

**Aus der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie der
Universität Würzburg**

Direktor: Prof. Dr. med. dent. Bernd Klaiber

**Effekte unterschiedlicher Konzentrationen einer
kalziumhaltigen Salzhydratschmelze auf das erosive
Potential säurehaltiger Getränke**

**Inaugural-Dissertation
Zur Erlangung der Doktorwürde der
Medizinischen Fakultät
der
Julius-Maximilians-Universität Würzburg**

**vorgelegt von
Asya Monova
Sofia, Bulgarien**

Würzburg, Juni 2011

Referent: Prof. Dr. med. dent. Wolfgang Wiedemann, Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie

Korreferent: Prof. Dr. med. dent. Thomas Holste, Poliklinik für Prothetik

Dekan: Prof. Dr. med. Matthias Frosch, Institut für Hygiene und Mikrobiologie

Tag der mündlichen Prüfung: 09.12.2011

Die Promovendin ist Zahnärztin

Meiner Familie in Liebe und Dankbarkeit

	Seite
1. Einleitung	1
2. Grundlagen und Literaturübersicht	4
2.1. Zahnschmelz	4
2.1.1. Chemische Struktur	4
2.1.2. Histologische Struktur	7
2.2. Dentin	12
2.2.1. Chemische Struktur	12
2.2.2. Histologische Struktur	13
2.3. Speichel	16
2.3.1. Speichelfließrate	18
2.3.2. Zusammensetzung des Speichels	21
2.3.3. Funktion und Puffersysteme des Speichels	22
2.3.3.1. Funktion	22
2.3.3.2. Puffersysteme	27
2.3.3.3. Speichel als Remineralisationslösung	28
2.4. Initiale Kariesläsion	31
2.5. Das Prinzip der forcierten dynamischen Remineralisation	33
2.6. Erosionen	37
2.6.1. Ätiologie und Pathogenese	38
2.6.2. Dynamik des erosiven Prozesses	39
2.6.3. Klinisches Erscheinungsbild	40
2.6.4. Keilförmige Defekte	44
2.6.5. Prävalenz und Progression	44
2.6.6. Risikofaktoren	46
2.6.6.1. Extrinsische Risikofaktoren	46

Inhaltsverzeichnis

2.6.6.2. Intrinsische Risikofaktoren	50
3. Problemstellung	54
4. Material und Methodik	56
4.1. Testkörper	56
4.1.1. Vorbehandlung der Testkörper	58
4.2. Salzhydratschmelze	59
4.3. Durchführung der Versuche	61
4.3.1. NaF-Lösung	61
4.3.2. REM-Lösung	61
4.4. Testgetränke und pH-Werte	62
4.4.1. Getränke	62
4.4.2. pH-Werte der Getränke	63
4.5. Versuchsaufbau	64
4.6. Messmethoden und Bestimmung der Mineralbilanz	66
4.6.1. Biometrie	66
4.6.2. Allgemeine Beschreibung der Grafiken	69
5. Ergebnisse	72
5.1. Auswertung der Grafiken	74
6. Diskussion	95
7. Zusammenfassung	102
8. Literaturverzeichnis	108

Abb.	Abbildung
bzw.	beziehungsweise
Ca	Calcium
ca.	zirka
d	Tag
d. h.	das heißt
et al.	et altera („und andere“)
evtl.	eventuell
FAP	Fluorapatit
Gew.%	Gewichtsprozent
Gl.	Glandula
HA	Hydroxylapatit
KHN	Knoop-hardness numbers
MWG	Massenwirkungsgesetz
NaF	Natriumfluorid
o. ä.	oder ähnliche
pH-Wert	negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionen-Aktivität
ppm	Parts per million; Konzentrationsangabe: ein Teil eines Stoffes auf eine Million Teile im Gesamten
PRP	Prolin-reiche Proteine
REM	Remineralisationslösung
SHS	Salzhydratschmelze
Std	Stunden
Tab.	Tabelle
u. a.	und andere
z. B.	zum Beispiel

1. Einleitung

Dentale Erosionen werden durch den häufigen und regelmäßigen Kontakt der Zahnhartsubstanzen mit exogenen oder endogenen Säuren verursacht, ohne dass daran säurebildende Mikroorganismen beteiligt sind. Sie manifestieren sich initial zunächst im Schmelz. Bei einem progredienten Verlauf dieser Erkrankung kann es zu größeren Zahnhartsubstanzdefekten mit Exposition im Dentin kommen. Diese fortgeschrittenen Erosionen sind in der Regel mit schmerzhafter Hypersensibilität sowie ästhetischen und funktionellen Einbußen vergesellschaftet und induzieren in diesen Fällen eine therapeutische Intervention¹⁰³.

Als häufigste Ursache für erosive Läsionen gilt der Verzehr saurer Nahrungsmittel und Getränke, die meistens in Form von Fruchtsäften, Erfrischungsgetränken, Limonaden und Energy-Drinks konsumiert werden. Zur Geschmacksverstärkung werden vielen Soft-Getränken säurehaltige Zusätze wie Zitronensäure, Phosphorsäure, Kohlensäure u. a. beigefügt, so dass der pH-Wert dieser Getränke in der Regel zwischen 2,44 (Coca-Cola) bis 3,67 (Ogangensaft) und 3,35 für Redbull liegt.

Die Erosivität eines Getränks oder Nahrungsmittels wird aber nicht nur von dem pH-Wert, sondern auch von dem Gehalt an titrierbarer Säure, der Pufferkapazität und der Mineralkonzentration sowie von der Konsumhäufigkeit und -art beeinflusst^{15, 51, 91}. Dabei ist das Erosionsrisiko mit steigender Häufigkeit und Dauer des Säurekonsums deutlich erhöht. Johansson et al.⁵² konnten zeigen, dass eine längere Verweildauer saurer Getränke im Mund in Zusammenhang mit bestimmten Trinkgewohnheiten (schluckweises Trinken, Saugen mit dem Strohhalm, intraorales Spülen mit dem Getränk) zu einem deutlich länger niedrig erhaltenen intraoralen pH-Wert führt als das schnelle Trinken, wodurch das Risiko für dentale Erosionen entscheidend gefördert wird. Das Ausmaß des erosiven Zahnhartsubstanzverlustes wird dabei von unterschiedlichen Wirtsfaktoren bestimmt.

Eine besondere Rolle kommt dabei der Pellikel und dem Speichel zu, der wegen seiner Puffersysteme protektiv auf die Entwicklung von Erosionen wirkt und aufgrund seiner Mineralkonzentration ein remineralisierendes Potential aufweist³⁴.

Im Laufe seiner Gebrauchsperiode verliert der Zahn in einem sauren Umgebungsmilieu nicht nur Mineral auf seiner Oberfläche, sondern auch im Gesamtvolumen des Schmelzes. Dieser Vorgang des Mineralverlustes wird als Demineralisation bezeichnet.

Der umgekehrte Vorgang, die Einlagerung von Mineral in ein Zahnareal, aus dem es zuvor herausgelöst worden ist, wird als Remineralisation bezeichnet. Das geschieht in der Zeit zwischen zwei Säureangriffen, in der Mineral aus dem Speichel, der an Calcium und Phosphat übersättigt ist, in den Zahn diffundiert und sich dort wieder einlagert. De- und Remineralisation bilden ein dynamisches Gleichgewicht, wobei die Richtung der Reaktion durch die Raten der Stoffumsetzung und der Diffusion der Reaktionsprodukte bestimmt wird³¹.

Demineralisierte Zahnhartsubstanzen können durch ein geeignetes Speichelangebot sowie durch die Bereitstellung von Fluorid, Calcium und Phosphat, z. B. in Form von Zahnpasten oder fluoridierten Gels, wieder remineralisiert werden¹⁰³. Die Fluoridierung gilt auch heute noch als die wichtigste Prophylaxemaßnahme, da andere Möglichkeiten wie Mundhygiene oder Ernährungslenkung sehr oft wegen der Nachlässigkeit der Menschen scheitern. Dennoch sind Fluoride nur bedingt für die Gesunderhaltung der Zähne brauchbar. In Perioden der Säureexposition, in denen der Zahnschmelz entkalkt wird, bilden sich an seiner Oberfläche kleine Poren, durch welche die Kalksalze aus der Tiefe des Schmelzes in den Speichel herauswandern. In der Zwischenzeit werden diese Poren durch die im Speichel im Überfluss vorhandenen Mineralsalze sehr schnell verschlossen. Tiefer gelegene Schmelzschichten bleiben dabei mineralarm^{92, 102}.

An diesem Punkt setzt die forcierte dynamische Remineralisation ein. Durch Absenken des pH-Wertes im Außenmedium des Zahnes kann die Konzentration an Mineral (Ca^{2+} -Ionen) um ein Vielfaches erhöht werden, ohne dass dessen Sättigungsgrenze überschritten wird. Ein solches Remineralisationsmedium kann

porösen, entkalkten Zahnschmelz gleichsam wie einen Schwamm durchtränken und eine große Menge gelösten Minerals in alle Bereiche der Läsion transportieren¹⁰².

Das Ziel der vorliegenden in-vitro-Studie ist es, die remineralisierende Auswirkung einer calciumreichen Salzhydratschmelze auf das erosive Potential säurehaltiger Getränke zu untersuchen. Die Experimente sollten wegen der wünschenswerten Reproduzierbarkeit an künstlich hergestelltem, porösen Hydroxylapatit, dem Hauptbestandteil der Zahnhartschmelzen, durchgeführt werden.

Die Untersuchungen wurden an handelsüblichen, käuflichen Getränken durchgeführt. Zunächst wurde deren erosives Potential am reinen Getränk und anschließend beim gleichen Getränk nach Zugabe unterschiedlicher Konzentrationen einer calciumreichen Salzhydratschmelze ermittelt. Die Messung des Mineralgehaltes der Probenkörper aus genormten Hydroxylapatit erfolgte mit Hilfe einer hochauflösenden online-Mikroradiografie, die reproduzierbar die Dichte von 20 nm Hydroxylapatit diskriminieren konnte.

2. Grundlagen und Literaturübersicht

2.1. Zahnschmelz

2.1.1. Chemische Struktur

Der Zahnschmelz (Enamelum, Substantia adamantina) bedeckt die Zahnkrone^{63 86}. Er wird von spezialisierten Zellen, den sog. Ameloblasten gebildet. Diese produzieren zunächst eine Schmelzmatrix aus Polysaccharidproteiden, die in rhythmischen Schüben durch Einlagerung von Mineralstoffen verkalkt³¹. Die während der Mineralisation stattfindende Kristallisation von Calcium-Phosphat-Verbindungen und das anschließende Wachstum der Kristalle werden als präeruptive Schmelzreifung bezeichnet. Dabei verbleiben Mikroporositäten zwischen den Kristallen und Ionendefekte in ihren Gitterstrukturen³⁶.

Nach dem Zahndurchbruch werden diese Porositäten und Fehlbildungen durch die posteruptive Schmelzreifung weitestgehend ausgeglichen. Dabei kommt es bei gleichzeitigem Wasserverlust zu einer Aufnahme von Mineralien (insbesondere von Calcium und Phosphat) aus dem umgebenden Milieu (Speichel, Nahrungsmittel). Der Zahnschmelz unterliegt nach seiner Bildung keinem zellulären Reparaturmechanismus mehr³⁶. Da er weder Zellen noch Zellfortsätze enthält, wird er als kristallines Gefüge angesehen (Schroeder, 1983)⁸⁶, das somit auch nicht aktiv am Stoffwechsel des Körpers beteiligt ist³¹.

Der ausgereifte Zahnschmelz ist die härteste, abrasionsfesteste, aber auch sprödeste^{63 86} Substanz des menschlichen Körpers (s. Tabelle 1). Seine mittlere Dichte schwankt je nach „Reifezustand“, chemischer Zusammensetzung und Stelle der Analysenentnahme. Seine Härte liegt im Durchschnitt zwischen 250 KHN (Knoop-hardness numbers) an der Schmelz-Dentin-Grenze und 390 KHN an der Schmelzoberfläche³⁶. Die Schmelzkappe ist am Zahnhals am dünnsten und hat die größte Dicke an den Schneidekanten, Höckerspitzen und den Randleisten (ca. 2 mm)⁶³.

Hartsubstanz	Mineral	Organische Matrix	Wasser
	Gew. % / Vol. %	Gew. % / Vol. %	Gew. % / Vol. %
Schmelz	95 / 86	1 / 2	4 / 12
Dentin	70 / 45	20 / 30	10 / 25
Zement	61 / 33	27 / 31	12 / 36
Knochen	45 / 23	30 / 37	25 / 40

Tab. 1: Zusammensetzung von Hartsubstanzen nach Gewichts- und Volumenprozent (nach H.E. SCHROEDER)⁶³.

Der Hauptbestandteil des Zahnschmelzes ist anorganischer Natur. Es handelt sich dabei um die Calciumphosphatverbindung Hydroxylapatit. Die Angaben über den Anteil der anorganischen Verbindungen schwanken je nach Analysemethode und analysierter Probe zwischen 93 und 98 Gew.%. Die zweitgrößte Fraktion bildet Wasser. Hier schwanken die Mengenangaben zwischen 1,5 und 4 Gew.%. Die restliche Substanz setzt sich aus organischen Verbindungen wie Proteinen und Lipiden zusammen³⁶.

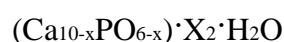
Die Zusammensetzung des Schmelzes wird durch Ernährung, Alter und zahlreiche andere Faktoren beeinflusst. Die Hauptbestandteile sind Calcium, Phosphat, Karbonat, Magnesium und Natrium (s. Tabelle 2). Insgesamt wurden bisher über 40 Spurenelemente im Zahnschmelz nachgewiesen.

Anorganische Bestandteile des Schmelzes	Trockengewicht in %
Ca ²⁺	36,1
PO ₄ ³⁻	17,6
CO ₃ ²⁻	4,0
Na ⁺	0,6
Mg ²⁺	0,2
Sonstige	v.a. Schwermetalle

Tab. 2: Die anorganischen Bestandteile des Schmelzes (% Trockengewicht)³¹.

Es gibt Unterschiede in der Schmelzzusammensetzung an verschiedenen Stellen eines einzelnen Zahnes. Diese lassen sich durch Konzentrationsschwankungen einzelner Elemente erklären. So nimmt die Konzentration von Fluorid, Eisen, Zinn, Chlor und Calcium von der Schmelzoberfläche zur Schmelz-Dentin-Grenze ab. Die Fluoridkonzentration steigt allerdings direkt an der Schmelz-Dentin-Grenze wieder an. Die Konzentration an Wasser, Karbonat, Magnesium und Natrium nimmt hingegen von der Schmelz-Dentin-Grenze zur Schmelzoberfläche hin ab. Es scheint eine Korrelation zwischen Magnesium- und Karbonatgehalt des Schmelzes und erniedrigten Werten für die Schmelzdichte zu geben. An Stellen mit erhöhter Magnesiumkonzentration in der Nähe der Dentinhörner und direkt unter den zentralen Fissuren der Zähne ist eine geringere Dichte festzustellen als z. B. an den stark mineralisierten Zonen der bukkalen und lingualen Zahnflächen³⁶.

Calcium und Phosphat liegen in einem Verhältnis von 1:1,2 als Apatitverbindung



in Form kleiner Kristalle vor. Es handelt sich dabei nicht um stöchiometrische Verbindungen der Formel Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂. Durch ein Defizit von Calcium-, Phosphat- und Hydroxylionen sowie das Vorhandensein von Karbonat und Hydrogenphosphat ist Schmelz aus nichtstöchiometrischen Apatitkristallen aufgebaut. Durch interne Substitutionsreaktionen kann es zur Ausbildung von Fluorapatit oder fluoridiertem Hydroxylapatit kommen, das eine stabilere Kristallgit-

terstruktur als Hydroxylapatit aufweist. Es kann jedoch auch zum Einbau von Karbonat in das Schmelzmineral kommen. Karbonierter Apatit ist gegenüber einem kariösen Angriff weniger resistent als Hydroxylapatit. Neben den genannten Verbindungen lassen sich in geringem Maß eine Reihe nicht apatitisch gebundener Calcium-Phosphat-Verbindungen, wie z. B. Oktacalciumphosphat, finden³⁶.

Wasser kommt im Zahnschmelz in zwei verschiedenen Formen vor. Ein Teil ist kristallin als Hydratationsschale, der andere lose, hauptsächlich an organische Materie gebunden. Das lose gebundene Wasser kann bei Erwärmung verdampfen. Schmelz kann jedoch auch bei Feuchtigkeitzufuhr Wasser aufnehmen. Diese Eigenschaft macht man sich bei der Erklärung bestimmter physikalischer Phänomene bei der Kariesentstehung bzw. -prävention zunutze. Zahnschmelz funktioniert wie ein Molekularsieb bzw. Ionenaustauscher, da mit dem Flüssigkeitsstrom Ionen in den Zahnschmelz hinein und auch von dort heraus gelangen³⁶.

Die organische Matrix macht nur ca. 1 Gew.% des Schmelzes aus, aber zusammen mit dem frei verfügbaren Wasseranteil ca. 14% des Schmelzvolumens (SCHROEDER, 1992)³¹. Diese kleine Menge organischen Materials besteht im ausgereiften Schmelz aus Proteinen (ca. 58%), Lipiden (ca. 40%) und Spuren von Kohlenhydraten, Zitrat und Laktat. Der größte Teil des organischen Materials liegt im inneren Drittel des Schmelzmantels in Form von Schmelzbüscheln³⁶.

2.1.2. Histologische Struktur

Der Schmelz besteht aus Schmelzkristalliten, die in strukturellen Einheiten (sog. Schmelzprismen oder Prismenstäbchen) zusammengefasst werden³¹. Diese Apatitkristalle sind im Querschnitt annähernd hexagonal und stellen sich in der Seitenansicht als kleine Stäbchen dar (Abb. 1)³⁶. Sie verlaufen ohne Unterbrechung von der Schmelz-Dentin-Grenze bis zur Schmelzoberfläche⁶³.

Die Schmelzkristalle sind durch ihre erhebliche Größe charakterisiert. Sie sind durchschnittlich 160 nm lang, 40-70 nm breit und 26 nm dick. Ihre Gestalt und Größe

kann allerdings je nach Reifegrad des Schmelzes oder Lokalisation im Schmelzmantel von dieser einheitlichen Größe abweichen³⁶.

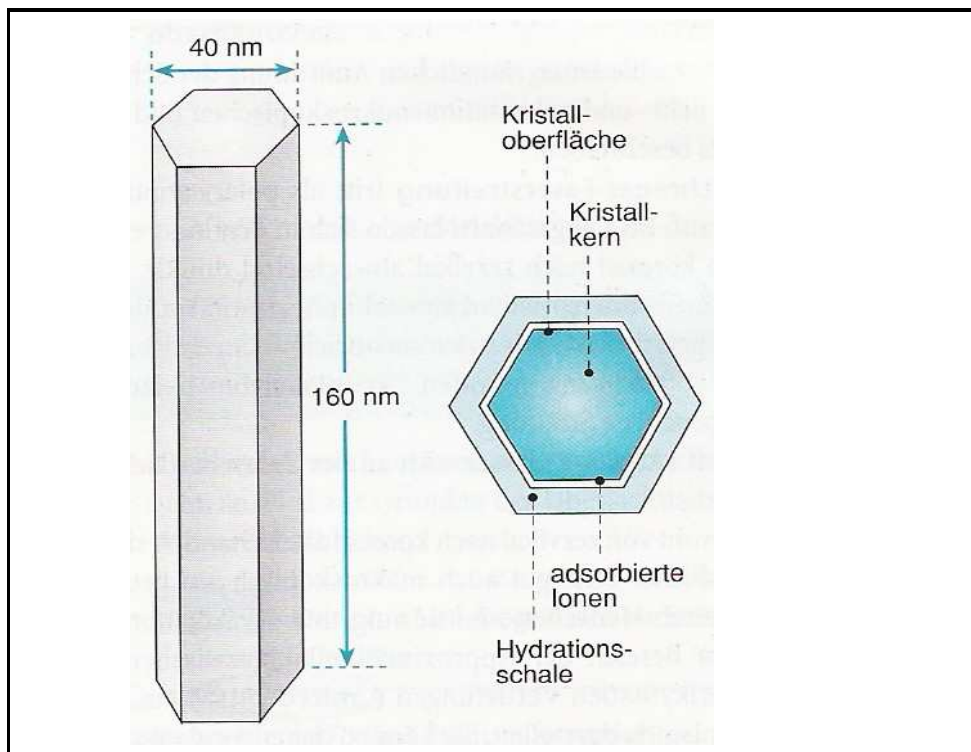


Abb. 1: Schematische Darstellung eines Hydroxylapatitkristalls (Hydrationssschale)⁸¹.

Etwa 100 Schmelzkristalle liegen im Querschnitt zusammengefügt und bilden die sog. Schmelzprismen bzw. Schmelzstäbe, die sich von der Schmelz-Dentin-Grenze bis fast zur Schmelzoberfläche erstrecken. Der Verlauf der Prismen ist sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung wellenförmig (s. Abb. 2a). Die Kristalle im Kern der Prismen sind dabei mit ihrer Längsachse parallel zur Längsachse des entsprechenden Prismas ausgerichtet. Je mehr sie zum Rand der Prismen gelegen sind, um so mehr fiedern sie aus und bilden einen mehr oder weniger großen Winkel zur Prismenlängsachse (Abb. 3)³⁶.

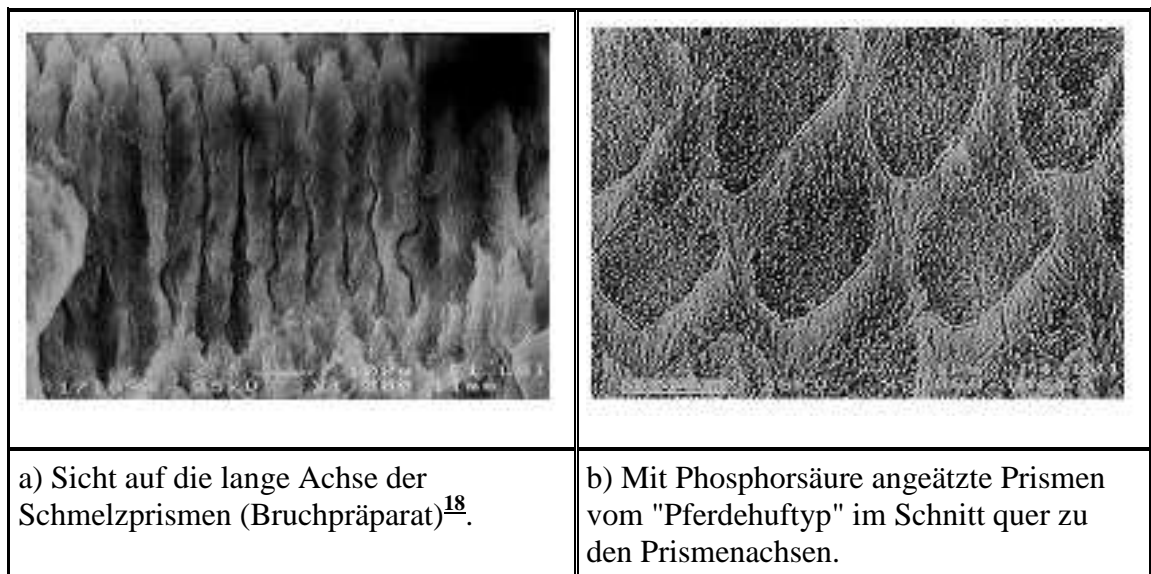
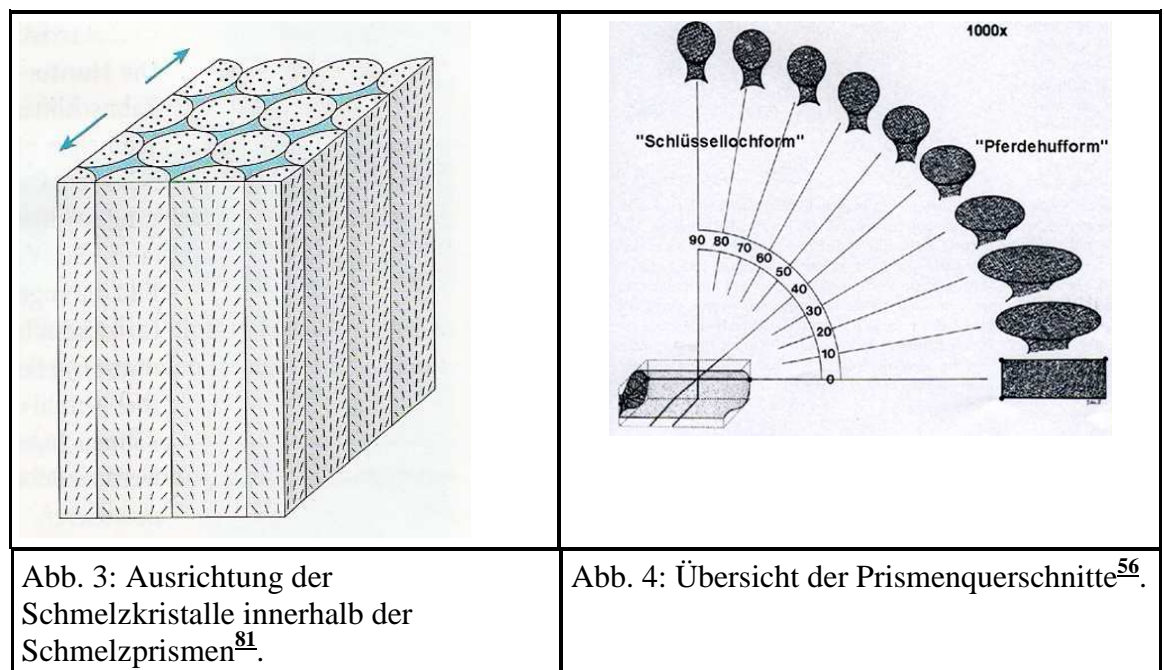


Abb. 2: REM-Aufnahmen typischer Strukturen im menschlichen Zahnschmelz. Die Kristallite sind weitgehend parallel orientiert und zu sogenannten "Schmelzprismen" zusammengefasst (hierarchische Gliederung der Struktur)¹⁸.



Alle Kristalle besitzen eine Hydrationschale (s. Abb. 1) und sind von einer Schicht aus Proteinen und Lipiden umgeben³⁶. Durch diese organischen Einlagerungen sind

Diffusion und Ionenaustausch durch den Schmelz hindurch gewährleistet³¹. Die Prismen als Organisationsstruktur der Kristalle liegen wiederum eingebettet in einer zwischenprismatischen Substanz, die aber auch aus Schmelzkristallen gebildet wird. Die Kristalle der interprismatischen Substanz liegen allerdings ungeordneter und bilden mit der Längsachse der Prismen einen Winkel von annähernd 90°.

Man unterscheidet Prismenverbände, die in einer Art Schlüssellochstruktur geordnet sind, von solchen, die als Pferdhuftyp oder zylindrischer Typ beschrieben werden³⁶ (Abb. 4, Abb. 5).

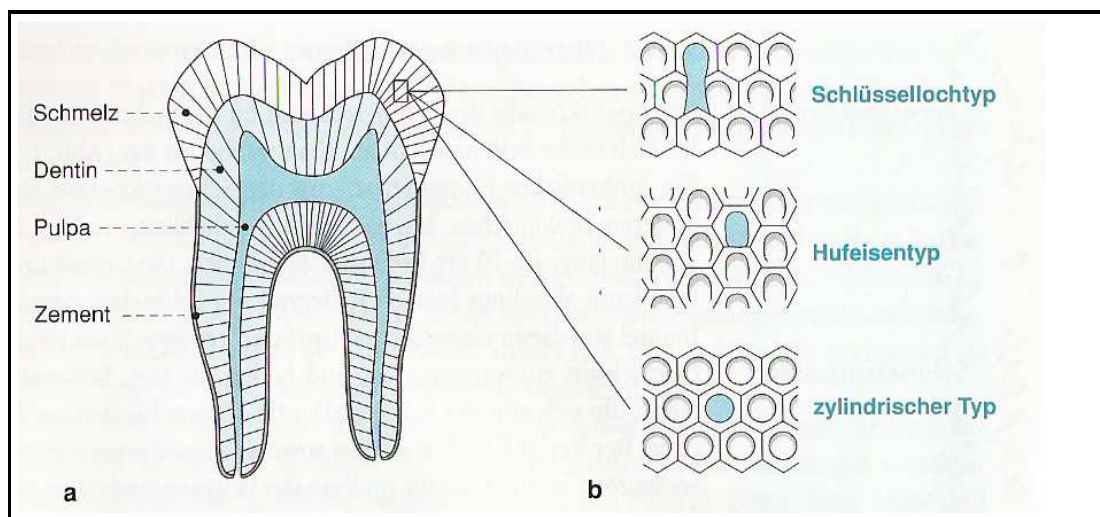


Abb. 5:

a) Schematische Darstellung des histologischen Aufbaus menschlichen Zahnschmelzes. Die Schmelzhaube des Zahnes besteht aus Prismen, die in gewundener Form von der Schmelz-Dentin-Grenze bis zur Schmelzoberfläche verlaufen.

b) Die Prismen erscheinen im Querschnitt in verschiedenen Formen. Die drei häufigsten Konfigurationen sind (von oben nach unten): Schlüssellochtyp, Hufeisentyp, zylindrischer Typ (nach HÖHLING 1966)⁴².

Diese Schmelzprismen typen sind idealisierte Modelle und werden in der inneren Hälfte des Schmelzmantels abwechselnd angetroffen, da die Prismenstäbe in ihrem Verlauf gegen die Zahnoberfläche horizontal schwingen. Der in einem tangential zur Schmelzoberfläche gelegten Schliff besonders häufig angetroffene Typ hängt daher von der Schliffebene ab³¹.

Unabhängig von dieser Stäbchenstruktur hat sich gezeigt, dass es sich häufig an der Oberfläche menschlicher Zahnkronen eine ca. 20-30 µm dicke Schicht prismenfreien Schmelz befindet. Sie ist deutlich härter, dichter mineralisiert und säureresistenter als tiefer gelegene Schmelzschichten³¹. Die Kristallite liegen hier dicht gepackt parallel zur Oberfläche³⁶.

Prismenfreier Schmelz wird bei allen Milchzähnen und in den Fissuren bzw. im Zervikalbereich der Zähne Erwachsener gefunden³⁶.

Aufgrund der verschiedenen räumlichen Anordnung der Schmelzprismen zueinander lassen sich im licht- und polarisationsmikroskopischen Bild eine Reihe histologischer Charakteristika beschreiben³⁶.

Die Hunter-Schreger-Faserstreifung tritt als polarisationsoptisches Phänomen in Zahnschliffen auf. Sie entsteht dadurch, dass die Schmelzprismen nicht parallel und geradlinig, sondern als Büschel ineinander verflochten verlaufen. Im Längsschnitt lassen sich in den inneren zwei Dritteln des Zahnschmelzes von koronal nach zervikal abwechselnd dunkle und helle Streifen unterscheiden, die als Parazonien und Diazonien bezeichnet werden⁶³. Da die Schmelzprismen sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung geschwungen verlaufen, werden sie im Schnitt an einigen Stellen quer, an anderen längs zur Verlaufsrichtung getroffen⁷. Ihr Verlauf entspricht dem der Schmelzprismen und ist senkrecht zur Schmelz-Dentin-Grenze⁶³.

