anstieg der Prävalenz im Verlauf dieser zwanzig Jahre war auch bei Milchzähnen beobachtbar.

Auffällig ist weiterhin, dass in vielen Studien ein signifikanter Unterschied zwischen der Häufigkeit von Erosionen bei Jungen und Mädchen zu erkennen ist (Dugmore und Rock 2004b). Auch sozioökonomische Unterschiede lassen sich in vielen Studien feststellen. So konnte bei der Untersuchung von 418 Schulkindern im Alter von 14 Jahren in einer britischen Studie gezeigt werden, dass bereits 48% der Kinder von geringen, 51% von mäßigen und 1% der Kinder von schweren Erosionen betroffen waren. Die Jungen hatten hier signifikant mehr Erosionen, als die Mädchen. Außerdem traten die Erosionen bei Kindern aus sozioökonomisch schlechteren Verhältnissen häufiger auf (Al-Dlaigan et al. 2001b). Die Korrelation zwischen Erosionen und dem Konsum saurer Lebensmittel konnte in einem zweiten Teil dieser Studie verdeutlicht werden. Hier stellte sich heraus, dass 10 bis 13% der Kinder mehr als 22 Mal pro Woche Limonaden und andere kohlensäurehaltige Getränke zu sich nahmen (Al-Dlaigan et al. 2001a). Im Gegensatz zu Al-Dlaigan (2001b) beobachtete Bardolia (2010) bei seiner Untersuchung von 13- bis 14-jährigen Kindern auf der Isle of Men, dass sogar weitaus mehr Kinder von schweren Erosionen mit Dentinbeteiligung betroffen sind. 20% der 629 untersuchten Kinder hatten solche Erosionen an den okklusalen, palatinalen und labialen Zahnflächen, wobei auch die Jungen stärker betroffen waren, als die Mädchen. Der Anstieg in der Häufigkeit von Erosionen in England wird in einer Studie von Dugmore und Rock (2003) deutlich. Sie stellten fest, dass schon innerhalb eines Zeitraumes von zwei Jahren die Prävalenz von Erosionen bei anfangs 12-jährigen Kindern in Leicestershire (England) von 56,3% auf 64,1% angestiegen ist, wobei wieder Jungen stärker betroffen waren als Mädchen. El Aidi et al. (2009) untersuchten in einem Zeitraum von drei Jahren 656 Kinder aus Holland. Auch hier konnte ein Anstieg in der Prävalenz von Erosionen festgestellt werden. Von den anfangs 11-jährigen hatten 30,4% Erosionen. Nach drei

Jahren hatte sich dieser Wert auf 44,2% erhöht. Ausgeprägter war dieser Anstieg bei Erosionen mit Dentinbeteiligung. Von zu Beginn 1,8%, erhöhte sich die Häufigkeit sogar auf 23,8%.

2.5. Die Therapie und Prävention von Erosionen und Abrasionen

Die Erosion von Zahnhartsubstanz ist eine Erkrankung mit multifaktorieller Genese (Zero 1996). Es ist daher wichtig, erosive Läsionen frühzeitig zu erkennen und die Ursache zu ermitteln, um gezielt Maßnahmen für die Therapie beziehungsweise für die Vermeidung einer Progression der Zahnhartsubstanzdefekte treffen zu können. Die Therapie von Erosionen wird eingeteilt in eine kausale und eine symptomatische Therapie. Wenn ausreichende kausale und symptomatische Maßnahmen ergriffen werden, können säurebedingte Zahnhartsubstanzverluste sogar zum Stillstand kommen (Schmidt et al. 2003).

Ziel der kausalen Therapie ist es, die Säureexposition zu identifizieren und zu reduzieren. Um die Ursache für die Entstehung der Erosionen festzustellen, muss eine sorgfältige Anamnese durchgeführt werden. So kann auch ermittelt werden, ob es sich um exogene oder endogene Säuren handelt oder ob weitere prädisponierende Faktoren, wie zum Beispiel die Einnahme von bestimmten Medikamenten mit erosivem Potenzial oder von Medikamenten, die zu einer Reduktion des Speichelflusses führen, bestehen. Auch ein fünftägiges Ernährungsprotokoll kann hier hilfreich sein, um die Frequenz, Art und Menge der Säurezufuhr zu ermitteln (Lussi 1996). Patienten, die Erosionen aufgrund von extrinsischen Ursachen erworben haben, wie beispielsweise durch einen zu hohen Konsum saurer Lebensmittel, sollten ihren Konsum drastisch reduzieren und saure Nahrung nicht über den Tag verteilt, sondern nur während der Hauptmahlzeiten zu sich nehmen (Lussi et al. 2004). Um die Kontaktzeit zwischen der Säure und den Zähnen zu reduzieren, kann es auch vorteilhaft sein, saure Getränke mit einem Strohhalm zu trinken (Edwards et al. 1998). Außerdem sollten sie auf weniger erosive Lebensmittel zurückgreifen, wie zum Beispiel auf Fruchtsäfte oder Limonaden mit einem hohen Kalziumzusatz, da dieser das erosive Potenzial des Getränks signifikant reduzieren kann (Larsen und Nyvad 1999; Attin et al. 2005). Werden Erosionen durch endogene Säuren

verursacht, die bei gastrointestinalen Dysfunktionen oder Bulimia und Anorexia nervosa vorkommen, dann bedarf dies einer allgemeinmedizinischen oder psychologischen Betreuung des Patienten.

Ist eine kausale Therapie nicht möglich, das heißt die erosive Noxe ist nicht identifizierbar oder sie kann, wie im Falle von Essstörungen, nicht vermieden werden, dann ist eine symptomatische Therapie indiziert (Schmidt et al. 2003). Ziel der symptomatischen Therapie ist es, den Substanzverlust erosiv veränderter Zahnhartsubstanz durch mechanische Abnutzung zu verringern und eine erosive Demineralisation durch lokale Fluoridierungsmaßnahmen zu reduzieren (Schmidt et al. 2003). Es ist bereits bekannt, dass frisch erodierter Schmelz empfindlicher auf mechanische Belastungen reagiert (Davis und Winter 1980). Das Zähneputzen sofort nach der Aufnahme saurer Lebensmittel sollte daher vermieden werden. Hier wird eine Wartezeit von einer Stunde empfohlen, um die Abrasion erodierter Zahnhartsubstanz zu verringern (Attin et al. 2001b). Andere Autoren wiederum halten eine Wartezeit für unnötig, da sie nur unwesentlich vor einem Zahnhartsubstanzverlust schützen könne (Ganss et al. 2007a). Betroffene Patienten sollen weiterhin eine fluoridhaltige Zahnpasta benutzen. Magalhaes et al. (2007) beobachteten eine signifikante Verbesserung in der Abrasionsresistenz erodierter Schmelzproben durch fluoridhaltige Zahnpasta um 21%, verglichen mit Zahnpasta ohne Fluorid. Bezüglich der Abrasivität von Zahnpasta erläuterten Wiegand et al. (2008b), dass eine höhere Abrasivität auch zu einem größeren Zahnhartsubstanzverlust führt. Somit ist eine Zahnpasta mit geringer Abrasivität das Mittel der Wahl. Außerdem wird dazu geraten beim Zähneputzen nicht zu viel Kraft auszuüben, da der Zahnhartsubstanzverlust von auch nur kurz erodiertem Schmelz mit zunehmendem Anpressdruck steigt (Wiegand et al. 2007). Die Ergebnisse einer Untersuchung, in der die Erzeugung von Abrasionen auf erodiertem Schmelz durch verschiedene Zahnbürsten getestet wurde, deuteten auf einen höheren Schmelzverlust durch elektrische Zahnbürsten im Vergleich zu Handzahnbürsten (Wiegand et al. 2006). Daher könnte es von Vorteil sein, wenn Risikopatienten eine Handzahnbürste verwendeten.

2.5.1. Prävention von Erosionen mit Fluoriden

In der Kariesprävention nimmt die Fluoridierung der Zahnhartsubstanz schon lange eine zentrale Rolle ein. Der kariostatische Effekt von Fluoriden wurde schon oft diskutiert und ist heutzutage allgemein akzeptiert. Fluoride können die Remineralisation von Zahnhartsubstanzen fördern und die Demineralisation unter leicht sauren Bedingungen, wie sie bei der Kariesbildung vorliegen, reduzieren (Rolla 1988). Bei lokaler Applikation von Fluoridpräparaten, die Amin- oder Natriumfluorid enthalten, lagern sich Kalziumfluorid (CaF_2) beziehungsweise kalziumfluorid-ähnliche Präzipitate auf der Zahnoberfläche ab (Petzold 2001). Man spricht von kalziumfluorid-ähnlichen Präzipitaten, da es sich bei diesem Präzipitat nicht um reines Kalziumfluorid handelt, sondern auch andere Bestandteile, wie Phosphat, enthalten sind (Christoffersen et al. 1988). Die Bildung dieser CaF_2-ähnlichen Präzipitate hängt von der Dauer der Fluorid-Applikation, der Fluoridkonzentration und vom pH Wert des Fluoridpräparates ab (Ogaard 2001). Das Auftragen eines sauren Fluoridpräparates erhöht die Löslichkeit des Schmelzes und führt damit zu einer Kalziumfreisetzung, wodurch in einer Reaktion des Fluorids mit dem Kalzium, Kalziumfluorid-Präzipitate entstehen (Larsen und Jensen 1994; Larsen und Richards 2001). Diese Präzipitate dienen als Fluoridreservoir, welches während eines pH Wert-Abfalls bei einem kariogenen Prozess Kalzium und Fluorid freisetzt (Ogaard et al. 1988). Dadurch wird eine weitere Demineralisation verhindert und die Remineralisation gefördert (Ogaard 2001). Es kommt zur Repräzipitation von Mineralien in Form von Fluorapatit oder fluoridiertem Hydroxylapatit (Rolla et al. 1993).

Über den Wirkungsmechanismus von Fluoriden unter erosiven Bedingungen ist dagegen nur wenig bekannt. Auch hier wird die Wirkung von Natriumfluorid (NaF), Aminfluorid (AmF) und saurem Phosphatfluorid (APF) mit der Präzipitation von CaF_2-ähnlichem Material in Verbindung gebracht. Die Oberfläche einer Erosion ist durch eine wenige Mikrometer tiefe demineralisierte Zone mit klassischem Ätzmuster gekennzeichnet, worauf Mineral durchaus präzipitieren kann (Ganss und Schlueter 2010). Eine Remineralisation im Sinne einer Restitutio ad integrum, wie bei der Remineralisation einer Initialkaries, ist hier jedoch nicht möglich (Schmidt et al. 2003). Ganss et al. (2001b) vermuteten, dass die CaF_2-Schicht wie eine

Schutzschicht fungiert, die während eines Säureangriffs zuerst aufgelöst werden muss, bevor die darunter liegende Zahnhartsubstanz angegriffen werden kann. In dieser Studie von Ganss et al. (2001b) führte eine intensive Fluoridierung mit fluoridhaltiger Zahnpasta (NaF), einer fluoridhaltigen Mundspülung (AmF/SnF_2) und zusätzlich noch mit einem Fluorid-Gel (AmF/NaF) zu einer Reduktion des Schmelzverlustes durch Säure um 21%, verglichen mit der Kontrollgruppe. Die alleinige Applikation von fluoridhaltiger Zahnpasta (NaF) reduzierte den Schmelzverlust um 13%. Im Dentin konnten Erosionen durch die Intensiv-Fluoridierung sogar nahezu komplett verhindert werden. Dennoch hatten diese Arten der Fluoridierung insgesamt nur einen geringen Effekt auf die Vermeidung der Progression von Erosionen, so dass Ganss und Kollegen zu dem Schluss kamen, dass die Prävention von Erosionen mit AmF und NaF einen nur limitierten Effekt hat, vor allem *in vitro* (Ganss et al. 2001b). Der Effekt von NaF- und AmF-Präparaten in der Prävention und Verminderung der Progression von Erosionen wird daher umstritten diskutiert, nicht zuletzt deshalb, weil sich die CaF_2-ähnliche Deckschicht *in vitro* unter stark erosiven Bedingungen auflösen kann (Ganss et al. 2007b).

Es wird berichtet, dass besonders hochkonzentrierte und saure NaF- sowie AmF-Präparate die Reduktion von Erosionen effektiv unterstützen (Lennon et al. 2006; Schlueter et al. 2007). Als Grund dafür wird genannt, dass ein niedriger pH Wert und eine hohe Fluoridkonzentration CaF_2 bildender Fluoridpräparate zur Bildung einer dickeren CaF_2-Schicht auf der Zahnoberfläche führt (Ogaard et al. 1988; Saxegaard und Rolla 1988). Lennon (2006) behandelte bovine Schmelzproben in einem zweiwöchigen Experiment zwei Mal täglich für 120 Sekunden mit elmex® gelée (12,500 ppm F, AmF, pH 4,8) und vollzog sechs Mal täglich für 30 Sekunden einen Säureangriff mit Zitronensäure (1%, pH 2,3). Er beobachtete eine Erosionsresistenz in den mit saurem und hochkonzentriertem Fluorid-Gel behandelten Proben, die um 29% höher war, als bei der Kontrollgruppe. Dabei vermutete er, ebenso wie Ganss und Kollegen (2001b), dass diese Art von Fluorid-Gel die Bildung der schützenden CaF_2-Schicht auf der Schmelzoberfläche induziert.

In neueren Untersuchungen wurden neben den konventionellen Fluoridpräparaten (NaF und AmF) zusätzlich sogenannte Tetrafluoride, wie Titaniumtetrafluorid (TiF_4), Zirkoniumtetrafluorid (ZrF_4) oder Hafniumtetrafluorid

(HfF_4), auf ihren präventiven Effekt hin untersucht, und dies meist mit positiven Ergebnissen bei Titaniumtetrafluorid (TiF_4). In einem zyklischen De- und Remineralisationsmodell prüften Schlueter und Kollegen (2007) den Effekt von TiF_4- und NaF-Lösungen mit einem pH Wert von 1,2 auf die Progression von Erosionen im Schmelz und Dentin. Beide Fluoridlösungen reduzierten den Schmelzverlust deutlich. Im Vergleich zur Kontrollgruppe erzeugte die NaF-Lösung eine Reduktion um 49% und die TiF_4-Lösung sogar eine Reduktion um knapp 72%. Auch im Dentin war bei beiden Lösungen ein ähnlich hoher protektiver Effekt zu erkennen. Anders als bei CaF_2-ähnlichem Material haben die Präzipitate von TiF_4 keine globuläre, sondern eine glatte Struktur (Mundorff et al. 1972) und sollen relativ stabil gegenüber chemischen und mechanischen Einflüssen sein (Buyukyilmaz et al. 1997).

Wiegand (2009c) verglich ebenfalls die Effekte von TiF_4- und NaF-Lösungen. Der pH Wert der Lösungen betrug entweder 1,2 oder 3,5. Die bovinen Schmelzproben wurden mit den Fluoriden vorbehandelt, dann in HCl (Chlorwasserstoff) einem Säureangriff ausgesetzt und der Schmelzverlust anschließend profilometrisch gemessen. Auch in dieser Studie war der protektive Effekt der TiF_4-Lösung größer, als derjenige der NaF-Lösung. Der pH Wert der Lösungen spielte eine wichtige Rolle, da nur der niedrige pH Wert von 1,2 einen positiven Einfluss auf die Erosionsresistenz hatte. Bei den Proben, die mit der TiF_4-Lösung (pH 1,2) vorbehandelt wurden, war kein Schmelzverlust nachweisbar. Hove et al. (2006) beobachteten eine Verbesserung von 88% in der Erosionsresistenz von durch HCl erodierten humanen Schmelzproben mithilfe einer TiF_4-Lösung. Eine Behandlung mit Zinnfluorid (SnF_2) ergab eine Verbesserung von 50%. NaF erreichte mit 25% die geringste Verbesserung in der Erosionsresistenz.

Für TiF_4 konnte jedoch nicht immer ein positiver Effekt nachgewiesen werden. Unter stark erosiven Bedingungen *in vitro* verlor es seine Effektivität (Schlueter et al. 2009a) und in einer *In-situ*-Studie gelang es nicht, die durch ein Cola-Getränk induzierte Bildung erosiver Läsionen in humanen Schmelzproben mit einer TiF_4-Lösung (pH 1,2) zu reduzieren (Magalhaes et al. 2008b).

Wie bereits bei der Erläuterung der Studie von Hove (2006) erwähnt, wurde des Weiteren der Effekt von zinnhaltigen Präparaten auf die Prävention von Erosionen erforscht. Hierbei konnten meist positive und bessere Ergebnisse erzielt werden, als mit NaF- oder AmF-Präparaten. Ganss et al. (2008)

untersuchten den anti-erosiven Effekt von Zinnchlorid ($SnCl_2$), Zinnfluorid (SnF_2), AmF und NaF in humanem Schmelz *in vitro*. Die Lösungen mit SnF_2 erwiesen sich hier als effektiver gegen die Entstehung von Erosionen, als Lösungen mit NaF oder AmF allein. Die longitudinale Mikroradiographie ergab bei der käuflich zu erwerbenden AmF/SnF_2-Lösung eine Verbesserung der Erosionsresistenz um 88% im Vergleich zur Kontrollgruppe. Durch die reine SnF_2-Lösung, konnten Erosionen sogar ganz verhindert werden. Aufgrund der guten Ergebnisse wird die in dieser Studie von Ganss und Kollegen (2008) verwendete und käuflich erwerbliche Lösung heute als Maßstab in der Therapie von Erosionen angesehen (Schlueter et al. 2009a). Auch in einer weiteren *In-vitro*-Studie erzielten Lösungen, die Zinn und Fluorid enthielten, einen sehr hohen protektiven Effekt gegen Erosionen, vor allem dann, wenn die Zinnkonzentration in der Lösung hoch war (Schlueter et al. 2009b). Um eine bessere Vergleichbarkeit zu haben testeten Schlueter und Kollegen (2009a) zinnhaltige Fluoridlösungen mit gleichem pH Wert und gleicher Fluoridkonzentration. Die Effektivität von zinnhaltigen Lösungen wurde hier außerdem mit derjenigen von TiF_4 verglichen. Der pH Wert der Testlösungen sollte dem zulässigen pH Wert von Produkten für die tägliche Mundhygiene entsprechen. Als stabilisierendes Agens wurde den Lösungen AmF beigefügt, da TiF_4-Präparate und zinnhaltige Fluoridpräparate bei einem für Mundhygieneprodukte notwendigen pH Wert von 4,5 eine nur geringe Stabilität aufweisen (Schlueter et al. 2009a; Schlueter et al. 2009c). In der Studie von Schlueter et al. (2009a) konnten unter leicht sauren Bedingungen zinn- und titanhaltige Lösungen die Bildung von Erosionen fast komplett verhindern. Unter stark sauren Bedingungen verloren titanhaltige Präparate ihre Wirkung, zinnhaltige Lösungen konnten jedoch auch hier den Schmelzverlust um 93% reduzieren. Auch *in situ* konnte ein sehr guter Effekt zinnhaltiger Fluoridlösungen in der Reduktion von Erosionen festgestellt werden (Schlueter et al. 2009c; Ganss et al. 2010).

2.5.2. Prävention von Abrasionen erosiv veränderter Zahnhartsubstanz mit Fluoriden

Nach einem Säureangriff ist die Zahnhartsubstanz anfälliger für Abrasionen, die zum Beispiel durch das Zähneputzen entstehen können (Davis und Winter 1980; Attin et al. 1997). Es wurde festgestellt, dass eine regelmäßige Verwendung hochkonzentrierter Fluoridpräparate, wie NaF- und AmF-Gelees oder NaF-Lösungen, die Abrasionsresistenz von Schmelz und Dentin erhöhen kann (Attin et al. 1998; Attin et al. 1999; Lagerweij et al. 2006).

Es könnte vermuten werden, dass saure Fluorid-Gelees wie elmex® gelée (pH 4,5) die Zahnhartsubstanz eher weiter angreifen, als sie zu schützen oder gesunde Zahnhartsubstanz erweichen. *In vitro* wurde diese Vermutung jedoch widerlegt (Attin et al. 1999). In dieser Studie von Attin und Kollegen (1999) war die Abrasionsresistenz der mit dem sauren und hochkonzentrierten NaF/AmF-Gel gebürsteten und vorher erodierten Proben um 65% höher, als bei denjenigen Proben, die mit neutralem Gel gebürstet wurden. Lagerweij et al. (2006) untersuchten die Prävention von Erosionen und Abrasionen mit hochkonzentriertem Fluorid-Gel (12,500 ppm F, AmF, pH 4,8) im Vergleich zu fluoridhaltiger Zahnpasta (1,250 ppm F, AmF, pH 4,6). Die Applikation von saurem und hochkonzentriertem Fluorid-Gel zwei bis acht Mal täglich, konnte dabei den Zahnhartsubstanzverlust durch Erosionen und Bürstabrasionen im Vergleich zur Kontrollgruppe um über 50% reduzieren. Die fluoridhaltige Zahnpasta hingegen hatte nur einen geringen Effekt.

Zur Wirksamkeit von fluoridhaltiger Zahnpasta gegen Erosionen und Abrasionen gibt es unterschiedliche Ergebnisse. Moretto et al. (2010) beobachteten, dass die Zahnpasta allein nicht in der Lage ist eine Zahnabnutzung vollständig zu vermeiden, jedoch konnte fluoridhaltige Zahnpasta den Zahnhartsubstanzverlust *in vitro* zumindest reduzieren. In einer Studie von Magalhaes et al. (2007), in der sieben Tage lang die in einer intraoralen Apparatur getragenen humanen Schmelzproben vier Mal täglich für fünf Minuten in einem Cola-Getränk der Säure ausgesetzt und daraufhin 30 Sekunden lang mit fluoridhaltiger Zahnpasta (1,098 ppm F) gebürstet wurden, konnte im Vergleich zur Kontrolle ein um 21% geringerer Schmelzabtrag durch das Bürsten ermittelt werden. Magalhaes et al. (2007) vermuteten, dass die fluoridhaltige Zahnpasta den erweichten Schmelz teilweise wiedererhärten und

ihn so resistenter gegen Abrasionen machen könnte. Eine ähnliche Studie von Rios et al. (2008) bei der bovine Schmelzproben sieben Tage lang vier Mal täglich für 60 Sekunden einem Cola-Getränk ausgesetzt und daraufhin mit NaF-haltiger Zahnpasta (1,100 und 5,000 ppm F) gebürstet wurden, ergab keinen signifikanten protektiven Effekt auf die Reduktion von Bürstabrasionen.

Auch Tetrafluoride wurden auf Ihre Wirksamkeit im Schutz vor Abrasionen erosiv veränderter Zahnhartsubstanz untersucht. Wiegand und Kollegen (2010) analysierten den Effekt von Fluoridlösungen mit TiF_4, ZrF_4, HfF_4 und vom konventionellen Fluoridpräparat AmF *in situ*. Die bovinen Proben wurden in diesem dreitägigen Versuch mit der jeweiligen Lösung 60 Sekunden lang vorbehandelt und nach einer 90-sekündigen Säureexposition in Sprite®, 30 Sekunden lang gebürstet. Den größten Schutz vor Abrasionen erreichten die TiF_4-Lösung mit einem um 38% geringeren Schmelzverlust, sowie die AmF-Lösung mit einem um 31% geringeren Schmelzverlust. In einer Studie von Vieira et al. (2006) konnte die auf Schmelz applizierte TiF_4-Lösung *in vitro* jedoch nicht der Kombination erosiver und abrasiver Prozesse standhalten. Die AmF-Lösung erzielte dafür eine Verbesserung der Abrasionsresistenz um 39%, und ein Fluorid-Lack (0,1% Difluorosilane) erreichte sogar eine Verbesserung um 70%. Für humanen Zahnschmelz stellten Vieira et al. (2007) auch *in situ* einen hohen Schutz vor kombinierten erosiven und abrasiven Angriffen mithilfe des oben genannten Fluoridlackes fest.

Die Studien zur Prävention von Erosionen und Abrasionen mithilfe mancher fluoridhaltigen Gelees, Lacke, Mundspülungen und Zahnpasten zeigen, dass eine häufige Applikation hochkonzentrierter Fluoridpräparate die Entstehung von Zahnhartsubstanzverlusten *in situ* und *in vitro* reduzieren kann (siehe Tab. 2). Eine vollständige Inhibition der Entstehung von Erosionen und Abrasionen wird jedoch im Schmelz nicht erreicht und nicht immer scheint der klinische Vorteil groß zu sein. Manche Empfehlungen, wie zum Beispiel die Applikation von Fluoriden auf erodierte Zahnhartsubstanz unmittelbar vor dem Zähneputzen zum Schutz vor Bürstabrasionen (Attin et al. 1998), die Applikation hochkonzentrierter Fluorid-Gelees mehrfach täglich (Lagerweij et al. 2006) oder Intensiv-Fluoridierungen mit hochkonzentriertem Fluorid-Gel, fluoridhaltigen Zahnpasten und Spüllösungen (Ganss et al. 2004), können im Alltag kaum bewältigt werden und führen zu einem erheblichen organisatorischen und finanziellen Aufwand für den Patienten.

2.5.3. Prävention von Erosionen und Abrasionen mithilfe des CO_2 Lasers

2.5.3.1. Interaktion der CO_2 Laserbestrahlung mit Zahnschmelz

Bereits in früheren Jahren haben Studien gezeigt, dass der Laser es ermöglicht die Bildung von Karies zu unterbinden (Fox et al. 1992; Featherstone et al. 1998; Kantorowitz et al. 1998; Esteves-Oliveira et al. 2008b). Neben dem CO_2 Laser wurden auch andere, wie zum Beispiel der Er:YAG Laser oder Nd:YAG Laser, getestet (Tsai et al. 2002; Cecchini et al. 2005). Der CO_2 Laser wird vor allem aufgrund seiner hohen Absorption im Schmelz (Featherstone und Fried 2001) als sehr effektiv in der Kariesprävention angesehen (Stern et al. 1972; Hsu et al. 2000). Ein CO_2 Laser mit einer Wellenlänge von 10,6 μm soll besser geeignet sein, als ein Laser mit einer Wellenlänge von 9,6 μm, da er zu einer geringeren Hitzebildung an der Zahnoberfläche führt, mehr Karbonat aus dem Kristallgitter entfernt und die Entstehung von Karies stärker unterbinden kann (Kantorowitz et al. 1998; Zuerlein et al. 1999a; Esteves-Oliveira et al. 2008a). In einer *In-vitro*-Studie untersuchten Esteves-Oliveira und Kollegen (2009) Laserparameter, die eine hohe Kariesresistenz bewirken sollten. Dabei stellte sich heraus, dass der CO_2 Laser (λ = 10,6 μm) mit einer Pulsdauer von 5 μs, einer Energiedichte von 0,3 J/cm^2, einer Anzahl von 2036 Pulsen (9 sec) und einer Impulsfrequenz von 226 Hz, die Kariesentstehung um 81% reduzieren konnte und damit auch signifikant bessere Ergebnisse erzielte, als eine Behandlung mit Fluorid. Außerdem konnten elektronenmikroskopisch keine unerwünschten Schäden im Schmelz durch die Laserbestrahlung festgestellt werden.

Es wurde bereits *in situ* und *in vitro* gezeigt, dass der CO_2 Laser dazu in der Lage ist die chemische Komposition und die Morphologie von Zahnschmelz und Dentin zu verändern und so eine Demineralisation durch Säuren zu verhindern (Fox et al. 1992; Hsu et al. 2000; Esteves-Oliveira et al. 2009). Doch der Mechanismus, der zur geringeren Löslichkeit der Zahnhartsubstanz führt, ist noch nicht gänzlich geklärt.

Wichtig für die Wechselwirkung zwischen dem Laser und dem Gewebe sind die optischen Eigenschaften des Gewebes, wie zum Beispiel die Absorption des Laserlichts. Bei der Absorption interagiert die Laserenergie mit den Atomen

im Zielgewebe und wird in Wärme umgewandelt. Die Wärme soll dabei zu einer Modifikation des Zahnschmelzes führen und ihn resistenter gegen Säuren machen (Featherstone und Fried 2001).

Den höchsten Absorptionskoeffizienten hat Schmelz mit 8000 cm^{-1}, bei einer Wellenlänge des CO_2 Lasers von 9,6 μm, und mit 825 cm^{-1}, bei einer Wellenlänge von 10,6 μm (Zuerlein et al. 1999b). Bei einer Wellenlänge von 10,6 μm ist der Absorptionskoeffizient zwar geringer, dafür dringt die Laserstrahlung tiefer ins Gewebe ein. Denn je höher der Absorptionskoeffizient ist, desto geringer ist die Absorptionstiefe und umgekehrt (Featherstone und Fried 2001). Dies könnte die Zahnhartsubstanz vor negativen Nebenwirkungen schützen, da bei hoher Absorption die Gefahr einer thermischen Schädigung geringer ist (Apel und Rieß 2005; Esteves-Oliveira et al. 2008a).

Es gibt viele unterschiedliche Theorien für die Abnahme der Säurelöslichkeit von Zahnhartsubstanz durch Laserbehandlung. Physikalische Ursachen, wie eine Versiegelung der Schmelzoberfläche durch Verschmelzung und Fusion von Schmelzkristallen, wurden für die Inhibition einer Demineralisation verantwortlich gemacht (Stern et al. 1972; Ferreira et al. 1989). Andere Autoren behaupteten jedoch, dass eine Fusion oder Verschmelzung dafür nicht nötig ist, und dass eher chemische Veränderungen der Zahnhartsubstanz, wie die Entfernung von Karbonat aus dem Schmelz durch CO_2 Laserbestrahlung, für die geringere Säurelöslichkeit verantwortlich sind (McCormack et al. 1995; Kantorowitz et al. 1998; Zuerlein et al. 1999a). Karbonat ist ein Bestandteil im Schmelz, der das Kristallgitter schwächt und bei Säureangriffen bevorzugt aus der Gitterstruktur herausgelöst wird (Rodrigues et al. 2004). Eine Temperaturerhöhung im Schmelz von 100 bis 800°C soll zur Verminderung des Karbonat-Gehaltes und zu einer Entstehung von Pyrophosphat führen, welches einen erheblichen Effekt auf die Reduktion der Säurelöslichkeit haben könnte (Fowler und Kuroda 1986; Zuerlein et al. 1999a). Eine Erhöhung der Temperatur auf über 1100°C, wie sie benötigt wird, um eine Verschmelzung und Fusion von Schmelzkristallen hervorzurufen, führt zur Bildung von α-TCP und TetCP, die im Verdacht stehen die Säurelöslichkeit stark zu erhöhen (Fowler und Kuroda 1986). Eine Fusion oder Verschmelzung wäre damit noch schädlicher für die Zahnhartsubstanz. Eine andere Theorie zur Inhibition der Demineralisation bezieht sich auf den organischen Anteil der Zahnhartsubstanz. Hsu und Kollegen (2000), die auch vermuteten, dass ein Verschmelzen von

Apatitkristallen nicht nötig ist, um die Demineralisation zu reduzieren, benutzten in ihrer Studie einen CO_2 Laser mit niedriger Energiedichte (0,3 J/cm^2), um einen zu hohen Temperaturanstieg zu vermeiden. Dass eine niedrige Energiedichte zu einer Kariesinhibition ohne Nebenwirkungen wie einer Ablation, Fusion oder Rissbildung der Zahnhartsubstanz führen kann, wurde bereits beobachtet (Esteves-Oliveira et al. 2008a; Esteves-Oliveira et al. 2009). So ermittelten Hsu et al. (2000), dass die Erhitzung des Schmelzes auf eine Temperatur unter 400°C zu einer Zersetzung der organischen Matrix führt, welche die inter- und intraprismatischen Räume verstopft. Dadurch soll die Diffusion von Säuren in den Zahnschmelz erschwert werden.

Die Mechanismen der Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Zahnhartsubstanz sind demnach noch nicht ganz aufgeklärt. Auch zur Frage wie lange der Lasereffekt anhält oder ob und wie oft die Behandlung wiederholt werden muss, gibt es keine Daten. Um ein besseres Verständnis für die Mechanismen zu bekommen, sind weitere Untersuchungen nötig.

2.5.3.2. Die Prävention von Erosionen durch die Kombination einer Laser- und Fluoridbehandlung

Die meisten Studien zur Wirkung von Laserstrahlung auf Zahnhartsubstanzen beziehen sich auf die Prävention von Karies (Esteves-Oliveira et al. 2010). Es gibt nur wenige Untersuchungen zur Prävention von Erosionen mithilfe des Lasers.

Dass eine Bestrahlung von Schmelz mit Laserlicht und die Applikation hochkonzentrierter saurer Fluoridpräparate zu einer Erhöhung der Säureresistenz führen können, ist bereits bekannt. Die Kombination der Laserbehandlung mit einer Fluoridapplikation soll die Aufnahme von Fluorid steigern, sowie die Effizienz von Fluoridpräparaten erhöhen, und führte in manchen Studien zu vielversprechenden Ergebnissen. In einer Studie zur Kariesprävention von Tepper und Kollegen (2004) wurde berichtetet, dass bei einer Behandlung von Schmelz mit dem CO_2 Laser (λ = 10,6 µm) und vorheriger AmF-Applikation mehr Fluorid in die Zahnhartsubstanz aufgenommen wird, als bei alleiniger Fluoridapplikation. Die Säureresistenz

konnte durch alleinige Laserbehandlung und durch eine kombinierte Laser- und Fluoridbehandlung erhöht werden. In einer weiteren Studie, in der Schmelz mit Fluorid und einem CO_2 Laser behandelt wurde, konnte neben einer verstärkten Ablagerung von Fluorid auf der Schmelzoberfläche, auch ein durch die Laserbehandlung erleichterter Einbau von Fluorid in das Kristallgitter beobachtet werden (Chin-Ying et al. 2004). Die genauen Mechanismen der Effekte bei kombinierter Laser- und Fluoridbehandlung sind jedoch unklar. Neben der erhöhten Aufnahme von Fluorid in den Schmelz, wurde auch die Transformation von Hydroxylapatit in säureresistenteres Fluorapatit diskutiert (Vlacic et al. 2008).

In einer Studie zur Prävention von Erosionen mithilfe von Fluoriden und dem Laser verwendeten Vlacic und Kollegen (2007) verschiedene Laser mit unterschiedlichen Wellenlängen und einer Energiedichte von 15 J/cm^2. Die Proben wurden mit einem neutralen NaF-Gel (1,23%) vorbehandelt, daraufhin mit dem Laser bestrahlt und zuletzt für fünf Minuten einem erosiven Angriff in HCl ausgesetzt. Es stellte sich heraus, dass die hier verwendeten Laser und Lasereinstellungen den Schmelz vor einer Erweichung schützen konnten. In einer Studie von Sobral et al. (2009) wurden humane Schmelzproben entweder nur mit NaF (1,23%, pH 5,3), nur mit einem Nd:YAG Laser (Energiedichte 125 J/cm^2), oder mit dem Laser und Fluorid kombiniert behandelt. Daraufhin wurden die Proben für 90 Minuten einem Säureangriff in Zitronensäure (2%) unterzogen. Den besten Schutz vor dem erosiven Angriff bot hier die Kombination der Laser- und Fluoridbehandlung mit einer um 81% geringeren Schmelzerweichung im Vergleich zur Kontrollgruppe. Eine aktuelle Studie von Steiner-Oliveira und Kollegen (2010) testete den Effekt von einem gepulsten CO_2 Laser (λ = 10,6 µm) und Fluorid auf den Schutz vor Erosionen. Bovine Proben wurden entweder eine Minute lang mit NaF-Gel (1,23%, pH 3,5) allein behandelt oder mit dem CO_2 Laser bestrahlt. In einer dritten Gruppe wurden die Proben zuerst mit Fluorid-Gel behandelt und anschließend mit dem Laser bestrahlt. Drei Mal täglich über einen Zeitraum von drei Tagen wurden die Proben für fünf Minuten einem erosiven Angriff in Zitronensäure (0,3%, pH 2,45) ausgesetzt und daraufhin zur Remineralisation 60 Minuten lang in künstlichem Speichel gelagert. Die alleinige Laserbehandlung erzielte keinen protektiven Effekt gegen Erosionen. Die Kombination der Laser- und Fluoridbehandlung resultierte jedoch auch hier in einem geringeren

Zahnhartsubstanzverlust während des Säureangriffs. Dennoch war der Unterschied zu den anderen Gruppen nach drei Tagen nicht sehr groß.

Wiegand et al. (2009b) untersuchten den Einfluss eines CO_2 Lasers auf die Effektivität von TiF_4- und AmF-Lösungen im Schutz vor Erosionen. Ähnlich wie bei den anderen Studien wurden die Schmelzproben entweder nur mit TiF_4 oder AmF allein, mit dem CO_2 Laser (λ = 10,6 µm) allein, oder mit dem Laser und Fluorid kombiniert behandelt. Nach einem folgenden fünftägigen De- und Remineralisationszyklus unter Verwendung des sauren Erfrischungsgetränkes Sprite® Zero vier Mal täglich für 90 Sekunden und künstlichem Speichel für die Remineralisation, ergab die alleinige Applikation von AmF eine Erhöhung der Erosionsresistenz um 30%. Die Verwendung von zusätzlicher Laserbestrahlung hatte hier jedoch keinen weiteren verbessernden Effekt. Die TiF_4-Lösung allein hatte einen noch geringeren protektiven Effekt. Eine Laserbestrahlung sofort nach der Fluoridapplikation verbesserte jedoch die Wirkung der TiF_4-Lösung und lieferte eine genauso große Erhöhung in der Erosionsresistenz, wie die alleinige Applikation der AmF-Lösung.

In den beschriebenen Studien ist eine Tendenz erkennbar, dass eine kombinierte Behandlung mit Fluorid und dem Laser zu einer Verbesserung der Säureresistenz führen kann. Der Effekt war jedoch meist gering und es wurden zum Teil sehr hohe Energiedichten benutzt, die zu schädlichen Nebenwirkungen führen könnten. Eine hohe Säureresistenz konnte in einer Studie zur Prävention von Karies bereits mit einer niedrigen Energiedichte (0,3 J/cm^2) erreicht werden, ohne schädliche Veränderungen der Zahnhartsubstanz zu verursachen (Esteves-Oliveira et al. 2009). Die Vorteile der Kombination einer Laser- mit einer Fluoridbehandlung und die Verwendung der Laserparameter aus der Studie von Esteves-Oliveira und Kollegen (2009), könnten auch in der Prävention von Erosionen und Abrasionen zu vielversprechenden Ergebnissen führen.

Tab. 2: *In-vitro*-Studien (1998-2010) und *In-situ*-Studien (2004-2010) zur Prävention von Erosionen und Abrasionen des Zahnschmelzes mit Fluoriden und Laserbestrahlung

Autor/ Jahr	Fluorid ± Laser	Erosion ± Abrasion	Reminera-lisation	Mess-art	Reduktion des erosiven Mineralverlustes im Vergleich zur Kontrolle (%)
***In-vitro*-Studien mit Zitronensäure**					
Steiner-Oliveira et al. (2010)	NaF (1.23%, pH 3.5, 1 min) mit/ohne CO_2 Laser (10.6 µm)	Zitronensäure (0.3%, pH 2.45, 5 min, 3 x tägl., 3 d)	KS (60 min, 3 x tägl., 3 d)	P FA	NaF + CO_2 Laser: positiver Effekt -------
Sobral et al. (2009)	NaF (1.23%, pH 5.3, 4 min) mit/ohne Nd:YAG Laser (1 W, 100 mJ, 19 Hz, 125 J/cm^2)	Zitronensäure (pH 2.6, 2%, 90 min)	Nein	MH	81%: L + F 23%: L 32%: F
Schlueter et al. (2009a)	TiF_4, AmF, SnF_2, $SnCl_2$, NaF (1.500 mg/l F, pH 4.5) a) 6 x 2 min (10 d) b) 2 x 2 min (7 d) c) 2 x 2 min (7 d)	Zitronensäure (0,05 M) (pH 2,3) a) 6 x 2 min b) 6 x 2 min c) 6 x 5 min	RL (pH 6.7)	P	69%: AmF/NaF/ $SnCl_2$ (geringe Konzentration), 93%: AmF/NaF/ $SnCl_2$ (hohe Konzentration), 8%: TiF_4/AmF/ZnF_2, 59%: AmF/SnF_2
Schlueter et al. (2009b)	AmF/NaF/$SnCl_2$ -Lösungen (pH 4.5, 1500 mgF/l, 1000 mgF/l)	Zitronensäure (0.05 M, pH 2.3, 6 x 5 min,10d)	RL (pH 6.7)	P	60-90%: Alle zinnhaltigen F-Lösungen
Ganss et al. (2008)	Lösungen: $SnCl_2$ NaF SnF_2 AmF AmF/NaF AmF/SnF_2	Zitronensäure (0.05 M pH 2.3 6 x 2 min,10d)	RL (pH 6.7)	REM LMR	73%: NaF 88%: AmF/SnF_2 Keine Erosion bei SnF_2
Schlueter et al. (2007)	TiF_4-Lösung (1.64%, pH 1.2) NaF-Lösung (2.2%, pH 1.2, 1 x 5 min, 5 d)	Zitronensäure (pH 2.3, 6 x 10 min/d)	RL	LMR	49%: NaF 72%:TiF_4
Lagerweij et al. (2006)	F-Zahnpasta (1.250 ppm) F-Gel (12.500 ppm)	Zitronensäure (1%,pH 2.3, 30 s) mit Bürst-abrasionen	KS	P	Ero/Remin: 58%: 8 x/d F-Gel Ero/Abr/Remin: 53%: 8 x/d F-Gel
Lennon et al. (2006)	AmF-Gel (elmex gelée, pH 4.8, 12.500 ppm) CasCP-Zahnpasta NaF-Lösung (250 ppm) CasCP-Zahnpasta + NaF-Lösung	Zitronensäure (1%, pH 2.3, 30 sec, 6 x tägl., 14 d)	KS	P	29%: AmF-Gel

Vieira et al. (2006)	TiF_4-Lösung (4%, 4 min) AmF-Lösung (1%, 4 min) Difluorosilan-Lack (0.1%)	Zitronensäure (pH 3, 10 min) und Bürstabrasion (NaF- Zahn-pasta)	KS	P REM	Er/Abr/Remin: 70%: F-Lack 39%: AmF -2%: TiF_4
Ganss et al. (2001b)	F-Zahnpasta Slurry (NaF 0.15% F) F-Zahnpasta-Slurry mit Mundspülung (Olaflur/SnF_2, 0.025%) F-Gel (Olaflur/NaF 1.25%)	Zitronensäure (0.05 M, pH 2.3, 6 x 10 min/tägl., 5 d)	RL	LMR	13%: F-Zahnpasta 21%: F-Zahnpasta/ F-Spülung/ F-Gel
***In-vitro*-Studien mit Sprite**					
Moretto et al. (2010)	Zahnpasta-Slurry: 5.000 µgF/g 500 µgF/g und 3% TMP 1.100 µgF/g	Sprite (7 d, 4 x tägl., 5 min) und Bürst-abrasionen (15 sec)	KS	P	Erosion: 57%: 5000 ppm 62%: 500 ppm Ero/Abr: 53%: 5000 ppm 51%: 500 ppm
Wiegand, et al. (2009b)	TiF_4 (1%, 60 sec) AmF (1%, 60 sec) und CO_2 Laser (10,6 µm, Pulsdauer 10 µs, 50 Hz,13 sec)	Sprite Zero (4 x tägl./5 d, 90 sec)	KS (20 ml, 2 Stunden)	P REM	30%: AmF 13%: TiF_4 30%: TiF_4 + Laser 20%: AmF+ Laser
Magal-haes et al. (2008a)	TiF_4-Lack (4%) NaF-Lack (2.26 %) NaF/CaF_2-Lack (5.62%) TiF_4-Lösung (4%, 2.45%)	Sprite (1 min, 6 x tägl., 5 d)	KS	P	68%: TiF_4-Lack
Attin et al. (1999)	AmF/NaF-Gel (1.25%, pH 4.5, pH 7)	Sprite light (5 min) und Bürstabrasion	KS	P	84%: AmF/NaF-Gel (pH 4.5)
Attin et al. (1998)	NaF-Lösung (250 und 2.000 ppm, pH 7)	Sprite light (5 min) und Abrasion	KS	P	19%: NaF (2.000 ppm)
***In-vitro*-Studien mit HCl**					
Wiegand et al. (2009d)	TiF_4 (1.5%): pH 1.2 NaF (2.02 %): pH 1.2 TiF_4 (1.5%): pH 3.5 NaF (2.02%): pH 3.5	HCl (pH 2.6, 10 x 60 sec)	Nein	P KF	Keine Bildung von Erosionen durch: TiF_4 (pH 1.2 und pH 3.5) -------
Wiegand et al. (2009c)	TiF_4-Lösung (1.5%) NaF-Lösung (2.02%) pH 1.2 und 3.5	HCl (pH 2.6), 10 x 60 sec	Nein	KF	37%:TiF4 (pH1.2) 33%: NaF (pH1.2)

Wiegand et al. (2008a)	TiF_4 (0.4 und 1%) ZrF_4 (0.4 und 1%) HfF_4 (0.4 und 1%) AmF/NaF-Gel (1.25%)	HCl, (pH 2.6 , 25 min)	Nein	VM, KF	38-49%: TiF_4
Vlacic et al. (2007)	NaF-Gel (1.23%, 12.300 ppm) mit/ohne verschiedenen Lasern (15 J/cm^2)	HCl (1.0 M, 5 min)	Nein	MH	Laserbehandlung: protektiver Effekt gegen Erosionen -------
Hove et al. (2006)	SnF_2 (0.5 M): pH 2.6 TiF_4 (0.5 M): pH 1.3 NaF (0.5 M): pH 8.0	HCl (0.01 M, pH 2.0 für 2, 4, 6 min)	Nein	WI	88%: TiF_4 50%: SnF_2 25%: NaF
***In-situ*-Studien mit Zitronensäure**					
Schlueter et al. (2010)	SnF_2 (pH 4.2, positive Kontrolle) Placebo (negative Kontrolle) $SnCl_2$/AmF/NaF (pH 4.5)	Zitronensäure (0,05 M, pH 2.3, 6 x 5min tägl.,7d)	Speichel	P	82%: $SnCl_2$/AmF/NaF
Schlueter et al. (2009c)	NaF (pH 4.5, positive Kontrolle) Placebo (negative Kontrolle) $SnCl_2$/NaF/AmF, pH 4.5)	Zitronensäure (0.05 M, pH 2.3, 6 x 5 min tägl.,7 d)	Speichel	P	73%: $SnCl_2$/AmF/NaF
Ganss et al. (2007a)	F-Zahnpasta (0.125% Olaflur, pH 4.6) Fluorid-Lösung (Olaflur/SnF_2, 0.025%, pH 4.2) F- Gel (Olaflur/NaF 1.25%, pH 4.8)	Zitronensäure (0.05 M, pH 2.3, 2 x 20 min/d) und Bürstabrasion (2 x 30 s/d)	Speichel	P	Ero/Abr: 48%: F-Gel oder F-Zahnpasta + F-Lösung
Ganss et al. (2004)	SnF_2/Olaflur (0.14% F) SnF_2/Olaflur (0.025% F) NaF/Olaflur- Gel (1.25% F)	Zitronensäure (0.05 M, pH 2.3, 6 x 5 min/d)	Speichel	LMR	55%: F-Zahnpasta 88%: F- Gel, F-Spülung und F-Zahnpasta
***In-situ*-Studien mit Sprite oder Cola oder Saft**					
Wiegand et al. (2010)	TiF_4 (1.55%, 0.5 M F, 60 s) ZrF_4 (2.09%, 0.5 M F, 60 s) HfF_4 (3.18%, 0.5 M F, 60 s) AmF (13.43%, 0.5 M F, 60 s)	Sprite (90 s, 4 x tägl.) und Bürstabrasio-nen (2 x tägl., 30 s 0.2 g Elmex Zahnpasta, 1400 ppm F)	Speichel	P	Ero: 50%: AmF 50%: TiF_4 Ero/Abr: 31%: AmF 38%: TiF_4
Vieira et al. (2007)	F-Lack (0.1% F, Difluorsilane)	Sprite 3 x tägl., 5 min und Bürstabrasion	Speichel	P	Ero: 86% Ero/Abr: 52%

Magal-haes et al. (2008b)	TiF_4-Lösung (4%, pH 1.2)	Cola (5 min, 4 x tägl.)	Speichel	MH	Erosion+TiF_4: -73%
Rios et al. (2008)	NaF-Zahnpasta (5.000 ppm, pH 8 1.100 ppm, pH 7) Placebo	Cola (pH 2.6, 60 s, 4x tägl.) und Bürstabrasio-nen (30 s,4 x tägl., 7 d)	Speichel	P	Erosion: 13%: 1.000 ppm 19%: 5.000 ppm Ero/Abr: 14%: 1.000 ppm 16%: 5.000 ppm
Magal-haes et al. (2007)	Fluorid-Zahnpasta (1.098 ppm F, pH 6.8) Placebo	Cola (5 min/ 4 x/d) und Bürstabrasio-nen (4 x tägl., 7 d)	Speichel	P	21%: F-Zahnpasta
Hara et al. (2009)	NaF-Zahnpasta (1.450 ppm)	Grapefruitsaft	Speichel	MH	58%: NaF + KNO_3

Abkürzungen: F = Fluorid, NaF = Natriumfluorid, AmF = Aminfluorid, $SnCl_2$ = Zinnchlorid, SnF_2 = Zinnfluorid, ZnF_2 = Zinkfluorid, REM = Rasterelektronenmikroskopie, P =Profilometrie, KS = künstlicher Speichel, RL = Remineralisationslösung, Remin = Remineralisation, µgF/g = mikrogramm Fluorid pro gramm, MH = Mikrohärte, Ero = Erosion, Abr = Abrasion, L = Laser, LMR = longitudinale Mikroradiographie, FA = Fluoridanalyse, WI = Weißlichtinterferometrie, KF = Kalziumfreisetzung, VM = Volumenmessung, M = molar, d = Day/Tag, x = Mal, tägl. = täglich, TMP = Trimetaphosphat, CasCP = Kasein/Kalziumphosphat, KNO_3 = Kaliumnitrat, ------- = Prozentzahl nicht berechenbar

3. Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es zu ermitteln, ob die Behandlung von Zahnschmelz mit einem CO_2 Laser der Wellenlänge 10,6 μm und mit Fluorid-Gel (elmex® gelée)

1.) die Widerstandsfähigkeit des Schmelzes gegenüber Säureangriffen erhöhen kann,
2.) bereits durch Säure angegriffenen und erweichten Schmelz wiedererhärten kann und
3.) die Resistenz des Schmelzes gegenüber Abrasionen erhöhen kann.

Mithilfe der Fluoridanalyse wurde außerdem untersucht, ob die oben genannten Behandlungen Veränderungen in der Fluoridaufnahme des Zahnschmelzes bewirken und wie dies die Erosionsresistenz beeinflusst.

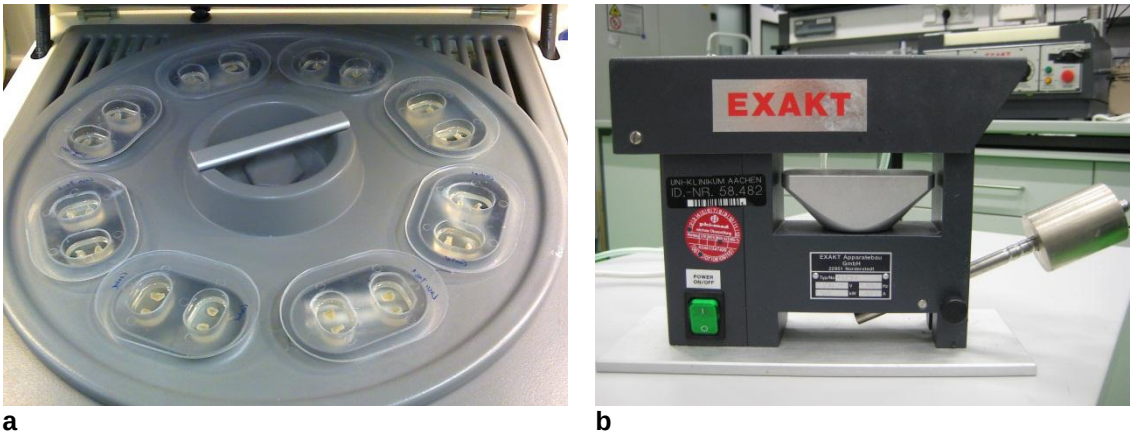
4. Material und Methoden

Vor der Extraktion der für die Studien benötigten Zähne wurden die Patienten über die Studie informiert und ihre schriftliche Einwilligung eingeholt. Sowohl die Studie 1, als auch die Studie 2, wurden von der Ethikkommission des Universitätsklinikums der RWTH Aachen genehmigt (EK 093/09).

4.1. Studie 1

4.1.1. Herstellung der Proben

Für die Durchführung dieser Studie wurden 130 kariesfreie humane Weisheitszähne verwendet, die, unter dem Stereomikroskop (Leica MZ 6, Leica Mikrosysteme GmbH, Wetzlar, Deutschland) betrachtet, keinerlei Schmelzsprünge oder beschädigte Schmelzoberflächen aufwiesen. Die Zähne wurden in verschiedenen Zahnarztpraxen und bei Kieferchirurgen im Raum Aachen und im Raum Bonn gesammelt. Bis zum Versuchsbeginn erfolgte die Lagerung der Zähne in einer 0,1-prozentigen Thymol-Lösung (Acros Organics, Geel, Belgien) mit einem pH Wert von 7 bei 4°C.



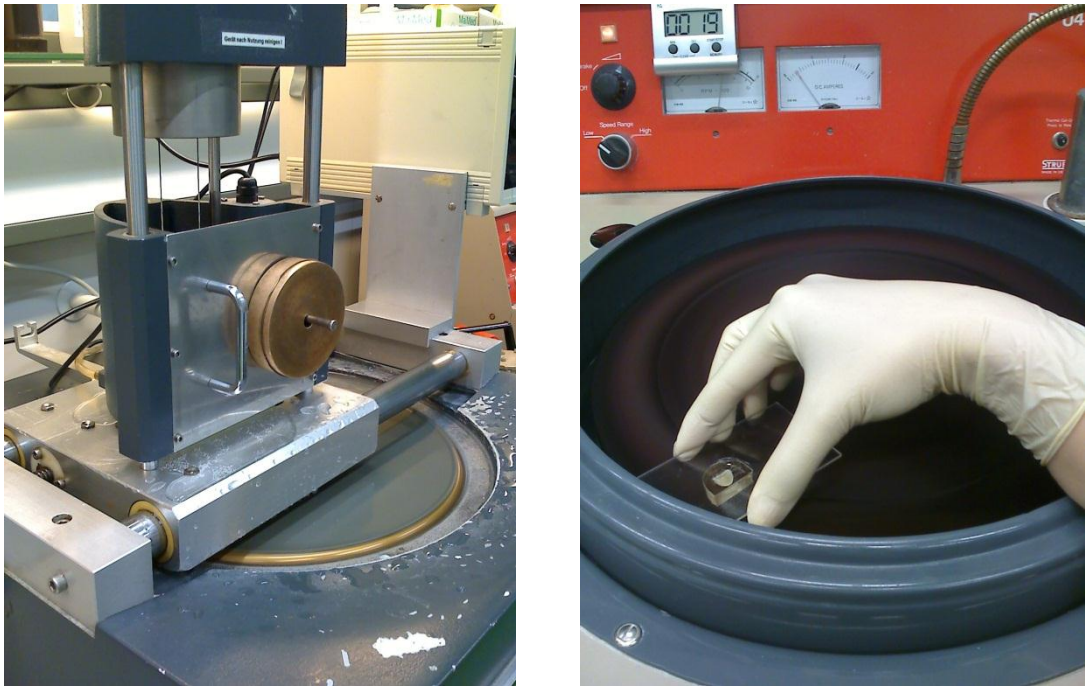
a **b**

Abb. 1: Histolux-Lichtpolymerisationsgerät (a), Präzisions-Klebepresse (b)

Die Weisheitszähne wurden mit einer Zahnbürste unter fließendem Leitungswasser gründlich gebürstet und von Geweberesten befreit. Mithilfe einer diamantierten Bandsäge (EXAKT-Trennschleifsystem, Norderstedt, Deutschland) wurden zunächst die Zahnkronen von den Wurzeln getrennt und daraufhin die Kronen so halbiert, dass man eine orale und eine bukkale

Zahnhälfte erhielt. Eine der beiden Hälften wurde für den Versuch zufällig ausgewählt. Jede Hälfte wurde dann mit rosa Modellierwachs, welches zuvor auf einer Heizplatte (Heidolph MR 2002, Heidolph Instruments GmbH, Schwabach, Deutschland) verflüssigt worden war, auf einem Objektträger (EXAKT, Norderstedt, Deutschland) fixiert. Mithilfe des EXAKT-Mikroschleifsystems und Siliziumkarbid-Nassschleifpapier der Körnung 1200 (Struers, Ballerup, Dänemark) wurden, kontrolliert mit einer Mikrometerschreibe, 200 µm Schmelz abgetragen. Die entstandene planparallele Schmelzfläche musste einen Durchmesser von mindestens 2,5 mm haben, da dies dem Durchmesser des zu verwendenden Laserstrahls entsprach. Die abgeschliffenen Proben wurden dann vom Objektträger abgelöst, von Wachsresten befreit und maximal zu zweit mit der planen und abgeschliffenen Fläche nach unten in Histolux Einbettformen (Kulzer, Wehrheim, Deutschland) platziert. Um den Halt der Zahnflächen darin zu verbessern, konnte eine geringe Menge Fixationskleber auf die plane Zahnfläche gegeben werden (Technovit 7230 VLC, Kulzer, Wehrheim, Deutschland). Die Einbettformen wurden daraufhin mit lichthärtendem Kunststoff (Technovit 7200 VLC, Kulzer, Wehrheim, Deutschland) gefüllt und zehn Stunden lang im Histolux-Lichtpolymerisationsgerät (Kulzer, Wehrheim, Deutschland) lichtgehärtet (siehe Abb. 1a). Nach der Entnahme der Proben aus den Einbettformen wurde die nicht polymerisierte oberste Schicht gründlich mit einem Skalpell abgetragen und jeder Kunststoffblock in der Mitte durchgesägt, um einzeln eingebettete Proben zu erhalten. Mittels Fixationskleber konnten die Proben dann mit der Rückfläche nach unten in einer Präzisions-Klebepresse (EXAKT, Norderstedt, Deutschland) planparallel auf Objektträger geklebt werden (siehe Abb. 1b). Für jede Probe wurde ein Objektträger benötigt. Die nachfolgende Politur der Proben erfolgte in vier Schritten. Erst wurden die Proben mit Siliziumkarbid-Nassschleifpapier der Körnung 1200 im EXAKT-Mikroschleifsystem (siehe Abb. 2a) soweit abgeschliffen, bis die oberste Kunststoffschicht gleichmäßig abgetragen war. Danach wurden die Proben für je fünf Minuten erst mit Nassschleifpapier der Körnung 2400, dann mit der Körnung 4000 und zuletzt eine Minute lang mit Diamantpaste der Korngröße 3 µm (IDA, Sulzberg, Deutschland) auf einem in einer Schleifmaschine (DP U4, Struers, Ballerup, Dänemark) montierten und ständig leicht mit Wasser benetzten Poliertuch poliert (siehe Abb. 2b). Anhand vorausgegangener

Probepolituren haben sich die angegebenen Zeitangaben als geeignet erwiesen, um hochglanzpolierte und riefenfreie Schmelzoberflächen zu erhalten. Zwischen jedem Politurschritt wurden die Proben eine Minute lang in einem mit destilliertem Wasser gefüllten Ultraschallbad gereinigt (Branson, Danbury, USA).



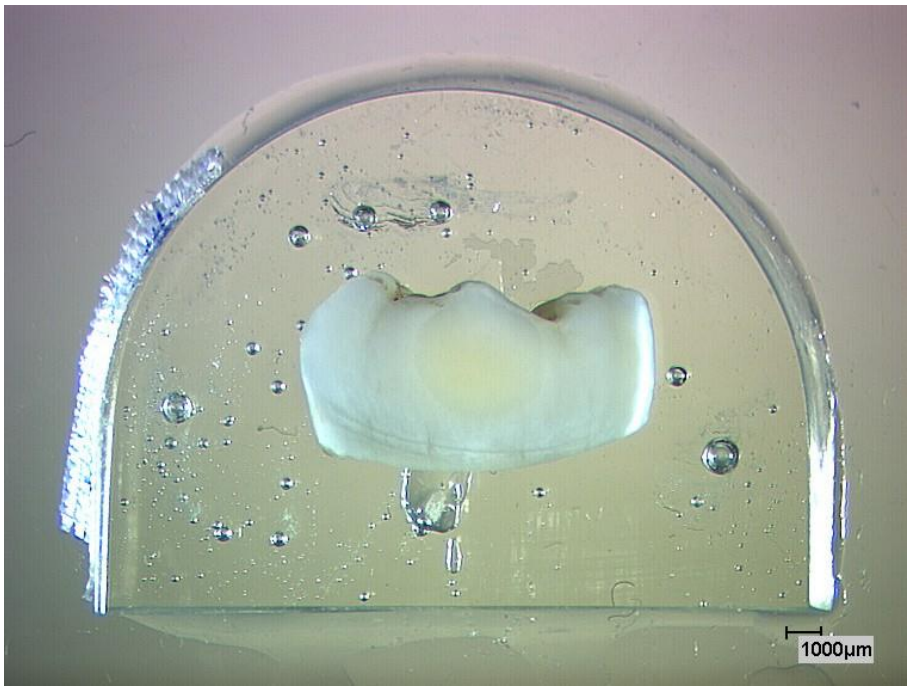
a **b**

Abb. 2: EXAKT-Mikroschleifsystem (a), Hochglanzpolitur (b)

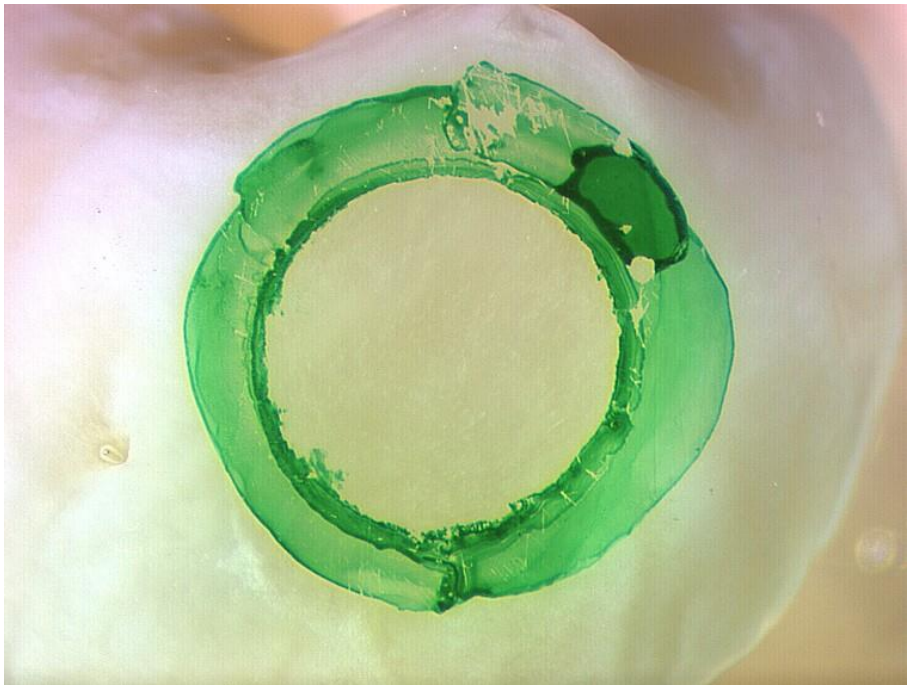
Im nächsten Schritt wurde mit einem permanenten grünen Filzstift ein Kreis mit einem Durchmesser von 2,5 mm auf die polierte Schmelzoberfläche eingezeichnet (siehe Abb. 3a-b). Dafür wurde vorher mithilfe einer Lochzange ein 2,5 mm großer und runder Aufkleber aus dickem Klebeband heraus gestanzt und auf die Schmelzoberfläche geklebt. Am Rand dieses Aufklebers entlang konnte der Kreis gezeichnet und daraufhin der Aufkleber vorsichtig wieder abgezogen werden. Auf der so markierten Fläche wurden später die Mikrohärteeindrücke, sogenannte Indentationen, gesetzt und die Oberflächenbehandlungen durchgeführt.

Die fertigen Proben wurden in mit Minerallösung getränkten Mullkompressen eingeschlagen und im Kühlschrank aufbewahrt. Die nach der Methode von Zero et al. (1990) hergestellte Minerallösung setzte sich zusammen aus 1,5 mmol/l Kalziumchlorid ($CaCl_2$), 1,0 mmol/l Kaliumdihydrogenphosphat (KH_2PO_4) und 50 mmol/l Natriumchlorid (NaCl). Diese Bestandteile wurden in destilliertem

Wasser gelöst (Milli-Q® Advantage A10® System, Millipore™, Billerica, USA). Der pH Wert von 7,0 wurde mit Kaliumhydroxid-Plätzchen (Merck, Darmstadt, Deutschland) eingestellt. Um Schimmelbildung zu vermeiden, war ein regelmäßiger Wechsel der Mullkompressen notwendig.



a



b

Abb. 3: Übersichtsaufnahme einer eingebetteten und polierten Schmelzprobe (a), Vergrößerung der Probe mit Darstellung des grün markiertem Schmelzbereiches für die Durchführung der Behandlungen und Mikrohärtemessungen (b)

4.1.2. Versuchsdurchführung

Angelehnt an die Studie von Lussi und Kollegen (2008) beinhaltete Studie 1 zwei Prozeduren, Prozedur A und Prozedur B, in denen die gleichen Behandlungen in unterschiedlicher Reihenfolge durchgeführt wurden (siehe Tab. 3). Während in Prozedur A erst die Oberflächenbehandlung mit dem CO_2 Laser und/oder Fluorid-Gel und danach der Säureangriff mit Zitronensäure durchgeführt wurde, erfolgten in Prozedur B zuerst der Säureangriff und danach die Oberflächenbehandlung der Proben. Die Kontrollgruppe der jeweiligen Prozedur wurde dem Zitronensäure-Angriff unterzogen, jedoch keiner Oberflächenbehandlung. Die Bezeichnung der Gruppen und der Inhalt der jeweiligen Oberflächenbehandlung werden in Kapitel 4.1.3 näher erläutert.

Für jede der beiden Prozeduren wurden je 65 Proben in fünf Gruppen eingeteilt, die sich in der Form der Oberflächenbehandlung unterschieden. Dafür wurde aus der Gesamtzahl an Proben (130 Stück) immer zufällig eine herausgenommen und der jeweiligen Prozedur zugeordnet. Von den 65 Proben wurden wiederum zufällig welche herausgegriffen und wieder zufällig einer der fünf Gruppen der Prozedur zugeordnet.

Die Fallzahlplanung erfolgte im Institut für Medizinische Statistik der RWTH Aachen vor Beginn der Studie mithilfe der Daten aus einem Vorversuch, bestehend aus einer Gruppe „Laser“ und einer Kontrollgruppe mit einer Anzahl von je drei Schmelzproben. Die Gruppe „Laser“ erhielt eine Laserbestrahlung mit den gleichen Parametern, wie sie in der Studie eingesetzt werden sollten. Daraufhin wurden beide Gruppen einer Zitronensäurebehandlung unterzogen, wie sie auch in Studie 1 durchgeführt werden sollte. Es wurde die Ausgangsmikrohärte, die Mikrohärte nach der Laserbestrahlung und die Mikrohärte nach der Säurebehandlung mithilfe der Härteprüfung nach Knoop gemessen. Um in einem zweiseitigen Test zum 5% Signifikanzniveau eine zu erwartende Mittelwertdifferenz von -19,30 (Differenz zwischen dem Mittelwert der Mikrohärte der Gruppe „Laser“ (313,07) und dem der Kontrollgruppe (332,37)) mit einer Standardabweichung von 16,80 mit einer Power von 80% nachzuweisen, wurden 13 Proben je Gruppe benötigt. Der Unterschied zwischen der Gruppe „Laser“ und der Kontrollgruppe ist der kleinste der erwartet wurde und kann daher auch mindestens für die anderen Unterschiede angenommen werden.