Im Längsschnitt lassen sich an der Zahnoberfläche feinste, parallel zur Schneidekante verlaufende Vertiefungen, die sog. Perikymatien erkennen. Ihre Anzahl nimmt

von zervikal nach koronal ab. Es handelt sich hier um Linien, die bei Zähnen Jugendlicher sehr gut auch makroskopisch am getrockneten Zahn sichtbar werden. Bei älteren Menschen sind sie aufgrund der Attrition nur noch selten zu diagnostizieren. Im Bereich der Approximalkontakte zwischen den Zähnen treten im Bereich der Perikymatien Vertiefungen („micro pits“) auf, die einen Schlupfwinkel für Mikroorganismen darstellen. Sie könne daher Ausgangspunkt für die Entstehung von Karies sein³⁶.

Die Retzius-Streifen sind eine etwa parallel zur Zahnoberfläche ziehende Streifung des Schmelzes, die sich im Durchlichtmikroskop erkennen lassen. Es handelt sich um die Auswirkungen der periodisch ablaufenden Verkalkung des Schmelzes (Wachstumslinien)⁶³. Sie sind der Ausdruck periodischer Ruhephasen der Ameloblasten während der Schmelzbildung und stellen meistens hypomineralisierte Bereiche vor³⁶.

Die Schmelzoberfläche frisch durchgebrochener Zähne ist von einer ca. 0,1-5 µm dicken Membran bedeckt, die gegen äußere Einflüsse, wie z.B. Säureeinwirkung sehr widerstandsfähig ist. Sie ist primär die Restsubstanz des schmelzbildenden Epithels (Cuticula dentis, primäres Schmelzoberhäutchen). Diese Membran wird in der Mundhöhle beim Kauen schnell abradiert. Sie wird jedoch durch ein erworbenes Schmelzoberhäutchen (acquired pellicle) ergänzt oder ersetzt³⁶.

2.2. Dentin

2.2.1. Chemische Struktur

Die Hauptmasse der Zähne bildet das Zahnbein (Dentin, Substantia eburnea) aus. Das Dentin wird im Bereich der Zahnkrone von dem massiven Zahnschmelz bedeckt. Im Bereich der Wurzel ist der Zahn mit Wurzelzement überzogen⁶³.

Im Gegensatz zu Schmelz gilt das Dentin als lebendes, weniger stark mineralisiertes Gewebe. Es besteht zu 70 Gew. % aus anorganischem und zu 20 Gew. % aus organischem Material. Der Rest besteht aus Wasser. Der größte Teil des organischen

Anteils sind Kollagen und kollagenartige Verbindungen (91-92 %). Der anorganische Anteil besteht ebenso wie der des Zahnschmelzes aus feinen Apatitkristallen und zwar hauptsächlich aus Phosphat und Calcium. Es lassen sich aber auch verschiedene Spurenelemente finden³⁶.

Das anorganische Material liegt ebenso wie im Zahnschmelz, Zahnzement und im Knochen in kristalliner Form als Apatit bzw. amorphes Calciumphosphat vor. Die Kristalle des Dentins sind erheblich kleiner und dünner als im Zahnschmelz. Ihre Länge beträgt 20 nm und sie sind 18-20 nm breit und 3,5 nm dick. Sie liegen nicht in Prismenform geordnet, sondern sind je nach Art des Dentins mehr oder weniger dicht verpackt³⁶.

Das Dentin ist weniger hart als Schmelz und besitzt eine gelbliche Farbe. Es ist hochelastisch, verformbar und sehr „porös“. Dadurch weist es auch eine wesentlich höhere Permeabilität als Schmelz auf³⁶.

2.2.2. Histologische Struktur

Das Dentin wird von Odontoblasten gebildet. Die Odontoblastenkörper befinden sich in der Zahnpulpa. Ihre Zellfortsätze durchziehen das gesamte Dentin bis zur Schmelz-Dentin-Grenze. Die Odontoblastenfortsätze werden von 5-8 nm großen Filamenten durchzogen. Sie liegen in den Dentinkanälchen und unterhalten das Dentin auch nach Abschluss der Zahnbildung physiologisch. Die Odontoblastenfortsätze weisen 0,35-0,6 µm dicke Seitenäste (Mikrovilli) auf, die tief in das intertubuläre Dentin hineinziehen und mit benachbarten Mikrovilli in Verbindung stehen. Die Dentinkanälchen sind im koronalen Bereich eines Zahnes s-förmig gekrümmt. Im Wurzelbereich verlaufen sie geradlinig nach außen. (Abb. 5)³⁶.

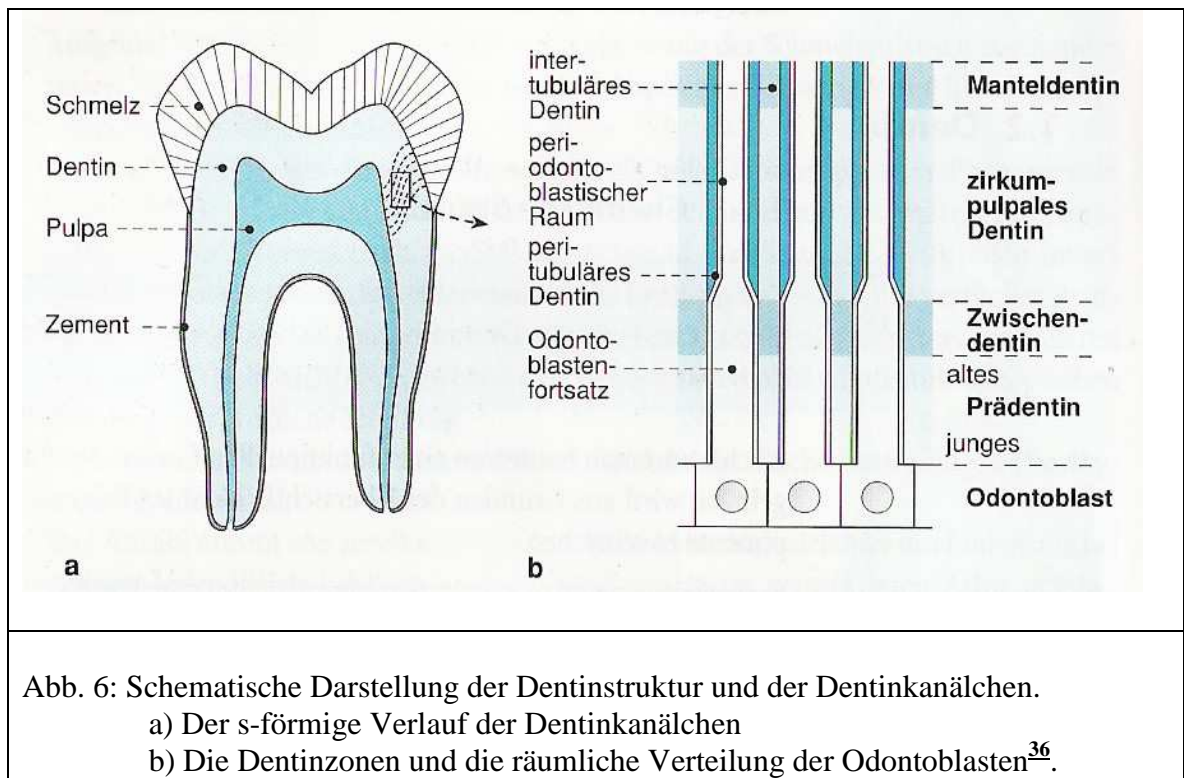


Abb. 6: Schematische Darstellung der Dentinstruktur und der Dentinkanälchen.

a) Der s-förmige Verlauf der Dentinkanälchen

b) Die Dentinzonen und die räumliche Verteilung der Odontoblasten³⁶.

Die Odontoblasten liegen an der Pulpa-Dentin-Grenze. Es folgt nach peripherer das nicht mineralisierte Prädentin, das Zwischendentin mit der Mineralisationsfront, das zirkumpulpaale Dentin und anschließend bis zur Schmelz-Dentin-Grenze das Manteldentin, das viele Verzweigungen der Dentinkanälchen enthält.

Die Dentinkanälchen enthalten den Odontoblastenfortsatz und den periodontoblastischen Raum, der mit Flüssigkeit gefüllt ist. Im zirkumpulpaalen Dentin und Manteldentin sind die Kanalwände von dicht mineralisiertem, peritubulärem Dentin ausgekleidet. Zwischen den Dentinkanälchen liegt das intertubuläre Dentin.

Die Dichte und die Anzahl der Dentinkanälchen unterscheiden sich je nach ihre Verteilung in Bezug auf der Pulpa³⁶. Pulpanah ist die Zahl der Dentinkanälchen pro Flächeneinheiten größer (ca. 45 000/mm²) als pulpafern (ca. 15 000/mm²)⁶³. Der Durchmesser und das Volumen der Dentinkanälchen hängen natürlich auch vom Alter des untersuchten Zahnes ab³⁶.

In den Kanälchen sind die Odontoblastenfortsätze häufig von Flüssigkeit und organischen Strukturelementen umgeben (periodontoblastischer Raum, s. Abb. 6, Abb. 7). Nervenfasern lassen sich nur in einzelnen Tubuli des Prädentins nachweisen. Im peripheren Dentin befinden sich keine Nervenendigungen. An der Grenze zur Pulpa liegt das nicht vollständig ausgereifte, hypomineralisierte Prädentin. Es folgt nach außen eine Zone der Mineralisation (Zwischendentin), das zirkumpulpale Dentin und das weniger stark mineralisierte Manteldentin. Dieses bildet mit dem Zahnschmelz eine arkadenförmige Grenzlinie und ist stark von Seitenästen der Dentinkanälchen durchzogen³⁶.

Die Dentinkanälchen sind von peritubulärem Dentin umgeben. Dieses kleidet die Kanalwände aus. Es ist homogen, dicht und am stärksten von allen Dentinstrukturen mineralisiert. Es kann im Alter durch Apposition zunehmen (sklerosiertes Dentin). Durch Einengung der Dentinkanälchen ist jedoch auch die Möglichkeit für die Pulpa gegeben, sich vor äußeren Reizen zu schützen. Intertubuläres Dentin trennt die Dentinkanälchen voneinander. Es ist weniger dicht mineralisiert und besteht zu über 50 % aus kollagenem Flechtwerk³⁶.

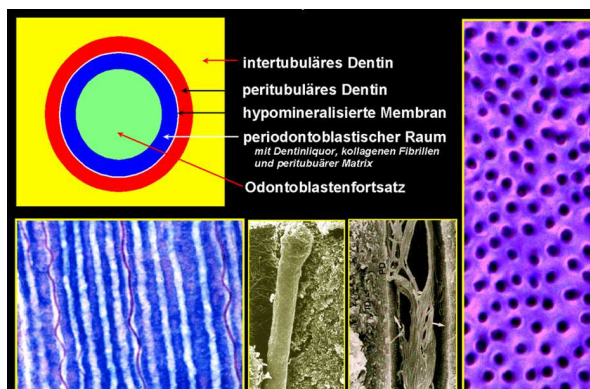


Abb. 7: Dentinkanälchen⁵⁶.

Bis zum Abschluss des Wurzelwachstums entstandenes Dentin wird Primärdentin genannt. Das Dentin, das anschließend regulär während der gesamten Lebensdauer eines Zahnes gebildet wird, heißt Sekundärdentin. Tertiärdentin (Reizdentin, irreguläres Sekundärdentin, Reparationsdentin) wird aufgrund eines Reizes (z. B. Attrition, Erosion, Karies, iatrogene Schäden) lokal als Abwehrbarriere gebildet³⁶.

Weitere wichtige histologische Strukturmerkmale des Dentins sind:

- **Ebner-Linien** (Wachstumslinien, Konturlinien). Es handelt sich um hypomineralisierte Bereiche, welche die Ruhephase der Odontoblasten während der Dentinentwicklung widerspiegeln. Sie verlaufen im zirkumpulpalen Dentin parallel zur Schmelz-Dentin-Grenze bzw. Dentin-Pulpa-Grenze.
- **Owen-Linien** sind verbreiterte, stärker hypomineralisierte Wachstumslinien. Sie spiegeln Allgemeinerkrankungen im Kindesalter wider, die mit verminderter Mineralisationsleistung der Odontoblasten korreliert sind.
- Bei Milchzähnen und im koronalen Bereich der ersten Molaren tritt als spezielle Form der durch Hypomineralisation entstandenen Wachstumslinien die **Neonatalinie** auf. Sie entspricht einer längeren Ruhepause der Odontoblasten (ca. 15 Tage). Die peripher liegenden Konturlinien, meist im koronalen zirkumpulpalen Dentin, weisen oft kugelförmige, stark hypomineralisierte Bereiche auf (Interglobulardentin). Die Dentinkanälchen besitzen in diesen Bereichen kein peritubuläres Dentin. Es handelt sich wahrscheinlich um nicht regulär mineralisierte Dentinbereiche.
- Im Manteldentin der Zahnwurzel befinden sich kleine Strukturen, die sog. **Tomes-Körnerschicht**, die der Zahnoberfläche folgen und nicht an den Wachstumslinien orientiert sind. Sie sind auch hypomineralisiert und ähneln dem Interglobulardentin³⁶.

2.3. Der Speichel

Das wichtigste natürliche körpereigene Schutzsystem, das für die Gesunderhaltung der Mundhöhle und besonders der Zahnhartsubstanz der Zähne und letztendlich des ganzen Körpers unentbehrlich ist, ist der Speichel⁶¹. Er enthält nicht nur alle Mineralbestandteile in gelöster Form, die zur ständigen Regeneration der Zähne notwendig sind, sondern auch beschichtende, schützende und Säure puffernde Bestandteile.

Der Speichel kleidet die Mundhöhle mit einem dünnen Film aus. Er gilt auch als der bedeutendste biologische Faktor in Hinsicht auf die Beeinflussung der Erosionsentstehung. Jede Beeinträchtigung des Speichelflusses kann bei häufiger Säurezufuhr zur erosiven Zerstörung der Zähne führen⁵⁷.

Der Speichelfluss unterliegt im Tagesablauf einem zirkadianen Rhythmus. Er wird durch emotionale, psychische und Umweltfaktoren beeinflusst. Durch Kautätigkeit und Reizung der Geschmacksrezeptoren oder Sinnesnerven wird der Speichelfluss angeregt. Zu einer Verminderung des Speichels (Oligosalie, Xerostomie) kann es durch Einnahme zahlreicher Medikamenten (z. B. Psychopharmaka, Appetitzügler, blutdrucksenkende Mittel, Antihistaminika, Diuretika, Zytostatika), durch systemische Erkrankungen (z.B. Sjögren-Syndrom, Diabetes mellitus, neurologische Erkrankungen, Speicheldrüsenerkrankungen), durch Bestrahlungstherapie bei Tumoren im Kopf-Hals-Bereich, psychogene Störungen und vermindertes Kauvermögen kommen³⁶. Diese Speichelflussverminderung führt oft zu Problemen mit dem Essen, Schlucken und Sprechen und beeinträchtigt dadurch die Lebensqualität⁵⁷.

Die Mundflüssigkeit ist ein Sekretgemisch, welches hauptsächlich von den drei paarigen Mundspeicheldrüsen Gl. parotis, submandibularis und sublingualis sowie einer Vielzahl kleiner gemischter Drüsen des Mundbodens, des Gaumens, der Wangen und der Lippen produziert wird³¹. Die großen Ohrspeicheldrüsen (Glandulae parotidae) sezernieren ein rein seröses und damit ein dünnflüssiges und proteinreiches Sekret, während die Unterkieferspeicheldrüsen (Glandulae submandibulares, seromukös) und die Unterzungspeicheldrüsen (Glandulae sublinguales, mukoserös) gemischte Drüsen sind. Sie produzieren sowohl seröses als auch muköses Sekret (SCHIEBLER, 1987)³¹. Die Speicheldrüsen sezernieren täglich gemeinsam ca. 0,7 l (0,5 l – 1,0 l) Speichel³⁶. Die Hauptmenge wird von den Glandulae submandibulares (70 %) und den Glandulae parotidae (25 %) produziert. Die Glandulae sublinguales und die übrigen kleinen Speicheldrüsen produzieren zusammen lediglich 5 % der Speichelmenge⁴³.

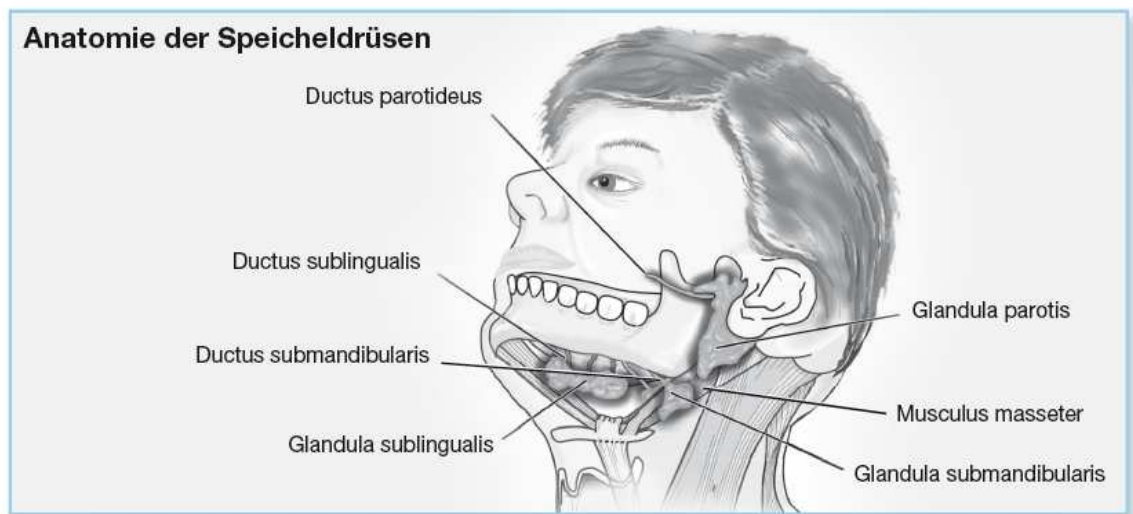


Abb. 8: Schematische Darstellung der großen Speicheldrüsen und der dazugehörigen Ausführungsgänge⁵⁷.

2.3.1. Speichelfließrate

Die zahlreichen Einflüsse auf die Speichelsekretion reichen von Art und Dauer der Stimulation über Medikamente und Stress bis zu Veränderungen im Zuge des normalen Tag-Nacht-Rhythmus (DAWES 1984)⁶¹. Man unterscheidet hauptsächlich zwischen unstimuliertem, dem sog. Ruhespeichel, und stimuliertem Speichel.

Unter unstimuliertem Speichel versteht man die Gesamtmenge des von den drei großen Speicheldrüsen gemeinsam mit den kleinen Speicheldrüsen sezernierten Speichels ohne äußere Stimulation. Das reine Drüsensekret mischt sich in der Mundhöhle mit Sulkusflüssigkeit, abgeschilferten Epithelzellen, Speiseresten, Blutbestandteilen, Bakterien und Viren. Zur Abgrenzung zum reinen Drüsensekret wird dieser Gesamtspeichel auch als „Mundflüssigkeit“ bezeichnet⁵⁷.

Der unstimulierte Speichel unterliegt im Tagesablauf dem in Abb. 9 dargestellten zirkadianen Rhythmus. Der Speichelfluss hat seinen Höhepunkt am Nachmittag und kommt während der Nachtruhe nahezu völlig zum Erliegen⁵⁷.

Die normale Fließrate für den unstimulierten Ruhespeichel liegt bei ca. 0,3 ml/min bis 0,4 ml/min, oder ca. 20 ml/Std. Während der Nachtruhe (ca. 7 Stunden) werden insgesamt nur ca. 20 ml Speichel produziert. Bei einer Oberflächengröße der Mundhöhle von etwa 200 cm² und einem Volumen von ca. 0,7 ml Speichel im Mund hat der Speichelfilm eine Dicke von ca. 0,1 mm. Eine Fließrate des Ruhespeichels von weniger als 0,1 ml/min ist als verminderter Speichelfluss (Oligosialie) zu betrachten. Bei entsprechend kleinen Volumina pro Flächeneinheit und besonders bei stockendem Speichelfluss nachts kann die Kapazität auch der wirksamen Systeme in der Mundflüssigkeit nicht groß sein^{57 61}.

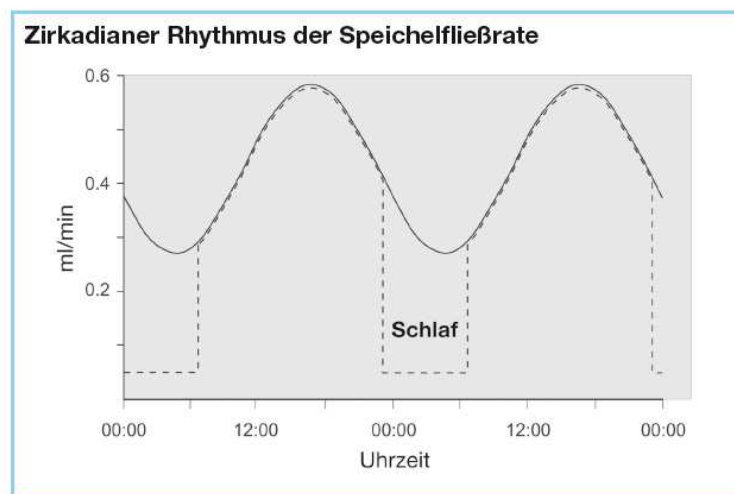


Abb. 9: Der zirkadiane Rhythmus der Fließrate des unstimulierten Gesamtspeichels²¹.

Nach Stimulation der Drüsen durch Geschmacks-, Geruchs- oder mechanische Reize wird der Speichelfluss erhöht. Man spricht von stimuliertem Speichel. Seltener ist eine Stimulation (Anregung) durch Medikamente wie dem Parasympathomimetikum Pilocarpin oder durch Aktivierung des Brechzentrums möglich⁵⁷.

Von den vier Geschmacksrichtungen süß, sauer, salzig und bitter wird der Speichelfluss am stärksten durch sauren Geschmack stimuliert. Die normale Fließrate für den stimulierten Speichel liegt zwischen 1 und 3 ml/min.

Das Maximum kann etwa 7 ml/min erreichen. Als Untergrenze werden 0,7 ml/min angesehen⁵⁷.

Wie beschrieben werden tagsüber ohne Stimulation durchschnittlich pro Stunde etwa 20 ml Speichel sezerniert. Das entspricht für ca. 15 Stunden etwa 300 ml Speichel. Während 2 Stunden Nahrungsaufnahme, d. h. starker Stimulation, werden 1 ml/min oder total 120 ml produziert. Das ergibt 420 ml, also knapp einen halben Liter pro Tag. Es gibt aber auch Angaben bei gesunden Menschen in 24 Stunden, die von 1000 ml bis 1500 ml sprechen, mit Hinweis darauf, dass die Speichelsekretion sehr individuell ist (RAUCH, 1959)³¹. Am besten spült und schützt der Speichel, wenn die Ruhesekretionsrate hoch ist und sich unmittelbar vor und nach dem Schlucken von Nahrung viel Speichel im Munde gesammelt hat (DAWES 1984)^{57 61}.

Die Sekretionsrate, der pH-Wert und die Pufferkapazität in Ruhe und nach Stimulation sind in der Tabelle 3 dargestellt³⁶.

	Ruhespeichel	Stimulierter Speichel
Sekretionsrate ml/min <ul style="list-style-type: none"> • Normal • sehr niedrig 	0,25 – 0,35 < 0,1	1,0 – 3,0 < 0,7
pH-Wert <ul style="list-style-type: none"> • normal • sehr niedrig 	6,5 – 6,9 < 6,3	7,0 – 7,5 < 6,8
Pufferkapazität <ul style="list-style-type: none"> • normaler End-pH • niedriger End-pH 	4,25 – 4,75 < 3,5	5,75 -6,5 < 4.0

Tab. 3: Sekretionsrate, pH-Wert und Pufferkapazität von Speichel verschiedener Personen im Alter zwischen 15 und 55 Jahren. Normale und sehr niedrige Werte⁸¹.

2.3.2. Zusammensetzung des Speichels

Die Zusammensetzung des Speichels wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst, insbesondere dadurch, aus welcher Speicheldrüse er stammt und ob es sich um unstimulierten oder stimulierten Speichel handelt⁵⁷.

Der Gesamtspeichel besteht zu 99,5 % aus Wasser und enthält ca. 5 g/l organische und anorganische Substanzen.

Die wichtigsten organischen Bestandteile des Speichels sind Enzyme, Proteine und Glycoproteine (Muzine) (s. Tab. 4). Die Enzyme leiten die Verdauung der Nahrung im Magen ein. Zu ihnen gehört die α -Amylase, die zu 80 % aus der Gl. parotis stammt und die im Speichel angereicherte Stärke aus der Nahrung zu Einfachzuckern spaltet, damit diese besser vom Körper aufgenommen werden können^{31 57}.

Organische Bestandteile	Menge (g/l)
Gesamtprotein (Proteine und Glykoproteine)	2,0 g/l
α -Amylase	0,4 g/l
Muzine	0,4 g/l
Lysozym	0,2 g/l
Prolin-reiche Proteine (PRP)	0,2 – 0,8 g/l
Harnstoff	3,0 – 5,0 mmol/l

Tab. 4: Die wichtigen organischen Bestandteile des Speichels.

Die Muzine sind Glykoproteine, die im Speichel in zwei Grundformen vorkommen: Muzine mit hohem (MUC5B) und Muzine mit niedrigem Molekulargewicht (MUC7). MUC5B gehört zu den Hauptbestandteilen der Beschichtung aller Schleimhäute. Diese Schleimschicht schützt das darunter liegende Epithel vor mechanischen Schäden und verhindert das Eindringen von Bakterien und Viren in die Haut⁵⁷.

Als wichtigste anorganische Bestandteile des Speichels gelten Natrium, Kalium, Calcium, Phosphat, Chlorid, Magnesium und Hydrogenkarbonat. Daneben sind auch geringe Mengen an Fluorid, Iodid, Bromid, Eisen, Zink und anderen Spurenelemente enthalten. Tabelle 5 vermittelt einen Überblick über die anorganische Zusammensetzung des Gesamtspeichels³¹.

Anorganische Bestandteile	Unstimulierter Speichel	Stimulierter Speichel
pH-Wert	6,7	5,6 – 7,6
Wasser	99,4 %	99,5 %
Feststoffe	0,60 %	0,50 %
	(mmol/l)	(mmol/l)
Natrium	2,0 -26,0	13,0 – 80,0
Kalium	13,0 – 40,0	13,0 – 38,0
Calcium	0,5 – 2,8	0,2 – 4,7
Chlorid	8,0 – 40,0	10,0 – 56,0
Bikarbonat	0,1 – 8,0	4,0 – 40,0
Phosphat	2,0 – 22,0	1,5 – 25,0
Thiocyanat	0,4 – 5,0	0,4 – 3,0
Fluorid	0,2 – 2,8	0,8 – 6,3

Tab. 5: Die wichtigsten anorganischen Bestandteile des unstimulierten und des stimulierten Speichels nach WHELTON (2004)⁵⁷.

2.3.3. Funktion und Puffersysteme des Speichels

2.3.3.1 Funktion

Der Speichel stellt ein überaus komplexes System dar. Die vielseitigen Funktionen der einzelnen Speichelbestandteile sind in Tabelle 6 übersichtlich zusammengefasst:

Funktion	Beteiligte Speichelkomponente
Spülfunktion	Gesamtflüssigkeit
Pufferung von Säuren	Bikarbonat, Phosphat, Proteine
(Re)-Mineralisation	Fluorid, Phosphat, Calcium, Statherin, PRPs
Beschichtung	Glykoproteine, Muzin
Antibakterielle Aktivität	Antikörper, Lysozym, Laktoferrin, Laktoperoxidase
Andauung der Nahrung	Amylase, Proteasen

Tab. 6: Funktion des Speichels und der Speichelkomponenten³⁶.

Der Speichel besitzt eine schmelzprotektive Wirkung, die im Wesentlichen auf zwei Faktoren zurückzuführen ist:

- die hohe Calcium-Phosphat-Sättigung
- die Pufferkapazität des Bikarbonates²².

Im Ruhespeichel beträgt die mittlere Calciumkonzentration 5,8 mg/100 ml (= 1,45 mmol/l) (Variationsbereich: 2,2 – 11,3 mg/ml) und die mittlere Phosphatkonzentration 16,8 mg/100 ml (= 5,4 mmol/l) (Variationsbereich: 6,1 – 7,0 mg/ml)². Dies entspricht einem molaren Calcium-Phosphatverhältnis von 1:3³¹.

BECKS und WAINWRIGHT stellten in ihren Untersuchungen schon 1937 fest, dass die Konzentration des Calciumphosphates im Speichel stark von der Speichelflussrate abhängt, insbesondere von der des Ruhespeichels³¹.

Des Weiteren besteht ein Zusammenhang zwischen den Calciumphosphaten und dem pH-Wert der umgebenden Lösung. Die Gleichgewichtslage zwischen den nachfolgend aufgeführten Calciumphosphat-Phasen als Bestandteile des Schmelzes und ihren einzelnen Komponenten in der Umgebungslösung wird durch das Massenwirkungsgesetz bestimmt³¹.

Die Apatitstruktur ist die energetisch günstigste und damit stabilste der kristallinen Phasen. Eine Erhöhung der H^+ -Ionen-Konzentration und damit ein pH-Wert-Abfall im Speichel führen zu verstärkter Protonisierung der Phosphationen. Da nur HPO_4^{2-} und PO_4^{3-} bei der Bildung stabiler Calciumphosphat-Komplexe wirksam sind, führt ein pH-Abfall zu einer Abnahme dieser Ionen, so dass feste Calciumphosphate gemäß des Massenwirkungsgesetzes solange in Lösung gehen, bis sich wieder ein Gleichgewicht eingestellt hat. Wie stabil eine kristalline Calciumphosphat-Phase ist, hängt also wesentlich von ihrer Umgebungslösung ab. Unter physiologischen Bedingungen, d. h. bei einem pH-Wert zwischen 6,77 und 7,45 liegen im Speichel soviel Calcium- und Phosphationen vor, dass eine Auflösung des Zahnschmelzes verhindert wird³¹.

Die Menge an gelöstem Calciumphosphat im Speichel wird durch weitere Faktoren beeinflusst:

1. Komplexbildner können Ca^{2+} -Ionen aus dem Gleichgewichtssystem ziehen
2. Puffersysteme im Speichel beeinflussen den pH-Wert und damit die Sättigungskonzentration
3. Reize, z. B. durch Zahnpasta, Mundwasser, Rauchen oder Kautabak
4. Reflexe des autonomen Nervensystems, z. B. als Reaktion auf Erschrecken
5. Psychische Faktoren wie Schmerz, Furcht, Kummer etc.
6. Nahrungsmittel direkt, z. B. Zitrusfrüchte (pH-Wert 2,59) oder indirekt über Stoffwechselung in der Plaque (IMFELD, 1983)³¹.

Die Menge und die Zusammensetzung des Speichels haben erheblichen Einfluss auf den Verlauf des Plaque-pH-Wertes nach dem Verzehr einer kariogenen Mahlzeit. Der typische zeitliche Verlauf des pH-Werts in der Plaque nach Zuckergabe wird als Stephan-Kurve (Abb. 10) bezeichnet. Der pH-Wert in metabolisch inaktiver Plaque ist relativ konstant und liegt durchschnittlich zwischen pH 6 und pH 7. Er unterscheidet sich jedoch zwischen kariesaktiven und -inaktiven Personen. Nach dem Verzehr fermentierbarer Kohlenhydrate sinkt der pH-Wert innerhalb weniger Minuten durch

die Produktion von organischen Säuren rasch bis zum „kritischen Wert“ oder darunter. Erst nach 30 bis 60 Minuten erreicht er wieder den Ausgangswert^{36 57}.

Der geringste pH-Wert korrespondiert mit der höchsten Laktat-Konzentration in der Plaque. Beim Unterschreiten des kritischen pH-Werts kommt es zu einer Demineralisation der Zahnhartsubstanz. Der kritische pH-Wert für Zahnschmelz liegt bei pH 5,2 bis 5,7. Dies ist der Grenzwert, unterhalb dessen Speichel und Plaquefluid nicht mehr in Bezug auf Schmelzmaterial (Hydroxylapatit) gesättigt sind. Es ist zu beachten, dass der kritische pH-Wert von Patient zu Patient variieren kann, z. B. in Abhängigkeit von der Calciumionenkonzentration im Umgebungsmilieu des Zahnes (Lit. Jendottir). Entscheidend für das resultierende Ausmaß der Demineralisation ist allerdings, wie lange der Plaque-pH-Wert unterhalb der kritischen Grenze bleibt⁵⁷.

Die Geschwindigkeit der Neutralisation des pH-Werts hängt in der Hauptsache von der Dauer der Säureproduktion und der Pufferkapazität des Speichels ab. Die Dauer der Säureproduktion wird entscheidend durch Speichelfaktoren mitbestimmt. Die Spüleigenschaften des Speichels tragen dazu bei, wie lange Nahrungsmittelpartikel nach einer Mahlzeit in der Mundhöhle verweilen und den Plaquebakterien als Substrat dienen können⁵⁷.

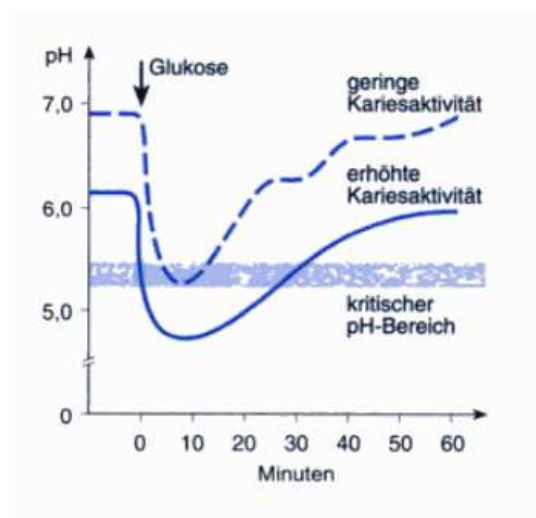


Abb. 10: Stephan-Kurve: pH-Änderung nach zuckerreicher Zwischenmahlzeit¹⁶.

Neben der Spülfunktion zeigt der Speichels auch eine antibakterielle Aktivität. Zu den biologisch aktiven, antibakteriell wirksamen Speichelproteinen zählen das Agglutin, Laktoferrin, Lysozym, Peroxydasen, Histidin-reiche Proteine (Histatine), Defensine und Cystatine. Die wichtigsten Eigenschaften der Speichelproteine sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Proteine	Funktion
Lysozym	Antibakteriell gegen grampositive Bakterien
Laktoferrin	Antibakteriell gegen grampositive und gramnegative Bakterien
Peroxidasen	Antibakteriell gegen Bakterien, Viren, Hefen
Agglutine	Agglutination von oralen Mikroorganismen
Histidin-reiche Proteine	Breit antibakteriell und antifungal wirksam
Defensin	Breit antibakteriell und antifungal wirksam
Cystatin	Antiviral und antibakteriell
Sekretorisches IgA	Hemmung der Adhäsion
IgG	Förderung der Phagozytose
IgM	Förderung der Phagozytose

Tab. 7: Die wichtigsten Speichelproteine⁵⁷.

Lysozym kann Bakterienzellwände zerstören. Laktoferrin ist ein eisenbindendes Enzym und hat somit eine wachstumshemmende Wirkung auf Mikroorganismen, die Eisen für ihr Wachstum benötigen. Makromolekulare Glykoproteine sind für die Viskosität des Speichels verantwortlich und enthalten Blutgruppenantigene (Hellwig et al., 1999)⁸⁷.

Eine besondere Rolle für das Remineralisationspotential des Speichels spielen die Prolin-reichen Proteine (PRPs) und Statherin. Der Speichel ist in Bezug auf die meisten Calciumphosphatsalze übersättigt. Die PRPs und das Statherin verhindern

durch die Bindung von Calcium eine spontane Präzipitation von Calciumphosphatsalzen und halten so die Übersättigung aufrecht⁵⁷.

2.3.3.2. Puffersysteme

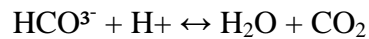
Eine weitere Funktion des Speichels ist die Neutralisation eines niedrigen pH-Wertes mittels seiner Puffersysteme:

- Bikarbonat-Puffersystem ($\text{HCO}_3^- / \text{H}_2\text{PO}_3$)
- Phosphat-Puffersystem ($\text{HPO}_4^{2-} / \text{H}_2\text{PO}_4^-$)
- Proteinpuffer.

Diese Puffersysteme dienen der Neutralisation des pH-Wert in der Mundflüssigkeit und in der Plaque nach der Nahrungsaufnahme. Dadurch wird die Einwirkungszeit der Nahrungssäuren auf die Zahnhartsubstanz verkürzt und somit das Erosionsrisiko gesenkt. Zum anderen nehmen die Puffereigenschaften des Speichels entscheidenden Einfluss auf den Verlauf der Stephan-Kurve⁵⁷.

Der Bikarbonatpuffer spielt die wichtigste Aufgabe bei der Säureneutralisation in der Mundhöhle während einer kariogenen Attacke. Das Bikarbonat entstammt hauptsächlich aus der Gl. parotis und der Gl. submandibularis. Bei steigender Speichelsekretion ist der Bikarbonatgehalt im Speichel sehr erhöht und somit auch der pH-Wert. Die Bikarbonatkonzentration im Speichel kann von unter 1 mmol/l bei maximaler Stimulation auf annähernd 60 mmol/l ansteigen. Das pH-Optimum des Bikarbonatpuffers liegt bei pH 6,1 und der Pufferbereich reicht von 5,1 bis 7,1. Das hat Auswirkung auf den Plaque-pH-Wert, wenn z. B. die Nahrung nicht gleichzeitig exzessive Zuckermengen enthält. Das Bikarbonat diffundiert durch die Plaque und neutralisiert die organischen Säuren. Damit wird der Zeitraum verlängert, in dem eine Remineralisation bereits demineralisierter Zahnbereiche durch den Speichel stattfinden kann. Besonders beachtenswert bei dem Bikarbonat-Puffer-System ist, dass bei Zugabe von stärkeren Säuren wie Laktat die entstehende schwächere

Kohlensäure H_2CO_3 nicht angehäuft wird, sondern in Wasser und Kohlendioxid zerfällt und abgeatmet wird^{36 57 87}:



Der Phosphatpuffer ist für die Remineralisation die bedeutendste Komponente. Das Phosphat-System sorgt für die Übersättigung der Zahnumgebung in Bezug auf Zahnmineral (Hydroxylapatit) nach der Demineralisation. Sein pH-Optimum liegt bei 7,1. Der Bereich reicht von 6,1 bis 8,1. Bei Stimulation des Speichelflusses sinkt die Konzentration von ca. 5 auf 3 mmol/l. Der Abfall der Gesamtkonzentration des Phosphats im Speichel nach Stimulation wirkt sich keinesfalls negativ auf die Remineralisation aus. Die pH-Wert-abhängige Dissoziation des Phosphates führt vom primären (H_2PO_4^-) über das sekundäre (HPO_4^{2-}) hin zum tertiären Phosphat (PO_4^{3-}). Die hohe Bikarbonatkonzentration des stimulierten Speichels steigert die Deprotonierung des Phosphats. Auf diese Weise kann trotz der sinkenden Gesamtkonzentration der anorganischen Phosphate im stimulierten Speichel die Konzentration des für die Remineralisation wichtigen tertiären Phosphates um bis zum 40-fachen des Ausgangswertes ansteigen⁵⁷.

Das Proteinpuffersystem wurde bisher nur wenig untersucht. Im Speichel finden sich nach heutigem Kenntnisstand etwa 1000 verschiedene Proteine und es ist weitgehend unbekannt, welche Proteine für die Pufferwirkung eine Rolle spielen. Das Optimum des Proteinpuffers liegt im stark sauren Bereich bei etwa pH 4,3 und der Pufferbereich reicht vermutlich von 3,3 bis 7,2⁵⁷.

2.3.3.3. Speichel als Remineralisationsmedium

Die endo- und die exogenen Säuren greifen den Zahn an und der Schmelz wird in seinen Bausteine Calcium und Phosphat zerlegt. Eine Demineralisation hat stattgefunden. Nach dem Konsum potentiell erosiver Nahrungsmittel und Getränke vermindert der Speichel die Entkalkung des Schmelzes durch Verdünnung, Neutralisierung, Pufferung und Abtransport von Säuren. Die aus Speichelkomponenten

gebildete Pellikel auf der Zahnoberfläche reduziert die Demineralisationsrate und der Speichel stellt Calcium-, Phosphat- und Fluorid-Ionen zur Remineralisation von erodierter Zahnhartsubstanz zur Verfügung. Die Anwesenheit von Speichel reduziert das Auftreten und das Ausmaß von Schmelzerosionen um das 10-fache⁵⁷, denn je stärker der Speichelfluss und je gehaltvoller er an Calcium und Phosphat ist, desto besser sind seine Remineralisationseigenschaften ausgeprägt⁹⁸. Die Abb. 11 skizziert den Prozess der De- und Remineralisation.

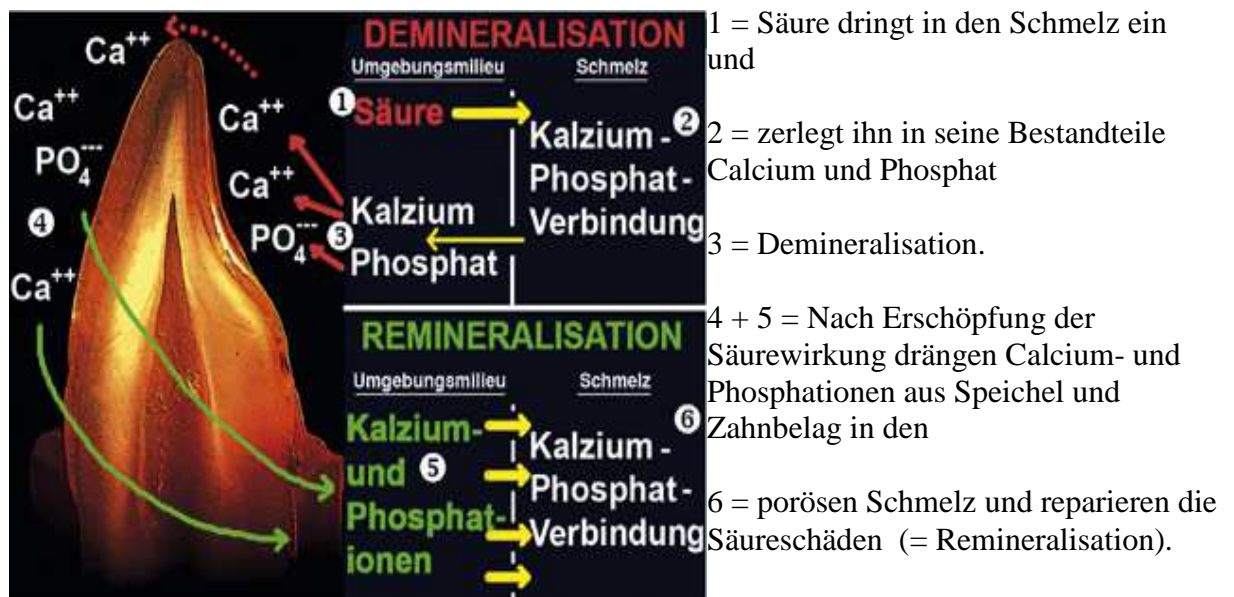
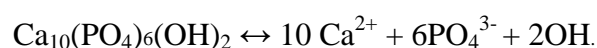


Abb. 11: Vorgänge bei der De- und Remineralisation von Zahnschmelz⁹⁸.

Die Remineralisationskapazität des Speichels ist sehr individuell und nimmt mit zunehmendem Alter stark ab^{49 50}. Bei Patienten mit einer Unterfunktion der Speicheldrüsen treten auch vermehrt Abrasionen und Attritionen auf, da die schützenden Eigenschaften des Speichels weitgehend fehlen⁵⁷.

Der Speichel ist bei pH 7 eine an Calcium und Phosphat übersättigte Lösung und kann somit als eine natürliche Remineralisationslösung bezeichnet werden. Das bedeutet, er kann innerhalb der pH-Grenze 5,5 – 6,5 Calcium- und Phosphationen, die während der Demineralisationsphasen aus der Zahnoberfläche verloren gingen, in den Remineralisationsphasen (zwischen den Mahlzeiten) wieder einlagern³⁶. Eine Unterschreitung der kritischen pH-Grenze durch Ansäuerung mit kurzzeitigem pH-Abfall auf pH 3,5 führt in der Regel zu Mineralverlust. Der Speichel kann diese säurebedingte Erosion der Zahnoberfläche reduzieren. Der protektive Effekt setzt für Dentin bereits nach 2 Minuten und für Zahnschmelz nach mindestens 1 Stunde ein. Dabei profitiert Zahnschmelz stärker vom Speichelschutz als Dentin^{49 50 97}.

Die anorganischen Hauptbestandteile des Zahnschmelzes stellen vor allem Calcium (36 %) und Phosphat (52%) dar. In kleineren Mengen sind noch Karbonat, Natrium, Chlorid, Kalium und Fluorid enthalten. Der Speichel umspült den Zahnschmelz mit den genannten mineralischen Bestandteilen, aber in gelöster Form. Man kann den Zahnschmelz stark vereinfacht als Calciumhydroxylapatit betrachten und die Gleichgewichtsreaktion zwischen fester (Zahnhartsubstanz) und flüssiger (Speichel) Phase folgendermaßen darstellen:



Unter physiologischen Bedingungen kommt es in der Mundhöhle zu einem regen Austausch von Ionen zwischen Speichel und Zahnschmelz. Dieser Austausch wird dadurch ermöglicht, dass der Speichel in Bezug auf Calcium- und Phosphat-Ionen übersättigt ist. Die Speichelproteine PRPs und der Statherin verhindern die spontane Ausfällung von Calciumphosphat-Salzen (s. unten). Nach einer Demineralisation stehen somit hinreichend Calcium- und Phosphat-Ionen für eine Remineralisation zur Verfügung. Ohne diese reparierende Funktion des Speichels würden die Zähne in der Mundhöhle keinen Bestand haben⁵⁷.

In sehr kleinen Mengen (0,01 – 0,05 ppm) ist auch Fluorid im Speichel enthalten, durch das die Demineralisation gehemmt und die Remineralisation gefördert wird⁵⁷.

2.4. Initiale Kariesläsion

Die De- und die Remineralisationsprozesse in der Mundhöhle spielen sich in abwechselnden Phasen ab. Überwiegt die Demineralisation, kommt es zu der initialen Kariesläsion. Diese so genannte White-spot-Läsion stellt eine weiße opake Verfärbung auf dem Zahnschmelz mit intakter und leicht rauer Oberfläche dar. Während ihrer Remineralisation werden nicht nur Mineralien, sondern auch Farbstoffe aus Tabak, Tee oder Kaffee eingelagert. Die Läsion erscheint dann in einem späteren Stadium bräunlich, daher wird sie auch als “brown-spot“ bezeichnet³⁷
79.

Polarisationsmikroskopisch werden in der Initiailläsion vier verschiedenen Zonen unterschieden (Abb. 12):

Transluzente Zone	<ul style="list-style-type: none"> • Läsionsfront = unmittelbar in Kontakt zum gesunden Zahnschmelz • Die Zone der fortschreitenden Demineralisation • Breite 5 µm – 100 µm • Porenvolumen ca. 1% • Herauslösen von Karbonat aus dem Apatitgitter • Kristallgröße 25-30 nm
Dunkle Zone	<ul style="list-style-type: none"> • Porenvolumen ca. 2-4 % • Aufgrund der Remineralisation an den Apatitkristallen sind die Poren kleiner als die der Transluzenten Zone
Läsionskörper	<ul style="list-style-type: none"> • Zone des größten Mineralverlustes ca. 25 % • Porenvolumen 5-25 % • Kristallgröße 10-30 nm
Oberflächenschicht	<ul style="list-style-type: none"> • Mineralverlust von 1-10 % • Porenvolumen ca. 5 % • Breite 20 µm – 40 µm

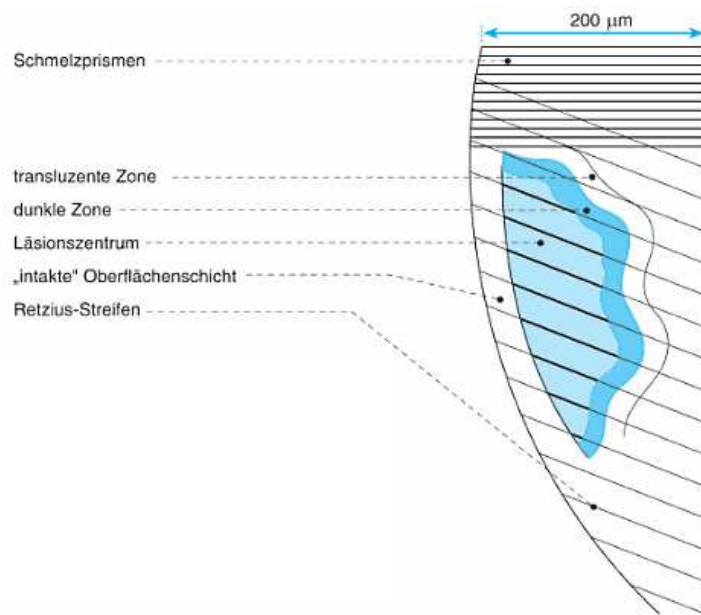


Abb. 12: Schematische Darstellung der Zonen der initialen Schmelzläsion nach Hellwig³⁷.

Wenn die entmineralisierenden Bedingungen über längere Zeit bestehen bleiben, kommt es zu Zerstörung der Schmelzprismen mit Vergrößerung des zwischenprismatischen Raumes. Auf dieser Weise werden ideale Diffusionswege für Säuren geschaffen. Die Säuren dissoziieren langsam im Schmelzinneren und geben kontinuierlich H^+ -Ionen ab. Diese Wasserstoffionen greifen die Schmelzkristalle an. Es werden vor allem Calcium, Phosphat und Fluorid aus dem Kristallgitter frei. Sie diffundieren dann entsprechend ihrer Konzentrationsgradienten durch die erweiterten Schmelzporen zur Schmelzoberfläche. Allerdings nimmt die Diffusionsgeschwindigkeit zur Schmelzoberfläche ab, weswegen sich Calcium und Phosphat sich an der Oberfläche an lagern. Auf diese Weise entsteht eine pseudointakte Oberfläche, durch die Säuren in die Tiefe bis in die Dentintubuli diffundieren und zu weiteren Auflösungserscheinungen in der Läsion führen³⁷. Die vielen Porositäten dieser pseudointakten Deckschicht sind erst elektronenmikroskopisch zu erkennen⁷⁹.

Die Übersättigung des Speichels mit Calcium- und Phosphationen ist pH-Wert-abhängig. Die in der Schmelzgitterstruktur eingebauten Hauptminerale Calcium und Phosphat sowie ihre im Speichel gelösten Elektrolyte befinden sich in einem

dynamischen Gleichgewicht erst bei dem physiologischen pH-Wert 7. Bei erhöhter H^+ -Ionenkonzentration und niedrigem pH-Wert kommt es zu einer Protonierung der Phosphationen⁹³. Durch diese Gleichgewichtsstörung strömen die Ionen aus den Hydroxylapatitkristallen in den Speichel. Es kommt zu Demineralisation des Zahnschmelzes⁶¹.

Anders dagegen verläuft dieser Prozess bei steigendem pH-Wert und sinkender Protonenkonzentration. Dadurch steigt auch die Phosphationenkonzentration. Der Speichel wird an Calcium- und Phosphationen übersättigt, was zu einem Ionenstrom aus dem Speichel in den Zahnschmelz führt. Es kommt zur Remineralisation⁷⁹.

Die Initialläsionen sind meist an den Prädilektionsstellen, d. h. im Interdentalraum unter dem Approximalkontakt und am Gingivalsaum lokalisiert⁷⁹. Wird die Schmelz-Dentin-Grenze überschritten, sind auch die Grenzen der Prävention erreicht. Die kariöse Stelle ist nur durch konservierende Maßnahmen zu therapieren⁶¹.

2.5. Das Prinzip der forcierten dynamischen Remineralisation

Die Demineralisationsprozesse von Initialläsionen stellen komplexe, nichtlineare chemisch-physikalische Reaktionen dar. Dazu spielt auch die Mikromorphologie der Zähne eine wichtige Rolle auf die Diffusionsreaktionen De- und Remineralisation. Schon 1966 hat BACKER-DIRKS festgestellt, dass die Voraussetzung für die Remineralisierung demineralisierter Schmelzareale eine intakte Deckschicht über der initialen Läsion ist. An Zähnen, die bereits über eine Kavitation verfügen, findet keine Remineralisation mehr statt^{13 49 50}.

KOULOURIDES⁵⁸ zeigte in seinen Versuchen bereits 1965, dass der Zusatz von Calcium-, Phosphat- oder Fluoridionen die Remineralisationsrate der Speichelflüssigkeit erhöhte, letztlich aber keine vollständige Remineralisation der Initialläsion bewirkte.

Durch den hohen Übersättigungsgrad des artifiziell angereicherten Speichels kommt es zu einer verstärkten Einlagerung mineralischer Substanzen in die äußersten Schmelzschichten (= die Deckschicht der Initialläsion), die die Diffusion des Remineralisationsmediums in die Tiefe bzw. ins Zentrum der Läsion verhindert^{49 50}. Genau hier setzt die forcierte dynamische Remineralisation ihren Hebel an.

Die Salzhydratschmelze, die in der vorliegenden in vitro Studie verwendet wurde, funktioniert nach dem Prinzip der forcierten dynamischen Remineralisation. Sie verdankt ihre remineralisierende Wirkung ihrem hohen Gehalt an ungebundenen Calciumionen. Ihre Wirkung unterscheidet sich grundlegend von der remineralisationsfördernden Wirkung der Fluorionen⁹². Die forcierte Remineralisation arbeitet nach folgendem Prinzip (Abb. 13):

Bei ihr wird die Entkalkung des Schmelzes durch Erhöhung der Calciumionendichte im Außenmilieu des Zahnes und dynamische, zeitlich gesteuerte Veränderungen des pH-Wertes am gleichen Ort verhindert. Dabei ist es sehr wichtig, dass das System nicht ins chemische Gleichgewicht kommt, also nicht stationär wird.

Es muss stetig auf zyklisch dynamische Veränderung geachtet werden. Zuerst wird ein saures, an Mineral übersättigtes Umgebungsmilieu am Zahn erzeugt¹⁰². Darin kann die Mineralkonzentration in Abhängigkeit vom pH-Wert um ein Vielfaches erhöht werden. Bei geeigneter Steuerung des pH-Wertes wird die Sättigungsgrenze für Hydroxylapatit, den hauptsächlichen Bestandteil des Zahnschmelzes, nicht überschritten^{61 98}. Dadurch wird am Zahn ein saures Umgebungsmilieu erzeugt, welches an Mineral übersättigt ist und dessen Komponenten durch Konzentrationsausgleich in die Schmelzporen gedrückt werden. Die Hauptkomponenten der Remineralisationslösung, Calcium- und Phosphationen, können somit den entkalkten Zahnschmelz durchtränken⁹⁸. Die H⁺-Ionen werden dabei zum Teil durch das gelöste Phosphat weggepuffert. Sie senken dadurch automatisch den pH-Wert weiter ab, wenn das Puffervermögen der Lösung erschöpft ist und ermöglichen auf diese Weise, eine höhere Mineralkonzentration in Lösung zu

halten. Diese erhöhte Konzentration an Mineral entstammt zum Teil aus den diffundierten Ionen, zum anderen Teil aus den aufgelösten Wänden^{92 94 95 102}.

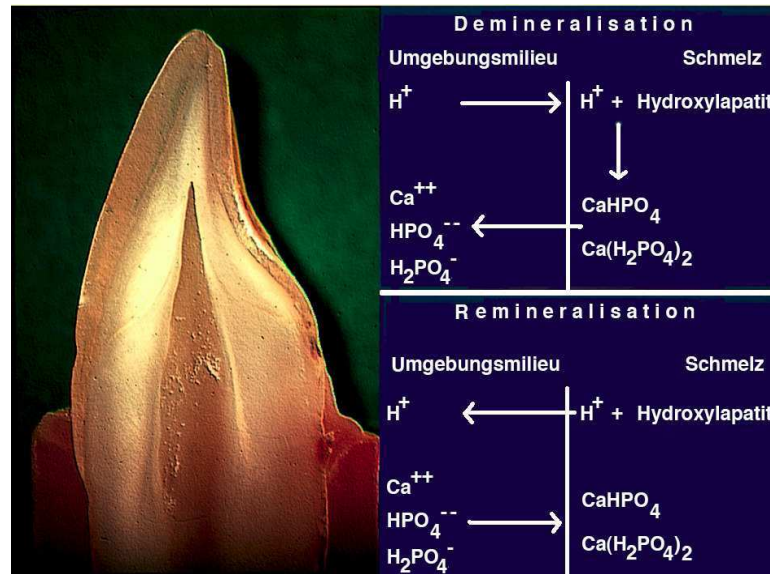


Abb. 13: Prinzip der chemischen Vorgänge bei der De- und Remineralisation von Zahnschmelz.

Nach dem Sättigungsausgleich folgt die Mineralabscheidung. Hierzu wird der pH-Wert im Außenmedium auf Werte unterhalb der Sättigung erhöht, wodurch im Außenmilieu automatisch der Mineralgehalt reduziert wird. Die Protonen und die Calcium- und Phosphationen aus dem Inneren der Läsion diffundieren nun wegen des neu aufgebauten Konzentrationsgradienten zwischen dem Inneren der Läsion und dem Außenmedium des Zahnes in Richtung Außenmedium. Die Protonen übertragen am schnellsten ihre Ladungsenergie. Dadurch erhöht sich der pH-Wert im Inneren der Läsion. Das dort gelöste Calciumphosphat kann sich deswegen nicht mehr in Lösung halten und schlägt sich als solides Calciumphosphat nieder (Abb. 14). Remineralisation hat stattgefunden^{92 95}.

Die Effektivität der forcierten dynamischen Remineralisation ist durch ein optimales, zeitliches Konzentrationsprofil der Lösungskomponenten festgelegt. Sie wurde in in vitro (Jahns⁴⁹, 1991; Bodky¹⁷, 1991 und Dörr²⁵, 2009) ebenso wie in in vivo Studien (Staebler⁹², 2008; Wiedemann,¹⁰²) nachgewiesen¹⁰².

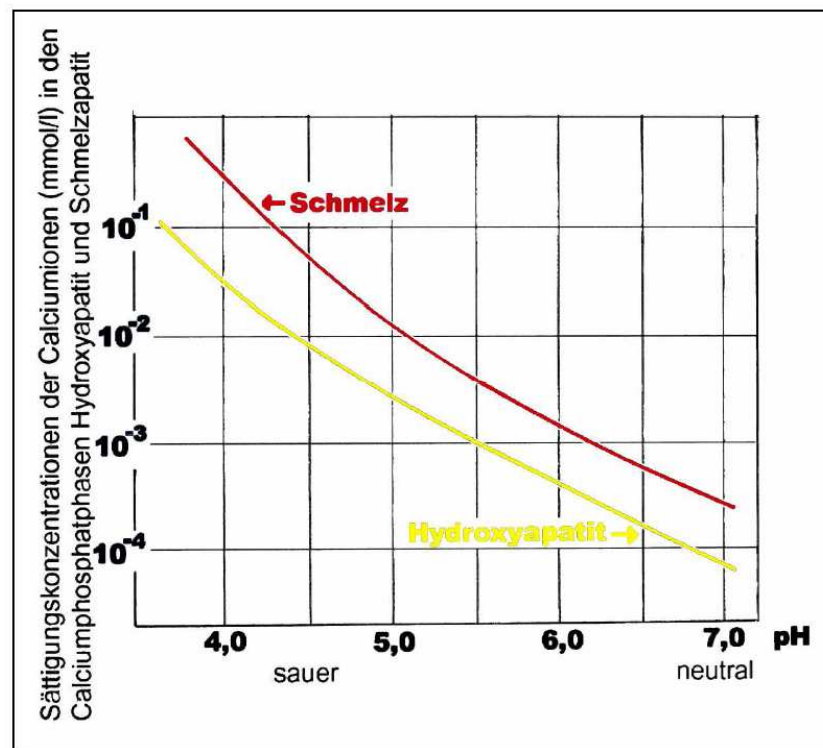


Abb. 14: Calcium-Löslichkeitsisothermen. Beim pH-Wert 4,5 können um den Faktor 100 mehr Calcium- und Phosphationen gelöst werden als beim pH-Wert 6,8, ohne dass die Sättigungskonzentration von HAP überschritten wird ($C_{\text{HAP}} 10^{-2}$ gegenüber 10^{-4})^{61 92 102}.

2.6. Erosionen

Parodontalerkrankungen, Zahnkaries und Zahnerosionen sind die drei häufigsten Erkrankungen der Mundhöhle. Die Ätiologie unterscheidet sich bei diesen Erkrankungen erheblich. Dies gilt insbesondere für den Einfluss der Ernährung. Zahnerosionen werden durch Säuren aus der Nahrung verursacht. Zahnkaries entwickelt sich durch Säuren, die aufgrund des enzymatischen Abbaus von Kohlenhydraten durch Bakterien in der Dentalplaque entstehen⁹⁶. Wie die Abrasion, Attrition, Abfraktion, Demastikation und Resorption gehören die Erosionen zu den nichtkariösen Zahnhartsubstanzdefekten⁴⁴. Diese Defekte können einzeln oder miteinander kombiniert auftreten, so dass eine eindeutige Diagnose und Zuordnung erschwert ist⁸⁰. Deswegen ist es sehr wichtig unterscheiden zu können, ob es sich bei einer Läsion primär um einen erosiven, abrasiven oder einen kariösen Prozess handelt⁷².

Dentale Erosionen werden als oberflächlicher Zahnhartsubstanzverlust im Sinne einer Demineralisation ohne Bakterienbeteiligung definiert¹⁰⁹. Sie können von exogenen und endogenen Faktoren verursacht werden. Zu den häufigsten exogenen Ursachen gehört der Konsum säurehaltiger Lebensmittel und Getränke⁷², wie z. B. Früchte und deren Fruchtsäfte (Äpfel, Zitronen) und besonders die Softdrinks wie Cola, Eistee, Apfelschorle oder Sportlergetränke, Wein, Salatdressings und Essigprodukte⁸⁰. Die wichtigsten endogenen Faktoren sind chronische Magen-Darm-Störungen sowie Anorexia und Bulimia nervosa mit häufigem Erbrechen (Järvinen et al., 1988; Milosevic & Slade, 1989; Meurman et al., 1994; Scheutzel, 1996)^{71 72}.