Tab. 3: Beschreibung des Versuchsablaufes von Prozedur A und B

Prozedur A (n = 65)	**Prozedur B (n = 65)**
5 Gruppen mit je 13 Proben	**5 Gruppen mit je 13 Proben**
Messung der Ausgangsmikrohärte	Messung der Ausgangsmikrohärte
Oberflächenbehandlung	Zitronensäurebehandlung
Mikrohärtemessung	Mikrohärtemessung
Zitronensäurebehandlung	Oberflächenbehandlung
Mikrohärtemessung	Mikrohärtemessung

4.1.3. Beschreibung der Gruppen und Oberflächenbehandlungen

Wie bereits erwähnt, wurden die 130 Schmelzproben gleichmäßig auf Prozedur A und B aufgeteilt und pro Prozedur wiederum in fünf Gruppen eingeteilt, die sich in der Form der Oberflächenbehandlung unterschieden. Diese Oberflächenbehandlungen wurden mit der Bezeichnung C, L, F, LF, und FL abgekürzt und diese Abkürzung für die Benennung der Proben verwendet.

Folgende Oberflächenbehandlungen wurden je nach Gruppe durchgeführt:

L: nur CO_2 Laserbestrahlung
F: nur Fluorid-Applikation
LF: erst CO_2 Laserbestrahlung, dann Fluorid-Applikation
FL: erst Fluorid-Applikation, dann CO_2 Laserbestrahlung
C: keine Oberflächenbehandlung (Kontrollgruppe)

Um zwischen den beiden Prozeduren unterscheiden zu können, wurde zusätzlich ein A oder B vor die oben angegebenen Abkürzungen gesetzt. Die fünf Gruppen aus Prozedur A erhielten demnach die Bezeichnungen AL, AF, ALF, AFL und AC und die fünf Gruppen der Prozedur B erhielten die Bezeichnungen BL, BF, BLF, BFL und BC.

Für die Laserbestrahlung wurde ein CO_2 Laser mit einer Wellenlänge λ von 10,6 µm verwendet (Rofin SC x 30, Rofin-Sinar Laser GmbH, Hamburg, Deutschland), der einen Strahl in TEM_{00} Mode emittiert (siehe Abb. 4). Die

Energiedichte betrug 0,3 J/cm^2 und die Pulsdauer 5 µs (siehe Tab. 4). Die Bestrahlung erfolgte in einem Abstand von 19,8 cm für jeweils neun Sekunden. Mithilfe eines Energiemessgerätes wurde die Energie des Lasers kontrolliert (Coherent FieldMaster GS+Detector LM45; Coherent Inc., Santa Clara, USA).

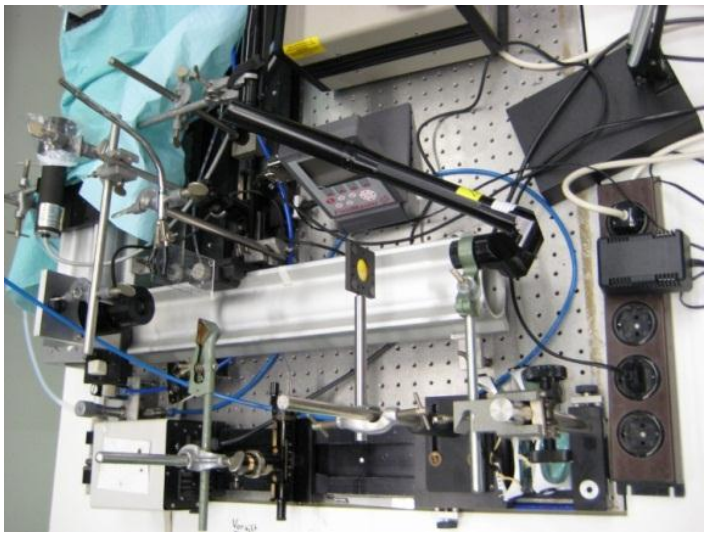


Abb. 4: CO_2 Laser

Tab. 4: Laserparameter

OB*	CO_2 Laser						F***
	Energie-Dichte	Puls-Dauer	Puls-Anzahl	Impuls-frequenz	Energie/ Puls	Strahl D**	
L	0,30 J/cm^2	5 µs	2036 (9s)	226 Hz	15 mJ	2,5mm	×
LF	0,30 J/cm^2	5 µs	2036 (9s)	226 Hz	15 mJ	2,5mm	✓
FL	0,30 J/cm^2	5 µs	2036 (9s)	226 Hz	15 mJ	2,5mm	✓
C	ohne Laserbestrahlung, negative Kontrolle						×
F	ohne Laserbestrahlung, mit F , positive Kontrolle						✓

* Oberflächenbehandlung

** Durchmesser des Laserstrahls

*** Fluorid-Applikation

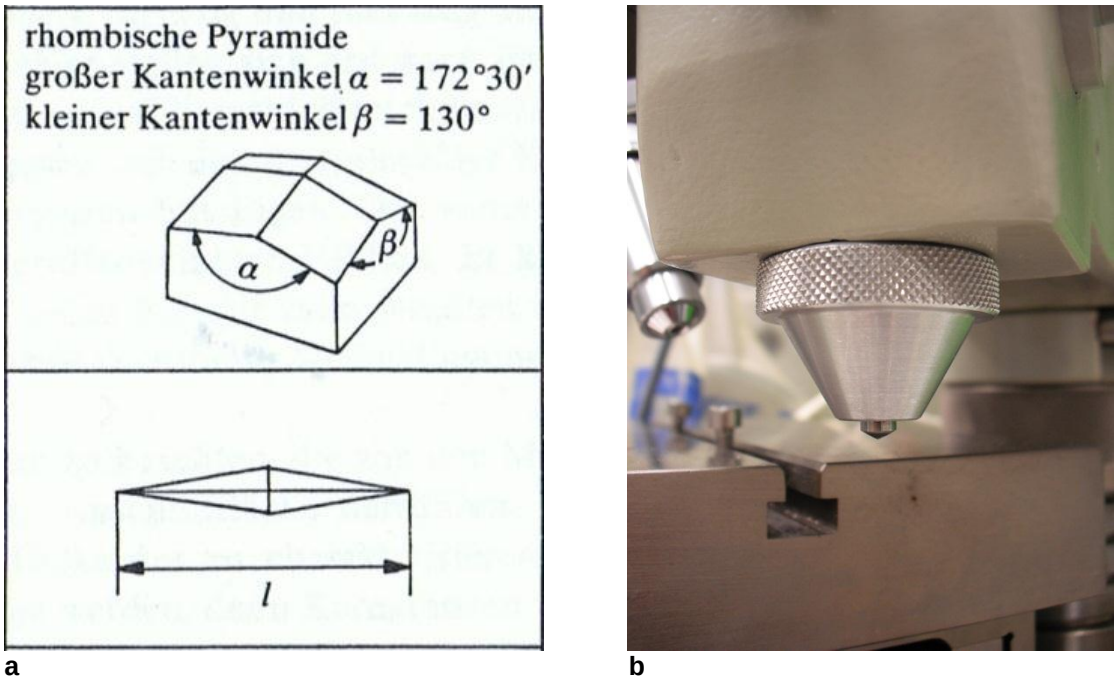
✓ mit Fluorid-Applikation

× ohne Fluorid-Applikation

Die Fluoridierung der Proben erfolgte mit einer erbsengroßen Menge elmex® gelée (1,25% F, pH 4,8–6,0, GABA GmbH, Lörrach, Deutschland) für drei Minuten. Anschließend mussten die Proben gründlich mit destilliertem Wasser abgespült werden.

4.1.4. Härteprüfung nach Knoop

Zu Beginn der Versuchsreihe, nach den Oberflächenbehandlungen und nach dem Säureangriff wurde die Mikrohärte der Proben gemessen. Die Messung erfolgte mit dem Härteprüfverfahren nach Knoop. Das Mikrohärteprüfgerät 3212 B (Zwick GmbH, Ulm, Deutschland) verfügt über einen Diamant-Eindringkörper mit einem großen Kantenwinkel α (172°30‘) und einem kleinen Kantenwinkel β (130°), der aufgrund seiner Form einen rhombischen Eindruck hinterlässt (siehe Abb. 5).



a b

Abb. 5: Skizze des Eindringkörpers und einer Indentation (Schumann 1991) (a), Foto des Eindringkörpers (b)

Im Labor des Instituts für Zahnärztliche Werkstoffkunde und Biomaterialforschung des Universitätsklinikums Aachen, wurden pro Messzeitpunkt sechs Indentationen auf jede Probe gesetzt. Aus dem Mittelwert dieser Einzelwerte errechnete sich die Mikrohärte einer Probe. Die Proben wurden mit einer Prüfkraft von 50 g (0,49 N) und einer Krafthaltedauer von 20 Sekunden belastet. Die Indentationen wurden innerhalb der grün umrandeten Fläche untereinander in koronoapikaler Richtung gesetzt. Die lange Diagonale des Eindruckes lag parallel zur mesiodistalen Ausrichtung der Zahnhälfte. Der Abstand zwischen zwei Indentationen betrug 50 μm. Die Indentationen der Ausgangsmikrohärte (Baseline) lagen bei beiden Prozeduren in der Mitte. Links

davon befanden sich die nach dem Säureangriff, und rechts die nach der Oberflächenbehandlung gesetzten Indentationen. Der Abstand zwischen den Messreihen betrug 100 µm (siehe Abb. 6).

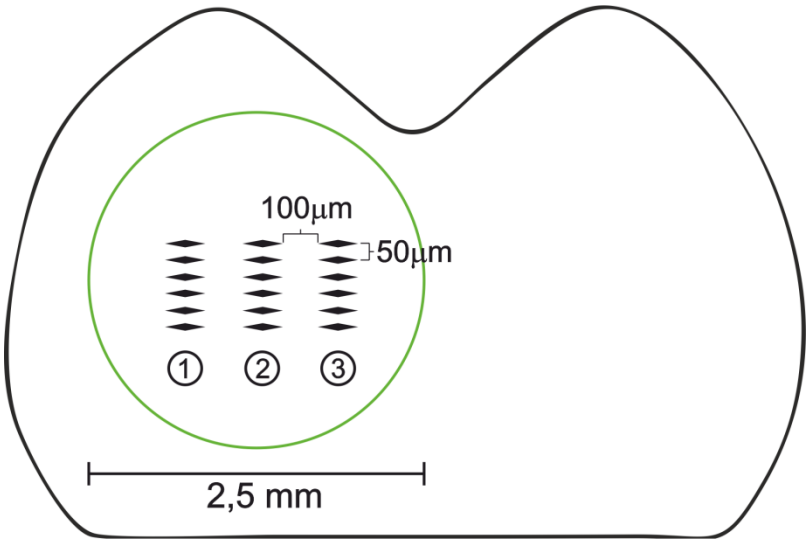


Abb. 6: Skizze einer Probe mit Darstellung der Position der Mikrohärteeindrücke, Indentationen nach dem Säureangriff ①, Indentationen zur Messung der Ausgangsmikrohärte (Baseline) ②, Indentationen nach der Oberflächenbehandlung ③

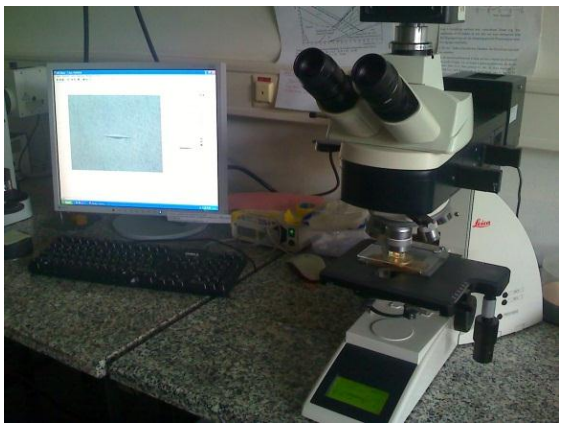
Im Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau (IWM) der RWTH Aachen wurden die Indentationen zu Beginn der Versuche (Baseline), nach der Oberflächenbehandlung und nach dem Säureangriff vermessen und der Wert der Mikrohärte, die sogenannte Knoop-Härte-Nummer (KHN) ermittelt. Hierfür wurde jede Indentation mithilfe einer Mikroskop-Kamera (ProgRes 3012, Jenoptik, Jena, Deutschland) an einem digitalen Lichtmikroskop (DM 4000 M, Leica, Wetzlar, Deutschland) bei tausendfacher Vergrößerung aufgenommen und in einer Bilddatenbank archiviert (a4i Doku 5.1, Aquinto, Enfield, USA). Durch Vermessen der langen Diagonale jedes Härteeindruckes am Computer (siehe Abb. 7a-b) und mithilfe der einprogrammierten Knoop-Formel, konnte die Mikrohärte über eine Bildanalysesoftware (a4i Analysis, Aquinto, Enfield, USA) berechnet werden. Die Formel zur Berechnung der KHN lautet:

$$KHN = \frac{F(kg)}{c_p \times L^2}$$

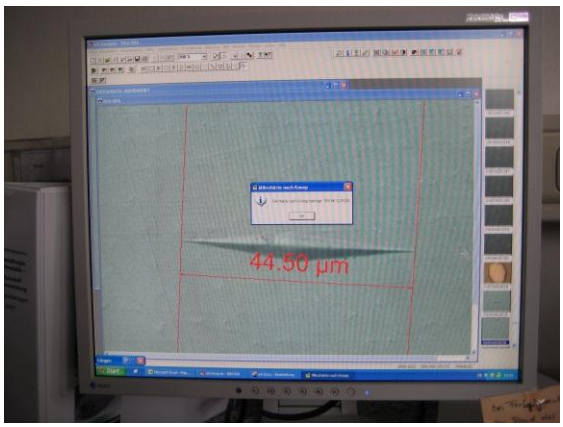
F = Prüfkraft in kg

L = Länge der langen Diagonale der Indentation in mm

c_p = Konstante des Eindringkörpers ($7{,}028 \times 10^{-2}$)



a



b

Abb. 7: Digitales Lichtmikroskop zur Aufnahme der Indentationen (a), Vermessung einer fotografierten Indentation (b)

In vielen Studien wird die Mikrohärte allgemein mit der Bezeichnung „Surface Microhardness“ (SMH) beschrieben. In den folgenden Formeln wird daher dieser Begriff anstelle der Abkürzung „KHN“ verwendet.

Für die Analyse der Ergebnisse wurde die Differenz zwischen der Mikrohärte einer Gruppe zu Beginn und am Ende des Versuches (∆SMH) berechnet. Dafür wurde die Mikrohärte am Versuchsende (nach dem Säureangriff bei Prozedur A und nach der Oberflächenbehandlung bei Prozedur B) von der Mikrohärte der Ausgangsmikrohärte (Baseline) subtrahiert. Die Formel zur Berechnung von ∆SMH lautet:

$$\Delta SMH = SMH\ Baseline - SMH\ Versuchsende$$

Anhand der so ermittelten Werte und der folgenden Formel, konnte die prozentuale Reduktion der Mikrohärte der jeweiligen Gruppen im Vergleich zur Kontrollgruppe berechnet werden. Diese Formel lautet:

$$\%Reduktion\ von\ \Delta SMH = \frac{\Delta SMH\ Kontrolle - \Delta SMH\ Oberflächenbehandlung \times 100}{\Delta SMH\ Kontrolle}$$

4.1.5. Säureangriff mit Zitronensäure

Die Gruppen von Prozedur A und Prozedur B wurden am selben Tag und unter denselben Bedingungen nacheinander mit Säure behandelt. Dafür wurde Zitronensäure (1%) mit einem pH Wert von 4 verwendet. Die Proben von Prozedur A hatten zu diesem Zeitpunkt schon die Oberflächenbehandlungen durchlaufen, die von Prozedur B noch nicht. Jede einzelne der 13 Proben einer Gruppe wurde, mit der exponierten Schmelzoberfläche nach oben, in einen großen flachen Behälter gelegt, wobei sich die Proben nicht überlappen durften. Für jede Gruppe wurden 1,5 l Zitronensäure in den Behälter gefüllt und dieser wurde dann in ein auf 29 Schwenkbewegungen pro Minute eingestelltes Schüttelwasserbad (GFL 1086, Gesellschaft für Labortechnik mbH, Burgwedel, Deutschland) gestellt. Bei Raumtemperatur wurden die Proben drei Minuten lang der Zitronensäure ausgesetzt, danach vorsichtig in eine mit destilliertem Wasser gefüllte Schale gegeben, zusätzlich unter fließendem, destilliertem Wasser abgespült und für fünf Sekunden unter Druckluft getrocknet.

4.1.6. Fluoridanalyse

4.1.6.1. Fluoridelektrode und Ionenmeter

Um zu erkennen, ob die Oberflächenbehandlungen in Studie 1 Veränderungen in der Fluoridaufnahme der Schmelzproben bewirkt haben, wurde der Fluoridgehalt der Proben aller Gruppen mit einer Fluoridelektrode gemessen (Orion Typ 96-09, Thermo Electron Corporation®,Beverly, USA). Es handelte sich hierbei um eine ionenselektive Elektrode (siehe Abb. 8). Diese ist aus zwei Elektroden aufgebaut, einer Mess- und einer Referenzelektrode. Diese Mess- und Referenzelektrode sind in einer Baueinheit zusammengefasst, was sich Einstabmesskette nennt. Die ionenselektive Membran der mit einem Epoxy-Schutzmantel versehenen Fluoridelektrode ist ein Lanthan-Fluorid-Einkristall, der eine Leitfähigkeit für Fluorid-Ionen aufweist. Wenn die hochempfindliche Membran mit einer Fluoridlösung in Kontakt kommt, dann bleibt das Spannungspotential der Referenzelektrode konstant, während sich das der Messelektrode mit der Aktivität der entsprechenden Ionen ändert. Über die

daraus resultierende Spannungsänderung können dann Rückschlüsse auf die Konzentration der sich in der Lösung befindlichen Fluorid-Ionen gezogen werden. Das mit einem Ionenmeter gemessene Potenzial entspricht der Konzentration der Fluorid-Ionen und wird durch die Nernst`sche Gleichung beschrieben (Bedienungsanleitung Fluoridelektrode Orion, Typ 9609):

$$E = E_0 - S \log (A)$$

E = gemessenes Elektrodenpotenzial in mV
E_0 = Referenzpotenzial (als Konstante)
A = Fluoridgehalt in der Lösung (Aktivität)
S = Elektrodensteilheit (59,16 mV bei 25°C)



Abb. 8: Ionenselektive Fluoridelektrode

Vor dem Gebrauch wird die Elektrode mit einer Fülllösung gefüllt (Orion 900061, Optimun Results™ A, Thermo Electron Corporation, Beverly, USA). Nach einem einstündigen Gebrauch kommt es zu Ermüdungserscheinungen der Elektrodenmembran. Eine Ruhephase zur Regeneration der Elektrode hat sich daher bewährt.

4.1.6.2. Das Polynomverfahren

Wie bereits erwähnt, wurde mithilfe der ionenselektiven Fluoridelektrode der Fluoridgehalt der Proben über eine Spannungsdifferenz gemessen. Der Hersteller gibt hierfür die Methode der Direktmessung an. Dabei wird mit Eichlösungen, die eine definierte Fluoridkonzentration enthalten, eine Eichkurve erstellt (siehe Abb. 9), wodurch die über das Ionenmeter gemessene Spannung in mV einer entsprechenden Fluoridkonzentration in mg/l zugeordnet werden kann.

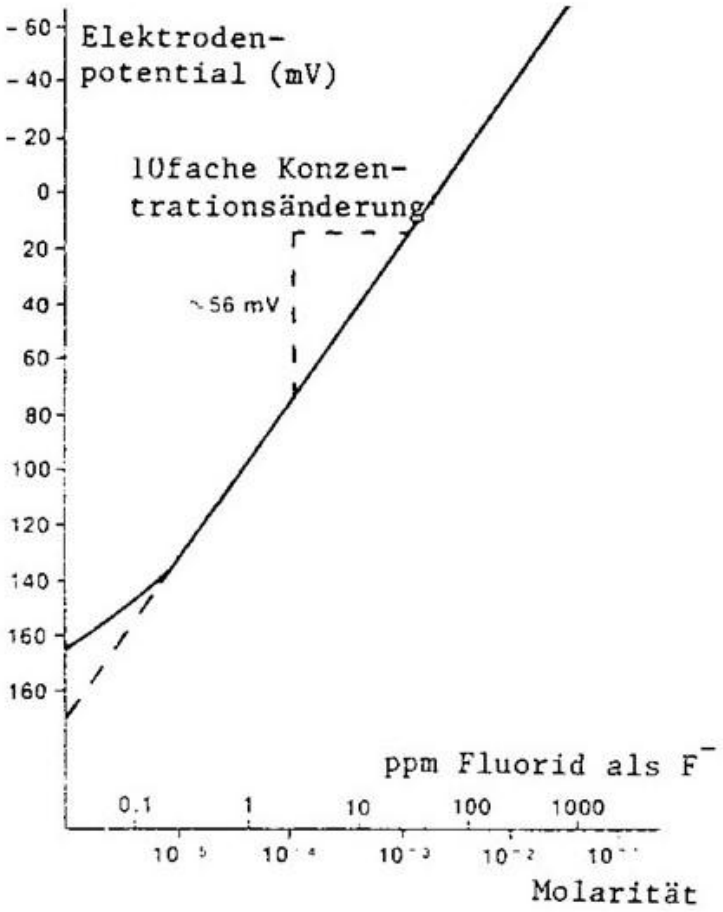


Abb. 9: Eichkurve

Die im Ionenmeter Orion 920 A (Orion Research Inc., Boston, USA) integrierte Software ist in der Lage eine solche Eichkurve zu erstellen. Dies gelingt jedoch nur in einem Konzentrationsbereich von 3,8 bis 0,19 mg/l. In der Eichkurve, die in Abbildung 9 dargestellt ist, entspricht dieser Konzentrationsbereich dem linearen Abschnitt der Kurve. In diesem Bereich ist die Steigung immer gleich. In einem Messbereich < 0,19 mg/l krümmt sich die

Eichkurve und ist, wenn man die Werte auf halblogarithmischem Papier aufträgt, nicht mehr linear. Daher müssten sehr viele Messpunkte in diesen Bereich gelegt werden, um einer Spannung die entsprechende Konzentration zuzuordnen. Um Konzentrationen unterhalb 0,19 mg/l messen zu können, wird vom Hersteller das sogenannte Additionsverfahren empfohlen. Dieses Messverfahren stellte sich jedoch als sehr zeitaufwendig heraus und ist stark anfällig für Fehler (Pietzsch und Rotgans 2004). Der erwartete Konzentrationsbereich des Fluoridgehaltes der Schmelzproben in Studie 1 lag unterhalb einer Konzentration von 0,19 mg/l. Die Nachweisgrenze für Fluorid liegt bei der ionenselektiven Elektrode laut Herstellerangaben bei 10^{-6} mol/l, was umgerechnet einer Konzentration von 0,019 mg/l entspricht. Das benötigte Messverfahren zur Bestimmung des Fluoridgehaltes sollte auch diesen Bereich genau erfassen können und zudem zeitsparend sein. Die Arbeitsgruppe um Prof. Dr. Jerome Rotgans (Klinik für Zahnerhaltung, Parodontologie und Präventive Zahnheilkunde des Universitätsklinikums Aachen) entwickelte deshalb ein Verfahren, mit dem diese Anforderungen erfüllt werden konnten: Das Polynomverfahren.

Der Ansatzpunkt bei der Suche nach dieser neuen Methode war die bereits angegebene Nernst`sche Gleichung. Da dieser Weg jedoch keine befriedigenden Ergebnisse lieferte, wurde mit Polynomen gearbeitet. Hierbei lässt sich jede Kurve mit n Datenpaaren über eine Polynomfunktion (n-1)ten Grades beschreiben. Bei sieben Standards (7-Punkt-Eichung) stellte sich eine Polynomfunktion 5. Grades als zuverlässige und zugleich ökonomische Methode für die Ermittlung der Fluoridkonzentration heraus. Die Funktion lautet:

$$f(x) = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + x$$

Beim Arbeiten mit dem Polynomverfahren war eine Eineichung unerlässlich, um eventuell vorhandene, nicht systematische Fehler, wie Mess- und Verdünnungsfehler, durch die Steigung zwischen den Punktepaaren zu erkennen. Wenn zuvor noch nicht mit dem Ionenmeter und der Fluoridelektrode gearbeitet worden ist, mussten alle sieben Standards (Eichlösungen) fünf Mal gemessen und die mV-Werte gemittelt werden. Mithilfe dieser Mittelwerte und der Polynomfunktion konnte die Berechnung der Fluoridkonzentrationen erfolgen. Bei einer erneuten Eichung wurden nicht mehr alle fünf Messreihen

wiederholt, sondern nur eine, welche dann gegen die älteste ausgetauscht wurde. Die jeweiligen Standards für die Erstellung der Eichkurve wurden im Verhältnis 1:1 mit TISAB II vermischt. Der Ablauf dieser Messungen erfolgte genauso wie der Ablauf der Messung der Probenlösungen.

4.1.6.3. Herstellung der Fluorid-Eichlösungen für die Fluoridanalyse

Damit bei den Messungen der Fluoridkonzentration dem gemessenen Potenzial in mV auch eine entsprechende Konzentration in mg/l zugeordnet werden kann (Eichkurv-Verfahren), musste vorher eine Eichkurve für die Eineichung erstellt werden, die den Konzentrationsbereich von 3,8 bis 0,019 mg/l erfasste. Dazu wurde eine 7-Punkt-Eichung durchgeführt, wofür sieben Eichlösungen, sogenannte Standards, benötigt wurden, die ausgehend von einem auf dem Markt erhältlichen Fluoridstandard mit einer Molarität von 0,1 beziehungsweise 10^{-1} mol/l (Orion Research Inc., Beverly, USA) in einer klassischen Verdünnungsreihe (siehe Tab. 5) hergestellt wurden. Zunächst musste der Fluoridstandard auf eine Konzentration von 10^{-2} mol/l verdünnt werden, indem mittels einer Pipette 10 ml Fluoridstandard aus der Flasche entnommen und in einen 100 ml-Messkolben gefüllt wurde. Der Messkolben wurde dann auf Eichstrich mit destilliertem Wasser aufgefüllt und die Lösung sofort in einen verschließbaren Plastikbehälter umgefüllt. Für das Ansetzen der Standards wurde nur mit Plastikbehältern gearbeitet, da Fluorid an gläsernen Behältern haftet und so die Konzentration verfälscht. Als nächstes musste die so angesetzte Fluoridlösung in eine Lösung mit einer Fluoridkonzentration von 10^{-3} mol/l weiter verdünnt werden. Dafür entnahm man 10 ml des letzten Standards (10^{-2} mol/l) und füllte ihn in einen sauberen 100 ml-Messkolben, der dann auch auf Eichstrich mit destilliertem Wasser aufgefüllt wurde. Die Beschreibung für das Ansetzen der weiteren Lösungen befindet sich in Tabelle 5.

Tab. 5: Fluoridkonzentration der Eichlösungen in mg/l und entsprechend umgerechnet in mol/l, sowie die kurze Beschreibung der Herstellung dieser Lösungen für die Erstellung der Eichkurve

Standard	Gewünschte Konzentration in mg/l	Entsprechende Konzentration in mol/l	Verdünnung
1	3,8	2×10^{-4}	20 ml vom Standard der Konzentration 10^{-3} mol/l auf 100 ml aqua dest.
2	1,9	10^{-4}	10 ml vom Standard der Konzentration 10^{-3} mol/l auf 100 ml aqua dest.
3	0,38	2×10^{-5}	20 ml vom Standard der Konzentration 10^{-4} mol/l auf 100 ml aqua dest.
4	0,19	10^{-5}	10 ml vom Standard der Konzentration 10^{-4} mol/l auf 100 ml aqua dest.
5	0,095	$5x\ 10^{-6}$	50 ml vom Standard der Konzentration 10^{-5} mol/l auf 100 ml aqua dest.
6	0,038	2×10^{-6}	20 ml vom Standard der Konzentration 10^{-5} mol/l auf 100 ml aqua dest.
7	0,019	10^{-6}	10 ml vom Standard der Konzentration 10^{-5} mol/l auf 100 ml aqua dest.

4.1.6.4. Präparation der Proben

Für die Durchführung der Fluoridanalyse wurde nur der kreisrunde exponierte Schmelzbereich der Probe benötigt, der 2,5 mm im Durchmesser betrug und auf dem sich die Indentationen befanden.

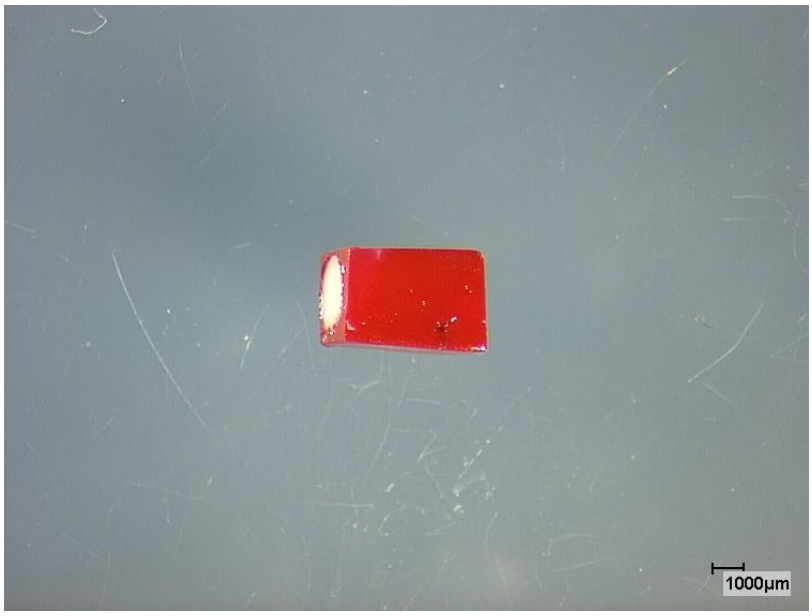


Abb. 10: Präparierte Probe für die Fluoridanalyse

Dieser Schmelzbereich wurde aus allen Proben der Prozedur A und B in quadratischer Form herausgesägt (EXAKT-Trennschleifsystem, Norderstedt, Deutschland). So wurden Proben hergestellt, deren Gesamtfläche ungefähr 2,5 mm x 2,5 mm x 5 mm betrug. Mit säureresistentem Nagellack wurden dann alle Seiten dieser Proben, bis auf den kreisrunden und behandelten Schmelzbereich, abgedeckt (siehe Abb. 10). Die beschrifteten Proben lagerten bis zu Ihrem Gebrauch in einer mit Minerallösung getränkter Mull-Kompresse. Wie bereits in Kapitel 4.1.1 beschrieben, setzte sich diese Lösung aus 1,5 mmol/l $CaCl_2$, 1,0 mmol/l KH_2PO_4 und 50 mmol/l NaCl zusammen und hatte einen pH Wert von 7.

4.1.6.5. Messung des Fluoridgehaltes

Nachdem die Erstellung der Eichkurve mithilfe des Computerprogramms ORIDAT (©Peter Meyer) abgeschlossen war, konnte mit den Fluoridmessungen begonnen werden. ORIDAT ist ein von der Arbeitsgruppe um Prof. Dr. Jerome Rotgans aus der Klinik für Zahnerhaltung, Parodontologie und Präventive Zahnheilkunde des Universitätsklinikums Aachen speziell für das Polynomverfahren entwickeltes Programm.

Fluorid kann entweder als sogenanntes KOH-lösliches oder als fest- beziehungsweise strukturell gebundenes Fluorid vorliegen (Ogaard 1990; Attin et al. 2000b). Wie der Name schon sagt, kann KOH-lösliches Fluorid durch KOH (Kaliumhydroxid) von der Zahnoberfläche gelöst werden, strukturell gebundenes Fluorid jedoch nicht (Caslavska et al. 1975; Attin et al. 1995). In der vorliegenden Fluoridanalyse wurde durch das Herauslösen des Fluorids mit HCl, wodurch auch ein Teil des Schmelzes aufgelöst wurde, sowohl das KOH-lösliche, als auch strukturell gebundenes Fluorid gemessen. Dass HCl zur Auflösung von Schmelz führen kann, ist bereits bekannt (Wiegand et al. 2009d).

Insgesamt wurde der Fluoridgehalt aller Proben aus Prozedur A und B analysiert. Die Methode für das Herauslösen des Fluorids aus den Proben, war angelehnt an die Studie von Benelli et al. (1993) und Goncalves et al. (2006). Dafür wurden 0,5 ml 0,5 M HCl (Merck, Darmstadt, Deutschland) mit einer Präzisionspipette (Eppendorf, Hamburg, Deutschland) in ein verschließbares Reaktionsröhrchen gefüllt. Der präparierte Schmelzblock wurde dann zügig in

das Röhrchen gegeben und 90 Sekunden lang mithilfe eines Vortex-Shakers (Heidolph REAX 2000, Heidolph Instruments GmbH, Schwabach, Deutschland) bei mittlerer Geschwindigkeit geschüttelt. In einem Vorversuch hatte sich herausgestellt, dass 90 Sekunden die stabilsten Ergebnisse lieferten. In diesem Zeitraum wurde nur der Schmelz aufgelöst und die Wahrscheinlichkeit reduziert, dass durch Eindringen von HCl bis ins Dentin die Ergebnisse verfälscht wurden. Das Reaktionsröhrchen wurde so an den Vortex-Shaker gehalten, dass sich die Probe beim Schütteln ständig in der Lösung befand und sich kein Strudel bildete. Nach 90 Sekunden wurde die Probe mithilfe einer Pinzette schnell aus der Lösung herausgenommen. Daraufhin wurde zu den 0,5 ml HCl und des darin gelösten Fluorids die gleiche Menge Tisab II-Lösung, versetzt mit 20 g NaOH/l, in das Reaktionsröhrchen pipettiert (Benelli et al. 1993). Tisab II-Lösung (Orion Research Inc., Beverly, USA), was für „Total Ionic Strength Adjusting Buffer“ steht, hält die Ionenstärke der zu messenden Lösung konstant, indem sie eventuell vorhandene Fluoridverbindungen löst. Denn nur freie Ionen können über die Elektrode gemessen werden. Die Tisab II-Lösung setzt sich zusammen aus Eisessig und NaCl. Der Zusatz von 20 g NaOH/l bewirkt eine Neutralisation der Salzsäure. Da bei der Fluoridanalyse für eine höhere Genauigkeit eine Doppelbestimmung durchgeführt wurde, musste die so hergestellte Messlösung mithilfe der Präzisionspipette gleichmäßig auf zwei beschriftete Plastikbehälter verteilt werden, das heißt 0,5 ml in jeden Behälter. Zur Berechnung der Fluoridkonzentration einer Probe wurde dann der Mittelwert der beiden gemessenen mV-Werte benutzt.