In der initialen Phase dieses Prozesses wird der Schmelz flächenhaft demineralisiert bei intakter Oberfläche. Fortgeschrittene Erosionen können bis ins Dentin reichen. Durch das Einwirken zusätzlicher abrasiver Prozesse wie z. B. Zähneputzen wird dieser Substanzverlust beschleunigt. Aufgrund der Lokalisation und der Morphologie eines erosiven Defektes ist es möglich, Aufschluss über dessen Ursache zu erhalten:

palatinale Erosionen weisen auf endogene und labiale Erosionen eher auf exogener Ursachen hin (Lussi et al., 1991; Järvinen et al., 1992)⁷².

Als besonders erosionsfördernd gelten die kohlenensäurehaltigen Getränke und die Fruchtsäfte, sowohl in purer als auch in verdünnter Form. Gemeinsame Merkmale dieser Getränke sind ihre sehr niedrigen pH-Werte sowie ihre ausgeprägte Pufferkapazität, die zu einer langen Aufrechterhaltung des sauren Charakters führen¹⁰⁴.

2.6.1. Ätiologie und Pathogenese

Die Erosionen gehören genauso wie die Karies und die Parodontitis zu den Erkrankungen mit multifaktorieller Ätiologie¹⁰⁷. Es lassen sich extrinsische, intrinsische und idiopathische (biologische) Faktoren voneinander unterscheiden, die das Ausmaß einer Erosion beeinflussen (IMFELD, 1996)^{44 80}.

Im Schmelz werden zunächst die Prismenscheiden zerstört, gefolgt von dem Prismenkern. Zuletzt wird die interprismatische Substanz aufgelöst. Bei der Dentindemineralisation wird zunächst das peritubuläre und dann das intertubuläre Dentin angegriffen. Es entsteht eine obere Schicht demineralisierten Dentins. Hier fehlt die anorganische Matrix und die organische Matrix liegt vollständig frei. Darunter befindet sich eine Schicht teilweise demineralisierten Dentins, gefolgt von gesundem Dentin⁸⁰.

Bei neutralem pH-Wert in der Mundhöhle stehen die Calcium- und Phosphationen des Speichels mit dem Hydroxylapatit der Zahnhartsubstanzen im chemischen Gleichgewicht, da der Speichel an Hydroxylapatit übersättigt ist (THYLSTRUP und FEJERSKOV, 1986). Sinkt der pH-Wert des Speichels nach einem Säureangriff auf unter pH 5 ab, so liegen die Phosphationen im Speichel überwiegend in protonierter Form vor. Der Speichel ist nun eine an Hydroxylionen übersättigte Lösung und Calcium- und Phosphationen des Schmelzes wandern entlang des Diffusionsgradienten aus dem Zahn in den Speichel. Der Zahnschmelz wird dadurch

demineralisiert. Die Säure greift die Hydroxylionen, die Karbonate und die Orthophosphate des Schmelzapatits an und bewirkt den Umbau in Wasser und Karbonat- bzw. Phosphationen. Innerhalb der Apatitkristalle wird so das Ionengleichgewicht destabilisiert und Calciumionen werden frei. Die Karbonat- und Phosphationen gehen als Anionen in Lösung. Die Kristalloberflächen werden negativ geladen, was dazu führt, dass Calciumionen in die umgebende Lösung der Kristalle wandern⁸⁰.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Erosionen und der Karies liegt darin, dass die Oberfläche des Schmelzes bei den Erosionen schichtweise abgetragen wird und es bei ihm nicht zur Entstehung einer pseudointakten Oberfläche kommt^{9 61 80}.

2.6.2. Dynamik des erosiven Prozesses

Der Erosionsprozess kann in zwei Stadien eingeteilt werden: Anfangs- und fortgeschrittenes Stadium.

In der Anfangsphase findet man als Folge einer partiellen Demineralisation eine Erweichung der Zahnoberfläche. In diesem Stadium ist eine Remineralisation möglich, da die noch vorhandenen Schmelzanteile als Gerüst dienen, in welches wieder Mineralien eingelagert werden können. Dieses Stadium spürt man z. B. nach dem Genuss von Rhabarber oder eines sauren Weines. Die Zähne fühlen sich danach rau an, später werden sie durch Remineralisation wieder glatt.

In einem zweiten, fortgeschrittenen Stadium sind die Strukturen der oberflächlichen Schmelzschichten vollständig zerstört und daher ist eine Remineralisation dieser Schmelzanteile nicht mehr möglich. Es kann hingegen zu einer Remineralisation der tieferen noch nicht zerstörten, aber erweichten Zahnhartsubstanzanteile kommen.

In der Regel besteht in der Mundhöhle ein Gleichgewicht zwischen De- und Remineralisationsvorgängen. Falls die Säureeinwirkung gegenüber den Reparationsvorgängen überwiegt, kommt es zur klinischen Manifestation von dentalen Erosionen. Der Zahnhartsubstanzverlust wird beschleunigt, wenn zusätzlich abrasive Prozesse, wie z. B. Zähneputzen, vorhanden sind. Erosiv veränderte Zahnhartsubstanz wird stärker durch Abrasions- und Attritionsprozesse in Mitleidenschaft gezogen als gesunder Schmelz ^{10 47 71 73}.

2.6.3. Klinisches Erscheinungsbild

Die Erosionen sind vor allem auf den bukkalen oder oralen Glattflächen der Zähne zu finden, da sie dort im direkten Kontakt zu den primären Säuren stehen. Die Säuren der Nahrungsmitteln führen zu Erosionen der labialen und der okklusalen Schmelzflächen, während die Magensäure (pH-Wert ≈ 1) überwiegend zu Erosionen an den oralen Flächen der Zähne führt⁵⁹.

Im Anfangsstadium besitzen die vestibulär gelegenen Erosionen eine matte, später eine eingedellte Oberfläche (Abb. 15-17). Typisch ist auch die Persistenz der Schmelzleiste am marginalen Kronenrand (Abb. 15, Abb. 17). Diese Schmelzleiste entsteht einerseits durch die cervikalen Plaquerückstände, die eine Diffusionsbarriere gegen den Säureangriff bilden⁹⁰, andererseits aber auch durch das Sulkusfluid, dessen pH-Wert von 7,5 bis 8,0 zu einer Neutralisation der Säuren im Gingivabereich führt. Im Bereich der Höckerspitzen der Molaren kommt es zu schüsselförmigen Vertiefungen und das Höcker-Fissurenrelief (Abb. 18) wird deutlich abgeflacht⁸⁰, z. T. bis ins Dentin (Abb. 19). Bei zahnärztlichen Restaurationen, wie z. B. Amalgam-Füllungen, ragen die Ränder über die benachbarte Zahnhartsubstanz hinaus (Abb. 21). Eine flächenhafte Entkalkung der Zahnhartsubstanz ist charakteristisch für palatinale Erosionen⁷¹.

Der destruktive Prozess von Erosionen breitet sich von der Schmelzoberfläche in die Tiefe aus. Für den Patienten ist zunächst der Substanzverlust unsichtbar und schmerzlos. Bei einem progredienten Verlauf wird das Dentin erreicht und die Erosionen weisen einen deutlichen Defekt auf, verbunden mit Zahnverfärbungen und Hypersensitivität^{80 38}.

LUSI et al.⁶⁴ haben im Jahr 1991 die Erosionen nach folgendem Index eingeteilt:

Vestibuläre Zahnflächen:

Grad 0	Keine Erosion
Grad 1	Flächenhafter Verlust von Schmelzsubstanz. Eindellungen mit intakter Schmelzleiste. Der Schmelz hat Seidenglanz. Kein Dentinbefall (Abb. 15, Abb. 16)
Grad 2	Dentin liegt auf weniger als der Hälfte der betroffenen Zahnoberfläche frei (Abb. 17)
Grad 3	Dentin liegt auf mehr als der Hälfte der betroffenen Zahnoberfläche frei

Okklusale und orale Zahnflächen:

Grad 0	Keine Erosion
Grad 1	Schwach ausgeprägte Erosion. Abgerundete Höcker, Schmelz seidenglänzend, Füllungen höher als benachbarte Zahnschmelzsubstanz. Kein Dentinbefall (Abb. 18)
Grad 2	Stark ausgeprägte Erosion. Zusätzlich ist das Dentin befallen (Abb. 19, Abb. 20)



Abb. 15:
Zähne 11–13: Erosionen Grad 1
am Zahn 12 mit intakter
Schmelzleiste⁷¹.



Abb. 16:
Erosionen Grad 1 an Zähne 11
und 21⁷¹.



Abb. 17:
Dentale Erosionen II. Grades
mit Dentinbefall auf der
vestibulären Flächen der
Zähnen. 13-14 Erosionen Grad
1 am Zahn 12⁷⁰.



Abb.18:
Okklusalansicht der Zähne 15 und 16 mit Erosionen Grad 1 (Zahn 15) sowie beginnende Erosion Grad 2 mit deutlichen Eindellungen der Höckerspitzen und Dentinbefall (Zahn 16)⁷¹.



Abb. 19:
Okklusalansicht der Zähne 14-16: fortgeschrittene Erosionen Grad 2 mit deutlichem Dentinbefall.



Abb. 20:
Erosionen Grad 2 der Unterkieferinzisiven: ausgeprägte Eindellungen mit Dentinbeteiligung⁷¹.



Abb. 21:
Okklusale Erosionen Grad 1 an
Zähnen 16, 17 neben Amalgam-
füllungen⁷⁰.

2.6.4. Keilförmige Defekte

Der Unterschied zwischen den Erosionen und den keilförmigen Defekten liegt darin, dass bei den keilförmigen Defekten die oben beschriebene intakte Schmelzleiste fehlt, da eine andere Pathogenese vorliegt. Durch falsche Zahnputztechnik wird das entblößte Zement eines Zahnes durch eine Gingivarezession bis in das Dentin abgetragen. Die Läsionsränder sind scharf begrenzt.

Dieser Prozess wird unter Umständen durch okklusalen Stress beschleunigt. Häufig treten erosive und abrasive Prozesse zusammen, was natürlich nicht nur die eindeutige Zuordnung zu einem Läsionstyp erschwert, sondern auch die Prävention und die Therapie⁷¹.

2.6.5. Prävalenz und Progression

Wenn keine Prävention erfolgt, können sich Erosionen rasant ausbreiten. LUSSI & SCHAFFNER⁶⁷ fanden im Jahr 2000 bei der Nachuntersuchung von 55 Personen, dass klinisch relevante Zahnhartsubstanzdefekte erst dann auftreten, wenn mehrere ungünstige Faktoren zusammenkommen. Die Progression der erosiven Defekte

korreliert primär mit dem Konsum saurer Nahrungsmittel und Getränke sowie der Trinkgewohnheit der Menschen, weiterhin mit der Pufferkapazität des Speichels, mit der Zahnpfutztechnik, sowie dem Alter der Patienten^{71 82}.

Aufgrund des steigenden Verzehrs von säurehaltigen Getränken steigt die Erosionsprävalenz zunehmend an⁹⁶. In vielen Studien (Al-Dlaigan et al.³, 2001; Al-Malik et al.⁵, 2002; Jaeggi & Lussi⁴⁸, 2004; Millward et al.⁷⁶, 1994) wurde nachgewiesen, dass bereits Milchzähne erosive Defekte bis ins Dentin hinein aufweisen können, da ihre Schmelzdicke geringer ist als die der bleibenden Zähne^{71 39}. Dadurch sind auch vor allem junge Menschen von Erosionen betroffen (moderate Erosionen bei Patienten im Alter von 8-14 Jahren: 70,6% an Milchzähnen, 11,6% an bleibenden Zähnen)^{59 80}. Säurehaltige Getränke mit entsprechend niedrigem pH-Wert und hoher Pufferkapazität verhindern außerdem eine schnelle Neutralisierung durch den Speichel sowie eine effiziente Remineralisierung der Zähne. Generell sollten daher möglichst nur säurehaltige Getränke mit einem $\text{pH} \geq 5,5$ konsumiert werden. Coca Cola hat z. B. einen pH-Wert von 2,44, während Orangensaft einen pH-Wert von 3,67 aufweist. Orangensaft hat jedoch wie Cola ein hohes erosives Potential, da die Menge an Fruchtsäuren und die im Orangensaft vorhandene eigene hohe Pufferkapazität im Vergleich zu Cola höher ist. Lebensmittel wie Joghurt sind trotz eines pH-Wertes von ca. 4,0 nicht erosiv, da sie gleichzeitig eine hohe Sättigung an Calcium und Phosphat aufweisen, die erosionsprotektiv wirkt⁵⁹.

Die verbesserte Mundhygiene führt zu plaquearmen und damit leichter angreifbaren Zahnoberflächen⁹⁶. Die Tiefe der Schmelz- und Dentinerosionen hängt vor allem vom pH-Wert, vom Säuregehalt, der Pufferkapazität, dem Säuretyp, vom Calcium- und Phosphatgehalt des Nahrungsmittels und von der Säureeinwirkzeit der Getränke ab⁹⁶. Als nachteilig hat sich die mechanische Beanspruchung durch Zähneputzen nach dem Genuss säurehaltiger Nahrungsmittel erwiesen. Die durch Säure aufgeweichte und vorgeschädigte Zahnhartsubstanz wird dadurch stark abradier⁷¹.

Ein steigender Prozentsatz erosiver Zahnhartsubstanzdefekte wird gegenwärtig durch Änderungen des Lebensmittelangebotes, des Ernährungsverhaltens sowie

fehlerhafter Ernährungsgewohnheiten mit einem Übermaß an sauren Komponenten beobachtet. Zur Entwicklung geeigneter präventiver Maßnahmen sind die Bestimmung der absoluten Tiefe der Erosion, die Breite der veränderten Schicht und die genauen Vorgänge, welche bei der Demineralisation an der Schmelzoberfläche stattfinden, von großer Bedeutung¹⁰⁴.

2.6.6. Risikofaktoren

Die Erosionen gehören den Erkrankungen mit multifaktorieller Ätiologie an¹⁰⁷. Es lassen sich exogene, endogene und idiopathische (biologische) Faktoren voneinander unterscheiden, die das Ausmaß einer Erosion beeinflussen^{44 80}.

2.6.6.1. Extrinsische Risikofaktoren

Es ist schon lange bekannt, dass saure Nahrungsmittel und Getränke die Zahnhartsubstanzen erweichen können. Das liegt an den säurehaltigen Zusätzen wie Zitronen-, Phosphor-, Ascorbin-, Kohlen- oder auch Weinsäure, die zur Geschmacksverstärkung vielen Softdrinks und Fruchtsäften beigefügt werden. Der pH-Wert dieser Getränke liegt in der Regel zwischen 2,4 und 4,0¹⁰⁴. Das macht sie auch zum Führer in der Liste der extrinsischen Risikofaktoren⁷¹.

Der Anteil von den Softdrinks und Fruchtsäften am totalen Getränkekonsum nimmt in Europa stetig zu. Er liegt bei über 50% des Konsums von nicht alkoholischen Getränken. Es konnte nachgewiesen werden, dass der häufige Konsum von kohlensäurehaltigen, alkoholischen und Erfrischungsgetränken und frischen Früchten in enger Beziehung mit dem Auftreten von Erosionen steht⁴. Die Erosivität eines Getränkes oder Nahrungsmittels wird aber nicht nur durch die Konsumationshäufigkeit und ihren pH-Wert bestimmt, sondern auch durch den pKs-

Wert. Dieser entspricht der Anteil an titrierbarer Säure und hat große Bedeutung für die Erosivität einer Säure⁸⁰. Auch die Pufferkapazität, die Chelatereigenschaften und andere Faktoren wie Calcium- oder Phosphatgehalt beeinflussen die Erosivität von Säuren. Eine kleine Erhöhung des Getränke-pH-Wertes alleine scheint keinen grossen Einfluss auf die Erosivität eines Getränkes oder eines Nahrungsmittels zu haben. Je größer die Pufferkapazität eines Getränkes oder Nahrungsmittels ist, desto länger würde es dauern, bis der pH-Wert durch den Speichel neutralisiert werden kann. Verschiedene Getränke und Nahrungsmittel können trotz ähnlichen pH-Werten ein unterschiedliches erosives Potenzial aufweisen⁸⁰. Durch das Auswechseln der Nahrungsmittelsäuren kann die Erosivität eines Getränkes reduziert werden. So kann z.B. Maleinsäure anstelle von Zitronensäure verwendet werden^{32 71}.

Der Calcium- und Phosphatgehalt eines Getränkes oder Nahrungsmittels ist sehr wichtig für dessen Erosivität. Schon 1999 haben LARSEN & NYVAD⁶² nachgewiesen, dass Orangensaft (pH = 4), der mit Calcium (42,9 mmol/l) und Phosphat (31,2 mmol/l) angereichert wurde, kein erosives Potential mehr aufweist. Eintauchen von Schmelzproben in einem calciumangereicherten, im Handel erhältlichen Orangensaft (Michel Sanasaya, Rivella, Rothrist, Schweiz, Hohes C + Calcium) zeigte keine Erweichung der Schmelzoberfläche. Dieser Orangensaft (pH 4) gehört zu dem „functional food“, der auch erosionsgefährdeten Patienten empfohlen werden kann. Joghurt ist ein anderes Beispiel für ein Nahrungsmittel, das trotz des niedrigen pH-Wertes (pH ~ 4) zu keinen Erosionen führt. Das verdankt er seiner hohen Calcium- (> 31,6 mmol/l) und Phosphatkonzentration (> 34,0 mmol/l). Der Fluoridgehalt eines Getränkes oder Nahrungsmittels scheint je nach Konzentration auch bei Erosionen einen gewissen protektiven Effekt zu haben^{65 71}.

Tabelle 8 gibt einen Überblick über die chemischen Eigenschaften von verschiedenen Getränken und Nahrungsmitteln und ihr erosives Potenzial. Der Ausgangs-pH, die titrierbare Basenmenge bis pH 5,5 und 7,0 („Pufferkapazität“), die Phosphat-, Calcium und Fluoridkonzentrationen, der Sättigungsgrad (pK–pI)

bezüglich Hydroxyl- und Fluorapatit sowie die Veränderung der Oberflächenhärte von Schmelzproben (KHN = Knoop hardness number) nach 20-minütigem Eintauchen in den verschiedenen Testlösungen sind aufgeführt⁶⁹.

	pH	mmol OH-/l bis pH 5,5	mmol OH-/l bis pH 7,0	Phosphat mmol/l (mM)	Kalzium mmol/l (mM)	Fluorid ppm	pK – pl HAP	pK – pl FAP	Δ KHN
Getränke (nicht alkoholisch)									
Coca-Cola	2,6	14,0	34,0	5,43	0,84	0,13	-19,2	-12,6	-76,6
Ice Tea	3,0	18,4	26,4	0,08	0,56	0,83	-22,3	-15,0	-224,0
Mineralwasser (mit Kohlensäure)	5,3	1,6	14,0	0,00	10,8	0,11	-5,8	-1,3	+5,85
Red Bull	3,4	73,2	91,6	<0,01	1,70	0,36	-19,8	-13,1	-232,0
Getränke (alkoholisch)									
Carlsberg-Bier	4,4	9,6	40,0	7,33	2,23	0,28	-3,8	2,0	+8,0
Corona-Bier	4,2	4,6	8,2	3,29	2,10	0,11	-6,4	-0,8	+2,5
Rotwein	3,4	66,4	76,6	3,25	1,90	0,16	-12,3	-5,9	-71,3
Weisswein	3,7	44,0	70,0	3,16	0,91	0,35	-11,5	-5,0	-30,1
Fruchtsäfte									
Apfelsaft	3,4	70,0	82,0	1,74	4,03	0,11	-11,4	-5,2	-154,4
Orangensaft	3,7	82,4	109,4	5,54	2,20	0,03	-9,4	-3,9	-209,0
Milchprodukte									
Trinkmolke	4,7	12,0	32,0	9,67	6,01	0,05	0,1	4,9	+0,6
Milch	6,7	-	4,0	18,90	29,50	0,01	16,3	18,1	+10,9

Tab. 8: Chemische Eigenschaften verschiedener Getränke und Nahrungsmittel und ihr erosives Potential⁷¹.

Neben den besprochenen Eigenschaften der säurehaltigen Nahrungsmitteln und Getränken gibt es noch andere Faktoren, die in vivo einen Einfluss auf die Entstehung von dentalen Erosionen haben: z. B. die Chelatoreigenschaften. Bis zu 32 % des Speichelcalciums können in einem Calcium-Chelator-Komplex der Zitronensäure gebunden werden^{71 75}.

Weitere Faktoren, die einen erosiven Prozess beeinflussen können, sind die Haftung und die Verdrängung von Flüssigkeiten auf der Zahnoberfläche (Oberflächenspannung). Die verschiedenen Getränke haften unterschiedlich gut und lang am Schmelz an⁶⁰. Je stärker die Haftung der Säure am Schmelz ist, desto länger wirkt sie ein und desto größer ist die erosive Zerstörung der Zahnhartsubstanz. BUSSCHER et al.¹⁹ fanden 2000 heraus, dass die Verdrängung von Speichel durch Coca-Cola 14 mJ/m², durch Coca-Cola light 5 mJ/m² benötigte. Die Verdrängung eines Cola-Films auf Schmelz durch Speichel benötigte jedoch 45 mJ/m², die Verdrängung eines Cola-light-Films sogar 52 mJ/m². Es scheint schwieriger zu sein, einen Softdrink-Film durch Speichel zu ersetzen als umgekehrt⁷¹.

Eine Übersicht über Faktoren, die das erosive Potenzial von säurehaltigen Getränken und Nahrungsmitteln beeinflussen, ist in Tabelle 9 aufgelistet⁷¹.

• pH-Wert und Pufferkapazität
• Säuretyp (pK-Wert)
• Chelatereigenschaften
• Calciumkonzentration
• Phosphatkonzentration
• Fluoridkonzentration
• Adhäsion auf Zahnoberfläche / Verdrängung von Speichel

Tab. 9: Faktoren, die das erosive Potenzial von Getränken und Nahrungsmitteln beeinflussen⁷¹.

Die Art der Aufnahme der erosiven Nahrungsmittel oder Getränke (schluckweise, saugend, mit oder ohne Trinkhalm) sind von entscheidender Bedeutung für die

Zerstörung der Zahnhartsubstanz. Sie bestimmen nicht nur das Erscheinungsbild der Erosionen, sondern auch die Prophylaxemaßnahmen⁷¹.

Infolge der verminderten Speichelproduktion ist nächtlicher Kontakt der Zähne mit Säuren nicht empfehlenswert, da dies zu massiven erosiven Zahnhartsubstanzdestruktionen führen kann⁷¹.

Die Fluoride nehmen auch eine wichtige Position in der Erosionsvorbeugung an. GANSS et al. wiesen 2001 nach, dass durch regelmäßige Fluoridierungen die Progression von Erosionen auf humanem Schmelz und Dentin in vitro reduziert werden kann. Verschiedene Untersuchungen zeigten, dass eine noch bessere Wirkung der Fluoride erreicht wird, wenn diese direkt vor dem Säureeingriff auf die Zahnhartsubstanz appliziert werden. Durch die Bildung einer protektiven Calciumfluorid-Deckschicht kommt es zu geringeren erosiven Läsionen und dadurch auch zu kleineren Abrasionsdefekten. Ein Schutz vor dem nächtlichen Aufstoßen durch entsprechende vorhergehende Fluoridprophylaxe ist ggf. einfach durchführbar⁷¹. Der Fluoridgehalt eines Getränkes oder Nahrungsmittels scheint je nach Konzentration auch bei Erosionen einen gewissen protektiven Effekt zu haben (Lussi et al., 1993b, 1995; Mahoney et al., 2003)⁷³.

2.6.6.2. Intrinsische Risikofaktoren

Auch Patienten, die einer endogenen Säurebelastung in der Mundhöhle ausgesetzt sind, weisen Erosionen auf⁸⁰. Zu den wichtigsten endogenen Erkrankungen gehören Anorexia und Bulimia nervosa, vergesellschaftet mit häufigem Erbrechen sowie chronische Magen-Darm-Störungen mit gastroösophagealem Reflux. Die Prävalenz von Bulimia nervosa bei 18- bis 35-jährigen Frauen in den westlichen Industrieländern steigt (<5%) (COOPER et al.²⁰). Die meisten Patienten, die an Anorexia nervosa leiden, sind im Alter von 12 bis 20 Jahren. Tendenz in dieser

Altersgruppe steigend (<2%). Das chronische Erbrechen führt häufig zu Erosionen im Bereich der okklusalen und oralen Zahnoberflächen der Oberkieferzähne, insbesondere im Bereich der Inzisiven^{71 85 88}.

Gastroösophagealer Reflux mit Regurgitation während des Schlafes kann auch zu gravierenden erosiven Läsionen führen. Diese Patienten bemerken ihr Leiden oft erst, wenn thermosensible Zähne aufgrund fortgeschrittener Erosionen vorhanden sind⁷¹.

Ein weiterer, sehr wichtiger intrinsischer Faktor ist der Speichel. Er schützt die Zähne durch Säureverdünnung, Säureabbau, Säureneutralisation, Verminderung der Schmelzauflösung durch das Vorhandensein von Calcium- und Phosphationen im Speichel, Remineralisation und Pellikelbildung¹⁰⁸. Die individuellen Speicheldrüsenfunktionen sowie die chemischen Eigenschaften der Säure bestimmen das Ausmaß der Stimulation der Speicheldrüsen. Die in vielen Fruchtsäften und Nahrungsmitteln vorhandene Zitronensäure verstärkt die Speichelproduktion⁷¹. Mehrere Studien haben die Bedeutung des Speichels für den Abbau und die Neutralisation von Säuren sowie Remineralisation auf der Zahnoberfläche bestätigt^{55 67, 73, 74, 106}.

Ausgeprägte Erosionen durch Säureeinwirkung sind häufig bei Personen mit eingeschränkter Speichelfließrate oder reduzierter Pufferkapazität des Speichels zu beobachten. Die unterschiedliche Säureneutralisation auf verschiedenen Zahnoberflächen ist ein weiterer Grund für die typische Verteilung der endogen verursachten Erosionen¹⁴. MILLWARD und Mitarbeiter⁷⁷ untersuchten 1997 den pH-Wert auf der Zahnoberfläche bei gesunden Patienten nach der Konsumation von 1 %-iger Zitronensäure. Sie stellten fest, dass an den Palatinalflächen der zentralen OK-Inzisiven 2 Minuten, an den 1. Molaren im OK sogar 4–5 Minuten vergingen, bis sich der pH-Wert erholt hatte. Patienten mit aktiven Erosionen und normalen

Speichelwerten zeigen eine deutlich längere pH-Erniedrigung im Bereich der OK-Inzisiven als Patienten ohne Erosionen. Diese Unterschiede dürften auf die Anatomie der Zähne und der Weichgewebe, welche die Haftung und Neutralisation von Säuren auf den Zahnoberflächen beeinflussen, zurückzuführen sein. Auch die Bewegungen von Wange, Lippen und Zunge sowie die Art und Weise der Säureeinnahme dürften eine Rolle spielen. Eine unterschiedlich ausgeprägte Pellikelbildung im Bereich des Zahnbogens könnte für die unterschiedliche Verteilung der Erosionen verantwortlich sein (AMAECCHI et al.⁶). Zähne mit dicker Pellikelbildung (UK-Frontzähne lingual, UK-Seitenzähne lingual) wiesen eine geringere Erosionsbildung, Zähne mit dünner Pellikelbildung (OK-Frontzähne palatinal) eine hohe Erosionsbildung auf. Andere Studien zeigten die größten Vorkommenshäufigkeiten der Erosionen im Bereich der palatinalen Zahnoberflächen⁸ oder im Bereich der okklusalen Zahnoberflächen^{3,71}.

Zu einer Reduktion der Speichelsekretion führen sowohl Radiotherapie im Nacken-Schädel-Bereich als auch verschiedene Medikamente. Dazu gehören Tranquilizer, Anticholinergika, Antihistaminika, Antiemetika und Antiparkinsonpräparate. Es ist zu beachten, dass längere und häufige Zahnkontakte von Medikamenten mit niedrigem pH-Wert Erosionen selber direkt verursachen oder zumindest beschleunigen können⁷¹.

Die früher oft vorgekommenen berufsbedingten Erosionen sind heute selten. Es wurden vor allem Fälle von Spitzensportlern/-innen beschrieben, die durch mehrstündiges Training in chloriertem Wasser mit unter Umständen schlecht eingestelltem pH-Wert oder durch Auflegen von Zitronenschnitzeln in der Umschlagfalte ausgeprägte Erosionen entwickelten. Isotonische Sportgetränke sind oft sauer und untersättigt bezüglich HAP oder FAP und können zu Erosionen bei Sportlern führen⁷¹.

Tabelle 10 gibt eine Übersicht der Patientenfaktoren, die eine Rolle bei der Entstehung der Erosionen spielen.

<ul style="list-style-type: none">• Ess- und Trinkgewohnheiten
<ul style="list-style-type: none">• Zahnhartsubstanz (z. B. Fluoridgehalt als FHAP oder CaF₂-artiges Material)
<ul style="list-style-type: none">• Speichel: Fließrate, Zusammensetzung, Pufferkapazität; Stimulationskapazität: Säureclearance; Pellikelbildung: Diffusionsbarriere für Säure.
<ul style="list-style-type: none">• Magen-Darm-Trakt-Probleme (Reflux, Anorexie, Bulimie)
<ul style="list-style-type: none">• Medikamentenkonsum
<ul style="list-style-type: none">• Berufsbedingte Säureeinwirkung
<ul style="list-style-type: none">• Zusätzliche mechanische Belastung: (para-)funktionelle Kontakte zwischen Zähnen, Weichgeweben (Wange, Zunge etc.)/Zähnen
<ul style="list-style-type: none">• Mundhygienegewohnheiten

Tab. 10: Erosive endogene Risikofaktoren⁷¹.

3. Problemstellung

Es werden immer häufiger erosive Schäden auf den Zahnhartsubstanzen diagnostiziert. Das ist ein Phänomen, das lange im Schatten des größten Risikofaktors Karies stand.

Auch die erosive Zahnschmelzerstörung ist ein multifaktorielles Geschehen. So begünstigen saure Nahrungsmittel, ein niedriger pH-Wert oder ein hoher Anteil an titrierbarer Säure ihre Ausbildung. Zu diesen Nahrungsmitteln gehören vor allem die sauren Getränke und die Fruchtsäfte, deren pH-Wert üblicherweise im Bereich von pH 2,4 bis 3,7 liegt. Das sind Werte, die weit unter dem kritischen pH-Wert 5,5 liegen. Die pH-Wert-Absenkung führt zu einer Untersättigung in Bezug auf die verschiedenen Apatitformen des Zahnes und unterstützt damit das Herauslösen von den Zahnmineralien Calcium und Phosphat¹¹.

Der fortgeschrittene erosive Zahnhartsubstanzverlust ist weitgehend irreversibel. Es wird ein flächenhafter Schmelz- und Dentinverlust an der Zahnoberfläche beobachtet. In der primären Phase wird die oberste Schmelzschicht durch die Säure der Nahrungsmittel erweicht. Diese Fläche ähnelt den initialen Kariesläsionen, die eine scheinbar nahezu vollständig erhaltene Oberfläche mit einer darunterliegenden erhöhten Porosität aufweisen. In diesem Stadium sind sie unter günstigen Bedingungen noch reparabel¹².