Nach dem Pipettieren der Probenlösungen in die Plastikbehälter wurde ein kleiner Rührmagnet dazu gegeben. Um optimale Ergebnisse zu erzielen war es wichtig die Rührgeschwindigkeit so einzustellen, dass keine Strudelwirkung auftrat. Außerdem musste die Rührgeschwindigkeit bei jeder Probe konstant sein. Da der Magnetrührer (Heidolph MR 2002, Heidolph Instruments GmbH, Schwabach, Deutschland) Wärme erzeugen kann und so die Temperatur der Probenlösung erhöhen könnte, wurde zur Isolierung ein Stück Styropor auf dem Magnetrührer befestigt (siehe Abb. 11). Ferner musste darauf geachtet werden, dass sich im Bereich der Elektrodenmembran keine Luftblase bildete, da auch dies die Messungen beeinflussen würde. Wenn der über das Ionenmeter gemessene mV-Wert stabil war, konnte er sofort über die Software ORIDAT (©Peter Meyer) in den Computer aufgenommen werden. Die gemessenen

Spannungen wurden daraufhin in die speziell vorbereitete Excel-Tabelle übernommen. Mittels Polynomverfahren konnte ihnen dann die entsprechende Fluoridkonzentration in mg/l zugeordnet werden. Diese Einheit wurde anschließend in die Einheit $\mu g/cm^2$ geändert. Dafür wurde zunächst der Fluoridgehalt von mg/l in $\mu g/ml$ umgerechnet und der Fluoridgehalt in 0,5 ml Lösung bestimmt. Mit dem so berechneten μg-Wert des aus den Proben gelösten Fluorids und der Flächenangabe der exponierten Schmelzoberfläche (0,049 cm^2) konnte dann ermittelt werden, wie viel μg Fluorid auf 1 cm^2 Schmelz enthalten war. Die hergeleitete Formel lautete:

$$\mu g/cm^2 = \frac{\left(\frac{\mu g/l}{2}\right)}{0{,}049\ cm^2}$$

Wie bereits erwähnt, wurde für die Doppelbestimmung das Gesamtvolumen der das Fluorid enthaltenden Lösung von 1 ml gleichmäßig auf zwei Plastikröhrchen verteilt. Um den Fluoridgehalt in 1 ml der Lösung statt in 0,5 ml zu ermitteln, wurde der in $\mu g/cm^2$ errechnete Wert mit zwei multipliziert.

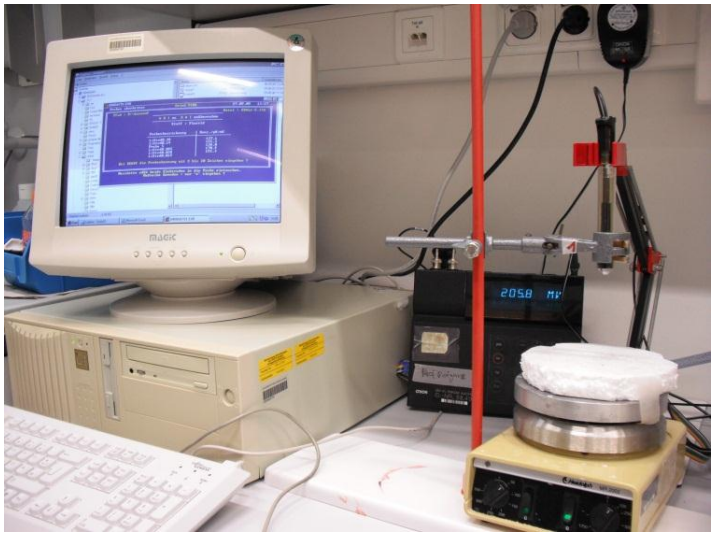


Abb. 11: Messplatz für die Fluoridanalyse

Laut Herstellerangaben beträgt die Ungenauigkeit der Elektrode 2%. Nach Beendigung einer Messreihe konnte mithilfe einer speziell dafür vorbereiteten Excel-Tabelle durch Nachmessen von zwei bis drei Standards mit geringer Fluoridkonzentration kontrolliert werden, ob dieser Wert überschritten wurde. Um genauere Messungen zu erhalten und hohe Ungenauigkeiten zu

vermeiden, wurde daher vor Beginn einer neuen Messreihe eine neue Eichung mit den Standardlösungen durchgeführt und, wie in Kapitel 4.1.6.2 beschrieben, diese neue Eichung gegen die älteste in der Excel-Tabelle zur Erstellung der Eichkurve, ausgetauscht. Außerdem musste die Elektrode nach jeder Messung mit destilliertem Wasser abgespült und vorsichtig abgetrocknet werden, um Verschleppungsfehler zu vermeiden.

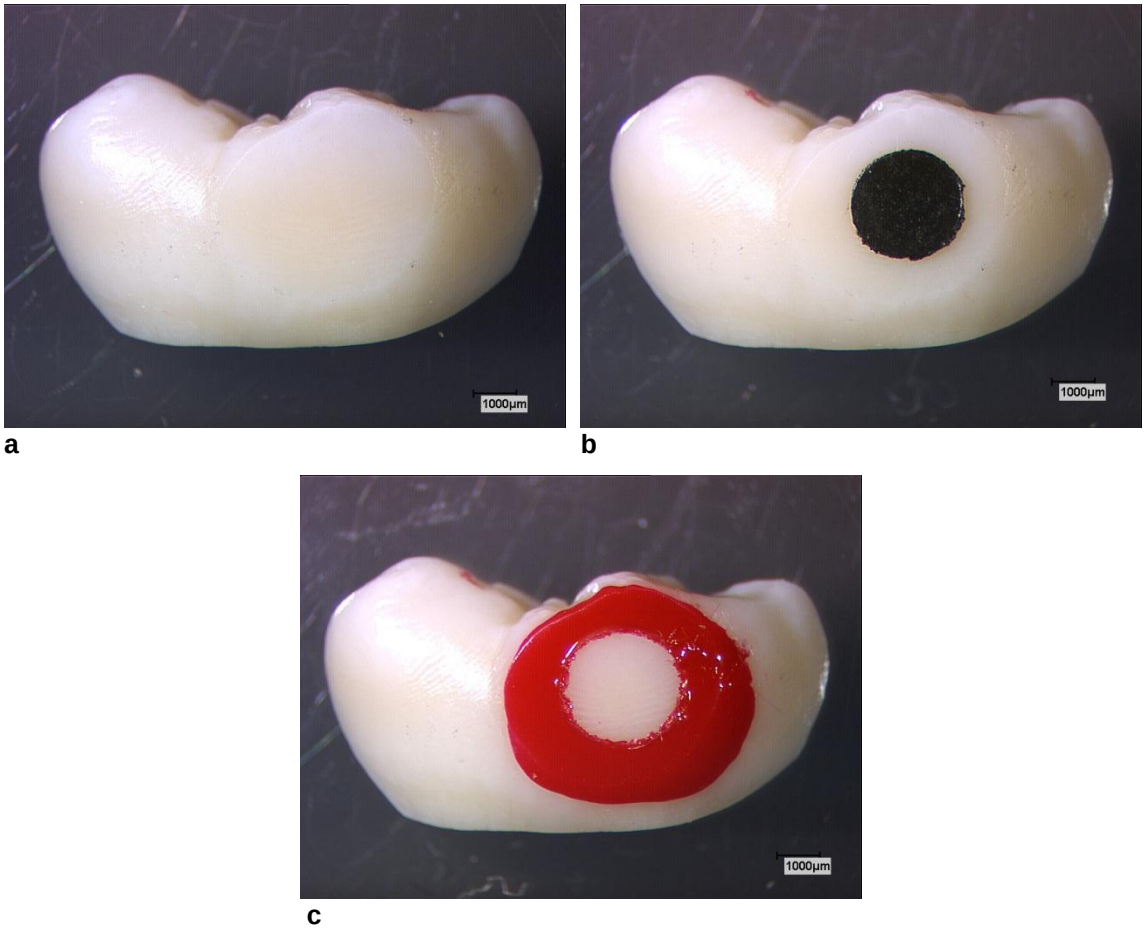
4.2. Studie 2

4.2.1. Herstellung der Proben

Für die Durchführung wurden 60 kariesfreie humane Weisheitszähne verwendet, die, unter dem Stereomikroskop betrachtet, keinerlei Schmelzsprünge oder beschädigte Schmelzoberflächen aufwiesen. Bis zum Versuchsbeginn erfolgte die Lagerung der Zähne in einer Thymol-Lösung (0,1%, pH 7) bei 4°C. Nach der Reinigung der Weisheitszähne unter fließendem Leitungswasser, wurden mithilfe einer diamantierten Bandsäge (EXAKT-Trennschleifsystem, Norderstedt, Deutschland) zunächst die Zahnkronen von den Wurzeln abgetrennt und daraufhin die Kronen so halbiert, dass man eine orale und eine bukkale Zahnhälfte erhielt. Nur eine der Zahnhälften wurde für den Versuch ausgewählt und die andere verworfen. Jede Hälfte wurde mit der Rückseite nach unten mit lichthärtendem Fixationskleber in der Klebepresse auf einen Objektträger geklebt. Mithilfe des EXAKT-Mikroschleifsystems und kontrolliert durch eine Mikrometerschraube wurde nun mit Siliziumkarbid-Nassschleifpapier der Körnung 1200 eine Schmelzschicht von etwa 200 µm abgetragen, so dass eine planparallele Schmelzfläche entstand. Nach diesem Schritt wurde jede Probe für je fünf Minuten erst mit Siliziumkarbid-Nassschleifpapier der Körnung 2400 und anschließend mit der Körnung 4000 im EXAKT-Mikroschleifsystem poliert. Die Hochglanzpolitur erfolgte eine Minute lang mit Diamantpaste der Korngröße 3 µm auf einem Poliertuch und unter ständiger Wasserkühlung. Zwischen jedem Politurschritt wurden die Proben eine Minute lang im Ultraschallbad gereinigt. Nach Beendigung der Politur, wurden alle Proben vom ihrem Objektträger gelöst und jeweils sechs zufällig

ausgewählt, die dann gemeinsam untereinander mit Fixationskleber auf einen neuen Objektträger fixiert wurden (Schlueter et al. 2009a).

Aus einem dicken Klebeband wurde mithilfe einer Lochzange ein Aufkleber mit einem Durchmesser von 2,5 mm ausgestanzt. Wie beim ersten Versuch diente dieser Aufkleber dazu, den zu behandelnden Bereich zu markieren. Außerdem entsprach der Durchmesser von 2,5 mm genau dem Durchmesser des Laserstrahls. Der Aufkleber musste so auf die polierte Zahnfläche platziert werden, dass sich um ihn herum noch ein 0,5-1mm großer Bereich polierten Zahnschmelzes befand (siehe Abb. 12a-b). Dies war wichtig für die späteren Profilmessungen mit dem Konturenmessgerät, da dabei diese Schmelzoberfläche als Referenzbereich dienen sollte. Durch ihn konnte ermittelt werden, wie viel Schmelz durch den Säureeingriff und die zusätzlichen Bürstabrasionen verloren gegangen ist. Um den Referenzbereich während der erosiven und abrasiven Prozesse zu schützen, wurde er mit säureresistentem Nagellack bedeckt (siehe Abb. 12c).



a b

c

Abb. 12: Probe mit planparallel geschliffenem und poliertem Schmelzbereich (a), Aufkleber auf dem polierten Schmelzbereich (b), mit Nagellack bedeckter Referenzbereich und exponierter Schmelzbereich (c)

Nachdem der Nagellack getrocknet war, konnte der Aufkleber vorsichtig mit einem Skalpell entfernt werden und hinterließ die exponierte, 2,5 mm im Durchmesser große Schmelzoberfläche (Ganss et al. 2005). Aus der Gesamtanzahl der hergestellten Proben wurden zufällig welche ausgewählt und auch zufällig den fünf Gruppen zugeordnet. Angelehnt an die Studie von Schlueter und Kollegen (2009a) wurde hier eine Anzahl von zwölf Schmelzproben pro Gruppe gewählt. Die Lagerung der Proben erfolgte in einer verschließbaren Box aus Kunststoff, die mit der gleichen Minerallösung gefüllt war, wie in Studie 1 (siehe Kap. 4.1.1). Der Unterschied zur Studie 1 war der, dass die Proben nicht in feuchte Mullkompressen eingeschlagen, sondern in 150 ml dieser Lösung eingetaucht wurden. Die Minerallösung wurde alle 3 Tage gewechselt und die Boxen bei 37°C gelagert. Jede Gruppe wurde in einer eigenen Box aufbewahrt.

4.2.2. Versuchsdurchführung

4.2.2.1. Oberflächenbehandlungen der Proben

Vor den Säureangriffen und der Durchführung der Bürstabrasionen wurden die Proben, wie diejenigen der Studie 1, je nach Gruppe unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen unterzogen Die Gruppenbezeichnungen und die dazugehörigen Oberflächenbehandlungen sind in Tabelle 6 dargestellt.

Die Kontrollgruppe C erhielt zwar keine Oberflächenbehandlung, wurde aber auch den erosiven und abrasiven Angriffen ausgesetzt. Gruppe L erhielt eine alleinige CO_2 Laserbehandlung und Gruppe F eine alleinige Fluoridbehandlung. In Gruppe LF erfolgte zuerst die CO_2 Laserbestrahlung der Proben und direkt im Anschluss die Fluorid-Applikation, in Gruppe FL erfolgte zuerst die Fluorid-Applikation und direkt danach die CO_2 Laserbestrahlung. Die Laserparameter entsprachen denen aus Studie 1 (siehe Tab. 4). Für die Fluorid-Applikation wurde auch hier eine erbsengroße Menge elmex® gelée (1,25% F, pH 4,8-6,0, GABA GmbH, Lörrach, Deutschland) für drei Minuten auf den Schmelz aufgetragen. Die Proben wurden daraufhin gründlich mit destilliertem Wasser abgespült.

Tab. 6: Darstellung der Gruppenbezeichnungen und der dazugehörigen Oberflächenbehandlung

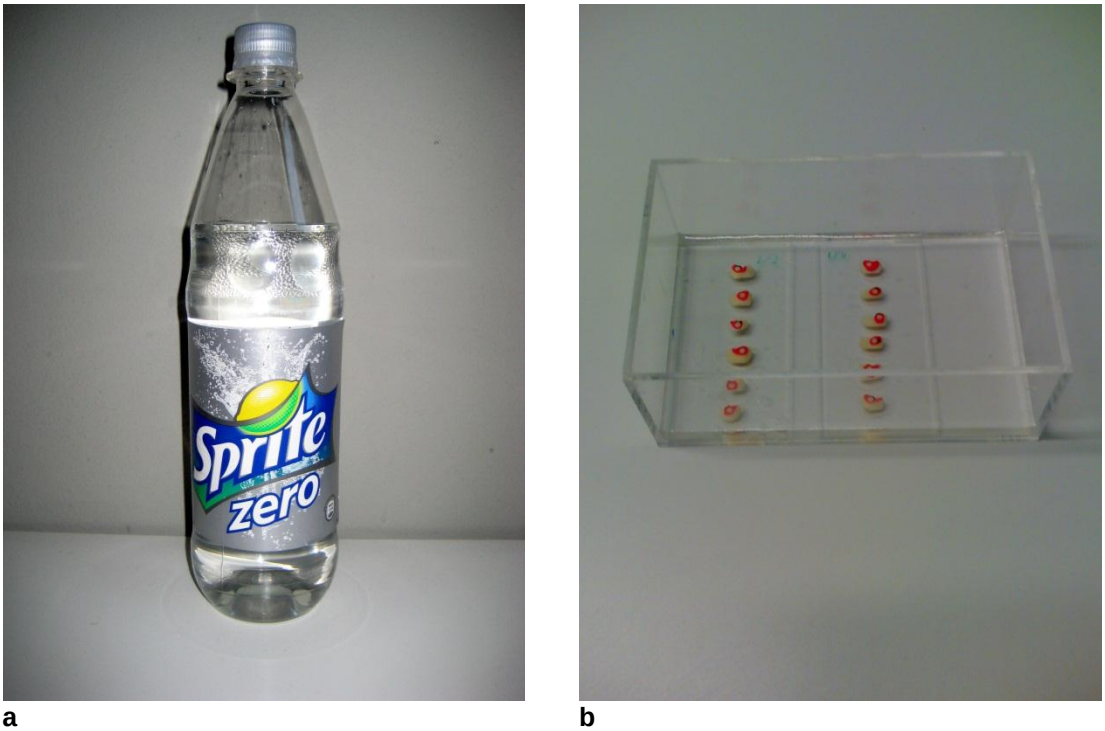
Gruppe (n = 12)	Oberflächenbehandlung
C	Keine (Kontrollgruppe)
L	Nur CO_2 Laserbestrahlung
F	Nur Fluorid-Applikation
LF	1. CO_2 Laserbestrahlung, 2. Fluorid-Applikation
FL	1. Fluorid-Applikation, 2. CO_2 Laserbestrahlung

4.2.2.2. Erzeugung der Erosionen und Bürstabrasionen

Nach den jeweiligen Oberflächenbehandlungen wurden die Proben, angelehnt an eine Studie von Attin und Kollegen (2001b), in einem hier 25-tägigen Versuch erosiven und abrasiven Prozessen ausgesetzt. Die Proben jeder Gruppe wurden zwei Mal täglich zur gleichen Zeit in einem Abstand von vier Stunden einem sauren Getränk ausgesetzt und daraufhin sofort mit einer elektrischen Zahnbürste gebürstet. Attin und Kollegen wählten bereits in mehreren Studien Sprite® light als erosive Flüssigkeit, da dies ein kohlensäurehaltiges Getränk ist, das mit 18,4 g Zitronensäure pro 100 ml und einem pH Wert von 2,91 mehr titrierbare Säuren enthält, als viele andere Lebensmittel (Attin et al. 1999; Attin et al. 2001b). Da Sprite® light heute nicht mehr käuflich zu erwerben ist, wurde für diese Studie Sprite® Zero verwendet (siehe Abb. 13a). Sprite® Zero hat einen pH Wert von 2,9.

Für jeden Säureangriff wurden pro Gruppe 100 ml des Getränkes benötigt. Diese Menge gewährleistete die vollständige Bedeckung der Proben zu jeder Zeit. Diese 100 ml Sprite® Zero wurden in ein Gefäß gegeben und dieses Gefäß wiederum in ein auf zwanzig Schwenkbewegungen pro Minute eingestelltes Schüttelwasserbad platziert (GFL 1086, Gesellschaft für Labortechnik mbH, Burgwedel, Deutschland). Die beiden Objektträger einer Gruppe mit den darauf befestigten 12 Proben (siehe Abb. 13b) wurden mit destilliertem Wasser abgespült, in das mit Sprite® Zero gefüllte Gefäß eingetaucht und 90 Sekunden lang darin geschwenkt. Sofort nach Ablauf der 90 Sekunden wurden die Proben aus der Flüssigkeit herausgenommen und mit einer elektrischen Zahnbürste (Braun Oral B Professional Care 8500, Procter &

Gamble GmbH, Deutschland) unter kontrollierter Bürstkraft fünf Sekunden lang gebürstet. Laut einer Studie von Ganss et al. (2009) putzen Erwachsene ihre Zähne im Durchschnitt 96,6 Sekunden lang. 22,3% der untersuchten Personen bürsteten ihre Zähne sogar über 120 Sekunden lang. Eine Putzdauer von 120 Sekunden ergibt bei 28 Zähnen eine durchschnittliche Putzdauer pro Zahn von 4,3 Sekunden. Eine Putzdauer von 5 Sekunden pro Zahn wurde somit für die Studie 2 als geeignet erachtet. Die Aufsteckbürste (Precision Clean, Oral B, Procter & Gamble GmbH, Deutschland) wurde so präpariert, dass nur noch die mittleren Borsten vorhanden waren. Die äußeren Borsten wurden entfernt, um den Nagellack und die sich darunter befindende Referenzfläche nicht zu beschädigen. Messungen mit einer elektronischen Schieblehre (Mauser, Isny, Deutschland) haben ergeben, dass ein Filament der Borsten einen Durchmesser von 0,15 mm und eine Länge von 6,7 mm hat.



a **b**

Abb. 13: Sprite® Zero (a), Proben einer Gruppe in einem Behälter (b)

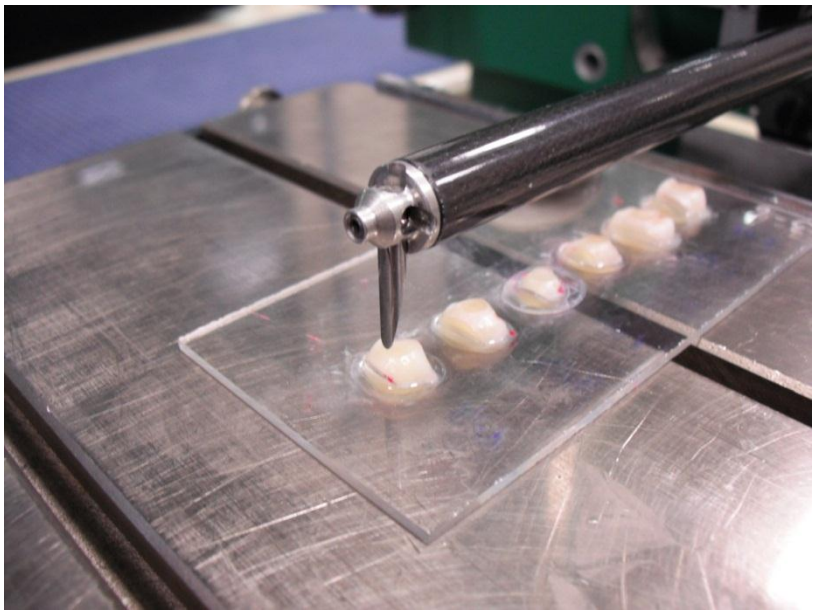
Bei jedem Bürstvorgang wurde pro Probe 0,3 g elmex® Zahnpasta benutzt (GABA GmbH, Lörrach, Deutschland). Laut Informationen der GABA GmbH (E-Mail Kommunikation) ermittelte ein US-amerikanisches Institut (Missouri Analytical Laboratories, St. Louis, USA) bei elmex® Zahnpasta einen RDA-Wert von 91 ± 15% (Messung nach der deutschen Norm DIN EN ISO 11609). Der

REA-Wert beträgt 4,3 ± 0,3 (Barbakow et al. 1989). Nach dem Bürstvorgang wurden die Proben gründlich mit destilliertem Wasser abgespült, in die übersättigte Mineralllösung gelegt und bis zum nächsten Säureangriff und Bürstvorgang bei 37°C gelagert. Nach Beendigung des 25-tägigen Versuches wurden die Proben in einer Thymol-Lösung (0,1%) aufbewahrt.

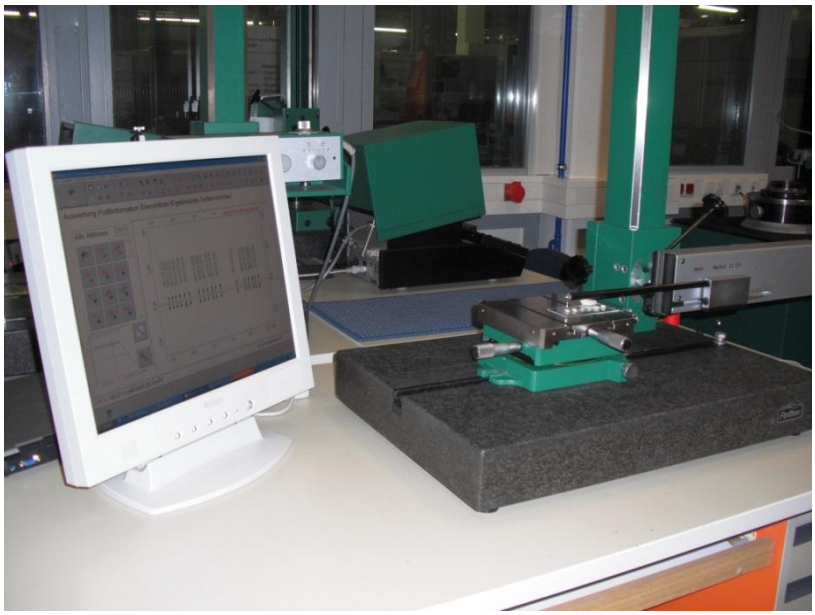
4.2.2.3. Profilometrische Messungen

Nach dem 25-tägigen Versuch wurde der Nagellack gründlich mit Nagellackentferner von den Proben entfernt. Mit dem Stereomikroskop wurde die Schmelzfläche auf Nagellackreste überprüft. Durch Entfernen des Nagellacks war nun der polierte Referenzbereich sichtbar. Der Substanzverlust der exponierten Schmelzoberfläche wurde mithilfe des Konturenmessgerätes MarSurf XC2 (Mahr, Göttingen, Deutschland) im Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen analysiert. Die Wartung des Konturenmessgerätes erfolgt jedes Jahr durch eine Firma, die das Gerät mit hochgenauen Kalibriernormalen eicht und abnimmt. Die Messungenauigkeit beträgt bei einer Profiltiefe von 1 bis 10 μm, 0,2 μm. Die vertikale Auflösung beträgt 0,04 μm. Zur Auflösung kann gesagt werden, dass pro Messung 8000 Messpunkte aufgenommen werden. Um die Genauigkeit der Messungen des Profilometers bei erodierten Schmelzoberflächen zu bestimmen, wurden auf einer Probe der Kontrollgruppe zehn Profile untereinander aufgenommen und gemessen, sowie wiederholte Messungen auf einem einzigen Profil durchgeführt. Dies ergab eine Genauigkeit von ± 0,93 μm und ± 0,21 μm.

Das Konturenmessgerät konnte durch den Höhenunterschied zwischen behandelter Schmelzoberfläche und unbehandeltem Referenzbereich ermitteln, wie viel Höhe an Schmelz durch die erzeugten Erosionen und Bürstabrasionen verloren gegangen war. Dazu wurden die Objektträger mit den darauf fixierten Proben mithilfe von Knete auf einem in mehrere Richtungen verschiebbaren X-Y-Tisch befestigt. An dem sogenannten Vorschubgerät war der Tastarm befestigt und daran wiederum die feine Tastnadel aus Hartmetall mit einen Spitzenradius von 25 μm (siehe Abb. 14a-b).



a



b

Abb. 14: Erfassung des Probenprofils durch die Tastspitze des Profilometers (a), Profilometer mit Messplatz (b)

War die am Tastarm befestigte Tastnadel in der gewünschten Position eingestellt, dann senkte sie sich automatisch auf die Probe herunter und tastete die Schmelzoberfläche ab. Die Länge der abgetasteten Fläche betrug 4 mm. Während dieser Messung wurde der Profilverlauf auf dem Bildschirm eines mit der MarSurf XC2 Software ausgestatteten Computers dargestellt und gespeichert (siehe Abb. 14b). Der Profilverlauf wurde anschließend an den polierten Seiten, das heißt an den beiden Übergängen zum Referenzbereich, mithilfe von zwei Punkten und einem Koordinatensystem über diese Punkte

ausgerichtet. Diese Koordinatenlinie stellte den Nullpunkt beziehungsweise die Referenzlinie dar. In das Profil der behandelten Schmelzoberfläche wurden einzelne Punkte per Mausklick festgelegt. Diese wurden dann in Bezug zur Referenzlinie ausgemessen und ergaben so den Höhenverlust (siehe Abb. 15).

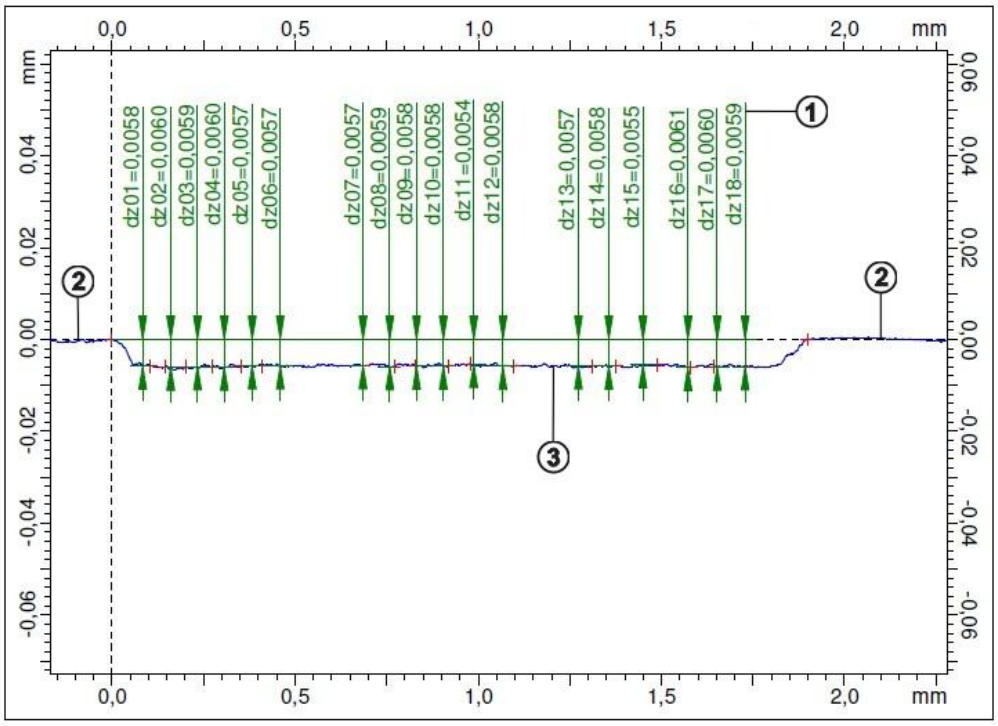


Abb. 15: Profilverlauf mit Vermessung der Läsionstiefe, Substanzverlust (µm) ①, Referenzbereich ②, behandelte Schmelzoberfläche ③

Die kreisrunde, behandelte Schmelzoberfläche jeder Probe wurde drei Mal mit dem Konturenmessgerät und einer Tasterkraft von 0,7 mN abgetastet. So wurde links, in der Mitte und rechts innerhalb des markierten Kreises jeweils ein Oberflächenprofil aufgezeichnet (siehe Abb. 16). Die Messstrecken waren mindestens 100 µm voneinander entfernt. Auf jeder dieser drei Messstrecken wurden 18 Punkte gesetzt, um mithilfe des Computerprogramms den Höhenverlust der behandelten Fläche im Vergleich zur Referenzfläche zu messen (siehe Abb. 15). Sechs dieser Messungen wurden links, sechs in der Mitte und sechs rechts auf dem Profil gesetzt. Pro Probe ergab dies insgesamt 54 Messwerte.

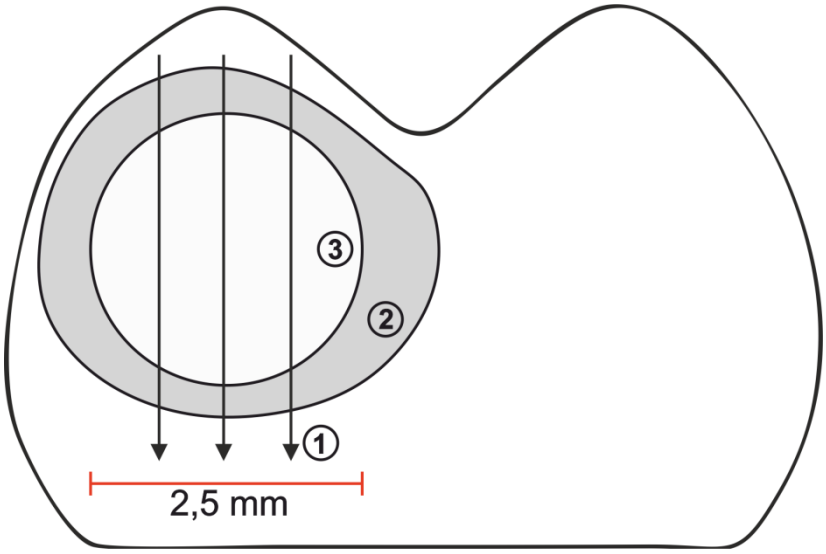


Abb. 16: Lage und Anzahl der Messstrecken des Profilometers, Messstrecke ①, Referenzbereich ②, behandelte Schmelzoberfläche ③

4.2.2.4. Topographiemessung

Zusätzlich zu den Messungen mit dem Profilometer wurde im Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen von je einer Probe aus jeder Gruppe eine Topographiemessung gemacht (siehe Abb. 22 bis Abb. 26). Dadurch konnte die Kontur der Oberfläche der Proben dreidimensional dargestellt werden. Die Messung erfolgte an einem PC-basierten Rauheitsmessplatz, dem Hommel Tester T8000 (Hommel Etamic GmbH, Villingen Schwennigen, Deutschland), mit einer maximalen Auflösung von 0,1 µm oder 0,01 µm.

Beim Messvorgang bewegt ein Vorschubgerät mit einer Führungsgenauigkeit von 0,4 µm/120 mm einen Taster mit Diamanttastnadel über die Oberfläche der Probe und erfasst ein digitales Profil. Es wurde eine Diamanttastnadel mit einem 90° Diamantkegel und einem Spitzenradius von 5 µm verwendet. Die Taststrecke betrug 3 x 3 mm und die Tasterkraft 0,7 mN. Für die Messung und Analyse der dreidimensionalen Bilder wurde die Software Turbo Wave und Hommel Map (Hommel Etamic GmbH, Villingen Schwennigen, Deutschland) verwendet.

4.3. Statistische Auswertung

Für die Studie 1 wurde vor Beginn der Versuche am Institut für Medizinische Statistik der RWTH Aachen eine Fallzahlkalkulation durchgeführt mit der ermittelt wurde, dass eine Anzahl von 13 Proben pro Gruppe geeignet war (siehe Kap. 4.1.2). Dies entspricht insgesamt einer Probenanzahl von 130 Proben. Diese Proben waren verteilt auf 10 Gruppen, 5 pro Prozedur, darunter je eine Kontrollgruppe. Die Mikrohärte jeder Gruppe wurde zu Beginn der Versuche, nach der Oberflächenbehandlung und nach dem Säureangriff gemessen, indem auf jede Probe je sechs Härteeindrücke gesetzt und vermessen wurden. Für die Analyse wurde aus den so ermittelten sechs Knoop-Härte-Nummern pro Probe der Mittelwert berechnet und diese einzelnen Mittelwerte zu einem Gesamtmittelwert pro Gruppe und pro Zeitpunkt zusammengefasst.