Zu den wichtigsten präventiven Maßnahmen gehören heute die fluoridhaltigen Präparate wie Zahnpasten, Gels und Mundspüllösungen sowie die zuckerfreien oder die xylithaltigen Kaugummis, die den Speichelfluss anregen können. Die Applikation von Fluorid reicht aber nicht aus, um die Zähne vor Substanzverlust zu schützen. Im Rahmen der Differentialdiagnostik ist es zuerst von großer Bedeutung zu klären, ob es sich um eine Attrition, eine Abrasion oder eine endo- oder exogene Erosion handelt. Jeder dieser Defekte erfordert unterschiedliche Vorbeugung und unterschiedliche Therapie.

In jüngerer Zeit haben Klinger und Wiedemann eine calciumhaltige, unterkühlte Salzhydratschmelze entwickelt, die sich in wesentlichen Eigenschaften von herkömmlichen Calciumsalzen unterscheidet. Salzhydratschmelzen bilden eine eigene Stoffklasse. Ihre Bestandteile sind nicht kristallin, sondern amorph und damit frei verfügbar. Eine calciumhaltige Salzhydratschmelze ermöglicht in besonderer Weise die Remineralisation von Zahnschmelz, da darin reagibles Calcium in hoher Konzentration erhalten sein kann.

Aufgabe der vorliegenden Studie war zu untersuchen, ob sich das erosive Potential saurer Getränke mit Hilfe einer calciumhaltigen Salzhydratschmelze modifizieren lässt.

4. Material und Methodik

In der vorliegenden in vitro Studie wurden De- und Remineralisationsversuche an künstlich hergestellten, porösen Hydroxylapatitprobekörpern durchgeführt, die in ihren wesentlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften dem Zahnschmelz einer initialen Läsion weitgehend entsprechen. Die Veränderungen im Mineralgehalt während der Exposition von sauren Flüssigkeiten wurden sowohl gravimetrisch als auch radiographisch mit hoher Genauigkeit reproduzierbar gemessen.

4.1. Testkörper

Die porösen HA-Körper können in der Remineralisationsforschung für standardisierte Untersuchungen über De- und Remineralisation von Zahnschmelz verwendet werden. Durch die Herstellungsweise kann das Porenvolumen gezielt variiert werden. Die homogene Porenverteilung erlaubt eine einfache Beurteilung der räumlichen Verteilung der Präzipitationsvorgänge. Für die Experimente wurden Testkörper aus Hydroxylapatit $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})]$ verwendet (Abb. 21). Als Ausgangsmaterial wurden 0,1450 g Tricalciumphosphatpulver (Firma Budenheim Typ C13 – 0,8) abgewogen und in eine Pressvorrichtung, die mit Aceton gereinigt und mit Graphitpulver beschichtet wurde, um Rückstände zu vermeiden, gefüllt (Abb. 22, Abb. 23). Mit einem Druck von 110-170 kPa wurde das Pulver in der hydraulischen Presse axial zu zylindrischen Grundkörpern gepresst. Anschließend wurden die Testkörper in einen kalten Brennofen gestellt und für 90 min auf 900°C aufgeheizt. So wurden sie zu Hydroxylapatit (HA) gesintert. Erst nach einer 24-stündigen Abkühlungsphase durften sie aus dem Ofen genommen werden.

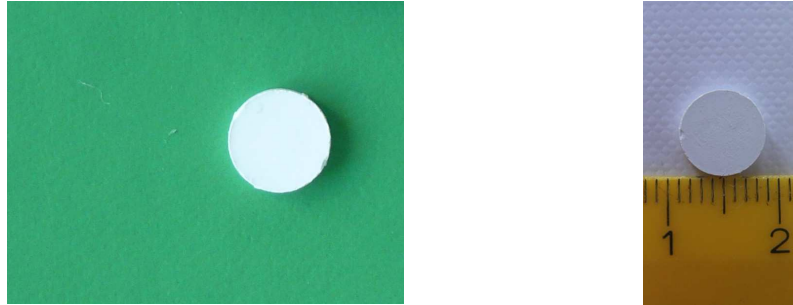


Abb. 22: Probekörper aus Hydroxylapatit.

Zur Bestimmung der Grünkörperdichte wurden die Höhe und der Durchmesser der Testkörpern mittels einer Schieblehre an je vier Stellen gemessen und mit der Analysewaage von Sartorius Typ MC1 Rc 210 P (Abb. 25) das Gewicht bestimmt. Die HA-Sinterkörper besaßen einen Durchmesser von ca. 7,5 mm und eine Dicke von ca. 0,8 mm. Voraussetzung war, dass die Dichte aller fertigen Testkörpern ca. 1,63 – 1,66 g/cm³ (Idealdichte = 1,65g/cm³) betrug. Somit lag die Porosität bei ca. 40% und ähnelt damit weitgehend dem unreifen Schmelz nach dem Zahndurchbruch^{101 102}.



Abb. 23:

Seitenansicht der Pressvorrichtung.



Abb. 24:

Pressvorrichtung von oben.

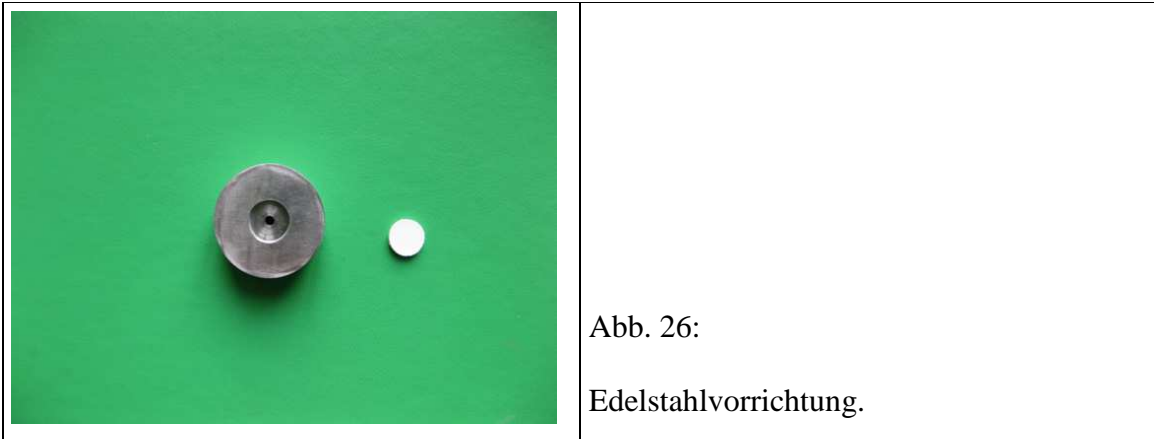


Abb. 25:

Analysewaage von Sartorius Typ MC1 Rc 210 P zur gravimetrischen Bestimmung.

4.1.1. Vorbehandlung der Testkörper

Die Testkörper wurden zuerst unter dem Mikroskop sorgfältig nach Rissen untersucht. Die fehlerfreien wurden dann einseitig vorsichtig unter Wasserspülung mit der Buehler Ecomet III Schleifmaschine und auf 600 Grid Siliziumkarbid - Schleifpapier geschliffen. Hierfür wurde der Probekörper zur besseren Handhabung in einen speziellen Metallzylinder (Edelstahlhalterung, Abb. 26), der genau 0,8 mm tief war, eingebracht.



Dadurch bekam der HA-Körper eine standardisiert gleichmäßig glatte und gerade Oberfläche, die für die Experimente notwendig war. Diese Seite wurde später von der Testlösung umspült.

Die auf diese Weise vorbereiteten Testkörper wurden beidseitig mit einer weichen Zahnbürste und einer fluoridfreien Placebo-Zahnpasta ca. 30 sec. gründlich gereinigt (zahnähnliche Vorbehandlung), mit destilliertem Wasser abgespült und für 15 min in bidest. Wasser gelegt, um in den Poren eventuell vorhandene schnell- und leichtlösliche Anteile entfernen zu können. Danach wurden sie für 15 min bei 100 °C in den Trockenschrank gelegt, um das Wasser aus den Poren vollständig auszutreiben. Die anschließende Abkühlzeit bei Raumtemperatur betrug 30 min. Die ungeschliffenen Seiten der Probenkörper wurde mit Nagellack dünn lackiert.

Um zum Schluss die Probekörper identifizieren zu können, wurden sie sortiert, in entionisiertem Wasser aufbewahrt und durchnummeriert^{92 101 102}.

4.2 Salzhydratschmelze (SHS)

Bislang liegen nur wenige Studien zum Effekt von SHS-Präparaten auf dentale Erosionen vor, die allerdings viel versprechende Hinweise hinsichtlich eines effektiven Erosionsschutzes lieferten⁸⁹.

Der Begriff „anorganische unterkühlte Salzhydratschmelze“ wurde von Peters⁸⁴ und Wiedemann¹⁰² beschrieben. Er beschreibt die Schmelze eines normalerweise bei Raumtemperatur festen kristallinen Schmelzgemisches. Es handelt sich dabei um die geschmolzene Mischung eines bestimmten Salz-Wasser-Verhältnisses, die bei normalen Temperaturen als Schmelze glasartig, somit amorph und nicht kristallin existieren kann. Das bedeutet, dass sich die abgekühlte Schmelze unterhalb ihrer Schmelztemperatur in einem Aggregatzustand befindet, in dem sie sich eigentlich nicht befinden sollte. Wegen ihrer besonderen Eigenschaften bilden diese Salzhydratschmelzen innerhalb der Salz-Wasser-Systeme mit steigender Salzkonzentrationen eine eigenständige Stoffklasse⁹⁸.

Unter „amorphes Material“ versteht man einen Stoff, bei dem die Atome keine geordneten Strukturen, sondern ein unregelmäßiges Muster ausbilden und über keine Fernordnung, sondern lediglich über eine leichte Nahordnung verfügen. Regelmäßig strukturierte Materialien mit Ionenbindung heißen Kristalle.

Bedingung für den amorphen Zustand ist, dass sich die Atome beim Abkühlen einer Schmelze nicht regelmäßig anordnen können, das heißt, die Viskosität muss einen gewissen Wert überschreiten und es darf nicht zur Kristallisation kommen. Glas ist ein typisches amorphes Material. Es ist die amorphe Form von Siliziumdioxid (SiO₂). Eine seiner kristallinen Formen heißt Quarz.

Die wesentlichen Vorteile der Salzhydratschmelze gegenüber den üblicherweise verwendeten Salzen bzw. Salzhydraten sind hierin aufgelistet:

1. Die Ionen der Salzhydratschmelze (SHS) sind frei und dadurch ist sie amorph
2. SHS sind leicht löslich
3. SHS werden homogener verteilt
4. SHS besitzen eine höhere Ionenkonzentration
5. Salzhydratschmelzen sind hochkonzentriert und im Vergleich zu Salzlösungen wasserarm, was bei der Herstellung von Lebensmitteln von großer Bedeutung sein kann¹⁰⁰.

Die einzelnen Schmelzen sind neben dem molaren Anteil an Calcium durch ihre Zusammensetzung bezüglich der Säurereste charakterisiert¹⁰⁰. Die Schmelze, die schon in mehreren Experimenten (Wiedemann, Staebler, Dörr) verwendet wurde, besteht im

Original im Wesentlichen aus den Edukten Calciumlactat, Calciumgluconat, Citronensäure und Milchsäure.

Die positiven Eigenschaften der in dieser in vitro Studie verwendeten Salzhydratschmelze wurden durch Wiedemann (2007), Staebler (2008) und Dörr (2009) in früheren in vitro und in situ Untersuchungen getestet und nachgewiesen. Sie funktioniert nach dem Prinzip der forcierten dynamischen Remineralisation und soll die erosive Zerstörung des Zahnschmelzes durch ihre hohe Konzentration an reagiblen Ionen, insbesondere Calcium, verhindern.

4.3. Durchführung der Versuche

4.3.1. NaF-Lösung

Um die Verhältnisse in der Mundhöhle annähernd zu imitieren, wurden die fluoridfreien Probekörper vor Beginn der Messungen 30 min mit einer NaF-Lösung mit 5 ppm Fluorid gespült. Dies war notwendig, da in der Remineralisationslösung kein Fluorid enthalten war, um ein vorzeitiges Ausfallen des Calciums zu CaF_2 zu unterbinden.

4.3.2. REM-Lösung

Die Remineralisationslösung (abgekürzt REM) ist eine künstliche Speichellösung, die den menschlichen Speichel nachahmt. Hierfür wurden Calcium- und Phosphationen im Verhältnis 1:1 (1 mmol Calcium zu 1 mmol Phosphat) verwendet. Fluorid war nicht enthalten. Dadurch gilt die Bezeichnung für die REM-Lösung $1/1/0 \equiv (\text{Ca}/\text{PO}_4/\text{F})$.

Für einen 2 Liter REM-Lösung-Ansatz wurden folgende Produkte zusammengemischt:

- 5 ml einer 200 mmolaren NaH_2PO_4 -Lösung werden mit
- 0,3984 g Calcium-Laktat und
- 1,96g Natrium-Acetat (als Puffer) zusammengemischt und mit
- 25 %-iger Milchsäure auf
- pH = 6,5 bei 30°C eingestellt.

Sobald alle wichtigen Inhaltsstoffe zusammengefügt und unter Einwirkung eines Magnetrührers gelöst waren, wurde der 2000 ml Kolben mit bidestilliertem Wasser aufgefüllt^{25 100}.

4.4. Testgetränke und pH-Werte

Ziel der Studie war es zum einen, die demineralisierende Wirkung handelsüblicher säurehaltiger Getränke nachzuweisen und weiterhin zu versuchen, diese durch das Beimischen der unterkühlten Salzhydratschmelze zu reduzieren.

4.4.1. Getränke

Die getesteten Getränke wurden in drei Gruppen aufgeteilt:

- Gruppe I: pure Getränke
- Gruppe II: Getränke mit verschiedener Calciumgehalt
- Gruppe III: Kontrollgruppe der Getränken mit unschädlichem pH-Wert → Wasser, Milch, Kaffee

Die unterschiedlichen Konzentrationen an Calcium (0,03 mol; 0,5 mol; 0,1 mol oder 0,2 mol), die den säurehaltigen Getränken später beigemischt wurde, konnte dank der Salzhydratschmelze problemlos zugefügt werden, ohne den Geschmack auffällig zu verändern.

Die Zugabe der mit Calcium angereicherten SHS zu den Testlösungen erfolgte in Form von amorphem Pulver¹⁰⁰. Die eingefrorene SHS wurde mit einer Küchenmaschine (Moulinette) gemahlen, um ihre Zugabe zu erleichtern und die Löslichkeit zu beschleunigen.

4.4.2. pH-Werte der Getränke

Es wurden häufig getrunzene Softdrinks wie Coca-Cola, Orangen- und Apfelsaft, Bionade, Eistee, Redbull sowie Milch, Kaffee und Wasser untersucht. Die pH-Werte der Testlösungen in purem und in angereichertem Zustand sowie Säureart sind der Tabelle 11 zu entnehmen.

Getränk	pH pur	pH + 0,2 mol SHS	Säure
Coca-Cola	2,44	3,82	Phosphorsäure
Orangensaft	3,67	3,77	Citronen- /Apfelsäure
Apfelsaft	3,56	3,81	Apfelsäure
Bionade	3,19	3,8 – 4,26	Kohlensäure / Gluconsäure ⁴⁰
Eistee	3,47	3,92	Citronen- /Apfelsäure
Redbull	3,35	-	Zitronensäure
Milch	6,58	-	Milchsäure
Kaffee	5,90	-	Kaffeensäure
Wasser	7,00	-	-

Tab. 11: pH-Werte der getesteten Getränke und Säureart.

Nach Angaben der Coca-Cola Company enthält das Cola-Getränk 17 mg/l Phosphorsäure⁴¹.

Alle Lösungen wurden für jeden Versuch neu angesetzt, im Exsikkator entgast und auf 37°C im Wasserbad aufgewärmt.

Die pH-Werte wurden mit dem pH-Meter (Einstab-Wasserstoffelektrode) mit $\pm 0,05$ pH Meßgenauigkeit gemessen. Dieser pH-Meter wurde jeden Tag mit den Eichlösungen Acetat-Puffer mit pH 4,66 und Phosphat-Puffer mit pH 6,88 kontrolliert und nach Bedarf neu justiert.

4.5. Versuchsaufbau

Für jeden Versuch wurde jeweils ein neuer HA-Probekörper verwendet. Davor wurde sein Gewicht mit einer Analysewaage mit $\pm 0,02$ mg Messgenauigkeit (s. Abb. 25) bestimmt (Null-Wert).

Die Proben wurden in eine Durchflussküvette montiert. Diese besaß einen Durchmesser von 10 mm und Höhe von 3 mm. Durch die Ein- und Ausflussröhren kann das Versuchsmedium blasenfrei die Küvette durchströmen und den HA-Körper umspülen. Die Röntgenstrahlen durchdringen genau in der Mitte die Küvette und den Probekörper durch die Ein- und Austrittsfenster, die aus ca. 0,15 mm dicken Plexiglasscheiben bestehen (Abb. 27).

Alle Testlösungen wurden vor dem Versuch in 250 ml-Bechergläser umgefüllt, im Exsikkator entgast und auf 37°C im Wasserbad aufgewärmt. Danach wurde das Becherglas mit der entsprechenden Flüssigkeit an einem Ständer in einem Wasserbehälter befestigt. Die Temperatur des Wasser im Behälter und somit auch die Testlösungen wurde über die gesamte Testzeit (640 min) konstant auf 37°C gehalten. Das Versuchspräparat und die Küvette wurden dann an das Schlauchsystem der 6-Roll-Druck-Pumpe angeschlossen. Dadurch wurde die Flüssigkeit vom Becherglas abgesaugt, durch die Küvette weitergeleitet und wieder ins Glas zurück gepumpt (5 ml/min). Die Küvette mit dem Probekörper (Absorber im Messstrahl) wurden in der Blende des Röntgenstrahls (Bremspektrum einer W-Röhre mit 18 bis 20 kV Anodenspannung) gebracht. Als Referenzkörper dienen Aluminiumplättchen mit annähernd gleicher Extinktion (Absorber im Referenzstrahl). Die durchgelassene Strahlung wurde mit zwei Photodioden alle 2 min gemessen^{36 50 92}.

Die online-Messung konnte gestartet werden. Die Messwerte wurden ausgewertet und grafisch dargestellt. Online besagt, dass auf dem Computermonitor die Zunahme der Massenbelegung des Probenkörpers ebenso wie eine Abnahme der Massenbelegung direkt verfolgt werden konnte. Die Veränderungen der Massenbelegung konnten nur auf

mineralische Einlagerungen bzw. Auflösungen zurückzuführen sein, da organische Ablagerungen vom Röntgenstrahl nicht erfasst werden konnten.

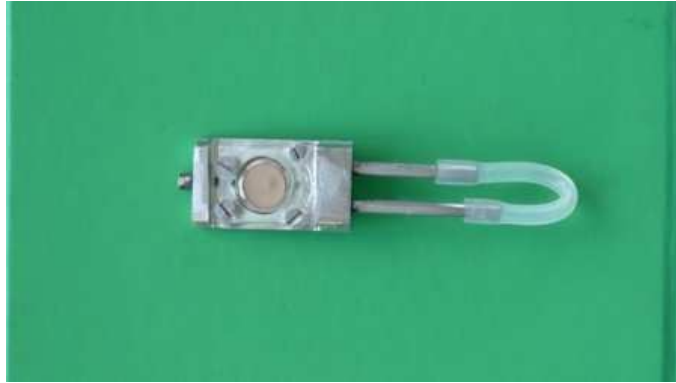


Abb. 27: Durchflussküvette

Jeder Versuch begann mit einer 30-minütigen Anfangsphase und verlief in vier nacheinander abwechselnde Zyklen. Die Umspülzeit jedes Zyklus dauerte genau 120 Minuten. Die Wechselphase nahm 2 min in Anspruch, in der das System mit der neuen Lösung durchspült wurde.

Wie bereits ausgeführt, wurde der Probekörper in der Anfangsphase mit einer 5 ppm NaF-Lösung umspült. Danach folgte der erste Zyklus, in dem das Testgetränk in purer oder in mit SHS angereicherter Form durch das System lief. Anschließend wurde die Küvette mit dem künstlichen Speichel durchspült, um die dynamische Remineralisation im Munde nachzustellen. Diese zwei Perioden wurden je zweimal wiederholt. Der letzte vierte Zyklus (der zweite REM-Durchlauf) entsprach der Nachtruhe, deswegen konnte man diese Periode über längere Zeit laufen lassen. Es war sehr wichtig, dass die Lösungen blasenfrei durchliefen, damit sie die Ergebnisse nicht verfälschen konnten (s. Grafiken 8, 10, 12, 22).

Die Messungen wurden bei einer Stromstärke von 10 mA und einer Stromspannung von 17 kV durchgeführt.

4.6. Messmethoden und Bestimmung der Mineralbilanz

4.6.1. Biometrie

Zum Nachweis der Mineralaustauschvorgänge bei in vitro Mineralisationsexperimenten müssen in den Proben sehr geringe Änderungen an Schmelzmineral quantitativ nachgewiesen werden. Als präzise Messmethoden kommen u. a. die Wägung und die Röntgenradiographie in Frage^{101 102}.

Mit der Wägung sollte die absolute Gewichtsveränderung des Probenkörpers nach Umspülen mit marktüblichen bzw. mit Calcium angereicherten säurehaltigen Getränken gemessen werden. Mit Hilfe der Radiographie soll anschließend die Mineralbilanz in den Probenkörpern ermittelt werden. Die radiographische Messung kann direkt in Bezug zur Re- bzw. Demineralisierung des Zahnschmelzes gesetzt werden¹⁰¹.

Wegen des variablen Wassergehaltes von Schmelzproben ist für originalen Zahnschmelz die gravimetrische Methode relativ ungenau. Für Zahnschmelz ist die Bestimmung der Absorption von weichen Röntgenstrahlen die Methode der Wahl. Sie hat als "longitudinale" und "transversale" Radiographie Eingang in die Kariesforschung gefunden¹⁰¹. Künstlicher Zahnschmelz allerdings ist hierbei weniger kritisch zu betrachten, da er genormt hergestellt werden kann.

Für die physikalische Untersuchung von De- und Remineralisationsänderungen in Hydroxylapatitproben mit Hilfe von Röntgenabsorptionsmessungen wurde eine dafür geeignete Apparatur entwickelt.

Mit der Hilfe dieser radiographischen Messmethode können Mineraleinlagerungen und Mineralverluste in natürlichen und künstlichen Schmelzproben aus Hydroxylapatit selbst online gemessen werden. Da das organische Material im Vergleich zum Mineral röntgentransluzent ist, lässt sich aus dem Unterschied zwischen den beiden Werten der Anteil an organischem Mineral an der Gewichtszunahme abschätzen. Der absolute Fehler ist kleiner als $\pm 6,4 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Das entspricht etwa einer Schichtdicke von 20 nm

Apatit. Für eine 100 µm dicke Probe bedeutet das eine relative Abweichung von etwa 2×10^{-5} ¹⁰¹.

Die Messapparatur (das Röntgengerät) hat zwei Kanäle, den Mess- und Referenzkanal (Abb. 28). Das bedeutet, der primäre Röntgenstrahl wird in zwei Teilstrahlen (Mess- und Referenzstrahl) aufgetrennt und der Brennfleck der Röntgenröhre wird von zwei Detektoren unter dem gleichen Raumwinkel beobachtet. Durch diese Maßnahmen können die Intensitätsschwankungen der Primärstrahlung eliminiert werden.

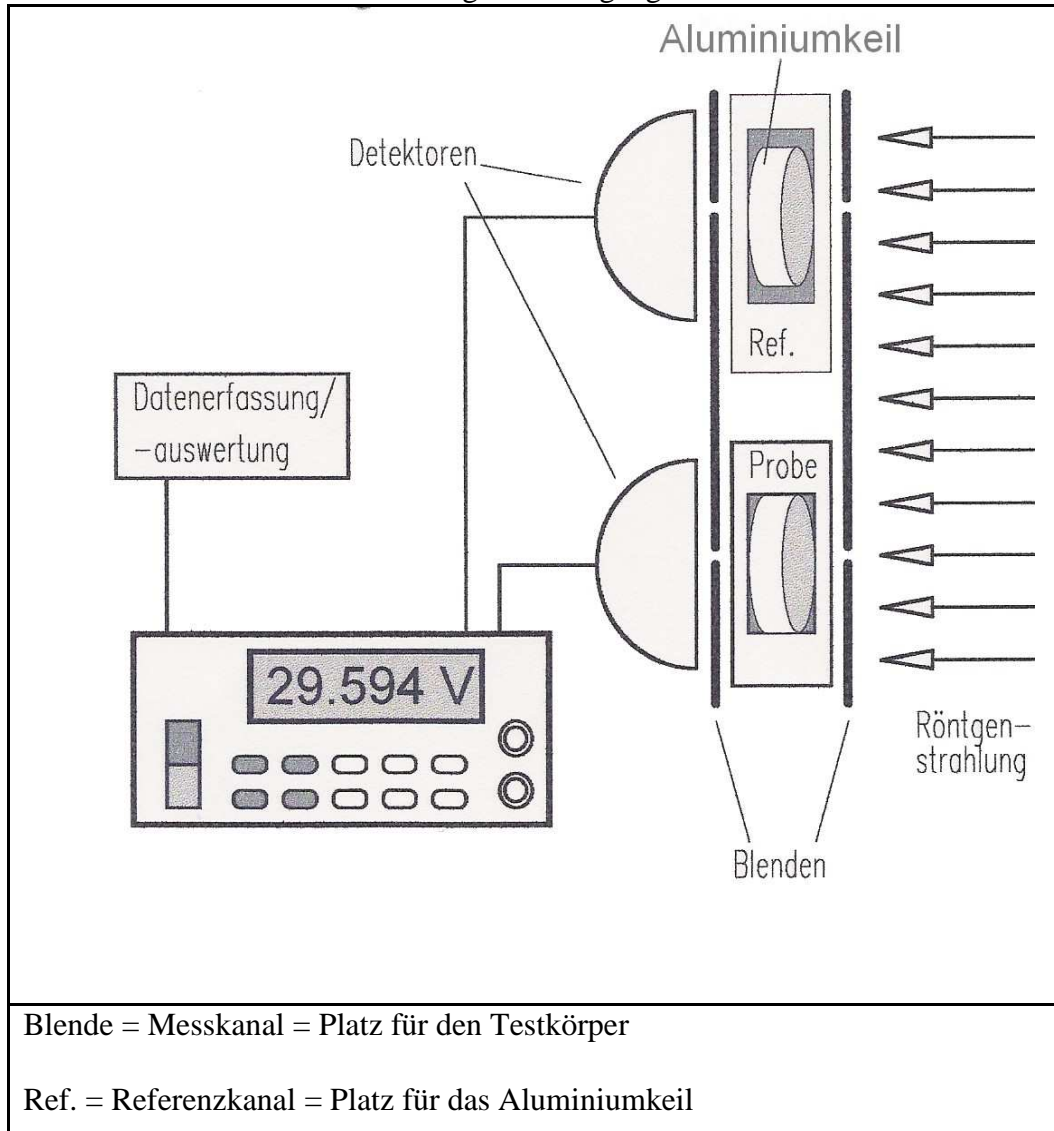
Der Röntgenstrahl des Referenzkanals wird mit Aluminiumplättchen gebremst. Mit dem Signal des Referenzstrahls werden die Schwankungen und das Driften der Röntgenintensität gemessen und zur Korrektur des Signals im Messstrahl, also des Strahls, in dem die Probe liegt, verwendet. Für optimale Genauigkeit wurde zu Beginn der Messung die Intensität des Röntgenlichts am Mess- und Referenzdetektor auf ungefähr 6,5 eingestellt. Das ist eine willkürlich ausgewählte Einheit und bei unseren Experimenten entsprach sie dem Nullpunkt. Der Unterschied zwischen Mess- und Referenzkanal sollte den Wert von 0,8 nicht überschreiten. Um das zu erreichen, wurden in einen Schieber im Referenzstrahl Aluminiumplättchen geeigneter Dicke eingelegt¹⁰¹:

1. ein Aluminiumplättchen \equiv 20 µm
2. 20 µm \equiv 1V
3. Aluminium ist für die Lichtdurchlässigkeit von großer Bedeutung.

Aluminium als Standardäquivalent hat den Vorteil, dass es in seinen röntgenologischen Eigenschaften mit eingelagertem Calciumphosphat verrechnet werden kann und damit ein Rückschluss auf die Mineralmenge möglich ist²⁵.

Mess- und Referenzsignal wurden mit einem zwei Kanal 18-Bit AD-Wandler (s. Abb. 28) digitalisiert. 255 Messwerte wurden pro Kanal in 90 sec aufgenommen und zu einem Rechner übertragen. Aus diesen Werten wurden Mittelwert und Standardabweichung berechnet und in das Arbeitsblatt einer Tabellenkalkulation übertragen¹⁰¹.

Abb. 28: Schematische Darstellung des Röntengerätes.

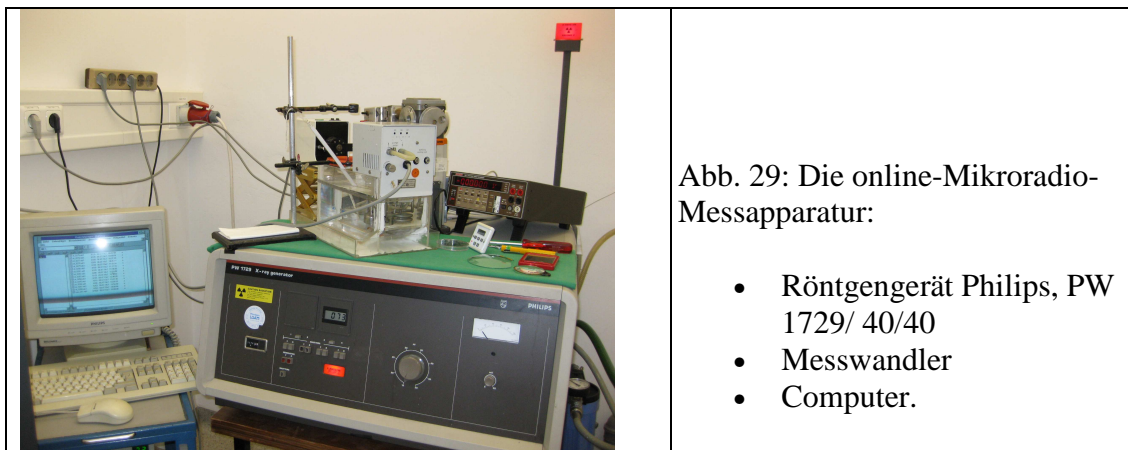


Aus den bereinigten Signalen - Berücksichtigung von Offset und Verstärkungsfaktor – wurde der Unterschied der Extinktion zwischen Mess- und Referenzkanal berechnet. Aus dem zeitlichen Verlauf dieser Größe berechnete sich die Änderung der Massenbelegung $\Delta (\mu_{\text{lin}} \cdot d) = \Delta \ln (U_{\text{mess}}/U_{\text{ref}})$. In dieser Beziehung steht μ_{lin} für den effektiven linearen Extinktionskoeffizient der Probe mit der Dicke d . Der effektive lineare Extinktionskoeffizient hängt von der Anregungsspannung und der Vorfilterung der Strahlung ab (Aufhärtung des Bremsspektrums)¹⁰¹.

Da die Messungen computergestützt durchgeführt wurden, ließen sich die erforderlichen Berechnungen für die Auswertung bequem und unmittelbar während der Messungen durchführen, so dass die Mineralbilanz der Proben bereits während der Messung auf dem Bildschirm sichtbar gemacht werden konnten. In Abb. 29 ist der Aufbau der Messapparatur dargestellt.

4.6.2. Allgemeine Beschreibung der Grafiken

Durch die computergestützte Durchführung der Experimente ließen sich die Auswertungen der Proben bequem und unmittelbar während der Messungen auf dem Bildschirm ablesen (Abb. 29).

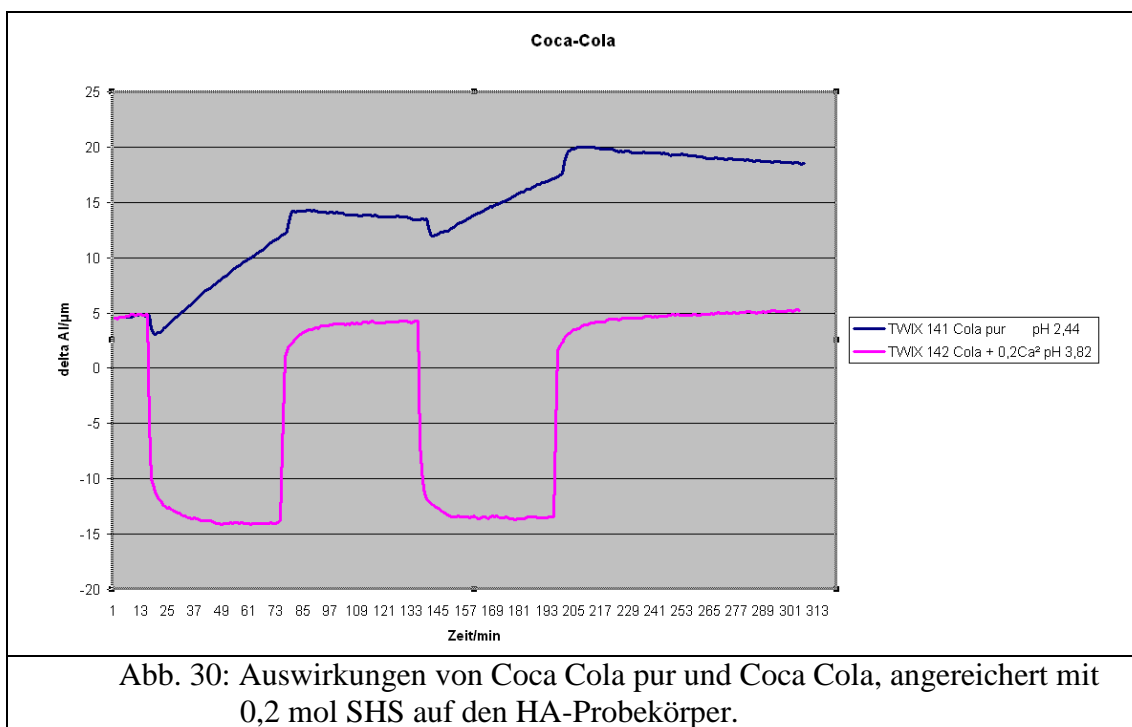


Die Grafik auf der Abb. 30 zeigt die grundsätzliche Verwirklichung der forcierten Remineralisation von künstlichem Zahnschmelz. Ihr Verlauf wird in diesem Abschnitt genau beschrieben.

Auf der X-Achse der Messkurve ist die Zeit in Minuten aufgetragen. Die Y-Achse stellt die Änderung der Extinktion beim Durchgang des Röntgenstrahls durch die Küvette dar. Die Extinktion wurde umgerechnet in Aluminiumäquivalente, also in Schichtdicken von Aluminium, und setzt sich aus den folgenden Anteilen zusammen:

1. Extinktion in der Flüssigkeitsschicht: zwischen Austrittsfenster und Probe. Die verschiedene Medien enthalten unterschiedliche Mengen an gelösten Stoffen und absorbieren deshalb unterschiedlich stark.
2. Extinktion in der Probe: Diese wird durch die abgeschiedenen Feststoffe, z. B. das abgeschiedene Mineral und durch die in die Poren eingedrungene Lösung beeinflusst.

Im Diagramm bedeutet ein Ausschlag nach unten eine Erhöhung der Absorption im Messstrahl, ein Ausschlag nach oben bedeutet umgekehrt eine Verringerung der Massenbelegung im Messstrahl^{92 101}.



Die Abb. 30 präsentiert den Kurvenverlauf der Testversuche TWIX_141 und TWIX_142. In TWIX_141 wurde Coca Cola pur und im TWIX_142 dasselbe Getränk, dem 0,2 mol Salzhydratschmelze beigemischt waren, gemessen. Die Anfangsphase für beide Messkurven ist die Umspülung mit der 5 ppm-haltigen NaF-Lösung. Sie dauerte stets 30 min. Die Messkurve verläuft nahezu waagrecht, was auf eine neutrale Mineralbilanz hinweist.

Der Anfangsphase folgt eine zweiminütige Wechselphase, in der die NaF-Lösung mit dem Testgetränk ausgetauscht wurde. Genau diese Zeit braucht jede Flüssigkeit, um das gesamte System aufzufüllen. Danach beginnt der erste Zyklus.

Im Zyklus I umspült das getestete Getränk den HA-Körper in der Küvette 120 Minuten lang. Der Kurvenverlauf war für jede Testgruppe unterschiedlich.

Testgruppe I war die Gruppe der reinen Softdrinks. Dazu gehört auch TWIX_141 (Coca-Cola pur). Charakteristisch für diese Periode ist die schlagartig nach oben verlaufende Kurve. Die geringere Röntgenopazität der Lösung ist zu beobachten. Es handelt sich um einen starken Mineralverlust, was der Demineralisation entspricht.

Anders dagegen verläuft die Kurve bei den Testlösungen der Gruppe II und Gruppe III (s. TWIX_142). Es ist über die ganze Messzeit von 120 Minuten der kontinuierlicher Verlauf nach unten zu beobachten. Dieser steiler Abfall resultiert aus der calciumangereicherten röntgenoptisch dichteren Lösung. Während der Testzeit lagert sich Calcium aus der Lösung in die Probe ein, was die Röntgenopazität im Messstrahl weiter erhöhte.

Im Zyklus II wurde die Testlösung durch den künstlichen Speichel (REM 1/1/0) ersetzt. Nach einem Sprung nach oben, der ebenfalls durch die Veränderung des Calciumgehaltes der Lösung hervorgerufen war, verlief die Messkurve relativ gerade mit einer leichten Neigung nach unten. Hier zeigt sich die Remineralisation, bewirkt durch das Calcium aus der SHS und dem Phosphat aus dem künstlichen Speichel sowie den Porenwänden des HA¹⁰¹.

5. Ergebnisse

In der vorgelegten in vitro Studie wurde die remineralisierende Wirkung einer innovativen calciumhaltigen Salzhydratschmelze getestet und nachgewiesen. Unterschiedliche Konzentrationen dieser Schmelze wurde handelsüblichen säurehaltigen Softdrinks wie Coca Cola, Bionade, Eistee, Apfel- und Orangensaft und Redbull in Pulverform beigemischt. Wegen der Eigenschaften der SHS wurde erwartet, dass das erosive Potential dieser Getränken durch die Beigabe reduziert wird.

Es wurden insgesamt 49 Versuche an standardisierten porösen Probekörpern aus Hydroxylapatit, der anorganischen Grundsubstanz des Zahnschmelzes, durchgeführt. Getestet wurden alle oben aufgelisteten Getränke in purer und in modifizierter Form. Alle Versuche wurden unter denselben Bedingungen durchgeführt. Die Getränke wurden in drei Gruppen aufgeteilt:

Gruppe I	→ Kontrollgruppe	→ pure säurehaltige Getränke
Gruppe II	→ Testgruppe	→ mit calciumhaltiger Salzhydrat- schmelze angereicherte Getränke
Gruppe III	→ Vergleichsgruppe	→ Getränke mit fast neutralem pH-Wert

Die Inkubation der Probekörper mit den puren säurehaltigen Softdrinks der Gruppe I führte zu einem Substanzverlust. Im Vergleich dazu wurde die Demineralisation bei den Testgetränken deutlich verringert. In den meisten Fällen wurde sogar ein Mineraleinbau beobachtet. Der pH-Wert der mit Salzhydratschmelze angereicherten Getränke wurde nur gering erhöht und lag weiterhin unter dem kritischen pH-Wert von 5,5. An diesem Punkt greift die forcierte dynamische Remineralisation ein.

Um den Effekt der forcierten dynamischen Remineralisation besser beurteilen zu können, wurden die Ergebnisse der Testgruppe denen der Kontroll- und der Vergleichs-

gruppe gegenübergestellt. In der Vergleichsgruppe wurden Milch (pH 6,58), Kaffee (pH 5,9) und Wasser (pH 7) unter gleichen Versuchsbedingungen getestet. Der niedrigste pH-Wert lag mit 5,9 leicht über den kritischen pH-Wert von 5,5. Die erwartete remineralisierende Wirkung dieser Getränke konnte trotzdem eindeutig beobachtet werden. Diese Getränke besitzen eine natürliche remineralisierende Wirkung, aufgrund ihres Calciumgehaltes (H-Milch 30 mmol, Würzburger Leitungswasser 6 mmol, Kaffee durch das gelöste Calcium im Wasser).

Bei der forcierten dynamischen Remineralisation dringen die Calciumionen vermehrt (forciert) in die Schmelzläsionen ein. Durch den häufigen pH-Wechsel von sauer auf neutral (dynamisch), bedingt durch den neutralisierenden Speichel (im vorliegende Falle durch den künstlichen Speichel = REM), übertragen die Protonen ihre Ladungsenergie sehr flink und der pH-Wert steigt an. In diesem Milieu ist schnell die pH-Wert abhängige Sättigungskonzentration von Calciumphosphat überschritten und ein solides Calciumphosphat fällt aus. Daher werden die Läsionen auch in der Tiefe remineralisiert und die Bildung eines Apatitdeckels über der Läsion sowie die Entstehung der „White Spots“ verhindert.

Aus den Ergebnissen konnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass es möglich ist, mit Hilfe der getesteten Salzhydratschmelze erosive Getränke so zu modifizieren, dass ihre demineralisierenden, erosiven Eigenschaften neutralisiert und teilweise sogar im Sinne einer Remineralisation umgekehrt wurden. Es wurde stets eine reproduzierbare Mineraleinlagerung bei den Testgetränken beobachtet. Mit Hilfe der SHS scheint es somit zumindest in vitro möglich zu sein, die Zahnschmelz-Erosionen durch saure Getränke zu reduzieren.

5.1. Auswertung der Grafiken

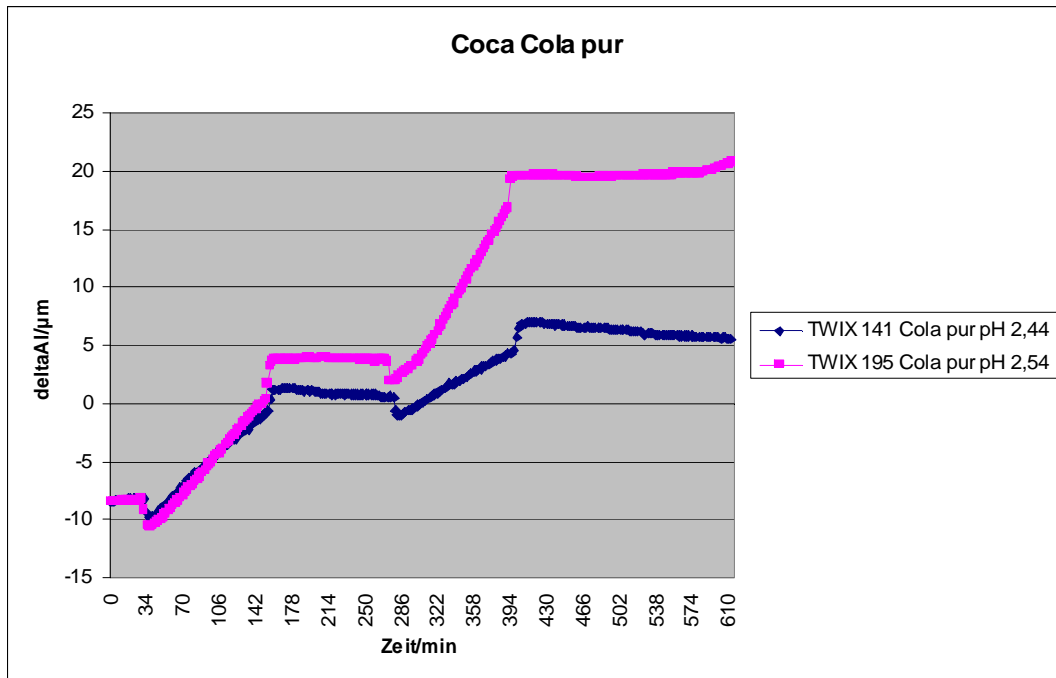
Die Auswertung der im Folgenden ausgeführten Grafiken Versuche wurde grundsätzlich nach folgendem Schema durchgeführt. Nach jeder Messung wurden die Punkte Diff. 1 und Diff. 2 festgelegt. Diff 1 entsprach dem Messwert in der 210. Minute (Mittelwert aus drei Werten vor und nach dem Hauptwert). In der 450. Minute wurde Diff. 2 festgelegt. Die Summe aus beiden Punkten ergab Diff. ges. Je größer der Unterschied zwischen Diff. 1 und Diff. ges. war, desto größer war auch die Mineralverlust. Die Röntgenabsorption durch die Massebelegung in den Probekörpern nahm ab und die Messkurve lief schlagartig nach oben. Anders dagegen verliefen die Messkurven, wenn die Diff. 1- und Diff. ges.-Werte sich nur minimal voneinander unterschieden. Es fand keine Demineralisation statt.

Coca Cola

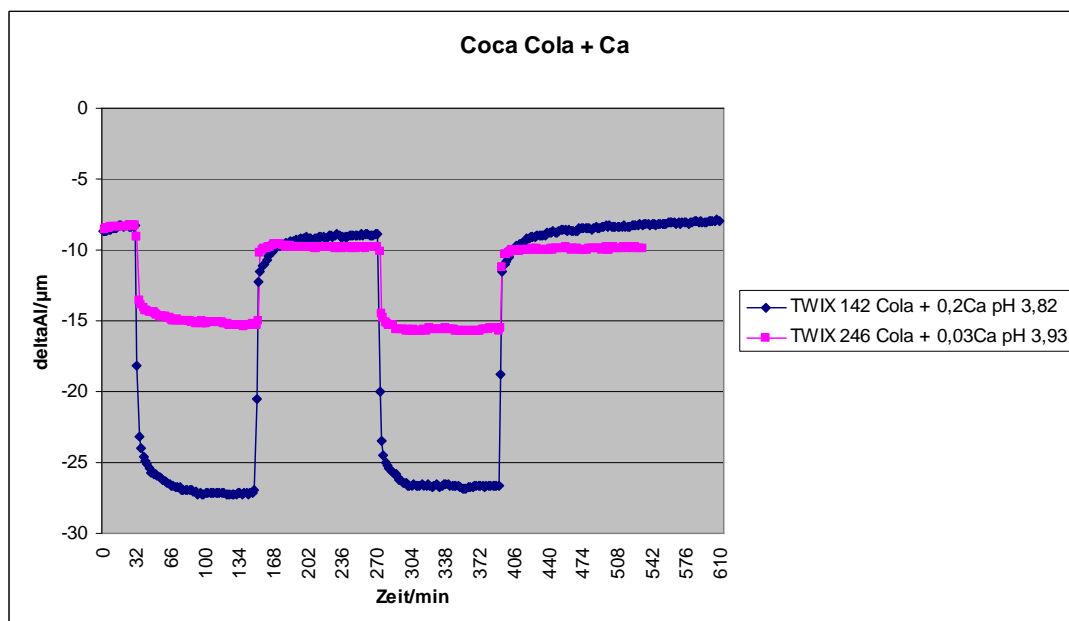
Zunächst eine Übersicht über die getesteten originalen und modifizierten Cola-Produkte. Auf den folgenden Grafiken sind die Bestandteile jeweils vermerkt.

TWIX-Nr.	20 min NaF	Produkt	pH-Wert	Diff 1	Diff 2	Diff ges.
141	x	Coca-Cola pur	2,44	-9,104	-5,742	-14,846
195	x	Coca-Cola pur	2,54	-12,208	-15,602	-27,810
139	x	Coca-Cola mit REM verd 1:5	4,39	0,734	-0,588	0,146
142	x	Coca-Cola + 0,2 mol Ca-SHS	3,82	0,883	-0,458	0,425
145	x	Cola mit NaOH auf pH 3,83 eingestellt	3,83	1,232	0,233	1,465
180	x	Cola pur (15 min) + REM (30 min)	2,49	-	-	-5,821
181	x	Cola + 0,2mol Ca-SHS (15 min) + REM (30 min)	3,87	-	-	1,776
246	x	Coca-Cola + 0,03 mol Ca-SHS	3,93	1562	0,101	1,663
247	x	Coca-Cola + 0,03 mol Ca-SHS	3,93	2,055	-0,251	1,811

Grafik 1: Der steile Anstieg der Kurven bedeutet eine heftige Mineralabnahme durch Coca Cola pur.

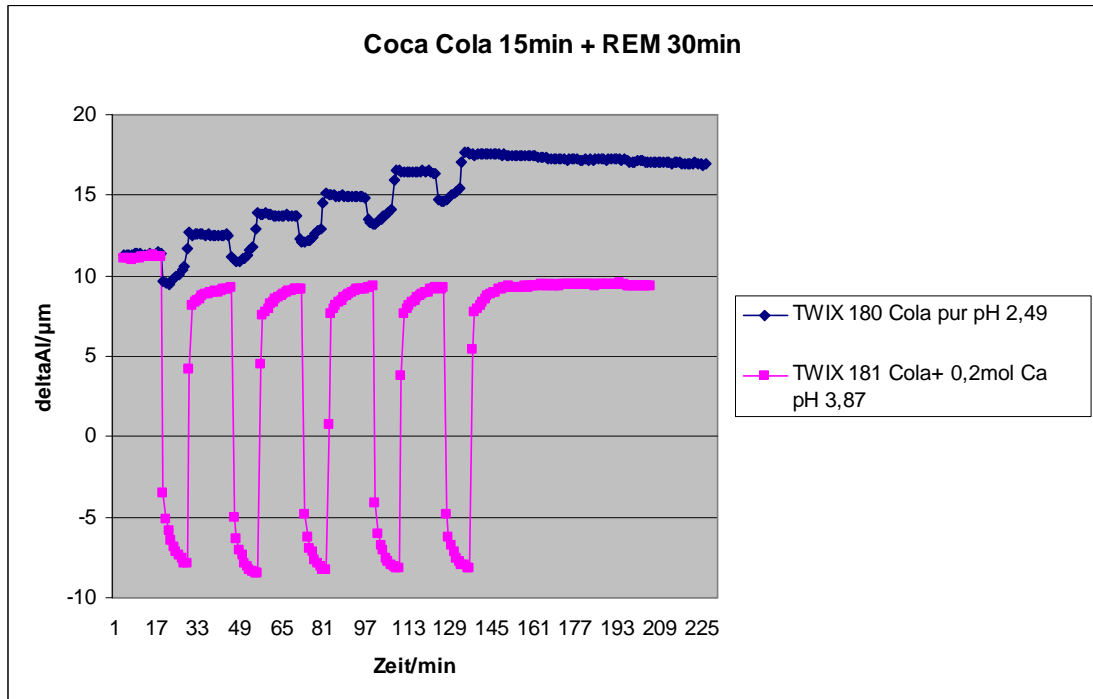


Grafik 2: Neutrale Mineralbilanz bei Cola mit SHS (blaue Kurve) bzw. leichte Remineralisation (rote Kurve).

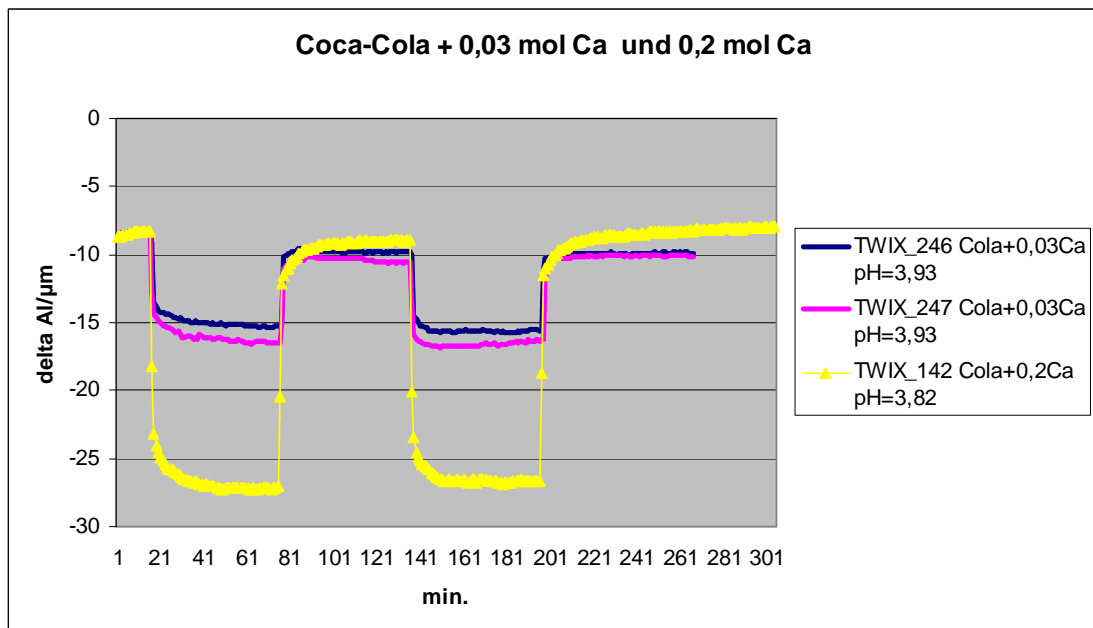


Grafik 3: Blaue Kurve: Cola pur löst Mineral auf;

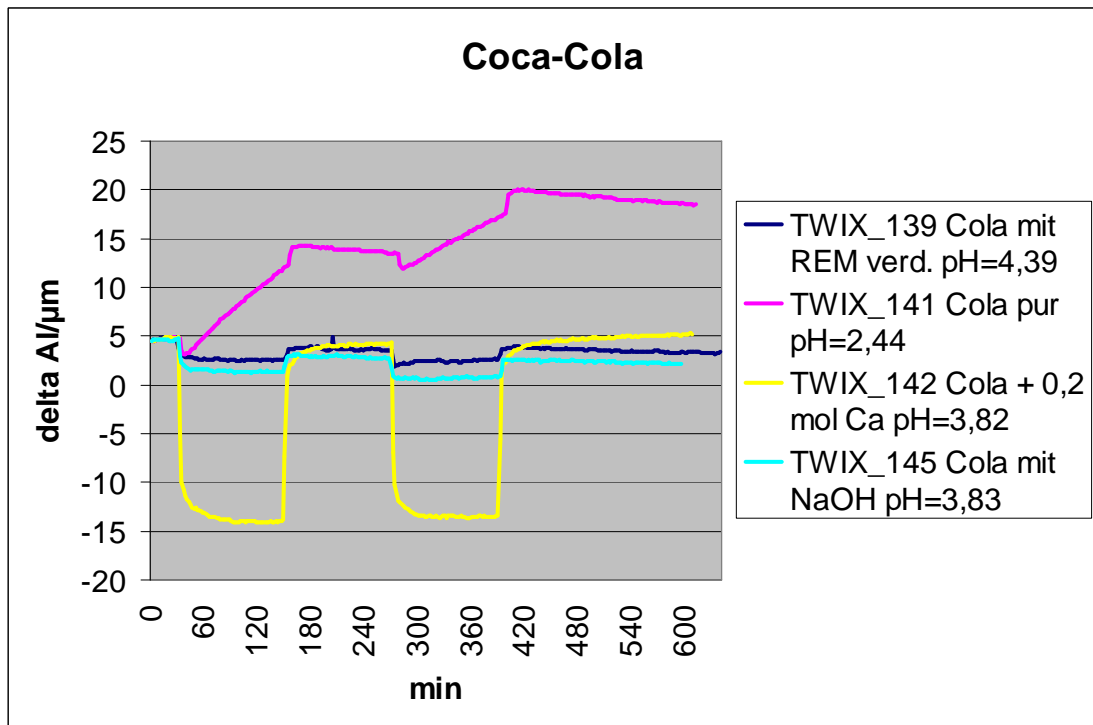
Rote Kurve: Remineralisation durch Cola mit SHS.



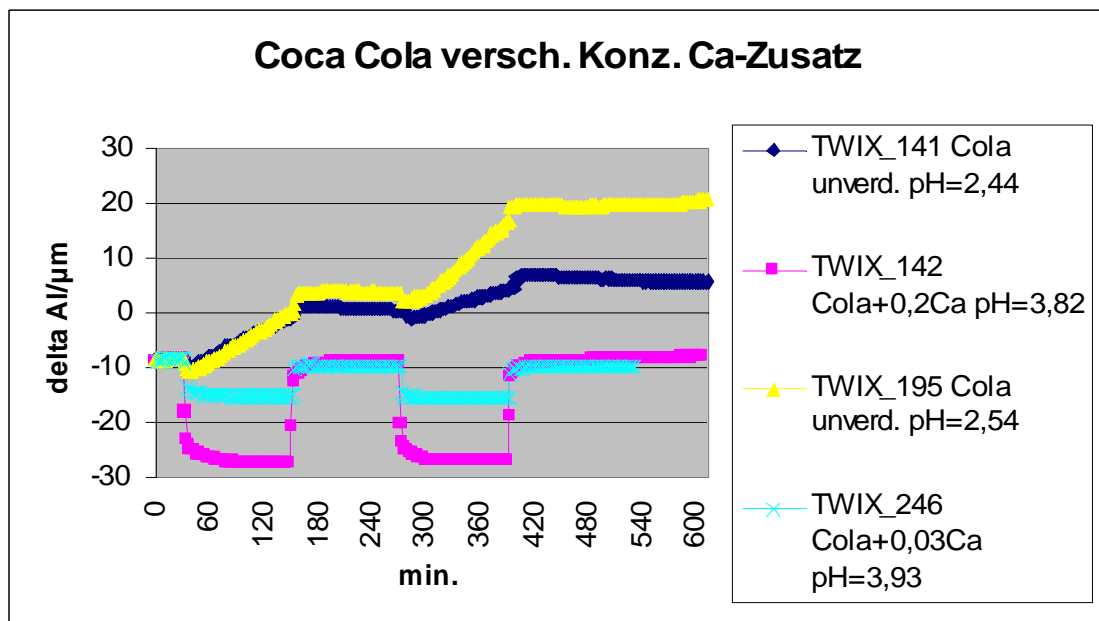
Grafik 4: Weitgehend deckungsgleicher Verlauf der blauen und der roten Kurve trotz 6,5-fach höherer Konzentration an SHS bei TWIX 142 (gelbe Kurve) keine weitere Verbesserung der Wirkung der SHS.



Grafik 5: Vergleichbare Mineralbilanz bei verdünnter Cola (blaue Kurve), mit SHS angereicherter Cola (gelbe Kurve) und bei Cola mit angehobenem pH-Wert (hellblaue Kurve).



Grafik 6: Übersicht über die Wirkung unterschiedlich konzentrierter Zusätze bei Cola. 0,03 mol SHS (hellblaue Kurve) ist demnach besser als 0,2 mol SHS (rote Kurve).

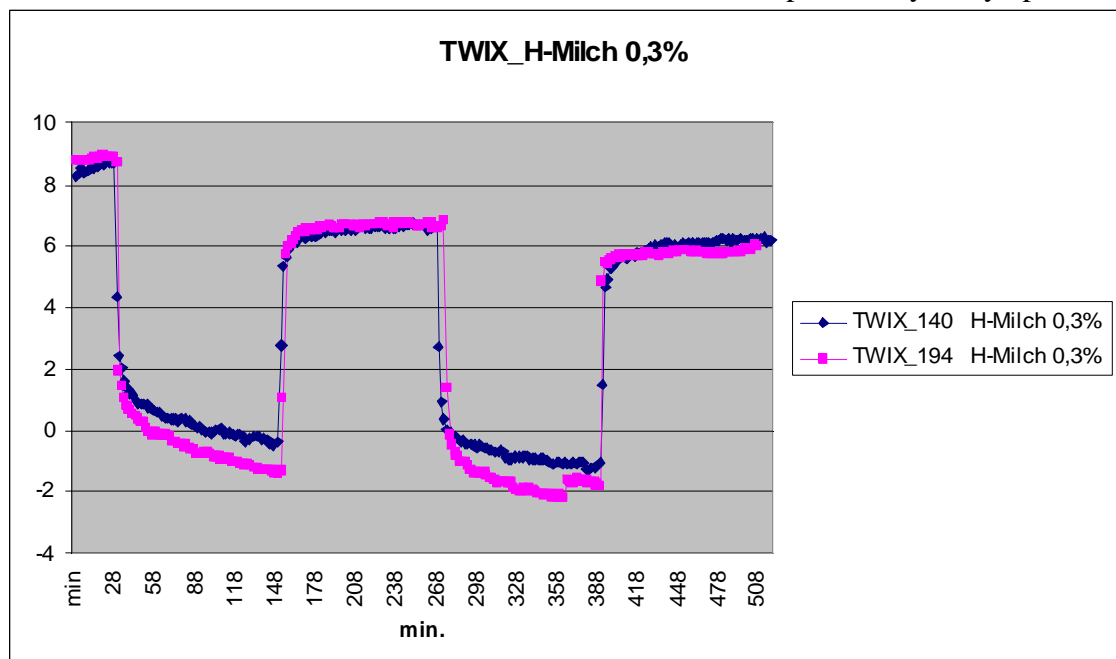


H-Milch

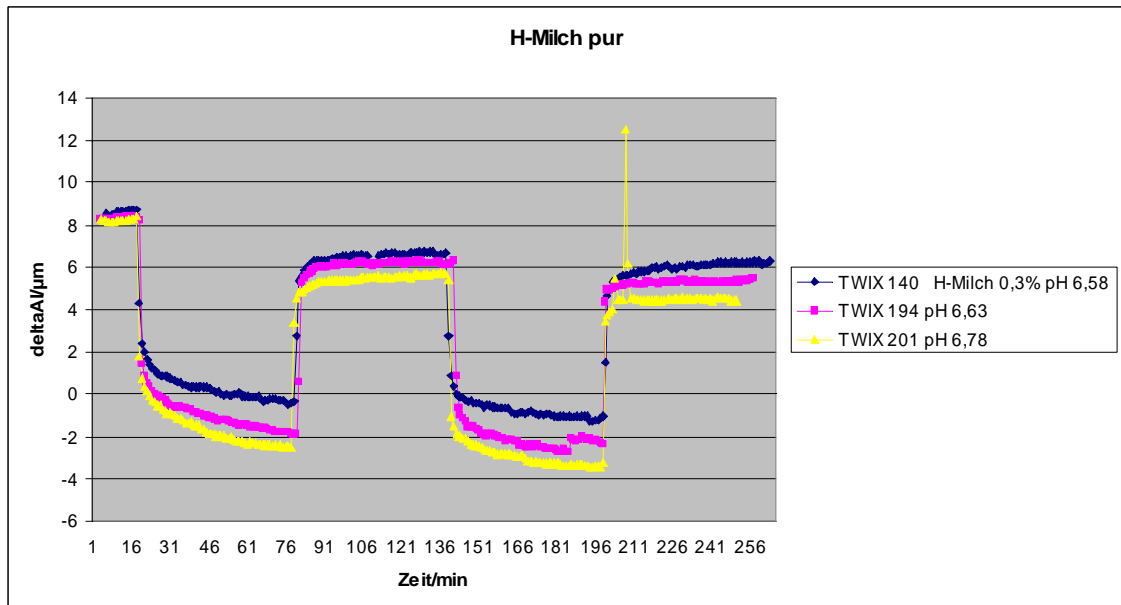
Zunächst wieder eine Übersicht über das verwendete H-Milch-Produkt und die numerischen Ergebnisse. Auf den folgenden Grafiken sind die Details zu den Versuchen vermerkt.