Um den Effekt der Behandlung auf die Mikrohärte zu den verschiedenen Messzeitpunkten zu untersuchen, wurde eine „repeated measures“ ANOVA verwendet. Dabei wurden die Behandlung (Einflussfaktor mit 10 Ausprägungen: AC, AL, AF, ALF, AFL, BC, BL, BF, BLF, BFL), der Messzeitpunkt (Einflussfaktor mit 3 Ausprägungen: Baseline, Nach Oberflächenbehandlung, Nach Säureangriff), sowie die Interaktion zwischen den beiden Einflussfaktoren modelliert. Um den Einfluss zwischen verschiedenen Behandlungen oder unterschiedlichen Zeitpunkten zu charakterisieren wurden Kontraste formuliert und getestet.

Für die Untersuchung des Effektes der Fluoridaufnahme bei den Gruppen wurde die Methode der einfaktoriellen Varianzanalyse (One-way ANOVA) genutzt (Faktor Oberflächenbehandlung, 10 Ausprägungen). Bei einem signifikanten „Overall“-Effekt wurden anschließend paarweise Vergleiche der Behandlungsgruppen durchgeführt.

Die einfaktorielle Varianzanalyse wurde auch durchgeführt, um in Studie 2 den Schmelzverlust durch Abrasion zu untersuchen. Die Probenanzahl in Studie 2 betrug insgesamt 60 Proben, welche auf 5 Gruppen mit 12 Proben pro Gruppe aufgeteilt wurden. Nach Durchführung der unterschiedlichen Behandlungen wurde die Tiefe der entstandenen Abrasionen profilometrisch gemessen. Dazu wurden bei jeder Probe drei Profile der Läsion aufgenommen und auf jedem Profil 18 Messpunkte gesetzt. Das entsprach pro Probe 54

Messpunkten. Es wurde der Mittelwert dieser 54 Messpunkte errechnet. Für die Analyse wurden die so ermittelten 12 Mittelwerte pro Gruppe wiederum zu einem Gesamtmittelwert zusammengefasst.

Alle durchgeführten Tests wurden zweiseitig zu einem Signifikanzniveau von 5% durchgeführt. Aufgrund des explorativen Forschungsansatzes wurde keine Adjustierung des Signifikanzniveaus vorgenommen. Die statistische Auswertung der gesammelten Daten erfolgten mit dem Statistikprogramm SAS Version 9.1.3, Prozedur MIXED (SAS Institut, Cary, USA).

5. Ergebnisse

5.1. Studie 1

5.1.1. Prozedur A: Ergebnisse der Mikrohärtemessung

In Prozedur A ergab die zweifaktorielle Varianzanalyse einen signifikanten Haupteffekt für den Einflussfaktor „Behandlung“ ($p = 0{,}0084$), für den Einflussfaktor „Messzeitpunkt“ ($p < 0{,}0001$) und einen signifikanten Interaktionseffekt zwischen den beiden Einflussfaktoren ($p < 0{,}0001$).

Im Allgemeinen wurde, je nach Oberflächenbehandlung, ein Unterschied in der Resistenz des Schmelzes gegenüber einem Säureangriff festgestellt.

Die Ausgangsmikrohärte (Baseline) aller Schmelzproben der fünf Gruppen lag in einem ähnlichen Bereich (siehe Abb. 17). Der Unterschied war statistisch nicht signifikant ($p > 0{,}05$). Die Mikrohärte nach Knoop (KHN) der jeweiligen Gruppen zu den verschiedenen Messzeitpunkten ist in Tabelle 7 zusammengefasst.

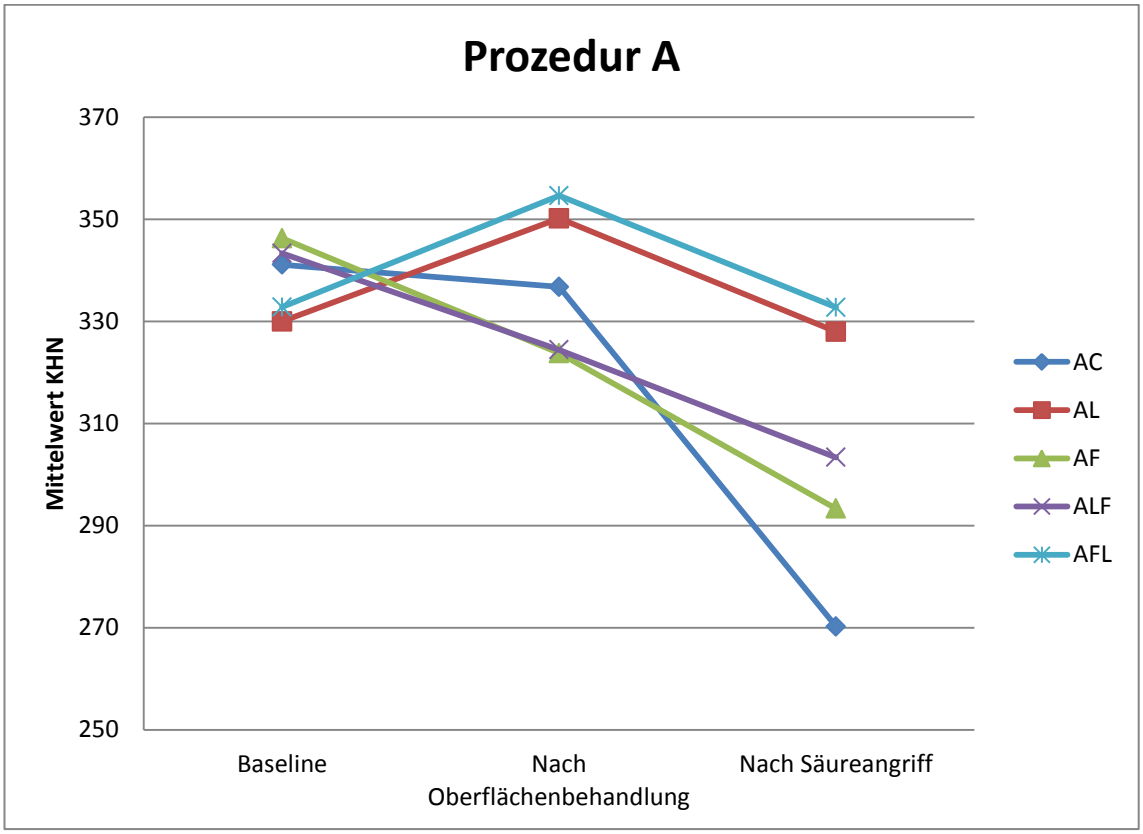


Abb. 17: Veränderung der KHN im Verlauf der Prozedur A

Tab. 7: Mittelwerte der KHN mit Standardabweichung (±) je Messzeitpunkt

Gruppe	Baseline	Nach Oberflächenbehandlung	Nach Säureangriff
AC	341,08 ± 13,36	336,74 ± 10,95	270,21 ± 15,88
AL	329,96 ± 27,63	350,14 ± 30,17	327,94 ± 25,76
AF	346,26 ± 18,37	323,76 ± 26,54	293,32 ± 21,87
ALF	343,32 ± 24,77	324,42 ± 34,39	303,35 ± 43,62
AFL	332,77 ± 29,16	354,59 ± 44,28	332,72 ± 34,08

(p-Werte siehe Tabelle 10,11, und 12)

Beim Vergleich der Gruppen untereinander nach der Oberflächenbehandlung konnten signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen AL und AF (p = 0,0346), AL und ALF (p = 0,0393), sowie zwischen AFL und ALF (p = 0,0166) und den Gruppen AFL und AF (p = 0,0145) festgestellt werden. Die Gruppen AL und AFL hatten eine signifikant höhere Mikrohärte. Es gab allerdings zu diesem Zeitpunkt keine signifikanten Unterschiede im Vergleich der Mikrohärte aller Gruppen mit der derjenigen der Kontrollgruppe (siehe Tab. 8).

Tab. 8: p-Werte für den Vergleich der Gruppen untereinander und mit der Kontrollgruppe nach der Oberflächenbehandlung

Gruppe	AC	AL	AF	ALF	AFL
AC	-----	0,2753	0,2933	0,3186	0,1053
AL	0,2753	-----	0,0346	0,0393	0,7232
AF	0,2933	0,0346	-----	0,9568	0,0145
ALF	0,3186	0,0393	0,9568	-----	0,0166

Beim Vergleich der Mikrohärte der Gruppen untereinander nach der Säurebehandlung (siehe Tab. 9), war ein signifikanter Unterschied in der Härte zwischen den Gruppen AL und AF (p = 0,0046), den Gruppen AL und ALF (p = 0,0413), sowie zwischen den Gruppen AFL und AF (p = 0,0013) und den Gruppen AFL und ALF zu erkennen (p = 0,0148). Hier war die Mikrohärte bei den Gruppen AL und AFL signifikant höher. Nach der Säurebehandlung war des Weiteren ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen AL, AFL und ALF und der Kontrollgruppe feststellbar (p < 0,0001, p < 0,0001, p = 0,0063). Zwischen der Kontrollgruppe und der Gruppe F bestand kein signifikanter Unterschied (p = 0,0530).

Tab. 9: p-Werte für den Vergleich der Gruppen untereinander und mit der Kontrollgruppe nach dem Säureangriff

Gruppe	AC	AL	AF	ALF	AFL
AC	-----	<0,0001	0,0530	0,0063	<0,0001
AL	<0,0001	-----	0,0046	0,0413	0,6737
AF	0,0530	0,0046	-----	0,3953	0,0013
ALF	0,0063	0,0413	0,3953	-----	0,0148

Im Folgenden werden die Unterschiede der einzelnen Gruppen im Verlauf des Versuches erläutert. Der Vergleich der Ausgangsmikrohärte der Gruppen mit derjenigen nach der Oberflächenbehandlung ergab in Gruppe AL (p = 0,0688) und Gruppe AFL (p = 0,0533) einen leichten, jedoch nicht signifikanten Anstieg der Mikrohärte um 6%. Gruppe AF wies nach der Fluorid-Applikation eine statistisch signifikante Abnahme der Mikrohärte um 6% auf (p = 0,0465). Die Abnahme der Mikrohärte um 5,5% in Gruppe ALF (p = 0,0930) war statistisch nicht signifikant. Die Mikrohärte der Proben der Kontrollgruppe AC, die keinerlei Oberflächenbehandlung unterzogen wurden, hatte sich nur geringfügig reduziert (siehe Tab. 10).

Tab. 10: p-Werte für den Vergleich der Ausgangsmikrohärte innerhalb einer Gruppe mit derjenigen nach der Oberflächenbehandlung

Gruppe	p-Wert
AC	0,6969
AL	0,0688
AF	0,0465
ALF	0,0930
AFL	0,0533

Wie in Tabelle 11 dargestellt, hat sich nach dem Säureangriff mit Zitronensäure die Mikrohärte im Vergleich zu den Werten nach der Oberflächenbehandlung bei allen Gruppen signifikant verringert. Am stärksten ist sie in der Kontrollgruppe und in der Gruppe AF gesunken (siehe Abb. 17).

Tab. 11: p-Werte für den Vergleich der Mikrohärte nach der Oberflächenbehandlung mit derjenigen nach dem Säureangriff innerhalb einer Gruppe

Gruppe	p-Wert
AC	<0,0001
AL	0,0185
AF	0,0017
ALF	0,0268
AFL	0,0218

Beim Vergleich der Ausgangsmikrohärte innerhalb einer jeden Gruppe mit der jeweiligen Mikrohärte am Ende des Versuches, was der Mikrohärte nach der Säurebehandlung entspricht, konnte eine statistisch signifikante Abnahme der Mikrohärte in der Kontrollgruppe ($p < 0,0001$), in Gruppe AF ($p < 0,0001$) und Gruppe ALF ($p = 0,0002$) festgestellt werden (siehe Tab. 12). Bei der Kontrollgruppe betrug der Verlust an Mikrohärte durch den Säureangriff im Vergleich zum Ausgangswert 20,8%, bei Gruppe AF 15,3% und bei Gruppe ALF 11,6%. Die Mikrohärte nach dem Säureangriff bei Gruppe AL und AFL war, wie bereits beschrieben, im Vergleich zur Mikrohärte nach Oberflächenbehandlung signifikant gesunken, jedoch war die Härte nach der Oberflächenbehandlung auch etwas angestiegen. Verglichen mit der Ausgangsmikrohärte hat sich die Mikrohärte daher nach der Säureattacke bei Gruppe AL ($p = 0,8432$) und Gruppe AFL ($p = 0,9959$) kaum verringert.

Tab. 12: p-Werte für den Vergleich der Ausgangsmikrohärte innerhalb einer Gruppe mit derjenigen nach dem Säureangriff

Gruppe	p-Wert
AC	<0,0001
AL	0,8432
AF	<0,0001
ALF	0,0002
AFL	0,9959

Die höchste Erosionsresistenz war bei Gruppe AFL erkennbar, bei der die Mikrohärte nach dem Säureangriff um nur 0,02% geringer war, als die Ausgangsmikrohärte. Verglichen mit der Kontrollgruppe entspricht dies einer Verringerung des Mikrohärteverlustes durch Erosionen (prozentuale Reduktion von ΔSMH) um 99,9%. Die nächsthöhere Säureresistenz wies Gruppe AL mit einer Reduktion der Mikrohärte um nur 0,6%, auf. Dies entspricht verglichen mit

der Kontrollgruppe einem um 97,1% geringeren erosiven Mikrohärteverlust. Die Ergebnisse der anderen Gruppen sind in der Tabelle 13 angegeben.

Tab. 13: %Reduktion von ΔSMH im Vergleich zur Kontrollgruppe

Gruppe	%Reduktion von ΔSMH
AFL	99,9%
AL	97,1%
ALF	43,5%
AF	25,2%

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Behandlung des Schmelzes mit dem CO_2 Laser allein oder kombiniert mit einer Vorbehandlung mit Fluorid-Gel (elmex® gelée), zu einer erhöhten Erosionsresistenz des Zahnschmelzes geführt hat.

5.1.2. Prozedur B: Ergebnisse der Mikrohärtemessung

Die zweifaktorielle Varianzanalyse ergab einen signifikanten Haupteffekt für den Einflussfaktor „Messzeitpunkt“ ($p < 0,0001$), für den Einflussfaktor „Behandlung“ jedoch nicht ($p = 0,5883$). Des Weiteren wurde ein signifikanter Interaktionseffekt zwischen den beiden Einflussfaktoren ermittelt ($p < 0,0001$).

Die Ausgangsmikrohärte (Baseline) lag bei allen Gruppen in einem ähnlichen Bereich (siehe Tab. 14 und Abb.18). Der Unterschied war statistisch nicht signifikant ($p > 0,05$).

Tab. 14: Mittelwerte der KHN mit Standardabweichung (±) je Messzeitpunkt

Gruppe	Baseline	Nach Säureangriff	Nach Oberflächenbehandlung
BC	347,67 ± 22,40	296,86 ± 18,77	301,05 ± 18,34
BL	337,44 ± 24,74	286,88 ± 18,67	331,64 ± 19,18
BF	335,91 ± 26,75	301,05 ± 13,32	293,91 ± 17,40
BLF	342,55 ± 15,93	280,24 ± 27,01	314,67 ± 21,15
BFL	345,67 ± 15,25	289,41 ± 20,62	320,88 ± 33,06

(p-Werte siehe Tabelle 17, 18 und 19)

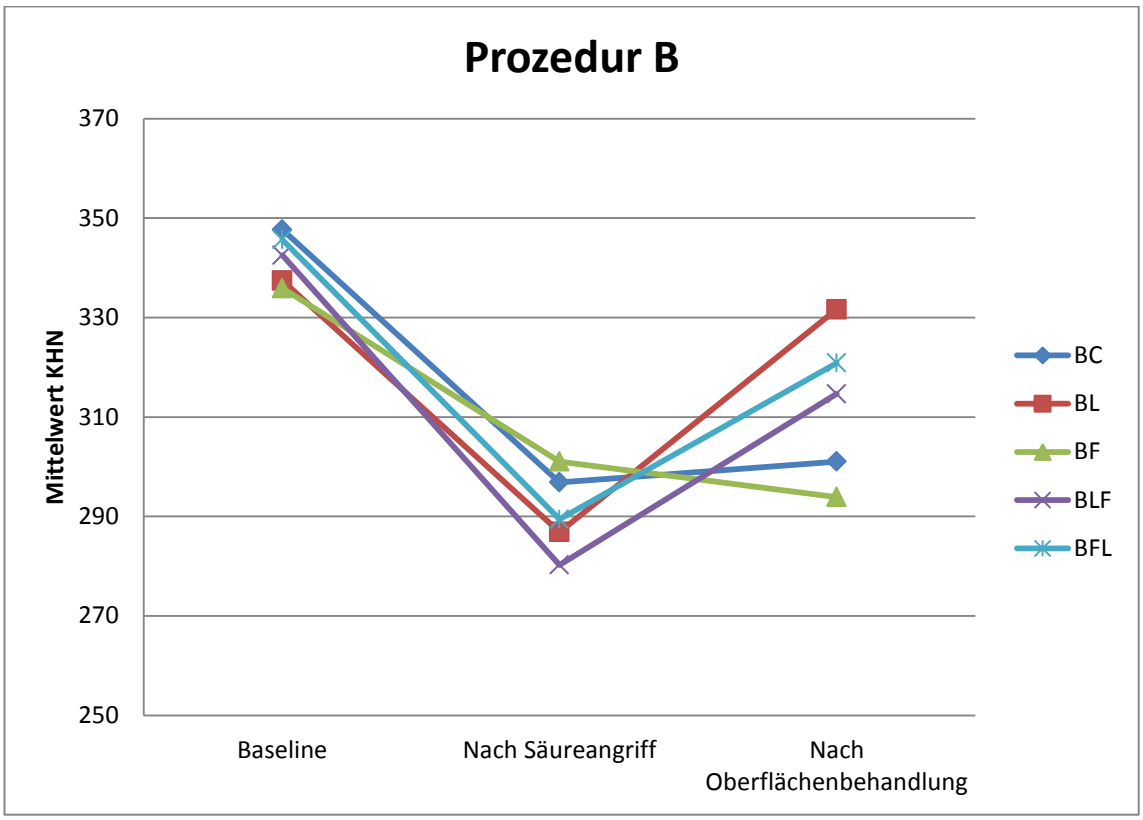


Abb. 18: Veränderung der KHN im Verlauf der Prozedur B

Die Mikrohärte der Gruppen nach dem Säureangriff lag auch in einem ähnlichen Bereich (siehe Tab. 14). Wie in Tabelle 15 dargestellt, bestand nur zwischen der Gruppe BLF und der Gruppe BF (p = 0,0108) sowie zwischen der Gruppe BLF und der Kontrollgruppe (p = 0,0400) ein statistisch signifikanter Unterschied. Die Mikrohärte in Gruppe BLF war hier niedriger.

Tab. 15: p-Werte für den Vergleich der Gruppen untereinander und mit der Kontrollgruppe nach dem Säureangriff

Gruppe	BC	BL	BF	BLF	BFL
BC	-----	0,2127	0,5969	0,0400	0,3509
BL	0,2127	-----	0,0783	0,4044	0,7506
BF	0,5969	0,0783	-----	0,0108	0,1463
BLF	0,0400	0,4044	0,0108	-----	0,2510

Der Vergleich der Mikrohärte nach der Oberflächenbehandlung in den Gruppen untereinander (siehe Tab. 16) zeigt einen signifikanten Unterschied in der Härte zwischen den mit dem Laser behandelten Gruppen BL, BLF, BFL und der Gruppe BF (p < 0,0001, p = 0,0224, p = 0,0034). Die Mikrohärte der nur mit Fluorid behandelten Gruppe BF war hier stets niedriger. Im Vergleich zur

Kontrollgruppe verringerte sich die Mikrohärte der Gruppe BF stärker, jedoch war der Unterschied nicht statistisch signifikant. Ein statistisch signifikanter Unterschied bestand zwischen der Kontrollgruppe und den Gruppen BL und BFL (p = 0,0010, p = 0,0288).

Tab. 16: p-Werte für den Vergleich der Gruppen untereinander und mit der Kontrollgruppe nach der Oberflächenbehandlung

Gruppe	BC	BL	BF	BLF	BFL
BC	-----	0,0010	0,4231	0,1293	0,0288
BL	0,0010	-----	<0,0001	0,0600	0,2291
BF	0,4231	<0,0001	-----	0,0224	0,0034
BLF	0,1293	0,0600	0,0224	-----	0,4852

Im Folgenden werden die Veränderungen der Mikrohärte innerhalb einer Gruppe im Verlauf des Versuches erläutert. Die Ausgangsmikrohärte jeder Gruppe verglichen mit ihrer Mikrohärte nach dem Säureangriff ließ erkennen, dass der Säureangriff bei allen Gruppen zu einer starken und statistisch signifikanten Abnahme (alle p < 0,0001) der Mikrohärte führte (siehe Tab. 17). Der größte Härteverlust konnte in Gruppe BLF mit 18% verzeichnet werden.

Tab. 17: p-Werte für den Vergleich der Ausgangsmikrohärte innerhalb einer Gruppe mit derjenigen nach dem Säureangriff

Gruppe	p-Wert
BC	<0,0001
BL	<0,0001
BF	<0,0001
BLF	<0,0001
BFL	<0,0001

Beim Vergleich der Mikrohärte der einzelnen Gruppen nach der Säurebehandlung mit derjenigen nach der Oberflächenbehandlung, konnte in den Gruppen BL, BLF und BFL ein Wiederanstieg in der Mikrohärte beobachtet werden (siehe Abb. 18 und Tab. 14). Wie Tabelle 18 zeigt, war dieser Anstieg in allen drei Gruppen statistisch signifikant (alle p < 0,0001). In Gruppe BF stieg die Mikrohärte nach der Oberflächenbehandlung nicht wieder an, sondern verringerte sich um weitere 2%. Die Mikrohärte der Kontrollgruppe hat sich nur geringfügig verändert.

Tab. 18: p-Werte für den Vergleich der Mikrohärte nach dem Säureangriff mit derjenigen nach der Oberflächenbehandlung innerhalb einer Gruppe

Gruppe	p-Wert
BC	0,4541
BL	<0,0001
BF	0,2057
BLF	<0,0001
BFL	<0,0001

Auch wenn die durch die Säurebehandlung verringerte Mikrohärte nach der Oberflächenbehandlung in diesen Gruppen wieder stark angestiegen ist, war, zumindest in den Gruppen BLF (p = 0,0007) und BFL (p = 0,0024) die Härte im Vergleich zur Ausgangshärte noch signifikant reduziert (siehe Tab. 19). Die Reduktion der Mikrohärte im Verlauf des Versuches lag in Gruppe BLF bei 8,1% und in Gruppe BFL bei 7,2%. Wird die Endmikrohärte bei Gruppe BL mit ihrer Ausgangsmikrohärte verglichen, so ist erkennbar, dass die Härte im Verlauf der Studie hier nicht signifikant gesunken ist (p = 0,4620). Sie verringerte sich in dieser Gruppe um nur 1,7%. Die nach dem Säureangriff verringerte Härte ist hier nach alleiniger Laserbestrahlung fast wieder auf den Wert der Ausgangshärte angestiegen. In Gruppe BF verringerte sich die Mikrohärte im Verlauf des Versuches um 12,5% und lieferte damit ein geringfügig besseres Ergebnis, als die Kontrollgruppe mit einem Härteverlust von 13,4%.

Tab. 19: p-Werte für den Vergleich der Ausgangsmikrohärte innerhalb einer Gruppe mit derjenigen nach der Oberflächenbehandlung

Gruppe	p-Wert
BC	<0,0001
BL	0,4620
BF	<0,0001
BLF	0,0007
BFL	0,0024

Es kann demnach festgehalten werden, dass es einen Unterschied zwischen denjenigen Gruppen gab, in denen der CO_2 Laser zum Einsatz kam und denjenigen Gruppen, in denen er nicht benutzt wurde. Bei den mit dem CO_2 Laser behandelten Gruppen konnte eine Wiedererhärtung des erweichten Schmelzes festgestellt werden. Jedoch erreichte nur die Gruppe BL fast den

Wert der Ausgangsmikrohärte. Im Vergleich zur Kontrollgruppe verzeichnete sie einen um 87,6% geringeren Mikrohärteverlust (prozentuale Reduktion von ΔSMH). Gruppe BFL wies im Vergleich zur Kontrollgruppe einen um 46,8% und Gruppe BLF einen um 40,2% geringeren erosiven Mikrohärteverlust auf (siehe Tab. 20). Eine alleinige Behandlung der Schmelzproben mit elmex® gelée konnte den Schmelz nicht Wiedererhärten, sondern führte zu einem weiteren, jedoch geringen Härteverlust.

Tab. 20: %Reduktion von ΔSMH im Vergleich zur Kontrollgruppe

Gruppe	%Reduktion von ΔSMH
BL	87,6%
BFL	46,8%
BLF	40,2%
BF	9,9%

5.1.3. Prozedur A: Ergebnisse der Fluoridanalyse

Bei der Fluoridanalyse wurde der Gehalt der Proben an KOH-löslichem und strukturell gebundenem Fluorid gemessen, um zu ermitteln, ob die Oberflächenbehandlungen zu Veränderungen in der Fluoridaufnahme führten.

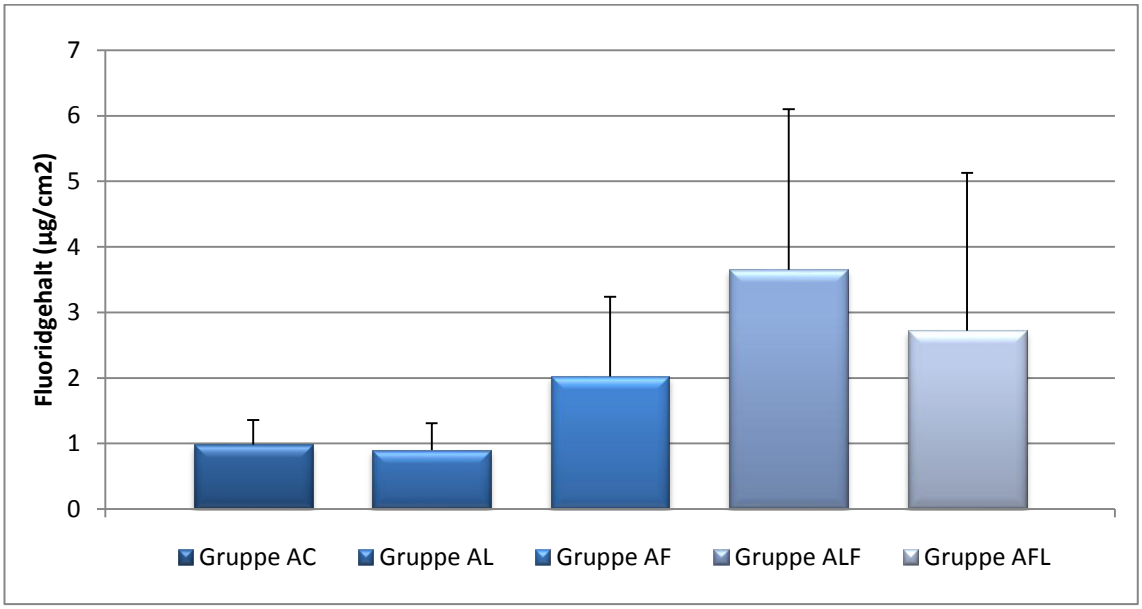


Abb. 19: Fluoridgehalt der Gruppen aus Prozedur A

Die einfaktorielle Varianzanalyse ergab einen signifikanten „Overall“-Effekt (p = 0,0002). Anhand der paarweisen Vergleiche konnte festgestellt werden, dass im Vergleich zur Kontrollgruppe der Fluoridanteil bei den mit elmex® gelée behandelten Gruppen erhöht war (siehe Abb. 19 und Tab. 21). Dies waren die Gruppe AF mit einem Fluoridgehalt von 2,02 ± 1,22 $\mu g/cm^2$, Gruppe ALF mit einem Fluoridgehalt von 3,65 ± 2,45 $\mu g/cm^2$ und Gruppe AFL mit einem Fluoridgehalt von 2,72 ± 2,41 $\mu g/cm^2$.

Tab. 21: Mittelwerte und Standardabweichungen (±) des Fluoridgehaltes im Schmelz

Gruppe	Fluoridgehalt ($\mu g/cm^2$)
AC	0,98 ± 0,38
AL	0,90 ± 0,41
AF	2,02 ± 1,22
ALF	3,65 ± 2,45
AFL	2,72 ± 2,41

(p-Werte siehe Tabelle 22)

Im Vergleich zur Kontrollgruppe konnte jedoch nur in denjenigen Gruppen ein statistisch signifikant höherer Fluoridgehalt ermittelt werden, in denen zusätzlich zur Fluorid-Applikation auch eine CO_2 Laserbehandlung erfolgt ist. Dies betrifft die Gruppe ALF (p = 0,0001) und die Gruppe AFL (p = 0,0092). Der Fluoridgehalt der Gruppe AF war zwar erhöht und reichte fast an den Wert der Gruppe AFL heran, jedoch war der Unterschied im Vergleich zur Kontrollgruppe nicht statistisch signifikant (p = 0,1124).

Beim Vergleich des Fluoridgehalts der Gruppen untereinander konnte beobachtet werden, dass die Gruppen ALF und AFL, wie in Tabelle 22 dargestellt, eine signifikant höhere Fluoriaufnahme aufwiesen, als die Lasergruppe AL (p < 0,0001, p = 0,0066). Verglichen mit der Gruppe AF wies nur die Gruppe ALF einen signifikant höheren Fluoridgehalt auf (p = 0,0143).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Gruppe ALF, in der zuerst die Laserbehandlung und daraufhin die Fluorid-Applikation erfolgte, die höchste Fluoridaufnahme aufwies. Verglichen mit der Kontrollgruppe enthielt sie die 3,7-fache, die Gruppe AFL die 2,8-fache und die nur fluoridierte Gruppe AF die doppelte Menge an Fluorid.

Tab. 22: p-Werte für den Vergleich des Fluoridgehalts der Gruppen untereinander und mit der Kontrollgruppe

Gruppe	AC	AL	AF	ALF	AFL
AC	-----	0,9046	0,1124	0,0001	0,0092
AL	0,9046	-----	0,0885	<0,0001	0,0066
AF	0,1124	0,0885	-----	0,0143	0,2836
ALF	0,0001	<0,0001	0,0143	-----	0,1548

5.1.4. Prozedur B: Ergebnisse der Fluoridanalyse

Auch in Prozedur B wurde der Fluoridgehalt der Schmelzproben mithilfe einer ionenselektiven Fluoridelektrode analysiert. Die einfaktorielle Varianzanalyse ergab einen signifikanten „Overall"-Effekt ($p < 0,0001$).

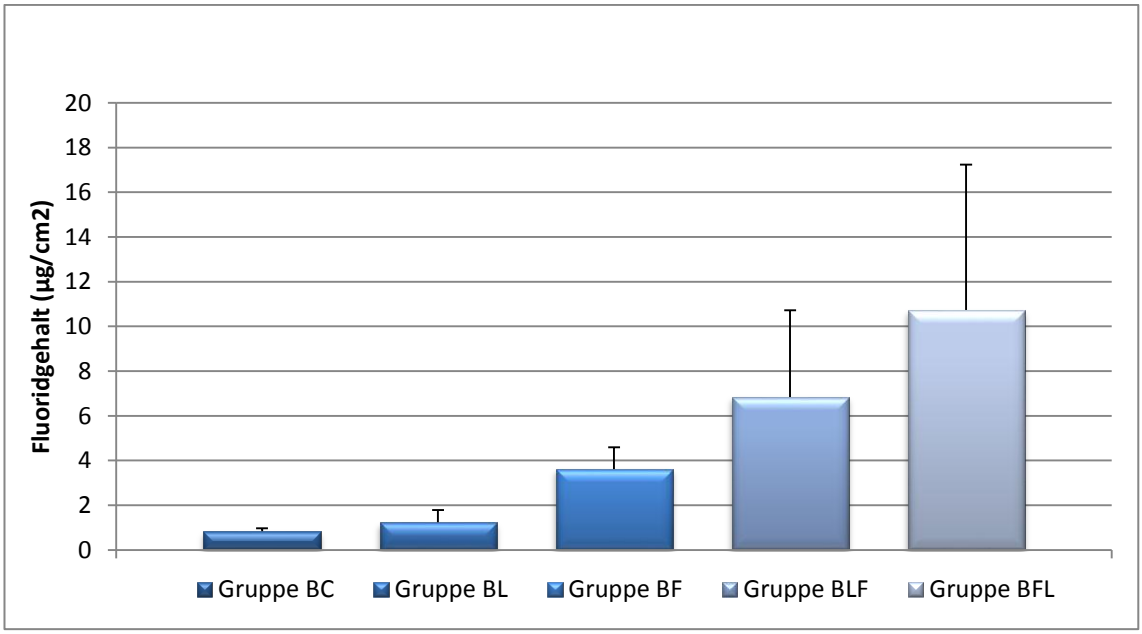


Abb. 20: Fluoridgehalt der Gruppen aus Prozedur B

Tab. 23: Mittelwerte und Standardabweichungen (±) des Fluoridgehaltes im Schmelz

Gruppe	Fluoridgehalt ($\mu g/cm^2$)
BC	0,84 ± 0,13
BL	1,24 ± 0,55
BF	3,62 ± 0,98
BLF	6,84 ± 3,88
BFL	10,73 ± 6,51

(p-Werte siehe Tabelle 24)

Mit 0,84 ± 0,13 μg/cm^2 enthielt die Kontrollgruppe die geringste Fluoridkonzentration, gefolgt von Gruppe BL mit 1,24 ± 0,55 μg/cm^2. Höhere Fluoridkonzentrationen waren in denjenigen Gruppen beobachtbar, in denen elmex® gelée bei der Oberflächenbehandlung appliziert wurde (siehe Abb. 20 und Tab. 23). Dies sind die Gruppe BF mit einer Fluoridgehalt von 3,62 ± 0.98 μg/cm^2, Gruppe BLF mit 6,84 ± 3,88 μg/cm^2 und die Gruppe BFL, die mit 10,73 ± 6,51 μg/cm^2 die höchste Fluoridaufnahme verzeichnete. Verglichen mit der Kontrollgruppe war bei diesen drei Gruppen eine höhere und statistisch signifikante Fluoridkonzentration feststellbar ($p = 0,0425$, $p < 0,0001$, $p < 0,0001$). Die Gruppe BF wies verglichen mit der Kontrollgruppe die 4,3-fache und die Gruppe BLF die 8-fache Menge an Fluorid auf. Die höchste Fluoridaufnahme erreichte jedoch die Gruppe BFL mit einem knapp 13-fach höheren Fluoridgehalt.

Beim Vergleich der Gruppen untereinander konnte beobachtet werden, dass die Gruppen BLF und BFL einen signifikant höheren Fluoridgehalt hatten, als die Gruppen BL (beide $p < 0,0001$) und BF ($p = 0,0197$, $p < 0,0001$) Die p-Werte sind in Tabelle 24 zusammengefasst.

Tab. 24: p-Werte für den Vergleich des Fluoridgehalts der Gruppen untereinander und mit der Kontrollgruppe

Gruppe	BC	BL	BF	BLF	BFL
BC	-----	0,7678	0,0425	<0,0001	<0,0001
BL	0,7678	-----	0,0808	<0,0001	<0,0001
BF	0,0425	0,0808	-----	0,0197	<0,0001
BLF	<0,0001	<0,0001	0,0197	-----	0,0053

Wie in Prozedur A, so fiel auch in Prozedur B auf, dass diejenigen Gruppen, die zusätzlich zur Applikation des Fluorid-Gels auch eine CO_2 Laserbehandlung erhielten, eine höhere Menge an Fluorid aufgenommen hatten, als Gruppen mit alleiniger CO_2 Laser- oder Fluoridbehandlung.

5.2. Studie 2

5.2.1. Ergebnisse der profilometrischen Messungen

Die einfaktorielle Varianzanalyse hat in Studie 2 einen signifikanten „Overall“-Effekt ergeben ($p < 0,0001$).

Der Substanzverlust an Schmelz betrug in Gruppe L 3,08 ± 1.19 µm, in Gruppe LF 2,77 ± 1,02 µm und in Gruppe FL 2,35 ± 0,79 µm. In Gruppe F, in der nur elmex® gelée appliziert wurde, entstand mit 5,17 ± 1,40 µm der höchste Substanzverlust (siehe Abb. 21 und Tab. 25).

Es ist deutlich erkennbar, dass diejenigen Gruppen, die mit dem CO_2 Laser allein oder in Kombination mit Fluorid behandelt wurden, dies waren Gruppe L, Gruppe LF und Gruppe FL, einen geringeren Zahnhartsubstanzverlust verzeichneten, als die Gruppen in denen der Laser nicht zum Einsatz kam. Der Unterschied zwischen den Gruppen L, LF und FL und der Gruppe F, die nur fluoridiert wurde, war statistisch signifikant (alle $p < 0,0001$). Die p-Werte sind in Tabelle 26 zusammengefasst.

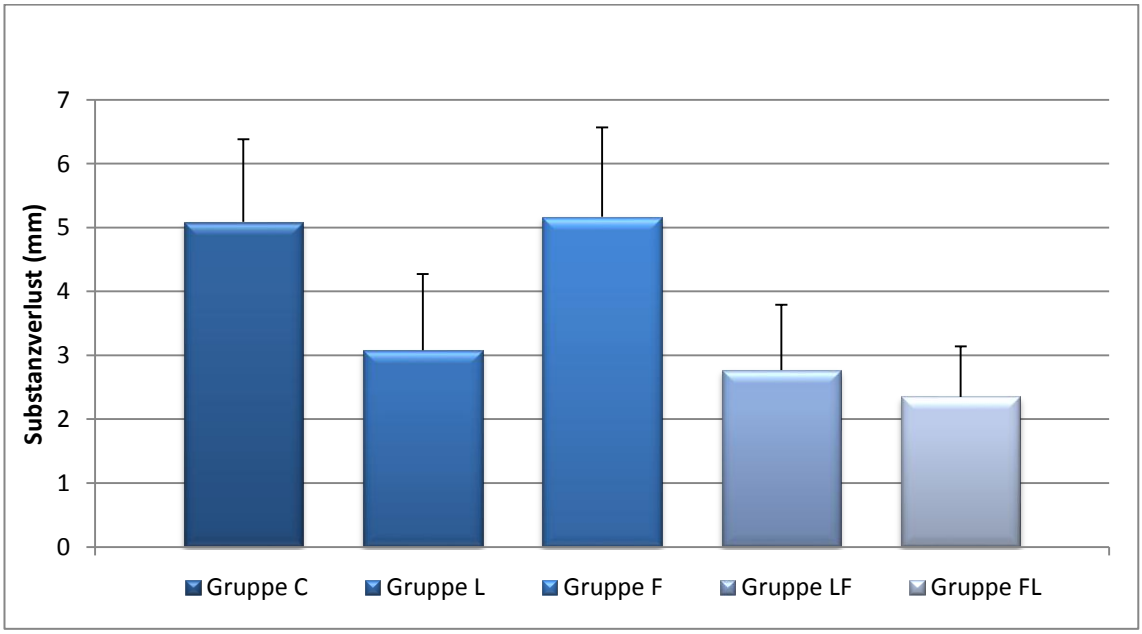


Abb. 21: Substanzverlust (µm) der Schmelzproben durch Erosion und Abrasion

Tab. 25: Höhe des Substanzverlustes in µm mit Standardabweichung (±)

Substanzverlust (µm)				
Kontrollgruppe C	**Gruppe L**	**Gruppe F**	**Gruppe LF**	**Gruppe FL**
5,09 ± 1,29	3,08 ± 1,19	5,17 ± 1,4	2,77 ± 1,0	2,35 ± 0,79

(p-Werte siehe Tabelle 26)

Ein statistisch signifikanter Unterschied konnte außerdem zwischen den Gruppen L, LF und FL und der Kontrollgruppe C festgestellt werden (alle p = 0,0001). Die Läsion in Gruppe F war zwar 1,5% tiefer, als die der Kontrollgruppe, jedoch bestand zwischen diesen beiden Gruppen kein statistisch signifikanter Unterschied (p = 0,8772).

Tab. 26: p-Werte für den Vergleich der Gruppen untereinander und mit der Kontrollgruppe

Gruppen	C	L	F	LF	FL
C	-----	< 0,0001	0,8772	< 0,0001	< 0,0001
L	< 0,0001	-----	< 0,0001	0,5087	0,1256
F	0,8772	< 0,0001	-----	< 0,0001	< 0,0001
LF	< 0,0001	0,5087	< 0,0001	-----	0,3773

Die Vorbehandlung der Schmelzproben mit elmex® gelée und anschließender Bestrahlung mit dem CO_2 Laser, wie bei Gruppe FL, führte mit 54% weniger Substanzverlust im Vergleich zur Kontrollgruppe, zur höchsten Verringerung des Schmelzverlustes durch die erosiven und abrasiven Prozesse. Eine Behandlung der Schmelzproben mit dem CO_2 Laser und nachträglicher Applikation des Fluorid-Gels, wie bei Gruppe LF, führte zu einem um 46% geringeren Substanzabtrag. Die alleinige Laserbestrahlung verringerte den Substanzabtrag um 39% im Vergleich zur Kontrollgruppe (siehe Tab. 27).

Tab. 27: %Reduktion des Substanzabtrages an Schmelz durch Erosion und Abrasion im Vergleich zur Kontrollgruppe

Gruppe	%Reduktion
FL	54%
LF	46%
L	39%
F	-1,5%

5.2.2. Ergebnisse der dreidimensionalen Konturenmessung

Anhand der dreidimensionalen Aufnahmen ist erkennbar, dass in jeder Gruppe eine Läsion entstanden war (siehe Abb. 22 bis Abb. 26). Bei genauer Betrachtung der Bilder kann festgestellt werden, dass die bereits mithilfe des Profilometers ermittelten Werte des Substanzverlustes (siehe Kap. 5.2.1) durch die dreidimensionalen Topographiemessungen unterstützt werden.

Seitlich der Abbildungen befindet sich eine Skala an der die Tiefe der Läsion durch die farbliche Markierung ablesen werden kann. Die Farbe „Weiß“ markiert den höchsten und die Farbe „Dunkelblau“ den tiefsten Bereich der Läsion. Für die Interpretation der Bilder ist darauf zu achten, dass jedes Bild einzeln betrachtet werden muss. Die Tiefe einer Läsion wird ermittelt, indem der Wert des niedrigsten Bereiches vom dem des höchsten subtrahiert wird. Dabei sollte innerhalb der Läsion ein Bereich gewählt werden, der weiter in der Mitte liegt, denn wie die Bilder zeigen, ist die Läsion im Randbereich stets tiefer, als in der Mitte. Dies könnte daran liegen, dass die Energiedichte im Zentrum des Laserstrahls höher ist, als im äußeren Bereich (Apel et al. 2002). Es könnte somit vermutet werden, dass der äußere Rand der Läsion mit einer niedrigeren Energie bestrahlt wurde, wodurch eine geringere Erosions- und Abrasionsresistenz erreicht wurde und somit auch eine tiefere Läsion entstanden ist.

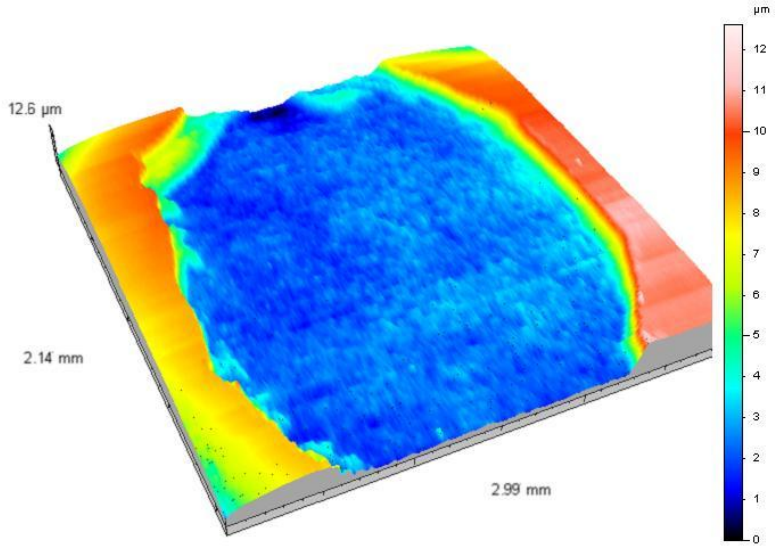


Abb. 22: Topographiemessung einer Probe aus Gruppe C

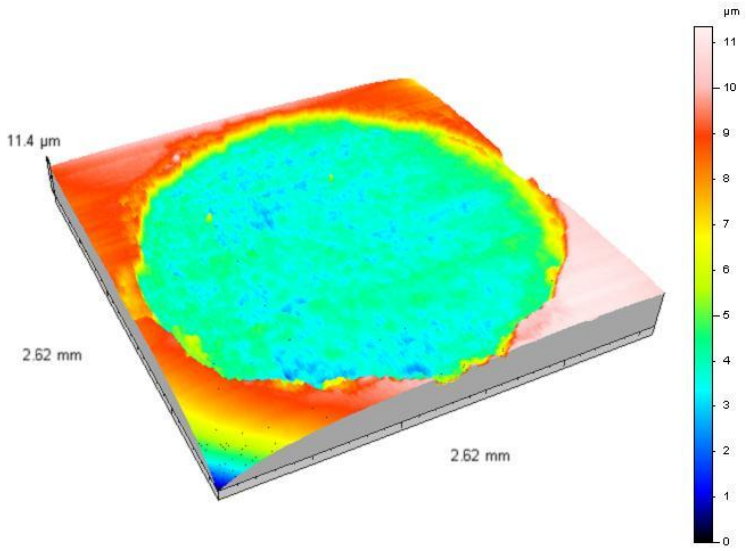


Abb. 23: Topographiemessung einer Probe aus Gruppe L

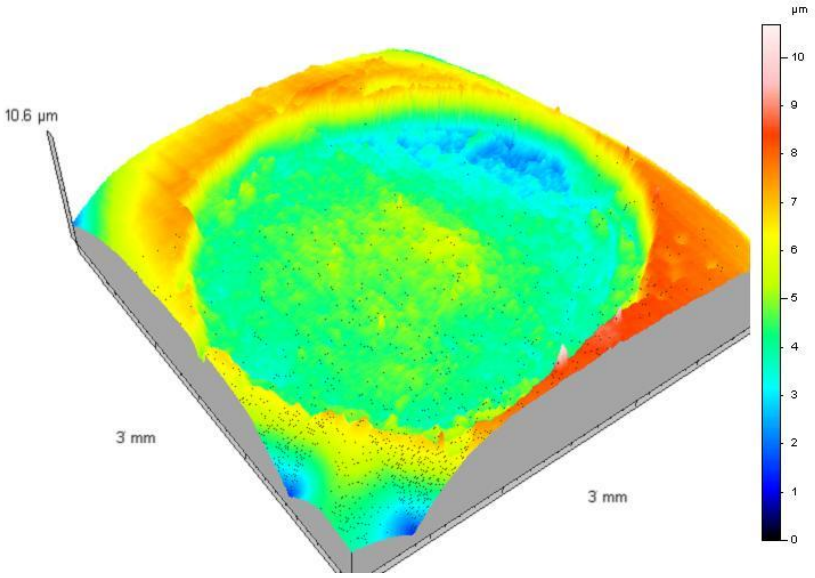


Abb. 24: Topographiemessung einer Probe aus Gruppe F

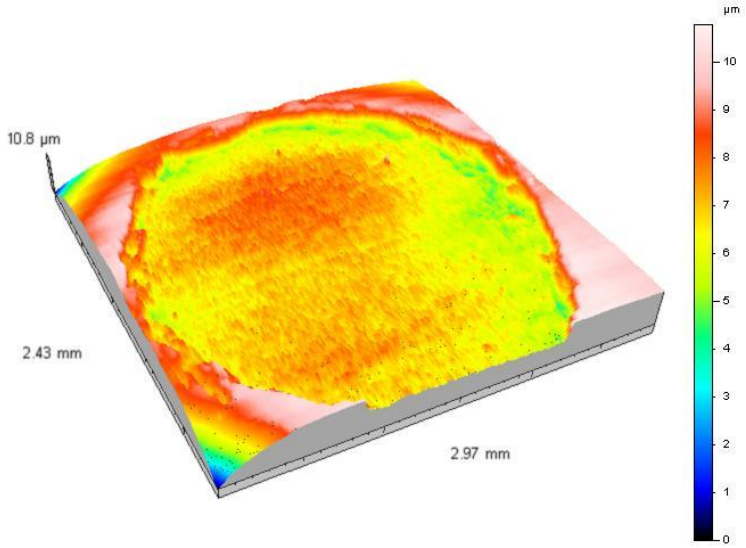


Abb. 25: Topographiemessung einer Probe aus Gruppe LF

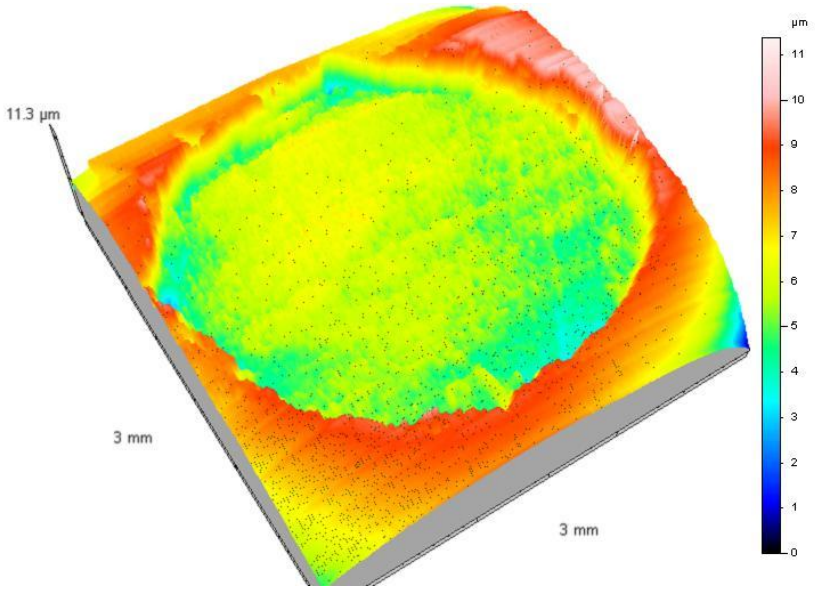


Abb. 26: Topographiemessung einer Probe aus Gruppe FL

6. Diskussion

6.1. Studie 1

6.1.1. Prozedur A: Diskussion der Ergebnisse der Mikrohärtemessung

Die höchste Erosionsresistenz konnte in Studie 1 in der Gruppe AFL, in der die Proben erst mit Fluorid-Gel und anschließend mit dem CO_2 Laser behandelt wurden, festgestellt werden. Hier wurde im Vergleich zur Kontrollgruppe die Entstehung von Erosionen um 99,9% signifikant reduziert.

Die Effizienz einer CO_2 Laserbestrahlung in Kombination mit Fluorid wurde schon oft beschrieben (Hsu et al. 2001; Tepper et al. 2004; Vlacic et al. 2007). In Studien, die der Studie 1 ähneln, konnte jedoch keine so hohe Erosionsresistenz erreicht werden. Wiegand und Kollegen (2009b) erreichten bei einer Behandlung von bovinem Zahnschmelz mit einer AmF-Lösung und nachträglicher CO_2 Laserbestrahlung eine Verringerung des Härte- und somit auch des Mineralverlustes durch einen Säureangriff um nur 20%. Eine alleinige Applikation der AmF-Lösung verbesserte die Säureresistenz schon um 30%, daher hatte in dieser Studie der CO_2 Laser keinen unterstützenden Effekt auf die Säureresistenz. Steiner-Oliveira et al. (2010) konnten auch nur einen geringen positiven Effekt bei einer Vorbehandlung mit NaF und folgender CO_2 Laserbestrahlung auf die Erhöhung der Erosionsresistenz feststellen, wobei dieser Effekt eher dem Fluorid zugeschrieben wurde. Eine Erklärung für den geringen Effekt des CO_2 Lasers in der oben genannten Studie von Steiner-Oliveira et al. könnte der starke Säureangriff sein, der möglicherweise den positiven Effekt des Lasers maskiert hat. Dieser Säureangriff mit Zitronensäure (pH 2,45) fand drei Tage lang, drei Mal täglich, für je fünf Minuten statt.

Wiegand und Kollegen (2009b) wählten, wie in Studie 1, einen CO_2 Laser mit einer Wellenlänge von 10,6 μm. Die Laserparameter unterschieden sich jedoch in der Energiedichte, der Impulsfrequenz, der Pulsdauer und der Dauer der Bestrahlung. Die Energiedichte in der Studie von Wiegand et al. (2009b) war mit 28,6 J/cm^2 recht hoch. Hohe Energiedichten können zu schädlichen Veränderungen der Zahnhartsubstanz, wie zur Bildung von Rissen, führen (Fried et al. 1996). Diese Risse stellen eine Schwachstelle dar. Sie können der

Ausgangspunkt für eine Demineralisation durch Säuren sein, wodurch der positive Effekt einer Laserbestrahlung aufhoben wird (Apel et al. 2005). Eine hohe Säureresistenz wurde in zwei Studien zur Untersuchung der Prävention von Schmelzlöslichkeit bereits bei einer Bestrahlung mit niedriger Energiedichte (< 1 J/cm^2) erreicht und so schädliche Nebenwirkungen vermieden (Esteves-Oliveira et al. 2008a; Esteves-Oliveira et al. 2009).

Eine kurze Pulsdauer kann das Risiko einer Schädigung der Zahnhartsubstanz und der Pulpa auch reduzieren, denn trotz der Tatsache, dass eine kürzere Pulsdauer zu einer höheren Erwärmung der Oberfläche führt, breitet sich die Hitze nicht so sehr in die Tiefe aus (Fried et al. 1996). In der vorliegenden Studie wurde, angelehnt an diejenige von Esteves-Oliveira et al. (2009), eine Pulsdauer von 5 μs gewählt. Steiner-Oliveira et al. (2010) geben in der oben bereits beschriebenen Studie eine verwendete Pulsdauer von 5 ms an. Pulse die länger sind als die thermische Relaxationszeit von Schmelz (70 bis 80 μs bei λ = 10,6 μm), sollen zu einer höheren Erhitzung des Gewebes führen, was negative Auswirkungen auf die Pulpa haben kann und zu einer Schädigung der Zahnoberfläche führen soll (Fried et al. 1996; Fried et al. 2001a; Fried et al. 2001b; Fried et al. 2002).

Es könnte vermutet werden, dass die Gruppe ALF eine ähnlich hohe Säureresistenz erreichen würde, wie Gruppe AFL. In der Gruppe ALF erfolgte zuerst die CO_2 Laserbestrahlung und anschließend die Fluoridierung für drei Minuten. Sie erreichte jedoch, verglichen mit der Kontrollgruppe, nur eine Verbesserung der Säureresistenz um 43,5%. Diese Ergebnisse stehen im Kontrast zu einer aktuellen Studie von Sobral und Kollegen (2009), in der humane Schmelzproben auch zuerst mit einem Laser (Nd:YAG Laser) behandelt, für vier Minuten mit NaF (1,23%, pH 5,3) bedeckt und 24 Stunden später einem 90-minütigen Säureangriff mit Zitronensäure (2%) ausgesetzt wurden. Im Vergleich zur Kontrollgruppe konnte hier eine Erhöhung der Erosionsresistenz von knapp 81% festgestellt werden. Aufgrund der Verwendung eines anderen Lasers und einer anderen Methodik ist der Vergleich mit dieser Studie jedoch erschwert. Eine mögliche Erklärung für die hohe Erosionsresistenz könnte die hohe Energiedichte (141,5 J/cm^2) sein. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Wellenlänge des Nd:YAG Lasers (λ = 1064 nm), anders als beim CO_2 Laser, im Zahnschmelz sehr schlecht absorbiert wird (< 1cm^{-1}) (Fried et al. 1995). Deshalb muss die Bestrahlung

zusammen mit einem Farbstoff durchgeführt werden, der die Energie des Laserstrahls als erstes absorbiert und dann in das Gewebe weiterleitet. Die niedrige Absorption im Schmelz ist somit ein großer Nachteil für die Verwendung des Nd:YAG Lasers in der Kariesprävention. Eine Gruppe, die erst mit Fluorid und dann mit dem Laser behandelt wurde, gab es in dieser Studie nicht.

In der Studie von Wiegand et al. (2009b), welche die Wirkung einer AmF- und TiF_4-Lösung in Kombination mit einer CO_2 Laserbehandlung überprüfte, gab es sowohl eine Gruppe, in der die Laserbestrahlung vor der Fluoridierung erfolgte, als auch eine, in der sie danach erfolgte. Die kombinierte Behandlung des Zahnschmelzes mit dem Laser und mit Fluorid erreichte hier zwar insgesamt nur eine geringfüge Verbesserung der Erosionsresistenz, dennoch kam es tendenziell zu einem geringeren erosiven Mineralverlust durch eine Vorbehandlung mit Fluorid.

Es gibt verschiedene Theorien für die erhöhte Säureresistenz bei einer kombinierten Laser- und Fluoridbehandlung. Diskutiert werden durch den Laser verursachte Veränderungen des Schmelzes. Zu diesen Veränderungen zählen die Verringerung des Karbonat-Gehaltes im Schmelz (Fowler und Kuroda 1986), die Reduktion der Permeabilität des Schmelzes für Säuren aufgrund einer Versiegelung der Oberfläche durch Fusion und durch den Verschluss der Poren (Stern et al. 1972; Nelson et al. 1987), sowie das Verstopfen der inter- und intraprismatischen Räume durch die Zersetzung der organischen Matrix (Hsu et al. 2000). Die beschriebene Verschmelzung der Schmelzoberfläche war in Studie 1 jedoch nicht erkennbar und wird außerdem als ein Effekt betrachtet, der für eine Verbesserung der Säureresistenz nicht notwendig ist (Kantorowitz et al. 1998).

Des Weiteren wird beschrieben, dass eine Laserbestrahlung nach erfolgter Fluoridierung einen erhöhten Einbau von Fluorid in den Schmelz hervorrufen kann (Chin-Ying et al. 2004; Gonzalez-Rodriguez et al. 2010). Auch Tepper und Kollegen (2004) konnten in einer Studie zur Kariesprävention einen höheren Einbau von Fluorid durch eine kombinierte Fluorid- und CO_2 Laserbehandlung (λ = 10,6 μm) feststellen, als durch eine alleinige Fluorid- beziehungsweise eine alleinige Laserbehandlung.

Wie bereits beschrieben, hatte Gruppe ALF eine geringere Erosionsresistenz, als Gruppe AFL. Goodman und Kollegen (1977)

beobachteten neben der vermehrten Aufnahme von Fluorid durch Laserbestrahlung sogar eine damit verbundene höhere Säureresistenz. Sie vermuteten, dass eine Laserbestrahlung in Anwesenheit von Fluorid, hier NaF, ein Verschmelzen oder eine Auflösung der kristallinen Struktur des Schmelzes bewirkt, und dass es bei einer daraufhin folgenden Rekristallisation zur Ausbildung von weniger löslichem Fluorapatit kommt. Die bei der Laserbestrahlung entstehende Hitze wird als ein weiterer Punkt für die erhöhte Fluoridaufnahme in Betracht gezogen. Vlacic und Kollegen (2007), sowie Meurman und Kollegen (1997) vermuteten, dass die Laserbestrahlung zu einer Transformation des Hydroxyl- in säurestabileres Fluorapatit führt, was die Säureresistenz erhöhen soll. Die geringere Erhöhung der Säureresistenz von Gruppe ALF im Gegensatz zur Gruppe AFL könnte demnach am fehlenden erhöhten Einbau von Fluorid in den Schmelz liegen. Nach den Erkenntnissen von Vlacic (2008) und Meurman (1997) könnte vermutet werden, dass durch eine Laserbestrahlung vor einer Fluoridapplikation keine Transformation von Hydroxyl- in Fluorapatit stattfinden konnte, da sich zu diesem Zeitpunkt noch kein beziehungsweise kaum Fluorid auf der Schmelzoberfläche befand, welches hätte transformiert werden können.

Es wurde erwartet, dass die Veränderungen des Schmelzes, die durch die Laserbestrahlung hervorgerufen wurden, in allen Gruppen aus Studie 1 gleich sind, da immer unter denselben Bedingungen gearbeitet wurde. Dennoch fiel auf, dass die Gruppe AL, in der nur der Laser verwendet wurde, mit einer Erhöhung der Erosionsresistenz im Vergleich zur Kontrollgruppe von 97,1%, eine höhere Säureresistenz aufwies, als die Gruppe ALF (43,5%), bei der nachträglich noch Fluorid-Gel appliziert wurde. Dass eine Laserbehandlung zu einer Verringerung der Säurelöslichkeit von Schmelz führen kann, wurde bereits gezeigt (Esteves-Oliveira et al. 2009). Eine Kombination der Laserbehandlung mit Fluorid soll zu einer besseren Säureresistenz führen, als eine alleinige Laser- oder Fluoridbehandlung (Sobral et al. 2009; Steiner-Oliveira et al. 2010). Diese Aussagen stehen jedoch im Kontrast zu den in Studie 1 ermittelten Ergebnissen, was den Vergleich von Gruppe AL mit Gruppe ALF betrifft. Da erwartet wurde, dass der Lasereffekt in Gruppe AL und ALF gleich ist, könnte die nachträgliche Fluorid-Applikation zur Veränderung der bestrahlten Schmelzoberfläche geführt haben und für die mäßige Erosionsresistenz verantwortlich sein. Die alleinige Laserbehandlung und die Fluoridierung vor der

Laserbestrahlung sollten daher einer Behandlung mit Fluorid und anschließender Laserbestrahlung vorgezogen werden.

Beim Vergleich der Gruppe ALF mit der Gruppe AF und der Kontrollgruppe war erkennbar, dass die Gruppe ALF nach dem Säureangriff einen geringeren Mikrohärteverlust aufwies. Dies könnte dem Lasereffekt zugeschrieben werden, da die alleinige Fluorid-Applikation, wie sie bei Gruppe AF durchgeführt wurde, kaum einen protektiven Effekt hatte.

Laut manchen Studien ist die häufige Behandlung von Schmelz mit hochkonzentrierten und sauren Fluoridpräparaten, wie beispielsweise NaF- und AmF-Gelees, eine effektive Maßnahme zur Prävention von Erosionen (Lagerweij et al. 2006; Lennon et al. 2006). Andere Autoren konnten wiederum kaum einen präventiven Effekt solcher Fluoridpräparate feststellen (Ganss et al. 2001b; Larsen und Richards 2002; Wiegand et al. 2008a). Für die Verwendung von NaF- und AmF-Gelees ist bereits bekannt, dass ein niedriger pH Wert und eine hohe Fluoridkonzentration des Präparates die Präzipitation von CaF_2 beziehungsweise CaF_2-ähnlichem Material erhöhen kann (Rolla und Saxegaard 1990). Das CaF_2-ähnliche Präzipitat dient als Fluoridreservoir und setzt im Falle eines pH Wert-Abfalls, wie bei einem kariogenen Prozess, Kalzium und Fluorid frei (Rolla 1988). Es ist jedoch wenig über die Wirkungsweise von Fluorid unter erosiven Bedingungen bekannt. Ganss et al. (2001b) vermuteten, dass hier die CaF_2-Schicht wie eine Schutzschicht fungiert, die während eines Säureangriffs zuerst aufgelöst werden muss, bevor die darunter liegende Zahnhartsubstanz angegriffen wird. In Studie 1 erhielt die Gruppe AF als Oberflächenbehandlung eine alleinige Fluorid-Applikation. Nach dieser Fluorid-Applikation kam es zu einem geringen, jedoch nicht signifikanten Abfall der Mikrohärte. Ein Abfall der Mikrohärte durch eine Fluoridbehandlung konnte schon in einer Studie von Wiegand et al. (2009b) beobachtet werden, wo eine Vorbehandlung boviner Schmelzproben mit TiF_4 einen Schmelzverlust von 1 µm hervorrief. Ein Grund für den geringfügigen Abfall könnte eine Erweichung des Schmelzes durch den sauren pH Wert des Fluoridpräparates sein. Auch Zero (1996) vermutete, dass durch eine häufige Verwendung von sauren Mundpflegeprodukten, vor allem bei Patienten mit geringem Speichelfluss, Erosionen entstehen könnten.

Die Mikrohärte sank in Gruppe AF nach dem Säureangriff mit Zitronensäure (1%, pH 4), weiter ab. Der Härteabfall war etwas geringer, als in der

Kontrollgruppe. Das Fluorid-Gel allein konnte somit die Entstehung von Erosionen nicht verhindern, sondern nur geringfügig abschwächen. Dies deckt sich mit einer ähnlichen Studie von Wiegand et al. (2009b), in der die Verwendung einer AmF-Lösung auch einen nur geringfügigen protektiven Effekt hatte.

Dennoch gibt es Studien, die durch die Verwendung von Fluorid gute Ergebnisse erreichten. In der Studie von Lennon et al. (2006) wurden bovine Schmelzproben 14 Tage lang sechs Mal täglich für 30 Sekunden in Zitronensäure (1%, pH 2,3) einem Säureangriff ausgesetzt und vor dem ersten und nach dem letzten Angriff, das heißt zwei Mal täglich, für 120 Sekunden mit elmex® gelée (NaF/AmF) behandelt. Elmex® gelée konnte hier im Vergleich zur Kontrollgruppe den Schmelzverlust um 29% reduzieren. Es muss jedoch angemerkt werden, dass elmex® gelée nicht zwei Mal täglich, sondern einmal pro Woche aufgetragen werden soll, um die toxische Grenzdosis nicht zu überschreiten. In einer weiteren Studie mit einem zyklischen De- und Remineralisationsmodell, konnte mithilfe einer hochkonzentrierten NaF-Lösung (2,2%) und einer TiF_4-Lösung (1,64%), die beide einen pH Wert von 1,2 hatten und über einen Zeitraum von fünf Tagen einmal täglich für jeweils fünf Minuten aufgetragen wurden, eine Reduktion des Schmelzverlustes um 64% beziehungsweise 75% festgestellt werden (Schlueter et al. 2007). Für die Demineralisation wurde sechs Mal täglich für zehn Minuten Zitronensäure (pH 2,3) verwendet. Verglichen mit den Erkenntnissen, dass saure und hochkonzentrierte Fluoridpräparate dazu in der Lage sind die Säureresistenz zu erhöhen, könnte auch hier der saure pH Wert des Fluoridpräparates eine Erklärung für die hohe Säureresistenz sein. Präparate, die für die tägliche Mundhygiene verwendet werden, sollten jedoch einen pH Wert von 4,5 haben (Schlueter et al. 2009a).

Hier wird deutlich, dass in vielen Studien zwar eine Steigerung der Erosionsresistenz durch Fluoride wie NaF, AmF und auch TiF_4 erreicht werden konnte, es sich aber bei den verwendeten Fluoriden oftmals um experimentelle Präparate mit sehr niedrigem pH Wert handelte, die für den häuslichen Gebrauch ungeeignet sind. Des Weiteren könnte die angegebene, häufige Applikation dieser Präparate den Patienten sogar schaden.

6.1.2. Prozedur A: Diskussion der Ergebnisse der Fluoridanalyse

Beim Betrachten der Ergebnisse der Fluoridanalyse war deutlich erkennbar, dass bei denjenigen Gruppen, bei denen Fluorid appliziert wurde, auch eine erhöhte Fluoridaufnahme messbar war. Dies betrifft die Gruppen AF, ALF und AFL. Die Fluoridanalyse ergab einen Fluoridgehalt von 2,02 ± 1,22 $\mu g/cm^2$ bei Gruppe AF, einen Fluoridgehalt von 3,65 ± 2,45 $\mu g/cm^2$ bei Gruppe ALF und einen Gehalt von 2,72 ± 2,41 $\mu g/cm^2$ bei Gruppe AFL. Nach der Applikation von Fluoridpräparaten (NaF oder AmF) kommt es zur Präzipitation von CaF_2 beziehungsweise CaF_2-ähnlichen Präzipitaten auf der Schmelzoberfläche und zum Einbau von fest gebundenen Fluorid in den Schmelz (Saxegaard und Rolla 1988). Es wird vermutet, dass das oben beschriebene CaF_2-ähnliche Präzipitat eine Deckschicht auf dem Schmelz bildet, die bei erosiven Angriffen zuerst von der Säure aufgelöst werden muss, bevor die Säure den Zahn angreifen kann (Ganss et al. 2001b).