TWIX-Nr.	20 min NaF	Produkt	pH-Wert	Diff 1	Diff 2	Diff ges.
140	x	H-Milch 0,3% Fett	6,58	2,128	0,520	2,648
194	x	H-Milch 0,3% Fett Whd. von 140	6,63	2,060	0,849	2,909
201	x	H-Milch 0,3% Fett + 0,03mol Ca-SHS	6,78	2,060	0,850	2,910

Grafik 7: Fettarme H-Milch remineralisiert die Probestkörper aus Hydroxylapatit.



Grafik 8: Trotz Zusatzes von SHS (TWIX_201) keine zusätzliche Remineralisation bei H-Milch.

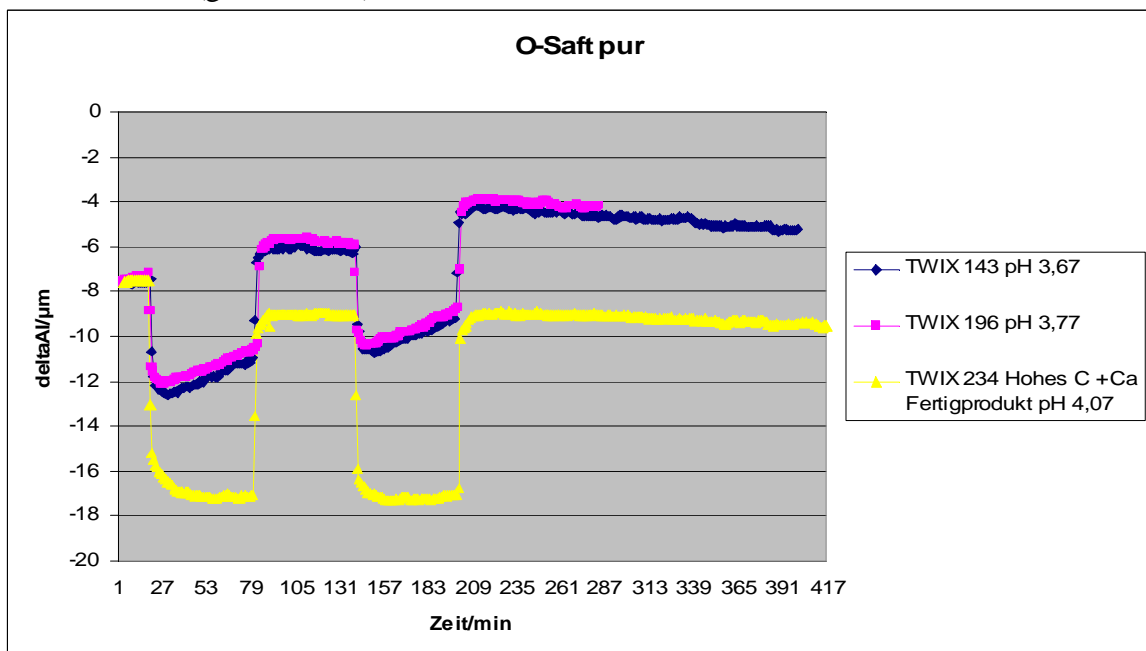


Orangensaft

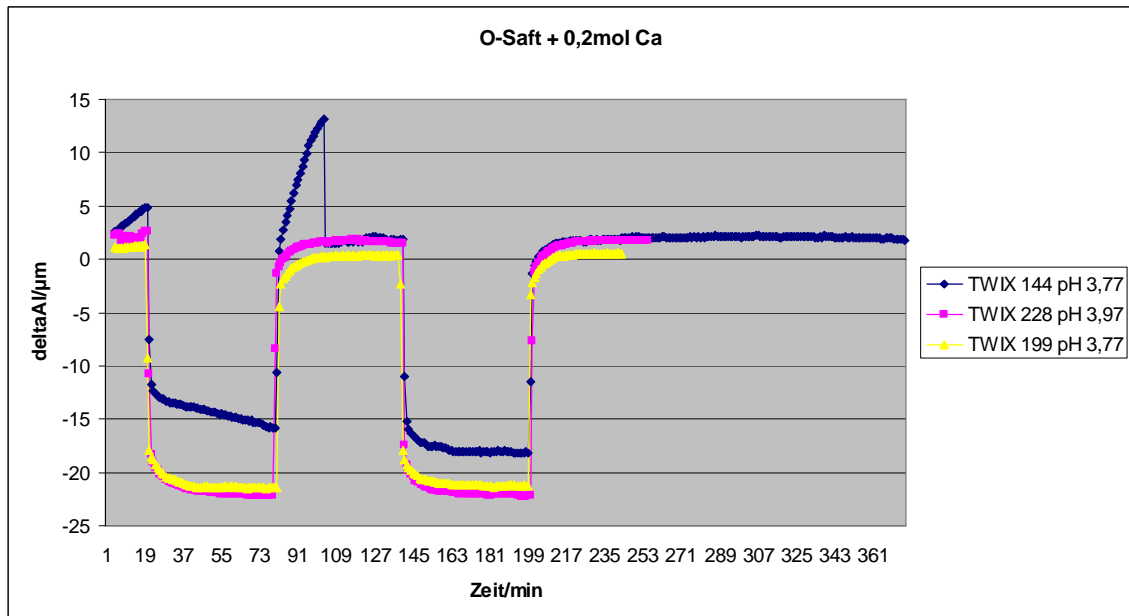
Orangensaft pur und modifiziert mit unterschiedlichen Konzentrationen der Salzhydratschmelze. Details sind in den folgenden Grafiken ersichtlich.

TWIX	20min NaF	Produkt	pH-Wert	Diff 1	Diff 2	Diff des.
143	x	Orangensaft pur	3,67	-1,463	-1,710	-3,173
196	x	Orangensaft pur Wdh. von 143	3,67	-1,504	-1,746	-3,250
144	x	Orangensaft + 0,2mol Ca-SHS	3,77	3,263	-0,187	3,076
199	x	Orangensaft + 0,2mol Ca-SHS	3,75	1,040	-0,230	0,810
228	x	Orangensaft (Hohes C 100%) + 0,2mol Ca-SHS	3,79	0,888	-0,020	0,868
230	x	Orangensaft (Hohes C 100%) + 0,1mol Ca-SHS	3,89	1,530	-0,060	1,470
231	x	Orangensaft (Hohes C 100%) + 0,1mol Ca-SHS	3,89	1,800	-0,150	1,650
233	x	Orangensaft (Hohes C 100%) + 0,05mol Ca-SHS	3,86	1,150	-0,097	1,060
235	x	Orangensaft (Hohes C 100%) + 0,05mol Ca-SHS	3,85	1,830	0,420	2,250
236	x	Orangensaft (Hohes C 100%) + 0,05mol Ca-SHS	3,86	0,930	0,254	1,190
234	x	Orangensaft (Fertigprodukt Hohes C + Ca) Zusatz enthalten: 135mg Ca/100ml = 0,034mol	4,07	1,530	-0,052	1,470

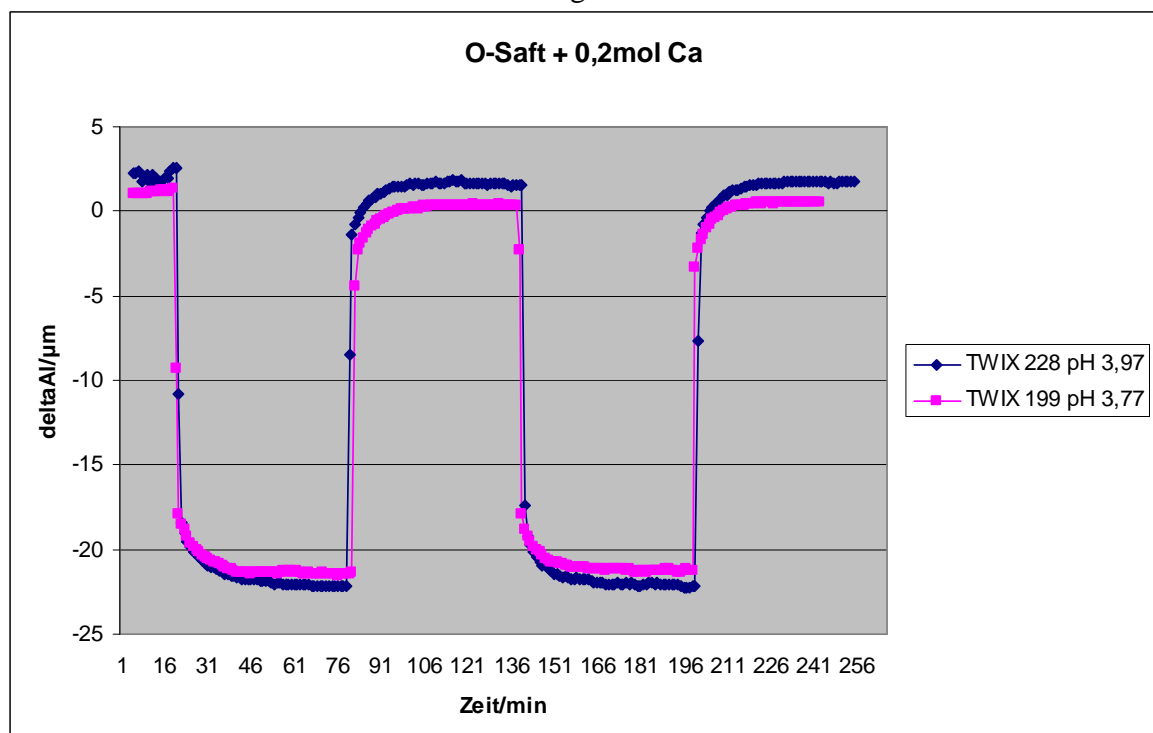
Grafik 9: Starke Mineralabnahme durch sauren Orangensaft (blaue und rote Kurve). Leichte Mineraleinlagerung beim Fertigprodukt Orangensaft + Calcium (gelbe Kurve).



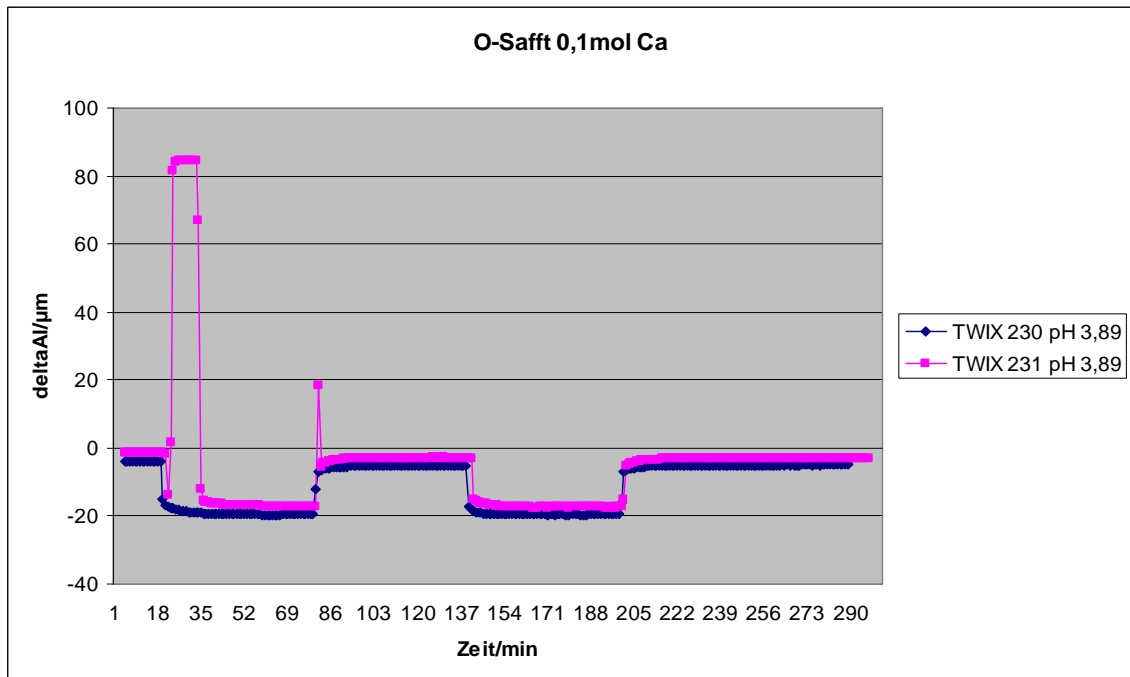
Grafik 10: Durch Zugabe von 0,2 mol Calcium wird bei saurem Orangensaft die säurebedingte Mineralabnahme verhindert.



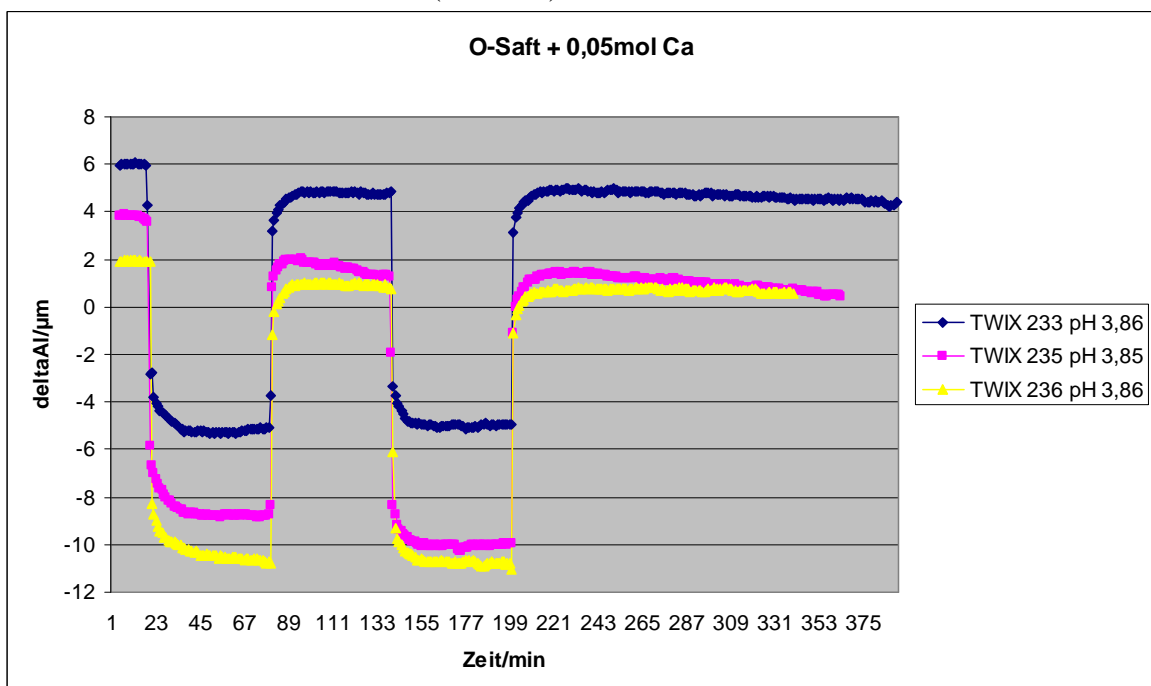
Grafik 11: Ausschnitt aus Grafik 10. Annähernd deckungsgleicher Verlauf der Kurven weist auf die Wirkung der SHS hin.



Grafik 12: Im Vergleich zu Grafik 11 Zugabe von 0,1 mol Calcium. Kein nennenswerter Unterschied. Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung.



Grafik 13: Durch Zugabe von 0,05 mol Calcium reproduzierbare Umkehrung der Demineralisation (Grafik 9) in Remineralisation.

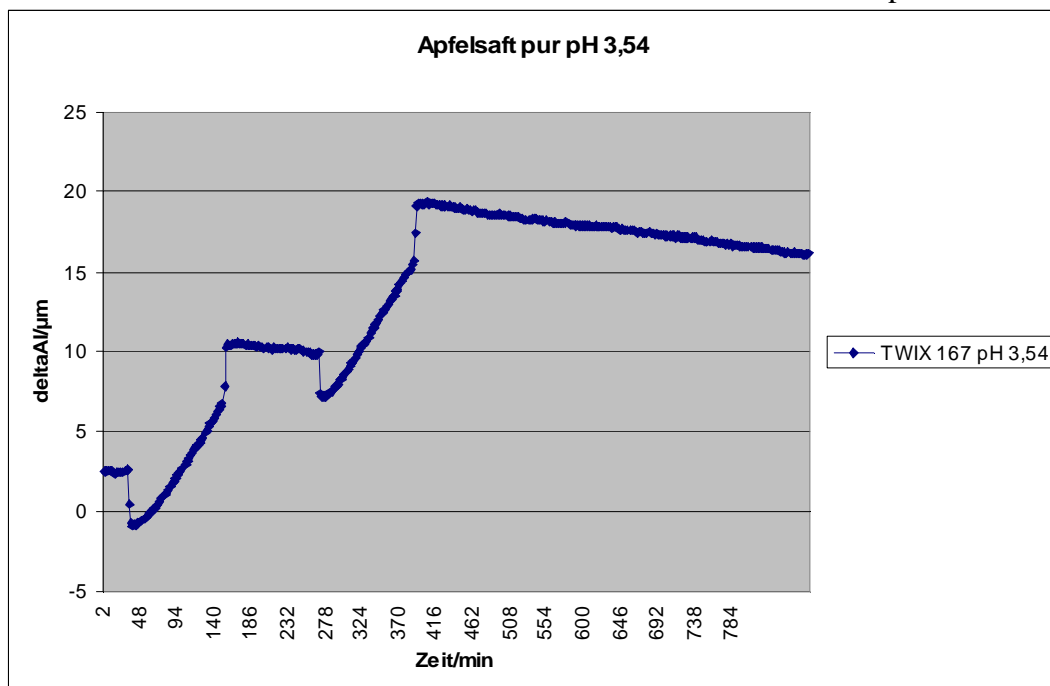


Apfelsaft

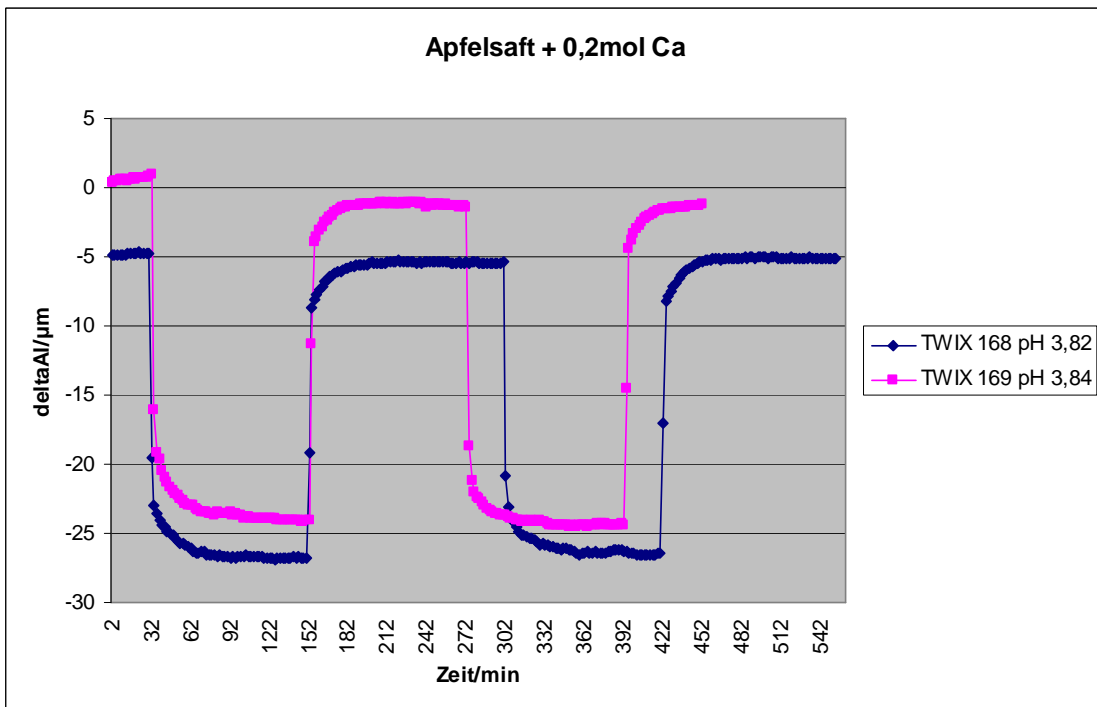
Übersicht über die Testreihen mit Apfelsaft, der teilweise mit Salzhidratschmelze versetzt wurde.

TWIX	20min NaF	Produkt	pH-Wert	Diff 1	Diff 2	Diff ges.
167	x	Apfelsaft pur (Hohes C mild)	3,56	-7,569	-8,692	-16,261
168	x	Apfelsaft + 0,2mol Ca-SHS	3,81	0,680	0,323	1,003
169	x	Apfelsaft + 0,2mol Ca-SHS	3,84	2,082	0,454	2,536
170	x	Apfelsaft + 0,03mol Ca-SHS	3,84	1,697	-0,500	1,197
171	x	Apfelsaft + 0,03mol Ca-SHS	3,76	1,076	-0,298	0,778

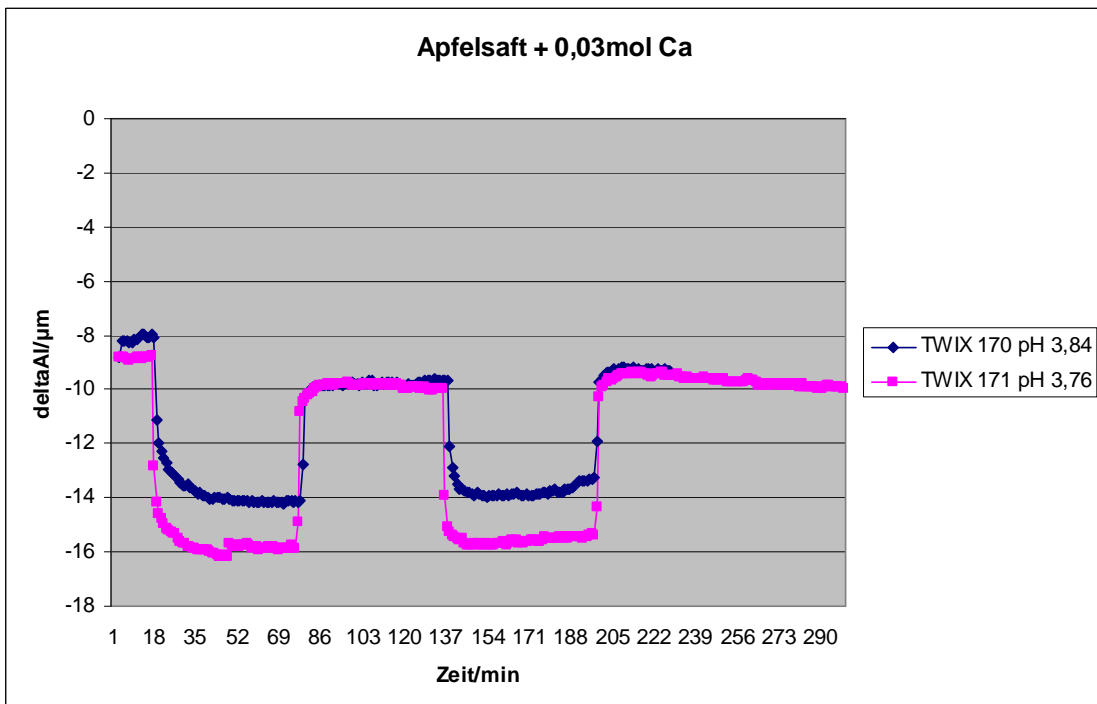
Grafik 14: Starke Demineralisation durch die Fruchtsäuren im Apfelsaft.



Grafik 15: Ausgeglichene Mineralbilanz beim Apfelsaft durch Zugabe von SHS mit 0,2 mol Calcium.



Grafik 16: Apfelsaft nach Zugabe von SHS mit 0,03 mol Calcium. Wie nach Zugabe von 0,2 mol Calcium (Grafik 15) ausgeglichene Mineralbilanz.

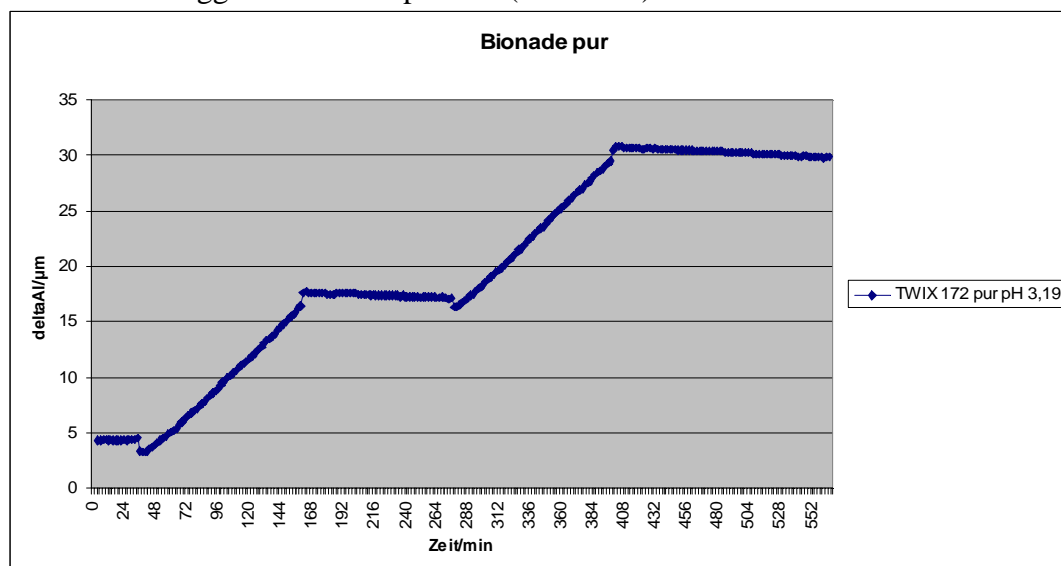


Bionade

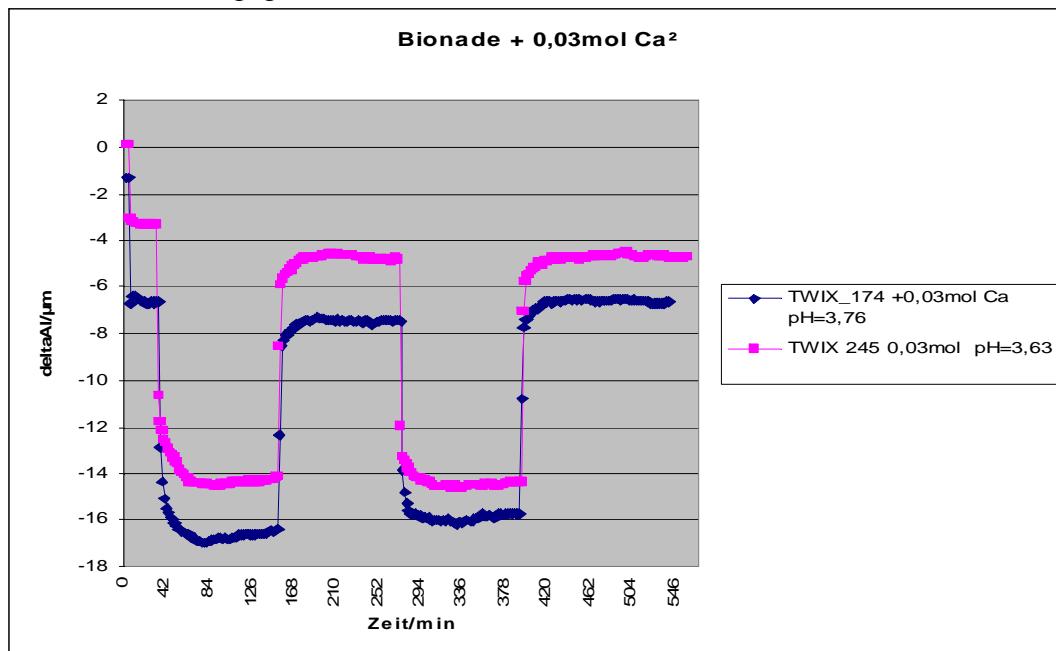
Übersicht über die Testreihen.

TWIX	20min NaF	Produkt	pH-Wert	Diff 1	Diff 2	Diff ges.
172	x	Bionade pur	3,19	12,989	13,022	26,011
173	x	Bionade + 0,03mol Ca	3,63	0,255	Nicht auswertbar wg. Luftblase	
174	x	Bionade + 0,03mol Ca-SHS	3,76	1,355	-0,273	1,083
245	x	Bionade + 0,03mol Ca-SHS Wdh.	3,63	1,562	0,101	1,663
177	x	Bionade + 0,1mol Ca ² SHS	3,81	1,554	0,664	2,208
182	x	Bionade + 0,1mol Ca-SHS	4,26	1,008	-0,201	0,807
183	x	Bionade + 0,1mol Ca-SHS	3,8	0,811	-0,892	0,081
184	x	Bionade + 0,1mol Ca-SHS	3,8	0,871	0,107	0,978
185	x	Bionade + 0,1mol Ca-SHS	4,22	1,306	0,108	1,414

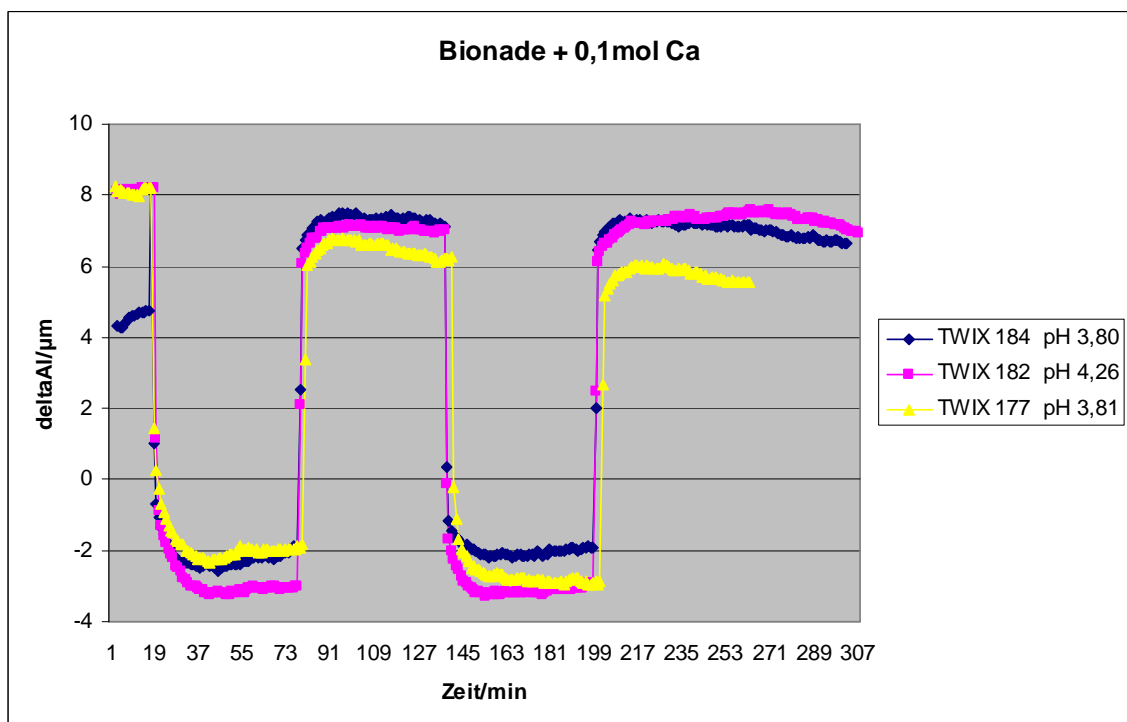
Grafik 17: Starker Mineralverlust durch Bionade mit pH-Wert 3,19. Erscheint aggressiver als Apfelsaft (Grafik 14).