Die Anzahl an Studien, die die Erosionsresistenz von Zahnhartsubstanzen durch Laser- und Fluoridbehandlungen untersuchen und nachfolgend noch mit einer Fluoridanalyse den Gehalt an Fluorid in den Proben analysieren, ist sehr gering. In vielen Studien wird von einer vermehrten Fluoridaufnahme durch Laserbestrahlung berichtet, jedoch beschäftigen sich die meisten mit der Prävention von Karies und nicht mit der Prävention von Erosionen (Tepper et al. 2004; Gonzalez-Rodriguez et al. 2010).

Der erhöhte Gehalt an Fluorid in Studie 1 bei den Gruppen AFL und ALF, die zusätzlich mit dem CO_2 Laser bestrahlt wurden, deckt sich mit den Ergebnissen aus einer anderen Studie. Steiner-Oliveira und Kollegen (2010) stellten in dieser Studie zur Prävention von Erosionen fest, dass der Schmelz, der einer Fluorid-Applikation und einer nachträglichen CO_2 Laserbestrahlung unterzogen wurde mehr Fluorid freisetzte, als die Kontrollgruppe und die Laser-Gruppe. Bei den Untersuchungen in Dentin konnte auch eine erhöhte Freisetzung von Fluorid in der Gruppe die kombiniert mit Fluorid und dem Laser behandelt wurde und in der Gruppe, die nur mit Fluorid behandelt wurde, festgestellt werden. Eine Gruppe, in der zuerst die Laserbestrahlung erfolgte und danach die Fluoridapplikation, gab es in der Studie von Steiner-Oliveira und Kollegen nicht. Trotz des höheren Fluoridgehaltes durch kombinierte Fluorid- und

Laserbehandlung konnte jedoch nur eine geringe Verbesserung der Säureresistenz erreicht werden.

Einen erhöhten Einbau von Fluorid in den Zahnschmelz durch Laserbestrahlung konnten auch Bevilácqua et al. (2008) beobachten. Sie bestrahlten bovine Schmelzproben mit einem Nd:YAG Laser unterschiedlicher Energiedichte und applizierten nachträglich für drei Minuten ein saures Fluoridpräparat (APF, 1,23% F). Bevilácqua und Kollegen berichteten hier über eine höhere Fluoridaufnahme durch niedrige Energiedichten von 1,8 und 0,9 J/cm^2. Sie vermuteten, dass die niedrige Energiedichte zu Veränderungen in der Schmelzstruktur führt, die eine höhere Aufnahme von Fluorid hervorrufen. Auch Gonzalez- Rodrigues und Kollegen (2010) erreichten eine hohe Fluoridaufnahme bei einer niedrigen Energiedichte von 5 J/cm^2. Diese Ergebnisse werden auch durch die in Studie 1 verwendete niedrige Energiedichte von 0,3 J/cm^2 unterstützt.

Es könnte vermutet werden, dass eine höhere Konzentration an Fluorid auch zu einer besseren Erosionsresistenz führt. Betrachtet man jedoch die Ergebnisse der Mikrohärtemessung aus Prozedur A so wird deutlich, dass die Gruppen AF und ALF trotz des hohen Fluoridgehaltes keine so hohe Verbesserung in der Erosionsresistenz erreichen konnten, wie die Gruppe AFL, die einen geringeren Fluoridgehalt hatte, als Gruppe ALF. Ein hoher Fluoridgehalt bedeutet daher nicht zugleich, dass auch die Erosionsresistenz höher ist. Auch eine alleinige Laserbestrahlung konnte zu einer hohen Verbesserung der Erosionsresistenz führen. Dies ist auch im Einklang mit den Ergebnissen anderer Studien in denen festgestellt wurde, dass CaF_2-bildende Fluoridpräparate einen nur limitierten Effekt auf die Verhinderung der Progression von Erosionen im Schmelz haben (Ganss et al. 2001b; Wiegand et al. 2008a).

Eine Behandlung des Schmelzes mit Fluorid und eine nachfolgende Laserbestrahlung hatte in Prozedur A eine unterstützende Wirkung auf den Lasereffekt. Der Mechanismus hinter dem unterstützenden Effekt könnte die vieldiskutierte Transformation des Hydroxylapatits in säurestabileres Fluorapatit durch den Laser sein (Meurman et al. 1997; Vlacic et al. 2008). Dies muss jedoch noch in weiteren Studien untersucht werden.

6.1.3. Prozedur B: Diskussion der Ergebnisse der Mikrohärtemessung

Der einzige Unterschied in der Methodik von Prozedur B verglichen mit Prozedur A war der, dass zuerst die erosive Demineralisation in Zitronensäure und danach die Oberflächenbehandlung der fünf Gruppen erfolgte. In Prozedur B wurde ermittelt, welche Auswirkungen eine Laser- und Fluoridbehandlung auf die Remineralisation beziehungsweise Wiedererhärtung von bereits erosiv demineralisiertem Schmelz hat.

Nach dem dreiminütigen Säureangriff mit Zitronensäure, kam es bei allen Gruppen zu einem signifikanten Härteverlust. Ein signifikanter Wiederanstieg der Mikrohärte im Vergleich zur Härte nach der Säureattacke konnte bei denjenigen Gruppen festgestellt werden, die mit dem CO_2 Laser behandelt wurden. Dies betrifft Gruppe BL, BLF und BFL. Im Vergleich zur Ausgangsmikrohärte war die Härte am Ende des Versuches bei Gruppe BFL und BLF jedoch noch immer signifikant reduziert. Die größte Härtesteigerung gelang in der nur mit dem Laser behandelten Gruppe BL. Die Mikrohärte betrug hier nach dem Säureangriff 286,88 KHN und stieg nach der Laserbestrahlung auf 331,64 KHN an. Der gesamte Mikrohärteverlust vom Anfang bis zum Ende des Versuches betrug nur 1,7%. Neben der Gruppe BL erreichte die Gruppe BFL durch die Oberflächenbehandlung einen Anstieg in der Mikrohärte von 289,41 KHN auf 320,88 KHN. Die gesamte Reduktion der Mikrohärte betrug hier 7,2%. Der Gruppe BFL folgte die Gruppe BLF mit einer Gesamtreduktion der Mikrohärte um 8,1%. Da die alleinige Fluoridierung keinen wiedererhärtenden Effekt auf den Schmelz hatte, kann davon ausgegangen werden, dass der Wiederanstieg der Mikrohärte bei den Gruppen BFL und BLF, die kombiniert mit Fluorid und Laser behandelt wurden, durch die Bestrahlung mit dem Laser hervorgerufen wurde.

Es ist bekannt, dass die Bestrahlung von Zahnhartsubstanz zu einer Erhöhung der Mikrohärte führt. Vlacic et al. (2007) erreichten in einer Studie einen signifikanten Anstieg der Mikrohärte (hier Vickers Härte) von Schmelz nach der Bestrahlung mit verschiedenen Lasern und Wellenlängen. Auch Westerman et al. (2003) berichteten über einen Anstieg der Knoophärte durch die Bestrahlung mit einem Argon Laser (11,5 J/cm^2). Eine nachträgliche Applikation eines APF-Gels führte dabei zu keiner weiteren Erhöhung der

Mikrohärte und eine alleinige vierminütige Fluoridierung reduzierte die Mikrohärte in der Studie von Westerman und Kollegen sogar um 9%.

Bleibt man bei der Theorie, dass das Fluorid-Gel nicht in der Lage ist den erodierten Schmelz wieder zu erhärten und durch seinen sauren pH Wert zu einer Erweichung des Schmelzes führt, dann ließe sich erklären, warum die Kombination der Laser- und Fluoridbehandlung bei den Gruppen BFL und BLF eine geringere Wiedererhärtung hervorrief, als die alleinige Laserbehandlung. Dennoch darf nicht außer Acht gelassen werden, dass es hier gelungen ist, den erosiv demineralisierten Schmelz zumindest etwas wieder zu erhärten. Die alleinige Laserbehandlung war hier aber effektiver. Wenn man die Ergebnisse aus Prozedur A betrachtet wäre es vorstellbar, dass bei einem erneuten Säureangriff die Gruppen BL, BFL und BLF eine erhöhte Erosionsresistenz aufweisen würden. Vor allem die Gruppe BFL könnte eine höhere Erosionsresistenz erworben haben, da es bei einer Vorbehandlung mit Fluorid und nachträglicher Laserbestrahlung zu einer Transformation von Hydroxylapatit in säurestabileres Fluorapatit gekommen sein könnte (Meurman et al. 1997; Vlacic et al. 2008).

Die Ursachen für die Wiedererhärtung des Schmelzes durch Laserbestrahlung sind noch nicht aufgeklärt. Dass anhand der Mikrohärte der Grad der Mineralisation der Zahnhartsubstanz gemessen werden kann, haben Zero und Kollegen (1990) bereits beschrieben. Korytnicki et al. (2006) ermittelten über die Mikrohärte nach Knoop den Mineralverlust von Schmelz durch einen kariogenen Angriff. Eine Verringerung der Mikrohärte bedeutete zugleich auch einen Mineralverlust. Sie stellten fest, dass bestrahlter Schmelz eine mineralisierte Oberfläche mit geringeren demineralisierten Zonen aufwies, als nicht bestrahlter Schmelz, wodurch auch die Resistenz gegenüber einer Demineralisation erhöht war. Auch Márquez und Kollegen (1993) leiteten von der Mikrohärte den Grad des Mineralgehaltes ab und deuteten an, dass die Laserbestrahlung die Mineralisation von Schmelz erhöht, indem sie den Wassergehalt und den organischen Anteil reduziert. Weiterhin vermuteten sie eine Härtezunahme durch Reorganisation der Apatitkristalle oder durch Änderung in der Zusammensetzung der Mineralien aufgrund einer Fusion des Mineralgehaltes. Dies soll die Zahnhartsubstanz widerstandsfähiger gegen die Härteeindrücke des Knoop-Diamanten machen (Marquez et al. 1993). Eine Fusion der Schmelzkristalle wird jedoch von vielen Autoren als unnötig

betrachtet, wenn es um die Erhöhung der Säureresistenz geht (McCormack et al. 1995; Kantorowitz et al. 1998). Außerdem findet eine Fusion erst bei einer Temperatur von 1000°C statt, was noch schädlicher für die Zahnhartsubstanz wäre (Fowler und Kuroda 1986).

Es wurde bereits in mehreren Studien gezeigt, dass der Laser, wie zum Beispiel der CO_2 Laser, dazu in der Lage ist, die chemische Komposition und Morphologie von Zahnhartsubstanzen zu verändern und ihre Säurelöslichkeit zu reduzieren (Hsu et al. 2000; Esteves-Oliveira et al. 2009). In einer Studie von Fried et al. (2002) führte ein CO_2 Laser mit einer Wellenlänge von 9,3 μm und 9,6 μm, einer Energiedichte von 0,5 J/cm^2 und einer Pulsdauer von 5–8 μs, zu einer Erhöhung der Mineralisation von Dentin mit Verlust von Wasser und Karbonat und zur Entstehung einer verbesserten Kristallinität. Fowler und Kuroda (1986) stellten fest, dass eine Temperaturerhöhung im Schmelz von 100–650°C zu einer Reduktion des Karbonat-Gehaltes führt. Karbonat ist ein Bestandteil im Zahnschmelz, der das Kristallgitter schwächt und somit die Säurelöslichkeit erhöht. Der Verlust des Karbonates durch die Laserbestrahlung könnte somit zur Entstehung eines stabileren Kristallgefüges führen (Rodrigues et al. 2004).

6.1.4. Prozedur B: Diskussion der Ergebnisse der Fluoridanalyse

Im Vergleich zur Fluoridanalyse aus Prozedur A, konnte beim Betrachten der Ergebnisse aus Prozedur B insgesamt ein höherer Fluoridgehalt in den mit Fluorid behandelten Gruppen verzeichnet werden. In Prozedur A erfolgte der Säureangriff nach der Oberflächenbehandlung. Daher ist es sehr wahrscheinlich, dass ein Teil des Fluorids durch den Säureangriff von der Schmelzoberfläche der Proben gelöst worden ist.

Auch in Prozedur B konnte beobachtet werden, dass die mit Fluorid-Gel behandelten Gruppen einen höheren Fluorideinbau verzeichneten, als die Gruppe BL und die Kontrollgruppe. Dies betrifft die Gruppe BF mit einem Fluoridgehalt von 3,62 ± 0,98 µg/cm^2, die Gruppe BLF mit einem Fluoridgehalt von 6,84 ± 3,88 µg/cm^2 und die Gruppe BFL mit einem Fluoridgehalt von 10,73 ± 6,51 µg/cm^2. Den höchsten Fluorideinbau erzielten die Gruppen BLF und

BFL, die mit dem Laser und Fluorid kombiniert behandelt wurden. Der Unterschied zwischen diesen Gruppen und der Gruppe BF war statistisch signifikant. Eine zusätzliche Fluoridbehandlung vor oder nach der Laserbestrahlung wirkte sich demnach positiv auf den Fluorideinbau aus.

Da der Säureangriff vor der Oberflächenbehandlung erfolgte, konnte anhand des Fluoridgehaltes der Gruppen aus Prozedur B deutlich beobachtet werden, dass eine kombinierte Laser- und Fluoridbehandlung zu einer stärkeren Fluoridaufnahme führte, als eine alleinige Fluoridbehandlung. Hier gab es keinen anschließenden Säureangriff, der zu einer Verringerung der Fluoridschicht hätte führen können. In Gruppe BFL könnte der erhöhte Fluorideinbau mit der Theorie der Transformation von Hydroxyl- in Fluorapatit erklärt werden (Vlacic et al. 2008). Der Fluorideinbau in dieser Gruppe war der höchste von allen und wies auch einen statistisch signifikanten Unterschied zur Gruppe BLF auf.

Da im Vergleich zur Gruppe BF die Gruppe BLF mehr Fluorid aufgenommen hatte, könnte die Vorbehandlung mit dem Laser der Grund dafür sein. Dies war auch bereits in anderen Studien der Fall. Tagomori und Morioka (1989) berichteten, dass die erhöhte Aufnahme eines sauren NaF-Präparates nach Bestrahlung mit einem Nd:YAG Laser (30 J/cm^2) damit zusammenhängen könnte, dass das Fluorid in die durch die Laserbestrahlung entstandenen Schmelzrisse vermehrt eindringt. Wie bereits erwähnt können Risse jedoch auch eine Schwachstelle sein und auch das Eindringen von Säuren ermöglichen (Apel et al. 2005). Auch Mikroräume im Schmelz, die durch den Verlust von Karbonat, Wasser und organischem Material entstehen sollen und von Fluorid penetriert werden können, wurden diskutiert (Oho und Morioka 1990).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die kombinierte Behandlung von Schmelz mit dem Laser und mit Fluorid zu einer Erhöhung der Fluoridaufnahme führte. Der höhere Fluoridgehalt hatte jedoch in Prozedur B keinen unterstützenden Effekt auf die Laserbehandlung.

6.2. Studie 2: Diskussion der Ergebnisse der Profilmessung

In Studie 2 wurde ermittelt, ob die CO_2 Laserbestrahlung allein oder in Kombination mit einer Fluoridapplikation *in vitro* zu einer Erhöhung der Resistenz von erodiertem Schmelz gegenüber Bürstabrasionen führen kann. Es wurden dieselben Laserparameter und das gleiche Fluorid-Gel verwendet, wie in Studie 1. Dadurch dass in Studie 2 die Proben zwei Mal täglich einem Säureangriff mit Sprite® Zero und anschließend einem Bürstvorgang mit einer elektrischen Zahnbürste unterzogen wurden, waren die Belastungen für die Schmelzproben größer, als in Studie 1.

In Studie 2 konnte gezeigt werden, dass diejenigen Proben, die vorher mit dem CO_2 Laser bestrahlt wurden, einen signifikant geringeren Substanzverlust durch Abrasion und Erosion des Schmelzes zur Folge hatten, als die unbehandelte Kontrollgruppe und die Gruppe F. Dies betrifft die Gruppe LF, die Gruppe FL und die Gruppe L. Mit einer Verringerung des Schmelzverlustes um 54%, erreichte die Gruppe FL, die zuerst mit Fluorid-Gel und anschließend mit dem Laser behandelt wurde, die höchste Resistenz gegenüber den erosiven und abrasiven Angriffen. Gruppe LF erreichte 46% weniger Verlust an Schmelz verglichen mit der Kontrollgruppe. Darauf folgt Gruppe L mit einem um 39% geringeren Substanzverlust. Die Ergebnisse dieser drei Gruppen unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Dass die Verbesserung in der Resistenz hier geringer ist, als in Studie 1 liegt wahrscheinlich an den häufigeren und damit stärkeren erosiven Angriffen.

Studien zur Prävention von Abrasionen erodierter Zahnhartsubstanz mithilfe des Lasers sind selten. Sobral und Kollegen (2009) verwendeten in ihrer Studie keinen CO_2 Laser, sondern einen Nd:YAG Laser. Der Ablauf dieser Studie ähnelt dem der Studie 2. Die Kombination der Laser- mit der Fluoridbehandlung führte auch hier zu einem geringeren Substanzverlust durch Erosionen und Abrasionen. Das Fluoridpräparat wurde hier nach der Laserbehandlung appliziert. Eine Gruppe, in der das NaF-Präparat schon vor der Laserbestrahlung aufgetragen wurde, gab es in der Studie nicht.

Es ist bereits gezeigt worden, dass die Laserbestrahlung zu Veränderungen der chemischen und physikalischen Struktur von Zahnhartsubstanzen führen kann, wodurch die Säureresistenz erhöht wird (Stern et al. 1972; Fowler und Kuroda 1986; Kantorowitz et al. 1998; Hsu et al. 2000). Die verbesserte

Säureresistenz bei der Kombination einer Fluorid- mit einer Laserbehandlung könnte weiterhin durch eine Transformation des Hydroxylapatits in säurestabileres Fluorapatit zustande gekommen sein (Meurman et al. 1997; Vlacic et al. 2008)

Es kann vermutet werden, dass mit der Erhöhung der Erosionsresistenz auch die Abrasionsresistenz steigt. Die Resistenz gegenüber Erosionen führt zu einer Reduktion der Demineralisation und Erweichung der Schmelzoberfläche, wodurch diese wiederum weniger empfindlich auf abrasive Kräfte reagiert.

Eine alleinige Fluoridapplikation hatte in Studie 2 keinen protektiven Effekt. Dies entspricht auch den Erkenntnissen aus der Studie von Sobral und Kollegen (2009). Der Substanzverlust ähnelte mit 5,17 ± 1,4 µm dem der Kontrollgruppe mit einem Verlust von 5,09 ± 1,29 µm. Viera et al. (2006) behaupteten jedoch, dass Fluoridlack und eine AmF-Lösung (1%) in vitro den Schmelz vor Erosionen und Bürstabrasionen schützen kann. Die AmF-Lösung erreichte in der Studie von Viera et al. (2006) einen um 39% geringeren Zahnhartsubstanzverlust, als die unbehandelte Kontrollgruppe. Auch in dieser Studie erfolgte nur eine einmalige Fluorid-Applikation. Dennoch muss beachtet werden, dass die Proben insgesamt nur drei Mal einen Zyklus aus Erosion und Bürstabrasion durchlaufen haben. In einer Studie von Attin und Kollegen (1998) heißt es, dass eine Behandlung von Dentin mit einer hochkonzentrierten NaF-Lösung (2,000 ppm) vor dem Zähneputzen die Abrasion erosiv demineralisierten Dentins signifikant reduzieren kann. Als demineralisierende Flüssigkeit wurde Sprite® light verwendet. Auch hier muss jedoch beachtet werden, dass die Proben nur fünf De- und Remineralisationszyklen unterzogen wurden. Außerdem wurden sie zuerst in Sprite® light erodiert, anschließend mit der Fluoridlösung behandelt und zusätzlich noch für eine Minute in künstlichem Speichel gelagert bevor sie gebürstet wurden. Dies könnte sich positiv auf die Abrasionsresistenz ausgewirkt haben, da die CaF_2-ähnliche Schicht nicht durch den erosiven Säureangriff abgetragen wurde. Im Vergleich dazu erfolgte in Studie 2 zuerst die Fluoridapplikation und anschließend der Säureangriff in Sprite® Zero sowie das Bürsten der Proben. Diese erosiven und abrasiven Prozesse wurden in Studie 2 nicht nur fünf, sondern für 50 Mal durchgeführt (25 Tage lang, zwei Mal täglich).

In einer Studie von Lagerweij und Kollegen (2006) war ein hochkonzentriertes Fluorid-Gel auch in der Lage vor Erosionen und Abrasionen

zu schützen. Sie erreichten eine Verbesserung in der Abrasionsresistenz erodierter Zahnhartsubstanz um 53%. Erwähnenswert ist jedoch, dass die Applikation des hochkonzentrierten Fluorid-Gels zwei bis acht Mal täglich erfolgte, was eindeutig zu häufig ist und dem Patienten schaden könnte.

Es ist allgemein bekannt, dass eine einzige Applikation von elmex® gelée einen nur geringen Schutz vor Erosionen bietet (Wiegand et al. 2008a). Daher kann vermutet werden, dass der erosive und abrasive Prozess in Studie 2 mit 50 Säureangriffen und Bürstprozessen zu stark war und das Fluorid-Gel aus diesem Grund keine Wirkung zeigen konnte. Es wird berichtet, dass CaF_2-ähnliche Präzipitate mit der Zeit aufgelöst (Ganss et al. 2007b) und abradiert werden (Wegehaupt et al. 2009). Ganss et al. (2007b) untersuchten, ob CaF_2-ähnliche Präzipitate *in vitro* und *in situ* erosiven Angriffen standhalten können. Trotz der Tatsache, dass nach mehreren erosiven Angriffen immer noch 10 Mal mehr CaF_2 messbar war, als bei den nicht fluoridierten Proben, wurde durch Sprite® light mit der Zeit eine erhebliche Menge an CaF_2-ähnlichen Präzipitaten von der Oberfläche entfernt. Dadurch können die Säuren ungehindert auf die Schmelzoberfläche gelangen, den Schmelz erweichen und somit auch anfälliger für den Substanzverlust durch mechanische Kräfte machen. Das Fluorid-Gel wurde in Studie 2 einmalig für drei Minuten aufgetragen. Es ist wahrscheinlich, dass, wie oben beschrieben, die CaF_2-ähnlichen Präzipitate durch die folgenden erosiven und abrasiven Prozesse zum größten Teil entfernt wurden und die alleinige Fluoridbehandlung den Zahnschmelz daher nicht vor der Entstehung von Erosionen und Abrasionen schützen konnte.

6.3. Diskussion Studie 1 versus Studie 2

Vergleicht man die Ergebnisse von Studie 1 mit denjenigen von Studie 2, so stimmen die beiden Studien in dem Punkt überein, dass die mit dem CO_2 Laser behandelten Gruppen eine höhere Erosionsresistenz entwickelt haben. Die Erosionsresistenz war dann am größten, wenn zuerst die Applikation des Fluoridgels erfolgte und unmittelbar danach die CO_2 Laserbestrahlung. Die alleinige Fluorid-Applikation hatte in beiden Studien kaum bis gar keinen protektiven Effekt. Es wurde außerdem deutlich, dass eine höhere Fluoridaufnahme nicht zugleich auch eine höhere Erosionsresistenz bedeutete.

Die Verbesserung der Abrasionsresistenz scheint unmittelbar mit der Erhöhung der Erosionsresistenz zusammenzuhängen. Es ist bereits bekannt, dass Zahnhartsubstanz nach einem erosiven Angriff anfälliger für die Entstehung von Bürstabrasionen ist (Schweizer-Hirt et al. 1978; Davis und Winter 1980). Verbessert man die Erosionsresistenz, dann wird zugleich auch die Empfindlichkeit gegenüber nachfolgenden abrasiven Prozessen reduziert und somit der Bildung von Abrasionen vorgebeugt.

7. Schlußfolgerung

In der ersten *In-vitro*-Untersuchung der vorliegenden Arbeit wurde festgestellt, dass die CO_2 Laserbestrahlung (λ = 10,6 μm) allein und in Kombination mit Fluorid-Gel (elmex® gelée, 1,25% F) die Widerstandsfähigkeit von humanem Zahnschmelz gegenüber Erosionen signifikant erhöhen kann. Durch die CO_2 Laserbestrahlung mit den verwendeten Parametern (0,3 J/cm^{2,} 5 μs, 226 Hz, und 15 mJ) kam es zu einer signifikanten Verringerung der Erosion um 97,1%, verglichen mit der Kontrollgruppe. Die Kombination des CO_2 Lasers mit einer vor der Bestrahlung durchgeführten Fluoridbehandlung, führte zu einer Reduktion des Mikrohärteverlustes um 99,9% und hatte einen unterstützenden Effekt auf die Laserbehandlung. Im Gegensatz dazu konnte die alleinige Fluoridbehandlung eine nur geringe und im Vergleich zur Kontrollgruppe nicht signifikante Erhöhung der Erosionsresistenz erreichen. Des Weiteren wurde durch die alleinige CO_2 Laserbehandlung eine statistisch signifikante Wiedererhärtung von bereits durch Säure erweichtem Schmelz erreicht. Die kombinierte Laser- und Fluoridbehandlung führte auch zu einer signifikanten Wiedererhärtung des Schmelzes, verstärkte jedoch nicht den präventiven Effekt der alleinigen Laserbehandlung. Die Behandlung mit Fluorid-Gel allein konnte den erweichten Schmelz nicht wieder erhärten. Es wurde außerdem ermittelt, dass die Kombination einer Behandlung mit dem CO_2 Laser und Fluorid-Gel die Aufnahme von Fluorid in den Schmelz erhöht. Ein höherer Fluoridgehalt bedeutete jedoch nicht zugleich eine höhere Erosionsresistenz.

In der zweiten *In-vitro*-Untersuchung der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass die CO_2 Laserbestrahlung allein und in Kombination mit Fluorid-Gel (elmex® gelée) zu einer signifikanten Erhöhung der Resistenz erodierter Zahnhartsubstanz gegenüber Abrasionen führt. Durch eine vor der Laserbestrahlung durchgeführte Fluoridierung wurde mit 54% die höchste Verringerung des Substanzverlustes durch Abrasion im Vergleich zur Kontrollgruppe erreicht. Die alleinige Applikation des Fluorid-Gels war nicht in der Lage den erodierten Schmelz vor Abrasionen zu schützen.

Bei Betrachtung der Ergebnisse aus Studie 1 und 2 kann zusammenfassend festgestellt werden, dass die CO_2 Laserbestrahlung allein oder kombiniert mit einer Fluorid-Vorbehandlung in Zukunft eine vielversprechende

Behandlungsmethode zur Prävention von Erosionen und Abrasionen darstellen könnte. Auch die Möglichkeit bereits erweichten Schmelz wieder zu erhärten, könnte in Zukunft Risikopatienten vor dem Verlust weiterer Zahnhartsubstanz schützen und somit zu einer Verlängerung der Lebensdauer ihrer Zähne verhelfen. Dennoch muss geklärt werden, ob solch eine Behandlung einen dauerhaften Schutz gewährleistet, oder ob und wie oft die Behandlung wiederholt werden muss und welche Auswirkungen eine mehrmalige derartige Behandlung auf dem Schmelz und auf den Zahn generell hat. Da in manchen Studien bereits bessere Ergebnisse in der Prävention von Erosionen mithilfe von zinnhaltigen Fluoridpräparaten und TiF_4-Präparaten erreicht wurden, als mit den konventionellen NaF/AmF-Präparaten, wäre es auch interessant zu prüfen, ob derartige Präparate in Kombination mit einer CO_2 Laserbestrahlung einen noch höheren Schutz vor Erosionen und Abrasionen erreichen könnten. Es muss beachtet werden, dass der in dieser Studie verwendete CO_2 Laser ein Prototyp ist. Es gibt zurzeit keinen solchen CO_2 Laser mit diesen Parametern, der für den klinischen Gebrauch eingesetzt werden könnte. Bevor ein solcher Laser klinisch eingesetzt werden kann sind weitere Studien notwendig, damit negative Auswirkungen auf den Zahn und die Pulpa vermieden werden können.

8. Literaturverzeichnis

Absi, E. G., M. Addy und D. Adams (1992). "Dentine hypersensitivity--the effect of toothbrushing and dietary compounds on dentine in vitro: an SEM study." J Oral Rehabil **19**(2): 101-110.

Addy, M. und M. L. Hunter (2003). "Can tooth brushing damage your health? Effects on oral and dental tissues." Int Dent J **53 Suppl 3**: 177-186.

Addy, M. und R. P. Shellis (2006). "Interaction between attrition,abrasion and erosion in tooth wear." Monogr Oral Sci **20**: 17-31.

Aeschbacher, M. (1967). "[Softening of the enamel surface by fruit juices under in vitro conditions]." SSO Schweiz Monatsschr Zahnheilkd **77**(1): 58-62.

Al-Dlaigan, Y. H., L. Shaw und A. Smith (2001a). "Dental erosion in a group of British 14-year-old school children. Part II: Influence of dietary intake." Br Dent J **190**(5): 258-261.

Al-Dlaigan, Y. H., L. Shaw und A. Smith (2001b). "Dental erosion in a group of British 14-year-old, school children. Part I: Prevalence and influence of differing socioeconomic backgrounds." Br Dent J **190**(3): 145-149.

Amaechi, B. T. und S. M. Higham (2001). "In vitro remineralisation of eroded enamel lesions by saliva." J Dent **29**(5): 371-376.

Amaechi, B. T., S. M. Higham, W. M. Edgar und A. Milosevic (1999). "Thickness of acquired salivary pellicle as a determinant of the sites of dental erosion." J Dent Res **78**(12): 1821-1828.

Apel, C., J. Meister, H. Gotz, H. Duschner und N. Gutknecht (2005). "Structural changes in human dental enamel after subablative erbium laser irradiation and its potential use for caries prevention." Caries Res **39**(1): 65-70.

Apel, C., J. Meister, R. S. Ioana, R. Franzen, P. Hering und N. Gutknecht (2002). "The ablation threshold of Er:YAG and Er:YSGG laser radiation in dental enamel." Lasers Med Sci **17**(4): 246-252.

Apel, C. und H. Rieß (2005) "Kariestherapie und Kavitätenpräparation." Zahnarztl Mitt **8**.

Attin, T., W. Buchalla, M. Gollner und E. Hellwig (2000a). "Use of variable remineralization periods to improve the abrasion resistance of previously eroded enamel." Caries Res **34**(1): 48-52.

Attin, T., W. Buchalla und B. Putz (2001a). "In vitro evaluation of different remineralization periods in improving the resistance of previously eroded bovine dentine against tooth-brushing abrasion." Arch Oral Biol **46**(9): 871-874.

Attin, T., H. Deifuss und E. Hellwig (1999). "Influence of acidified fluoride gel on abrasion resistance of eroded enamel." Caries Res **33**(2): 135-139.

Attin, T., B. Dumont und W. Buchalla (2000b). "Fluoridaufnahme in erodiertem, kariösem und gesundem Zahnschmelz nach Applikation einer 2000-ppm-Fluoridlösung." Dtsch Zahnarztl Z **55**(7): 455-460.

Attin, T., O. Hartmann, R. D. Hilgers und E. Hellwig (1995). "Fluoride retention of incipient enamel lesions after treatment with a calcium fluoride varnish in vivo." Arch Oral Biol **40**(3): 169-174.

Attin, T., S. Knofel, W. Buchalla und R. Tutuncu (2001b). "In situ evaluation of different remineralization periods to decrease brushing abrasion of demineralized enamel." Caries Res **35**(3): 216-222.

Attin, T., U. Koidl, W. Buchalla, H. G. Schaller, A. M. Kielbassa und E. Hellwig (1997). "Correlation of microhardness and wear in differently eroded bovine dental enamel." Arch Oral Biol **42**(3): 243-250.

Attin, T., S. Siegel, W. Buchalla, A. M. Lennon, C. Hannig und K. Becker (2004). "Brushing abrasion of softened and remineralised dentin: an in situ study." Caries Res **38**(1): 62-66.

Attin, T., K. Weiss, K. Becker, W. Buchalla und A. Wiegand (2005). "Impact of modified acidic soft drinks on enamel erosion." Oral Dis **11**(1): 7-12.

Attin, T., C. Zirkel und E. Hellwig (1998). "Brushing abrasion of eroded dentin after application of sodium fluoride solutions." Caries Res **32**(5): 344-350.

Barbakow, F., T. Imfeld, F. Lutz, G. Stookey und B. Schemehorn (1989). "Dentin abrasion (RDA), enamel abrasion (REA) and polishing scores of dentifrices sold in Switzerland." Schweiz Monatsschr Zahnmed **99**(4): 408-413.

Bardolia, P., G. Burnside, A. Ashcroft, A. Milosevic, S. A. Goodfellow, E. A. Rolfe und C. M. Pine (2010). "Prevalence and risk indicators of erosion in thirteen- to fourteen-year-olds on the Isle of Man." Caries Res **44**(2): 165-168.

Bartlett, D. W. und P. Shah (2006). "A critical review of non-carious cervical (wear) lesions and the role of abfraction, erosion, and abrasion." J Dent Res **85**(4): 306-312.

Benelli, E. M., M. C. Serra, A. L. Rodrigues, Jr. und J. A. Cury (1993). "In situ anticariogenic potential of glass ionomer cement." Caries Res **27**(4): 280-284.

Bevilacqua, F. M., D. M. Zezell, R. Magnani, P. A. da Ana und P. Eduardo Cde (2008). "Fluoride uptake and acid resistance of enamel irradiated with Er:YAG laser." Lasers Med Sci **23**(2): 141-147.

Buyukyilmaz, T., B. Ogaard und G. Rolla (1997). "The resistance of titanium tetrafluoride-treated human enamel to strong hydrochloric acid." Eur J Oral Sci **105**(5 Pt 2): 473-477.

Caslavska, V., E. C. Moreno und F. Brudevold (1975). "Determination of the calcium fluoride formed from in vitro exposure of human enamel to fluoride solutions." Arch Oral Biol **20**(5-6): 333-339.

Cavadini, C., A. M. Siega-Riz und B. M. Popkin (2000). "US adolescent food intake trends from 1965 to 1996." West J Med **173**(6): 378-383.

Cecchini, R. C., D. M. Zezell, E. de Oliveira, P. M. de Freitas und P. Eduardo Cde (2005). "Effect of Er:YAG laser on enamel acid resistance: morphological and atomic spectrometry analysis." Lasers Surg Med **37**(5): 366-372.

Chin-Ying, S. H., G. Xiaoli, P. Jisheng und J. S. Wefel (2004). "Effects of CO2 laser on fluoride uptake in enamel." J Dent **32**(2): 161-167.

Christoffersen, J., M. R. Christoffersen, W. Kibalczyc und W. G. Perdok (1988). "Kinetics of dissolution and growth of calcium fluoride and effects of phosphate." Acta Odontol Scand **46**(6): 325-336.

Davis, W. B. und P. J. Winter (1980). "The effect of abrasion on enamel and dentine and exposure to dietary acid." Br Dent J **148**(11-12): 253-256.

de Carvalho Sales-Peres, S. H., S. Goya, J. J. de Araujo, A. Sales-Peres, J. R. Lauris und M. A. Buzalaf (2008). "Prevalence of dental wear among 12-year-old Brazilian adolescents using a modification of the tooth wear index." Public Health **122**(9): 942-948.

Dugmore, C. R. und W. P. Rock (2003). "The progression of tooth erosion in a cohort of adolescents of mixed ethnicity." Int J Paediatr Dent **13**(5): 295-303.

Dugmore, C. R. und W. P. Rock (2004a). "A multifactorial analysis of factors associated with dental erosion." Br Dent J **196**(5): 283-286; discussion 273.

Dugmore, C. R. und W. P. Rock (2004b). "The prevalence of tooth erosion in 12-year-old children." Br Dent J **196**(5): 279-282; discussion 273.

Dyer, D., M. Addy und R. G. Newcombe (2000). "Studies in vitro of abrasion by different manual toothbrush heads and a standard toothpaste." J Clin Periodontol **27**(2): 99-103.

Eccles, J. D. (1979). "Dental erosion of nonindustrial origin. A clinical survey and classification." J Prosthet Dent **42**(6): 649-653.

Edwards, M., R. A. Ashwood, S. J. Littlewood, L. M. Brocklebank und D. E. Fung (1998). "A videofluoroscopic comparison of straw and cup drinking: the potential influence on dental erosion." Br Dent J **185**(5): 244-249.

Eisenburger, M., R. P. Shellis und M. Addy (2003). "Comparative study of wear of enamel induced by alternating and simultaneous combinations of abrasion and erosion in vitro." Caries Res **37**(6): 450-455.

Eisenburger, M., R. P. Shellis und M. Addy (2004). "Scanning electron microscopy of softened enamel." Caries Res **38**(1): 67-74.

El Aidi, H., E. M. Bronkhorst, M. C. Huysmans und G. J. Truin (2009). "Dynamics of tooth erosion in adolescents: a 3-year longitudinal study." J Dent **38**(2): 131-137.

Esteves-Oliveira, M., C. Apel, N. Gutknecht, W. F. Velloso Jr, M. E. B. Cotrim, C. P. Eduardo und D. M. Zezell (2008a). "Low- Fluence CO2 Laser Irradiation Decreases Enamel Solubility." Laser Phys **18**(4): 478-485.

Esteves-Oliveira, M., C. P. Eduardo, F. Lampert und C. Apel, Eds. (2008b). Changes in dental enamel birefringence after CO2 laser irradiation trough fluoride gel - a pilot study. Berlin Heidelberg, Springer Verlag.

Esteves-Oliveira, M., D. M. Zezell, P. A. Ana, S. S. Yekta, F. Lampert und C. P. Eduardo (2010). "Dentine caries inhibition through CO(2) laser (10.6mum) irradiation and fluoride application, in vitro." Arch Oral Biol.

Esteves-Oliveira, M., D. M. Zezell, J. Meister, R. Franzen, S. Stanzel, F. Lampert, C. P. Eduardo und C. Apel (2009). "CO2 Laser (10.6 microm) parameters for caries prevention in dental enamel." Caries Res **43**(4): 261-268.

Featherstone, J. D., N. A. Barrett-Vespone, D. Fried, Z. Kantorowitz und W. Seka (1998). "CO2 laser inhibitor of artificial caries-like lesion progression in dental enamel." J Dent Res **77**(6): 1397-1403.

Featherstone, J. D. und D. Fried (2001). "Fundamental interactions of lasers with dental hard tissues." Med. Laser Appl. **16**(3): 181-194.

Featherstone, J. D. und A. Lussi (2006). "Understanding the chemistry of dental erosion." Monogr Oral Sci **20**: 66-76.

Ferreira, J. M., J. Palamara, P. P. Phakey, W. A. Rachinger und H. J. Orams (1989). "Effects of continuous-wave CO2 laser on the ultrastructure of human dental enamel." Arch Oral Biol **34**(7): 551-562.

Fowler, B. O. und S. Kuroda (1986). "Changes in heated and in laser-irradiated human tooth enamel and their probable effects on solubility." Calcif Tissue Int **38**(4): 197-208.

Fox, J. L., D. Yu, M. Otsuka, W. I. Higuchi, J. Wong und G. L. Powell (1992). "Initial dissolution rate studies on dental enamel after CO2 laser irradiation." J Dent Res **71**(7): 1389-1398.

Fried, D., R. E. Glena, J. D. Featherstone und W. Seka (1995). "Nature of light scattering in dental enamel and dentin at visible and near-infrared wavelengths." Appl Opt **34**(7): 1278-1285.

Fried, D., J. Ragadio, M. Akrivou, J. D. Featherstone, M. W. Murray und K. M. Dickenson (2001a). "Dental hard tissue modification and removal using sealed transverse excited atmospheric-pressure lasers operating at lambda=9.6 and 10.6 microm." J Biomed Opt **6**(2): 231-238.

Fried, D., J. Ragadio und A. Champion (2001b). "Residual heat deposition in dental enamel during IR laser ablation at 2.79, 2.94, 9.6, and 10.6 microm." Lasers Surg Med **29**(3): 221-229.

Fried, D., W. Seka, R. Glena und J. D. Featherstone (1996). "Thermal response of hard dental tissues to 9- through 11- μm CO_2- laser irradiation." Opt Eng **35**: 1976-1984.

Fried, D., M. J. Zuerlein, C. Q. Le und J. D. Featherstone (2002). "Thermal and chemical modification of dentin by 9-11-microm CO2 laser pulses of 5-100-micros duration." Lasers Surg Med **31**(4): 275-282.

Ganss, C., J. Klimek, V. Brune und A. Schurmann (2004). "Effects of two fluoridation measures on erosion progression in human enamel and dentine in situ." Caries Res **38**(6): 561-566.

Ganss, C., J. Klimek und K. Giese (2001a). "Dental erosion in children and adolescents--a cross-sectional and longitudinal investigation using study models." Community Dent Oral Epidemiol **29**(4): 264-271.

Ganss, C., J. Klimek, U. Schaffer und T. Spall (2001b). "Effectiveness of two fluoridation measures on erosion progression in human enamel and dentine in vitro." Caries Res **35**(5): 325-330.

Ganss, C. und A. Lussi (2006). "Diagnosis of erosive tooth wear." Monogr Oral Sci **20**: 32-43.

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

Ganss, C., L. Neutard, J. von Hinckeldey, J. Klimek und N. Schlueter (2010). "Efficacy of a Tin/Fluoride Rinse: a Randomized in situ Trial on Erosion." J Dent Res.

Ganss, C., M. Schlechtriemen und J. Klimek (1999). "Dental erosions in subjects living on a raw food diet." Caries Res **33**(1): 74-80.

Ganss, C. und N. Schlueter (2010). "Erosionen der Zahnhartsubstanzen - Prävention und Therapie." Dtsch Zahnarztl Z **61**(10): 1203-1210.

Ganss, C., N. Schlueter, D. Friedrich und J. Klimek (2007a). "Efficacy of waiting periods and topical fluoride treatment on toothbrush abrasion of eroded enamel in situ." Caries Res **41**(2): 146-151.

Ganss, C., N. Schlueter, M. Hardt, P. Schattenberg und J. Klimek (2008). "Effect of fluoride compounds on enamel erosion in vitro: a comparison of amine, sodium and stannous fluoride." Caries Res **42**(1): 2-7.

Ganss, C., N. Schlueter und J. Klimek (2007b). "Retention of KOH-soluble fluoride on enamel and dentine under erosive conditions--A comparison of in vitro and in situ results." Arch Oral Biol **52**(1): 9-14.

Ganss, C., N. Schlueter, S. Preiss und J. Klimek (2009). "Tooth brushing habits in uninstructed adults--frequency, technique, duration and force." Clin Oral Investig **13**(2): 203-208.

Goncalves, N. C., A. A. Del Bel Cury, G. S. Simoes, A. T. Hara, P. L. Rosalen und J. A. Cury (2006). "Effect of xylitol:sorbitol on fluoride enamel demineralization reduction in situ." J Dent **34**(9): 662-667.

Gonzalez-Rodriguez, A., J. de Dios Lopez-Gonzalez, J. D. Del Castillo und J. Villalba-Moreno (2010). "Comparison of effects of diode laser and CO(2) laser on human teeth and their usefulness in topical fluoridation." Lasers Med Sci.

Goodman, B. D. und H. W. Kaufman (1977). "Effects of an argon laser on the crystalline properties and rate of dissolution in acid of tooth enamel in the presence of sodium fluoride." J Dent Res **56**(10): 1201-1207.

Grenby, T. H., A. Phillips, T. Desai und M. Mistry (1989). "Laboratory studies of the dental properties of soft drinks." Br J Nutr **62**(2): 451-464.

Hannig, M. und M. Balz (1999). "Influence of in vivo formed salivary pellicle on enamel erosion." Caries Res **33**(5): 372-379.

Hara, A. T., S. A. Kelly, C. Gonzalez-Cabezas, G. J. Eckert, A. P. Barlow, S. C. Mason und D. T. Zero (2009). "Influence of fluoride availability of dentifrices on eroded enamel remineralization in situ." Caries Res **43**(1): 57-63.

Hefferren, J. J. (1976). "A laboratory method for assessment of dentrifrice abrasivity." J Dent Res **55**(4): 563-573.

Holloway, P. J., M. Mellanby und R. J. C. Steward (1958). "Fruit drinks and tooth erosion." Br Dent J **104**: 305-309.

Hove, L., B. Holme, B. Ogaard, T. Willumsen und A. B. Tveit (2006). "The protective effect of TiF4, SnF2 and NaF on erosion of enamel by hydrochloric acid in vitro measured by white light interferometry." Caries Res **40**(5): 440-443.

Hsu, C. Y., T. H. Jordan, D. N. Dederich und J. S. Wefel (2000). "Effects of low-energy CO2 laser irradiation and the organic matrix on inhibition of enamel demineralization." J Dent Res **79**(9): 1725-1730.

Hsu, C. Y., T. H. Jordan, D. N. Dederich und J. S. Wefel (2001). "Laser-matrix-fluoride effects on enamel demineralization." J Dent Res **80**(9): 1797-1801.

Imfeld, T. (1996). "Dental erosion. Definition, classification and links." Eur J Oral Sci **104**(2 (Pt 2)): 151-155.

Jaeggi, T. und A. Lussi (1999). "Toothbrush abrasion of erosively altered enamel after intraoral exposure to saliva: an in situ study." Caries Res **33**(6): 455-461.

Jaeggi, T. und A. Lussi (2006). "Prevalence, incidence and distribution of erosion." Monogr Oral Sci **20**: 44-65.

Jaeggi, T., M. Schaffner, W. Burgin und A. Lussi (1999). "[Erosions and wedge-shaped defects in Swiss Army recruits]." Schweiz Monatsschr Zahnmed **109**(11): 1170-1182.

Jarvinen, V., J. H. Meurman, H. Hyvarinen, I. Rytomaa und H. Murtomaa (1988). "Dental erosion and upper gastrointestinal disorders." Oral Surg Oral Med Oral Pathol **65**(3): 298-303.

Jarvinen, V. K., Rytomaa, II und O. P. Heinonen (1991). "Risk factors in dental erosion." J Dent Res **70**(6): 942-947.

Joiner, A., A. Schwarz, C. J. Philpotts, T. F. Cox, K. Huber und M. Hannig (2008). "The protective nature of pellicle towards toothpaste abrasion on enamel and dentine." J Dent **36**(5): 360-368.

Kantorowitz, Z., J. D. Featherstone und D. Fried (1998). "Caries prevention by CO2 laser treatment: dependency on the number of pulses used." J Am Dent Assoc **129**(5): 585-591.

Korytnicki, D., M. P. Mayer, M. Daronch, M. Singer Jda und R. H. Grande (2006). "Effects of Nd:YAG laser on enamel microhardness and dental plaque composition: an in situ study." Photomed Laser Surg **24**(1): 59-63.

Kuroiwa, M. und T. Kodaka (1993). "Microstructural changes of human enamel surfaces by brushing with and without dentifrice containing abrasive." Caries Res **27**(1): 1-8.

Lagerweij, M. D., W. Buchalla, S. Kohnke, K. Becker, A. M. Lennon und T. Attin (2006). "Prevention of erosion and abrasion by a high fluoride concentration gel applied at high frequencies." Caries Res **40**(2): 148-153.

Larsen, M. J. und S. J. Jensen (1994). "Experiments on the initiation of calcium fluoride formation with reference to the solubility of dental enamel and brushite." Arch Oral Biol **39**(1): 23-27.

Larsen, M. J. und B. Nyvad (1999). "Enamel erosion by some soft drinks and orange juices relative to their pH, buffering effect and contents of calcium phosphate." Caries Res **33**(1): 81-87.

Larsen, M. J. und A. Richards (2001). "The influence of saliva on the formation of calcium fluoride-like material on human dental enamel." Caries Res **35**(1): 57-60.

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

Lennon, A. M., M. Pfeffer, W. Buchalla, K. Becker, S. Lennon und T. Attin (2006). "Effect of a casein/calcium phosphate-containing tooth cream and fluoride on enamel erosion in vitro." Caries Res **40**(2): 154-157.

Levine, R. S. (1973). "Fruit juice erosion--an increasing danger?" J Dent **2**(2): 85-88.

Levitch, L. C., J. D. Bader, D. A. Shugars und H. O. Heymann (1994). "Non-carious cervical lesions." J Dent **22**(4): 195-207.

Lussi, A. (1996). "Dental erosion clinical diagnosis and case history taking." Eur J Oral Sci **104**(2 (Pt 2)): 191-198.

Lussi, A. und T. Jaeggi (2001). "[The erosive potential of various oral care products compared to foodstuffs and beverages]." Schweiz Monatsschr Zahnmed **111**(3): 274-281.

Lussi, A. und T. Jaeggi (2006). "Chemical factors." Monogr Oral Sci **20**: 77-87.

Lussi, A. und T. Jaeggi (2008). "Erosion--diagnosis and risk factors." Clin Oral Investig **12 Suppl 1**: S5-13.

Lussi, A., T. Jaeggi und D. Zero (2004). "The role of diet in the aetiology of dental erosion." Caries Res **38 Suppl 1**: 34-44.

Lussi, A., T. Jaggi und S. Scharer (1993). "The influence of different factors on in vitro enamel erosion." Caries Res **27**(5): 387-393.

Lussi, A., N. Kohler, D. Zero, M. Schaffner und B. Megert (2000). "A comparison of the erosive potential of different beverages in primary and permanent teeth using an in vitro model." Eur J Oral Sci **108**(2): 110-114.

Lussi, A., B. Megert, D. Eggenberger und T. Jaeggi (2008). "Impact of different toothpastes on the prevention of erosion." Caries Res **42**(1): 62-67.

Lussi, A. und M. Schaffner (2000). "Progression of and risk factors for dental erosion and wedge-shaped defects over a 6-year period." Caries Res **34**(2): 182-187.

Lussi, A., M. Schaffner, P. Hotz und P. Suter (1991). "Dental erosion in a population of Swiss adults." Community Dent Oral Epidemiol **19**(5): 286-290.

Lussi, A., M. Schaffner, P. Hotz und P. Suter (1992). "[The erosion of dental hard substance. Its epidemiology, clinical appearance, risk factors and preventive rules]." Schweiz Monatsschr Zahnmed **102**(3): 320-329.

Lussi, A., M. Schaffner, T. Jaeggi und A. Grüninger (2005). "Erosionen - Befund, Diagnose, Risikofaktoren, Prävention, Therapie." Schweiz Monatsschr Zahnmed **115**(10): 917 - 934.

Magalhaes, A. C., M. T. Kato, D. Rios, A. Wiegand, T. Attin und M. A. Buzalaf (2008a). "The effect of an experimental 4% Tif4 varnish compared to NaF varnishes and 4% TiF4 solution on dental erosion in vitro." Caries Res **42**(4): 269-274.

Magalhaes, A. C., D. Rios, A. C. Delbem, M. A. Buzalaf und M. A. Machado (2007). "Influence of fluoride dentifrice on brushing abrasion of eroded human enamel: an in situ/ex vivo study." Caries Res **41**(1): 77-79.

Magalhaes, A. C., D. Rios, H. M. Honorio, A. M. Jorge, Jr., A. C. Delbem und M. A. Buzalaf (2008b). "Effect of 4% titanium tetrafluoride solution on dental erosion by a soft drink: an in situ/ex vivo study." Arch Oral Biol **53**(5): 399-404.

Marquez, F., E. Quintana, I. Roca und J. Salgado (1993). "Physical-mechanical effects of Nd:YAG laser on the surface of sound dental enamel." Biomaterials **14**(4): 313-316.

Maupome, G., J. Diez-de-Bonilla, G. Torres-Villasenor, L. C. Andrade-Delgado und V. M. Castano (1998). "In vitro quantitative assessment of enamel microhardness after exposure to eroding immersion in a cola drink." Caries Res **32**(2): 148-153.

McCormack, S. M., D. Fried, J. D. Featherstone, R. E. Glena und W. Seka (1995). "Scanning electron microscope observations of CO2 laser effects on dental enamel." J Dent Res **74**(10): 1702-1708.

McCracken, M. und S. J. O'Neal (2000). "Dental erosion and aspirin headache powders: a clinical report." J Prosthodont **9**(2): 95-98.

Meurman, J. H. und R. M. Frank (1991). "Scanning electron microscopic study of the effect of salivary pellicle on enamel erosion." Caries Res **25**(1): 1-6.

Meurman, J. H., J. Hemmerle, J. C. Voegel, R. Rauhamaa-Makinen und M. Luomanen (1997). "Transformation of hydroxyapatite to fluorapatite by irradiation with high-energy CO2 laser." Caries Res **31**(5): 397-400.

Meurman, J. H. und J. M. ten Cate (1996). "Pathogenesis and modifying factors of dental erosion." Eur J Oral Sci **104**(2 (Pt 2)): 199-206.

Meyer-Lueckel, H. und A. M. Kielbassa (2002). "[Use of saliva substitutes in patients with xerostomia]." Schweiz Monatsschr Zahnmed **112**(10): 1037-1058.

Micheelis, W. und U. Schiffner, Eds. (2006). Vierte Deutsche Mundgesundheitsstudie (DMS IV), IDZ.

Milosevic, A. (1997). "Sports drinks hazard to teeth." Br J Sports Med **31**(1): 28-30.

Moazzez, R., B. G. Smith und D. W. Bartlett (2000). "Oral pH and drinking habit during ingestion of a carbonated drink in a group of adolescents with dental erosion." J Dent **28**(6): 395-397.

Moretto, M. J., A. C. Magalhaes, K. T. Sassaki, A. C. Delbem und C. C. Martinhon (2010). "Effect of different fluoride concentrations of experimental dentifrices on enamel erosion and abrasion." Caries Res **44**(2): 135-140.

Mundorff, S. A., M. F. Little und B. G. Bibby (1972). "Enamel dissolution. II. Action of titanium tetrafluoride." J Dent Res **51**(6): 1567-1571.

Nelson, D. G., J. S. Wefel, W. L. Jongebloed und J. D. Featherstone (1987). "Morphology, histology and crystallography of human dental enamel treated with pulsed low-energy infrared laser radiation." Caries Res **21**(5): 411-426.

Nunn, J. H. (1996). "Prevalence of dental erosion and the implications for oral health." Eur J Oral Sci **104**(2 (Pt 2)): 156-161.

Ogaard, B. (1990). "Effects of fluoride on caries development and progression in vivo." J Dent Res **69 Spec No**: 813-819; discussion 820-813.

Ogaard, B. (2001). "CaF(2) formation: cariostatic properties and factors of enhancing the effect." Caries Res **35 Suppl 1**: 40-44.

Ogaard, B., G. Rolla, J. Arends und J. M. ten Cate (1988). "Orthodontic appliances and enamel demineralization. Part 2. Prevention and treatment of lesions." Am J Orthod Dentofacial Orthop **94**(2): 123-128.

Oho, T. und T. Morioka (1990). "A possible mechanism of acquired acid resistance of human dental enamel by laser irradiation." Caries Res **24**(2): 86-92.

Petzold, M. (2001). "The influence of different fluoride compounds and treatment conditions on dental enamel: a descriptive in vitro study of the CaF(2) precipitation and microstructure." Caries Res **35 Suppl 1**: 45-51.

Pietzsch, T. und J. Rotgans (2004). "The polynominal function procedure to measure lowest fluoride concentrations in saliva and urine." Caries Res **38**(4): 357-412.

Rios, D., A. C. Magalhaes, R. O. Polo, A. Wiegand, T. Attin und M. A. Buzalaf (2008). "The efficacy of a highly concentrated fluoride dentifrice on bovine enamel subjected to erosion and abrasion." J Am Dent Assoc **139**(12): 1652-1656.

Rodrigues, L. K., M. Nobre dos Santos, D. Pereira, A. V. Assaf und V. Pardi (2004). "Carbon dioxide laser in dental caries prevention." J Dent **32**(7): 531-540.

Rolla, G. (1988). "On the role of calcium fluoride in the cariostatic mechanism of fluoride." Acta Odontol Scand **46**(6): 341-345.

Rolla, G., B. Ogaard und A. Cruz Rde (1993). "Topical application of fluorides on teeth. New concepts of mechanisms of interaction." J Clin Periodontol **20**(2): 105-108.

Rolla, G. und E. Saxegaard (1990). "Critical evaluation of the composition and use of topical fluorides, with emphasis on the role of calcium fluoride in caries inhibition." J Dent Res **69 Spec No**: 780-785; discussion 820-783.

Saxegaard, E. und G. Rolla (1988). "Fluoride acquisition on and in human enamel during topical application in vitro." Scand J Dent Res **96**(6): 523-535.

Scheutzel, P. (1992). "Zahnmedizinische Befunde bei psychogenen Eßstörungen." Dtsch Zahnarztl Z **47**: 119-123.

Schiffner, U., W. Micheelis und E. Reich (2002). "Erosionen und keilförmige Zahnhalsdefekte bei deutschen Erwachsenen und Senioren." Dtsch Zahnarztl Z **57**: 102-106.

Schlueter, N., A. Duran, J. Klimek und C. Ganss (2009a). "Investigation of the effect of various fluoride compounds and preparations thereof on erosive tissue loss in enamel in vitro." Caries Res **43**(1): 10-16.

Schlueter, N., C. Ganss, U. Mueller und J. Klimek (2007). "Effect of titanium tetrafluoride and sodium fluoride on erosion progression in enamel and dentine in vitro." Caries Res **41**(2): 141-145.

Schlueter, N., J. Klimek und C. Ganss (2009b). "Effect of stannous and fluoride concentration in a mouth rinse on erosive tissue loss in enamel in vitro." Arch Oral Biol **54**(5): 432-436.

Schlueter, N., J. Klimek und C. Ganss (2009c). "Efficacy of an experimental tin-F-containing solution in erosive tissue loss in enamel and dentine in situ." Caries Res **43**(6): 415-421.

Schlueter, N., J. Klimek und C. Ganss (2010). "Efficacy of tin-containing solutions on erosive mineral loss in enamel and dentine in situ." Clin Oral Investig.

Schmidt, N., C. Ganss und J. Klimek (2003). "Ätiologie, Epidemiologie, und Therapie von Erosionen." Oralprophylaxe **25**(3): 101-109.

Schumann, H., Ed. (1991). Metallographie. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH.

Schweizer-Hirt, C. M., A. Schait, R. Schmid, T. Imfeld, F. Lutz und H. R. Muhlemann (1978). "[Erosion and abrasion of the dental enamel. Experimental study]." SSO Schweiz Monatsschr Zahnheilkd **88**(5): 497-529.

Slop, D., J. F. de Rooij und J. Arends (1983). "Abrasion of enamel. I. An in vitro investigation." Caries Res **17**(3): 242-248.

Sobral, M. A., K. M. Lachowski, W. de Rossi, S. R. Braga und K. M. Ramalho (2009). "Effect of Nd:YAG laser and acidulated phosphate fluoride on bovine and human enamel submitted to erosion/abrasion or erosion only: an in vitro preliminary study." Photomed Laser Surg **27**(5): 709-713.

Steiner-Oliveira, C., M. Nobre-dos-Santos, D. T. Zero, G. Eckert und A. T. Hara (2010). "Effect of a pulsed CO2 laser and fluoride on the prevention of enamel and dentine erosion." Arch Oral Biol **55**(2): 127-133.

Stephen, K. W., J. McCrossan, D. Mackenzie, C. B. Macfarlane und C. F. Speirs (1980). "Factors determining the passage of drugs from blood into saliva." Br J Clin Pharmacol **9**(1): 51-55.

Stern, R. H., J. Vahl und R. F. Sognnaes (1972). "Lased enamel: ultrastructural observations of pulsed carbon dioxide laser effects." J Dent Res **51**(2): 455-460.

Tagomori, S. und T. Morioka (1989). "Combined effects of laser and fluoride on acid resistance of human dental enamel." Caries Res **23**(4): 225-231.

ten Bruggen Cate, H. J. (1968). "Dental erosion in industry." Br J Ind Med **25**(4): 249-266.

Ten Cate, J. M. (2004). "Fluorides in caries prevention and control: empiricism or science." Caries Res **38**(3): 254-257.

ten Cate, J. M. und T. Imfeld (1996). "Dental erosion, summary." Eur J Oral Sci **104**(2 (Pt 2)): 241-244.

Tepper, S. A., M. Zehnder, G. F. Pajarola und P. R. Schmidlin (2004). "Increased fluoride uptake and acid resistance by CO2 laser-irradiation through topically applied fluoride on human enamel in vitro." J Dent **32**(8): 635-641.

Tsai, C. L., Y. T. Lin, S. T. Huang und H. W. Chang (2002). "In vitro acid resistance of CO2 and Nd-YAG laser-treated human tooth enamel." Caries Res **36**(6): 423-429.

Vieira, A., D. H. Jager, J. L. Ruben und M. C. Huysmans (2007). "Inhibition of erosive wear by fluoride varnish." Caries Res **41**(1): 61-67.

Vieira, A., M. Lugtenborg, J. L. Ruben und M. C. Huysmans (2006). "Brushing abrasion of eroded bovine enamel pretreated with topical fluorides." Caries Res **40**(3): 224-230.

Vlacic, J., I. A. Meyers und L. J. Walsh (2007). "Laser-activated fluoride treatment of enamel as prevention against erosion." Aust Dent J **52**(3): 175-180.

Vlacic, J., I. A. Meyers und L. J. Walsh (2008). "Photonic conversion of hydroxyapatite to fluorapatite: A possible mechanism for laser- activated fluoride therapy." The Journal of Oral Laser Applications **8**(2): 95 - 102.

Wegehaupt, F. J., V. Schneiders, A. Wiegand, P. R. Schmidlin und T. Attin (2009). "Influence of two different fluoride compounds and an in vitro pellicle on the amount of KOH-soluble fluoride and its retention after toothbrushing." Acta Odontol Scand: 1-5.

Westerman, G. H., R. W. Ellis, M. A. Latta und G. L. Powell (2003). "An in vitro study of enamel surface microhardness following argon laser irradiation and acidulated phosphate fluoride treatment." Pediatr Dent **25**(5): 497-500.

Wiegand, A., M. Begic und T. Attin (2006). "In vitro evaluation of abrasion of eroded enamel by different manual, power and sonic toothbrushes." Caries Res **40**(1): 60-65.

Wiegand, A., B. Hiestand, B. Sener, A. C. Magalhaes, M. Roos und T. Attin (2010). "Effect of TiF4, ZrF4, HfF4 and AmF on erosion and erosion/abrasion of enamel and dentin in situ." Arch Oral Biol **55**(3): 223-228.

Wiegand, A., L. Kowing und T. Attin (2007). "Impact of brushing force on abrasion of acid-softened and sound enamel." Arch Oral Biol **52**(11): 1043-1047.

Wiegand, A., M. Kuhn, B. Sener, M. Roos und T. Attin (2009a). "Abrasion of eroded dentin caused by toothpaste slurries of different abrasivity and toothbrushes of different filament diameter." J Dent **37**(6): 480-484.

Wiegand, A., A. C. Magalhaes, R. S. Navarro, P. R. Schmidlin, D. Rios, M. A. Buzalaf und T. Attin (2009b). "Effect of Titanium Tetrafluoride and Amine Fluoride Treatment Combined with Carbon Dioxide Laser Irradiation on Enamel and Dentin Erosion." Photomed Laser Surg.

Wiegand, A., A. C. Magalhaes, B. Sener, E. Waldheim und T. Attin (2009c). "TiF(4) and NaF at pH 1.2 but not at pH 3.5 are able to reduce dentin erosion." Arch Oral Biol **54**(8): 790-795.

Wiegand, A., W. Meier, E. Sutter, A. C. Magalhaes, K. Becker, M. Roos und T. Attin (2008a). "Protective effect of different tetrafluorides on erosion of pellicle-free and pellicle-covered enamel and dentine." Caries Res **42**(4): 247-254.

Wiegand, A., M. Schwerzmann, B. Sener, A. C. Magalhaes, M. Roos, D. Ziebolz, T. Imfeld und T. Attin (2008b). "Impact of toothpaste slurry abrasivity and toothbrush filament stiffness on abrasion of eroded enamel - an in vitro study." Acta Odontol Scand **66**(4): 231-235.

Wiegand, A., E. Waldheim, B. Sener, A. C. Magalhaes und T. Attin (2009d). "Comparison of the effects of TiF4 and NaF solutions at pH 1.2 and 3.5 on enamel erosion in vitro." Caries Res **43**(4): 269-277.

Wulknitz, P. (1997). "Cleaning power and abrasivity of European toothpastes." Adv Dent Res **11**(4): 576-579.

Zero, D. T. (1996). "Etiology of dental erosion--extrinsic factors." Eur J Oral Sci **104**(2 (Pt 2)): 162-177.

Zero, D. T., I. Rahbek, J. Fu, H. M. Proskin und J. D. Featherstone (1990). "Comparison of the iodide permeability test, the surface microhardness test, and mineral dissolution of bovine enamel following acid challenge." Caries Res **24**(3): 181-188.

Zipkin, I. und F. Mc Clure (1949). "Salivary citrate and dental erosion; procedure for determining citric acid in saliva; dental erosion and citric acid in saliva." J Dent Res **28**(6): 613-626.

Zuerlein, M. J., D. Fried und J. D. Featherstone (1999a). "Modeling the modification depth of carbon dioxide laser-treated dental enamel." Lasers Surg Med **25**(4): 335-347.

Zuerlein, M. J., D. Fried, J. D. Featherstone und W. Seka (1999b). "Optical properties of dental enamel in the mid-IR determined by pulsed photothermal radiometry." IEEE J Selected Top Quantum Electronics **5**(4): 1083-1089.

Auflistung der eigenen Publikationen

Esteves-Oliveira, M., **C. Pasaporti,** N. Heussen, C.P. Eduardo, F. Lampert und C. Apel (2011a). “Rehardening of acid-softened enamel and prevention of enamel softening through CO_2 laser irradiation.” Journal of Dentistry. 39(6), p.414-421

Esteves-Oliveira, M., **C. Pasaporti**, N. Heussen, C.P. Eduardo, F. Lampert und C. Apel (2011b). “Prevention of toothbrushing abrasion of acid-softened enamel by CO_2 laser irradiation.” Journal of Dentistry. 39(9), p.604-611

Danksagung

Herrn Prof. Dr. med. dent. Friedrich Lampert, zu Beginn meiner Promotionsarbeit Leiter der Klinik für Zahnerhaltung, Parodontologie und Präventive Zahnheilkunde, danke ich herzlich für die Möglichkeit im Universitätsklinikum der RWTH Aachen zu promovieren.

Herrn Dr. med. dent. Christian Apel danke ich herzlich für die Möglichkeit mit dem CO_2 Laser zu arbeiten.

Mein besonderer Dank gilt Frau Dr. med. dent. Marcella Esteves-Oliveira für ihre hervorragende Betreuung bei meiner Promotionsarbeit, für ihre Geduld und ihre Freundlichkeit. Sie hat mich immer wieder mit ihrem wissenschaftlichen Engagement beeindruckt.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Fischer, Leiter des Lehr- und Forschungsgebietes Zahnärztliche Werkstoffkunde und Biomaterialforschung der RWTH Aachen, möchte ich gern für die Bereitstellung des Mikrohärteprüfgerätes danken.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Paul Beiss, Leiter des Instituts für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau der RWTH Aachen (bis Ende Juli 2009), danke ich für die Erlaubnis dort Messungen durchzuführen. Ich bedanke mich auch bei seinen Mitarbeitern Frau Renate Peters und Herrn Stefan Lindlohr für die freundliche Betreuung.

Außerdem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt vom Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen für die Erlaubnis der Benutzung des Profilometers. Ein großes Dankeschön gilt auch seinem Mitarbeiter Dipl.-Ing. Thomas Fischer für seine ausführliche Anleitung.

Bei Frau Dr. rer. medic. Nicole Heussen aus dem Institut für Medizinische Statistik des Universitätsklinikums Aachen, möchte ich mich herzlich für die freundliche Unterstützung bei der statistischen Analyse bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich herzlich bei Frau Patricia Buttler-Bücher, medizinisch-technische Assistentin im Labor der Klinik für Zahnerhaltung, Parodontologie und Präventive Zahnheilkunde, für ihre Hilfe, ihre fachliche Unterstützung und für ihr offenes Ohr bedanken.

Bei meinen Eltern und meinen Geschwistern möchte ich mich für die Unterstützung und den unermüdlichen Zuspruch bedanken.

Ein ganz besonderer Dank gilt Jan Hinkelmann für die Kraft, die er mir während der ganzen langen Zeit gegeben hat. Ich danke Dir von ganzem Herzen dafür, dass Du mich immer wieder motiviert und mir zugehört hast.

Erklärung zur Datenaufbewahrung

Hiermit erkläre ich, dass die dieser Dissertation zu Grunde liegenden Originaldaten

bei mir, ***Christina Pasaporti, Hauptstraße 5, 53757 Sankt Augustin***,

hinterlegt sind.