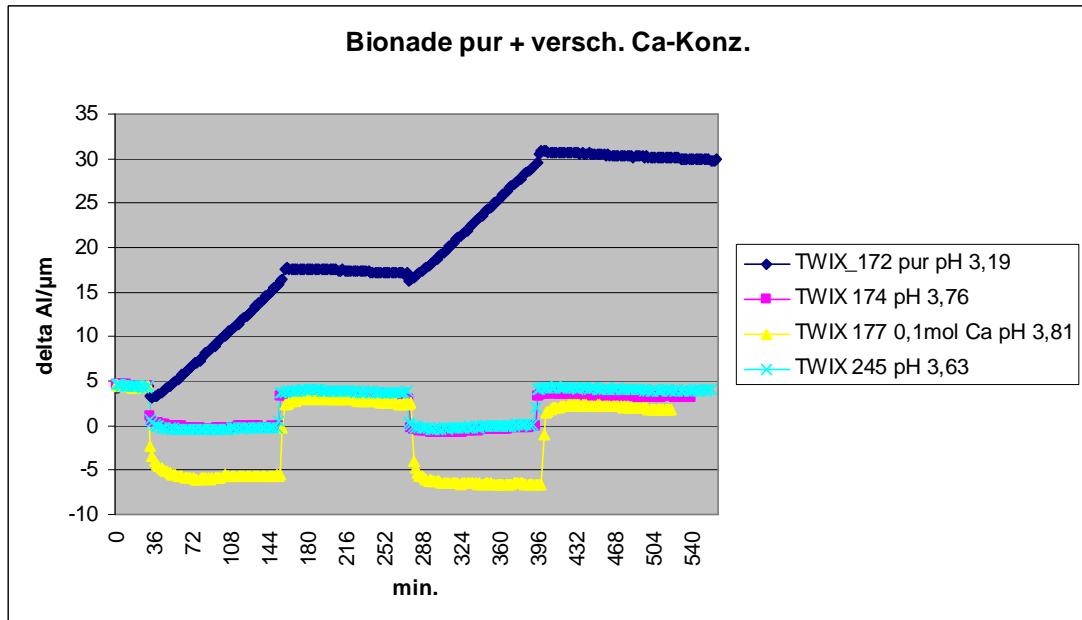
Grafik 18: Bereits Zugabe von SHS mit 0,03 mol Calcium führt zu einer ausgeglichenen Mineralbilanz.



Grafik 19: Hier Zugabe von SHS mit 0,1 mol Calcium. Keine Demineralisation nachweisbar.



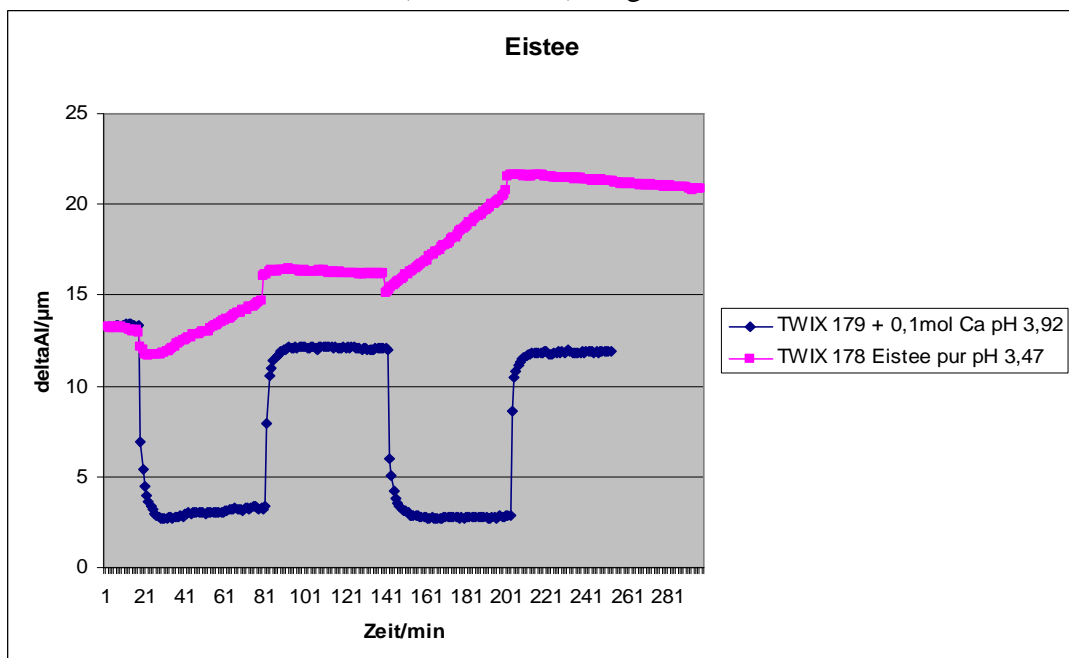
Grafik 20: Gegenüberstellung Bionade pur (dunkelblaue Kurve) gegen Bionade mit SHS unterschiedlicher Konzentrationen an Calcium.



Eistee

TWIX	20min NaF	Produkt	pH-Wert	Diff 1	Diff 2	Diff ges.
178	x	Eistee (Nestee Pfirsich)	3,47	-4,294	-5,229	-9,520
179	x	Eistee + 0,1mol Ca-SHS	3,92	1,086	0,203	1,289

Grafik 21: Nach Zugabe von SHS mit 0,1 mol Calcium wird die Demineralisation von Hydroxylapatit (rote Kurve) in leichte Remineralisation (blaue Kurve) umgekehrt.

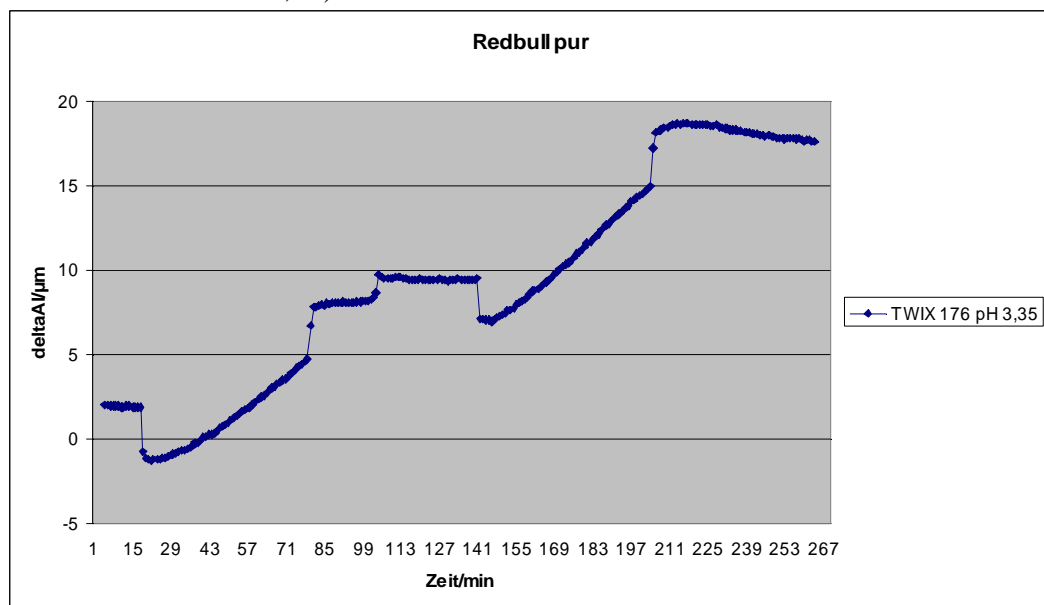


Redbull

Numerisches Ergebnis aus der Grafik 22.

TWIX	20min NaF	Produkt	pH-Wert	Diff 1	Diff 2	Diff ges.
175	x	STROMAUSFALL	-	-	-	-
176	x	Redbull pur	3,35	-7,634	-8,838	-16,472

Grafik 22: Starke Mineralauflösung durch das saure Getränk Redbull (pH-Wert 3,35).

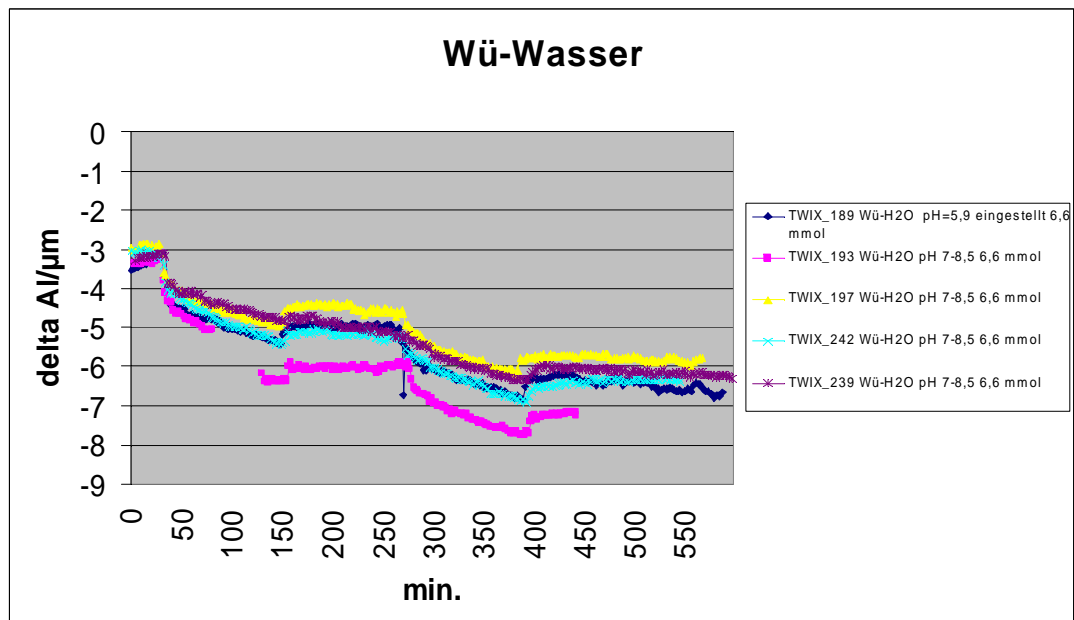


Würzburger Leitungswasser

Ergebnisse der Versuchsreihen mit calciumreichen Trinkwasser. Diff. ges. wird positiv, d. h. die Massenbelegung hat zugenommen.

TWIX	20min NaF	Produkt	PH-Wert nach Entlüften	Diff 1	Diff 2	Diff ges.
189	x	Wü-H ₂ O (38°dH = 6mmol) pH 7,0; eingestellt mit 1n HCl auf pH 5,9	5,9	1,856	1,414	3,270
193	x	Wü-H ₂ O (38°dH = 6mmol) pH 7	8,5	2,929	1,176	4,105
197	x	Wü-H ₂ O (38°dH = 6mmol) pH 7	8,5	1,345	1,280	2,630
198	x	Wü-H ₂ O (38°dH = 6mmol) pH 7	8,5	0,940	0,821	1,761
239	x	Wü-H ₂ O (38°dH = 6mmol) pH 7	8,5	1,889	1,065	3,073
242	x	Wü-H ₂ O (38°dH = 6mmol) pH 7	8,5	2,084	1,210	3,294

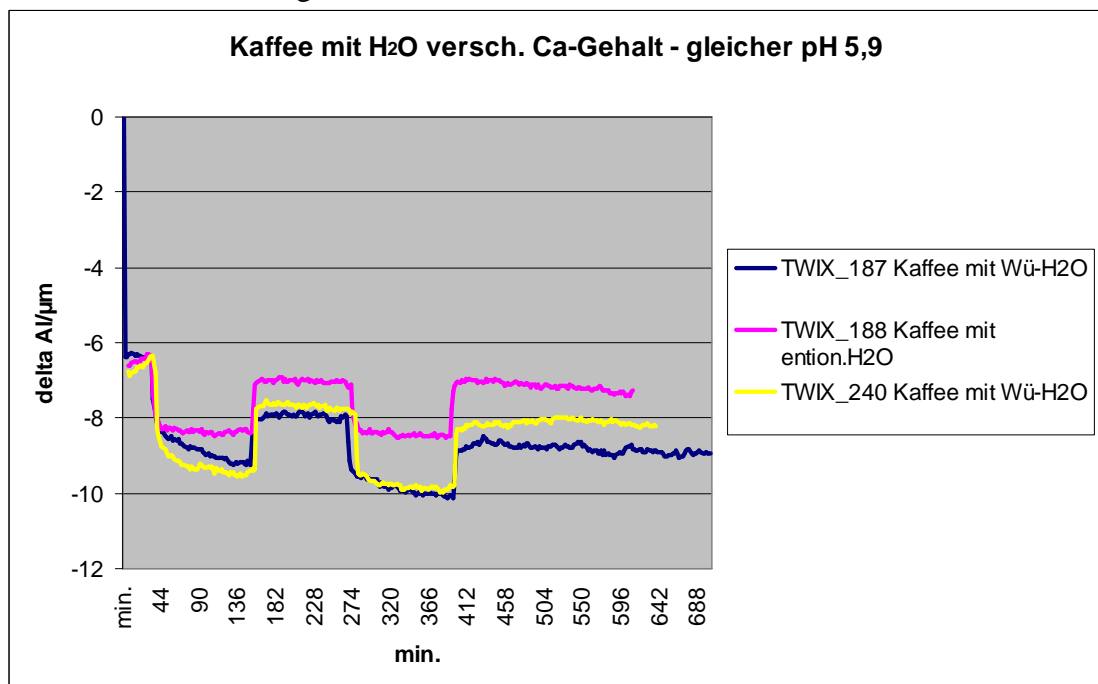
Grafik 23: Starke Remineralisationswirkung im Zusammenspiel Würzburger Leitungswasser und phosphathaltiger Remineralisationslösung. Hinweis auf dissoziierte Calciumionen im Wasser.



Kaffee

TWIX	20min NaF	Produkt	pH-Wert	Diff 1	Diff 2	Diff ges.
187	x	Kaffee + Wü-H ₂ O (38°dH)	5,9	1,553	0,792	2,345
188	x	Kaffee + entionisiertem H ₂ O pH 4,98 eingestellt mit 1n KOH auf 5,9	5,9	0,674	0,037	0,711
240	x	Kaffee + Wü-H ₂ O (38°dH)	5,9	1,320	0,495	1,815

Grafik 24: Kaffee mit Würzburger Leitungswasser (blaue und gelbe Kurve) greift trotz der zusätzlichen Kaffeesäure in Verbindung mit der Remineralisationslösung die Probekörper ebenso wenig wie an wie Kaffee mit entionisiertem Wasser. Somit war eine Zugabe von SHS hinfällig.



Aus den Ergebnissen konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Das erosive Potential der säurehaltigen Erfrischungsgetränke konnte bestätigt werden;
- Der säurebedingte Zerstörungsprozess konnte durch die Anreicherung der Testgetränke mit der calciumhaltigen Salzhydratschmelze vermindert und größtenteils sogar zugunsten der Remineralisation verschoben werden;
- Nach Reduktion der Menge der Salzhydratschmelze konnte ihr bitterer Geschmack vernachlässigt werden;
- Die Getränke der Gruppe III (Milch, Wasser und Kaffee) besaßen auf Grund ihrer dissoziierten Calciumionen ein hohes natürliches Remineralisationspotenzial.

6. Diskussion

Eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Widerstandkraft des Schmelzes ist hohe Mineralisationsgüte. Die dazu führenden Reaktionen sind nur zum Teil bekannt. Die fördernden Einflüsse des Fluor-Ions sind unbestritten, scheinen jedoch in der Prävention der Karies weitgehend ausgereizt zu sein. Auch hängt ihre Wirkung in hohem Maße von der Compliance der Menschen ab. Der antimikrobiellen Wirkung einiger Substanzen wie CHX, Benzoxoniumchlorid oder Listerine wird z. Z. in einigen Arbeitsgruppen vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt, da bei Kindern wieder eine vermehrte Kariesinzidenz zu verzeichnen ist. Jedoch ist die Anwendung solch antibakterieller Substanzen aus grundsätzlichen Erwägungen nicht unumstritten.

Ziel von Präventivmaßnahmen bei der Kariesprophylaxe sowie bei der Prophylaxe der vermehrt auftretenden Erosionen ist es, die wesentlichste Mineralisationsform der Zahnhartgewebe, den Hydroxylapatit, chemisch solide zu bilden bzw. so zu verändern, dass er stabilere und einheitlichere kristalline Strukturen erhält.

Die Natur führt uns unbemerkt vor, was gezielte Mineralisation am frisch durchgebrochenen Zahn bewirken kann: Die sog. sekundäre Schmelzreifung (vor dem Durchbruch des Zahnes) führt den Zahnschmelz nicht zum erwünschten „vollkommenen“ Endzustand, der zeitlebens die uneingeschränkte Integrität des Zahnes garantieren könnte. Deshalb schließt sich nach dem Durchbruch die tertiäre Schmelzreifung im Sinne einer posteruptiven Mineralisation an. Diese geht ohne sichtbare Grenze in die Phase der ständigen Wechselbeziehungen zum Mundhöhlenmilieu über. Sie endet erst mit dem Verlust des Zahnes.

Die posteruptive Schmelzreifung ist durch Vorgänge charakterisiert, die die Zahnoberfläche in ihrer Qualität verbessern, während sich die später ablaufenden und lebenslang andauernden Vorgänge auf die Erhaltung dieser Qualität orientieren. Eine Verbesserung der Eigenschaften ist dann zwar ebenfalls möglich, aber nicht mehr im

Entwicklungszustand vorgesehen, sondern nur durch gezielte Manipulation erreichbar.

Der Schmelz des durchbrechenden Zahnes ist noch nicht voll mineralisiert. Zwischen den Kristalliten befinden sich schmale Mikrospalten und Poren. Auch die Grenzen der Schmelzprismen sind mit Spalträumen durchsetzt. Sie können weit in die Tiefe reichen. Kleinere Moleküle können diese Mikrokapillaren und Mikroporen passieren. Entlang der Mikrokanäle können Substanzen dann aus der Mundhöhle in den Schmelz eindringen bzw. mit dem Flüssigkeitsstrom des Schmelzliquors, der von der Zahnaußenfläche nach innen verläuft, transportiert werden. Dadurch wird der fehlende Stoffwechsel des Schmelzes teilweise ausgeglichen.

Es finden chemische Reaktionen statt, die seine Zusammensetzung verändern, seine passive Widerstandskraft fördern oder auch schwächen. Der Anteil des Carbonatapatits in den Oberflächenarealen des Schmelzes wird auf diese Weise verringert. Die Mineralionen gelangen aus dem Speichel über Plaque und Zahnoberhäutchen in den Schmelz und wandeln dort auf dem Wege des Ionenaustausches die vorliegende leichter lösliche Apatitsubstanz in den schwer löslichen HA (Hydroxylapatit) oder HFA (Hydroxyfluorapatit) um. Die Kristallite sind in der Lage, durch Wachstum die Mikroporen zu schließen. Die Mikrokapillaren werden nach und nach verengt. Innerhalb einiger Wochen besitzt der Schmelz in der Regel eine genügend hohe Kompaktheit. Die entscheidenden abdichtenden Vorgänge finden weiterhin an der eigentlichen Oberfläche ab, wo sie ständig ablaufen. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass mit dieser Mineralisation lediglich Spalten im submikroskopischen Bereich (Freiräume zwischen Kristalliten u. ä.) geschlossen werden können. Größere Defekte können nicht restauriert werden. Trotzdem nimmt der Mineralgehalt des Schmelzes postnatal um weitere 20 % zu und gelangt in ein Endstadium. Während der ständige Kontakt zu den Ionen der Mundflüssigkeit und des Speichels an Glattflächen des Zahnes gewährleistet ist, entstehen an den Kontaktpunkten und im Sulkusgebiet Schwierigkeiten durch die veränderten Strömungsverhältnisse. Auch die Fissuren bleiben weicher, weil sie durch ihre anatomische Form und Lage der mineralisierenden Wirkung des Speichels

weitgehend entzogen sind. Der Fissurenschmelz gelangt infolgedessen nie oder nur in breiten Fissuren zur völligen Ausreifung.

Es sei noch einmal klargestellt, dass diese unverzichtbare Mineralisation, die sog. tertiäre Schmelzreifung unreifer frisch durchgebrochener Zähne durch den Speichel bewirkt wird, dem die Zähne nach dem ihrem Durchbruch ausgesetzt sind. Speichel stellt eine etwa zweifach übersättigte Lösung an Calciumionen dar, die für die Kristallitbildung bei der Mineralisation und ggf. bei der Remineralisation von porös gewordenem Schmelz verantwortlich sind.

Lange Zeit galt die Karies als der größte Risikofaktor für den Zahnverlust. Im Laufe der Jahre haben Wissenschaftler und Zahnärzte gemeinsam dafür gearbeitet, dieses Risiko zu reduzieren. Ein Ziel der Prophylaxe in der modernen Zahnheilkunde ist es, die Remineralisation schon in der initialen Phase einer Kariesbildung einzuleiten und damit die Kariesprogression zu unterbinden. Die Remineralisation beim Zahnschmelz ist ein Prozess, bei dem Calcium- und Phosphationen außerhalb des Zahnes angeboten werden, die die Reparatur der Schmelzdefekte (Entkalkung) ermöglichen. Der Aufbau bereits zerstörter Schmelzkristalle ist dagegen problematisch³³. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die Prophylaxemöglichkeiten, die sich bei der Verhütung der Karies bewährt haben, auch bei der Vorbeugung bzw. Therapie von Erosionen erfolgreich sein können.

Dies ist von besonderer Bedeutung, denn neben der Karies und den Parodontopathien leiden zunehmend mehr Menschen an Erosionen. Selbst bei 12-jährigen Kindern wurde bereits freiliegendes Dentin an Zahnhälsen beobachtet. Als ursächlich dafür gelten u. a. die sauren Lebensmittel, insbesondere fast alle Getränke, sowie saure „Süßigkeiten“, wie z. B. mit organischen Säuren bestreute Weingummikringel. In der Süßwarenindustrie wird offen darüber geklagt, dass die Geschmacksnerven der Jugendlichen immer abgestumpfter zu werden scheinen, denn die Nachfrage nach immer saureren Drops steigt an.

Die Stabilisierung der Calcium- und Phosphationen bei der Verhütung säurebedingter Zahnschäden ist schwierig. Das Außenmilieu des Zahnes braucht eine

hohe Konzentration an diesen Mineralien, um einen Konzentrationsgradienten ins Innere des Zahnschmelzes aufbauen zu können. Sobald aber ihre Sättigungskonzentration überschritten ist, fallen sie in Abhängigkeit vom pH-Wert als unterschiedliche Calciumphosphatverbindung aus. Sowohl der Niederschlag amorpher Calciumphosphats als auch die Bildung von Brushit bis hin zu Hydroxylapatit (unter dem Einfluss von Fluorid) konnten beobachtet werden. Die im Speichel enthaltenen PRPs sowie das Statherin unterstützen diese Vorgänge, indem sie das Ausfallen von Calciumphosphatverbindungen außerhalb einer Matrix (z. B. Zahnplaque) weitgehend erfolgreich verhindern. Dadurch sind Mineralien verfügbar und können bei Bedarf in demineralisierte Schmelzbereiche diffundieren. Die natürliche Remineralisation der Zähne mit Calcium- und Phosphationen aus dem Speichel ist ein Prozess, der üblicherweise bei ausgewogener Ernährung und guter fluoridgetragener Mundhygiene ausreicht, die Karies unter Kontrolle zu halten⁶¹.

Die Ionen werden vor allem in der Schmelzoberfläche abgelagert, da der Konzentrationsgradient zwischen Läsion und Speichel in der Regel klein ist. Es wird nur die sog. „Deckschicht“ gebildet. In die tieferen Schichten der Schmelzläsionen werden meist keine Mineralien eingebaut. Daher persistieren die tiefer liegenden Porositäten und damit auch die „White-spot“-Läsion häufig³³.

Die Remineralisation wird nach dem MWG unter zusätzlicher Anwesenheit von Fluorid, Calcium- und Phosphationen gefördert. Zur Optimierung des Mineralangebotes wurden deswegen unterschiedliche Calcium-Phosphat-Präparate für die tägliche Anwendung in der Kariesprophylaxe entwickelt.

Eine ausreichende Flüssigkeitsaufnahme gehört zu der täglichen ausgewogenen Ernährung. Nach der Deutschen Gesellschaft für Ernährung²³ ist eine Flüssigkeitszufuhr von mindestens 1,5 l pro Tag in Form von Getränken für Erwachsene empfehlenswert. Mit dem Streben nach gesunder Lebensweise, nehmen die Menschen vermehrt Obst und Gemüse oder deren frisch ausgepresste Säfte und Softdrinks zu sich auf. Heute gehören die säurehaltigen Erfrischungsgetränke zu den ständigen Alltagsbegleitern. Ihr Anteil am Getränkekonsum ist mit ca. 25 % vergleichsweise relativ groß²².

Diese Erfrischungsgetränke stehen aber nicht nur wegen ihres hohen Zucker-, sondern auch wegen ihres hohen Säuregehalts und somit auch wegen ihrer erhöhten Erosionsgefahr für den Zahnschmelz immer wieder in der Kritik. Mit dem erhöhten Konsum saurer Nahrungsmittel und Getränke ist das Auftreten von erosiven Defekten auf dem Zahnschmelz, oft sogar bis ins Dentin immer häufiger zu beobachten.

Ein wesentlicher Punkt in der Erosionsprävention ist die richtige Diagnostik. Dafür ist es wichtig, die endogenen von den exogenen Merkmalen voneinander unterscheiden zu können.

Ein Ziel der zahnbezogenen Ernährungsaufklärung ist die präventive Reduktion der Säurezufuhr. Einerseits wird dies durch eine Verminderung des Konsums von säurehaltigen Nahrungsmitteln und Getränken, andererseits durch raschen Verzehr der erosiven Lebensmittel (Minimieren der Verweildauer in der Mundhöhle) erreicht. Man darf dabei jedoch nicht vergessen, dass die Karies immer noch das Hauptproblem darstellt⁷³.

Die Mundhygieneinstruktion spielt auch eine bedeutsame Rolle. Es wird eine schonende Zahnputzmethode (z. B. Putztechnik nach Bass) mit einer Zahnbürste mit weichen Zahnborsten angeraten. Diese sollte nicht direkt vor oder nach der Säureexposition stattfinden, um die durch die Säure angegriffene Zahnhartsubstanz nicht zusätzlich zu schädigen. Die sachgerechte konsequente und regelmäßige Zahnpflege mit fluoridierten Zahncremes und Gelees kann das Risiko von Zahnerosionen und Karies durch die zucker- und säurehaltige Nahrungsmittel und Getränke deutlich senken⁹⁶.

Die Verfügbarkeit von Fluoriden ist dabei essentiell. Ganss et al.³⁰ wiesen 2001 nach, dass durch regelmäßige Fluoridierungen die Erosionsprogression auf humanem Schmelz und Dentin in vitro reduziert werden konnte. Die Bildung der protektiven Calciumfluorid-Deckschicht führt zu geringeren erosiven Läsionen. Die Bildung eines Calciumfluoridpräzipitates auf der Zahnoberfläche wirkt als mechanischer Schutz gegen Säureangriffe sowie als Fluoriddepot. Bei einem pH-Abfall kommt es ggf. zuerst zu einer Auflösung dieser Deckschicht, bevor der Schmelze, der darunter

liegt, angegriffen wird³⁰. Es ist jedoch noch immer nicht geklärt, wie schnell dieses Calciumfluoridpräzipitat in vivo auf einer gesunden Zahnoberfläche gebildet wird. Es wurde hingegen nachgewiesen, dass in vitro dieses calciumfluoridartige Mineral sehr schnell gebildet werden kann, dass ein leicht saurer pH-Wert des Fluoridgels diese Bildung fördert und dass auch der Calciumgehalt des Speichels an der Bildung der Präzipitate beteiligt ist⁷³.

Die protektive Wirkung der Fluoridpräparate in der täglichen Zahnpflege vor Erosionsschäden gilt als bewiesen, scheint aber, wie oben ausgeführt wurde, an ihre Grenzen zu gelangen.

In der vorliegenden Studie wurde der Schwerpunkt deswegen auf die remineralisierenden Eigenschaften einer neuartigen calciumhaltigen Salzhydratschmelze, die säurehaltigen erosiven Getränken beigemischt wurde, gesetzt.

Aus den Experimenten wurde bestätigt, dass die säurefreien Testgetränke der Gruppe III (die Vergleichsgruppe) Wasser, Milch und Kaffee zumindest in vitro zu einer Mineralisierung künstlichen Zahnschmelzes führen, obwohl sie bezüglich Hydroxylapatit leicht untersättigt sind (pK zwischen -3,8 und -6,4). Beim Kontakt dieser Flüssigkeiten mit der Schmelzoberfläche werden zuerst Ionen des Hydroxylapatits freigesetzt. Es kommt zu einer lokal begrenzten pH-Erhöhung an der oberflächlichen Grenzschicht (LUSSI & JAEGGI 2001⁶⁸), aber es findet keine Schmelzerweichung statt. Diese Unbedenklichkeit von Wasser, Milch und Kaffee bezüglich Erosionen wurde auch in anderen Untersuchungen festgestellt (PARRY et al. 2001⁸³). Die Präsenz von Fluorid in der Mundhöhle führt bei den täglich stattfindenden De- und Remineralisationen der Schmelzoberfläche unter anderem zu einer begrenzten Erhöhung des Fluorapatits an der Oberfläche, welcher eine geringere Säurelöslichkeit aufweist als reiner Hydroxylapatit.

Die Inkubation der schmelzähnlichen Probekörper mit säurehaltigen Softdrinks wie Coca-Cola, Eistee oder Apfelsaft führte zu einem Substanzverlust im Vergleich zu den mit Calcium angereicherten Getränken, bei denen eine Mineralanlagerung

beobachtet wurde. Aus den Messungen ist zu erkennen, dass es keinen Zusammenhang zwischen dem pH-Wert der Getränke, Inkubationsdauer sowie Calciumkonzentration und den ermittelten Mineralverlusten der künstlichen Schmelzproben gibt. Der pH-Wert der mit Calcium angereicherten Getränken lag stets weit unter dem kritischen pH-Wert.

Um das Effekt der forcierten dynamischen Remineralisation besser beurteilen zu können, wurden die Ergebnisse mit diesen der Kontrollgruppe verglichen. In dieser Gruppe wurden die Getränke Milch (pH 6,58), Kaffee (pH 5,9) und Wasser (pH 7), die fast neutralen pH-Wert aufweisen, unter gleichen Versuchsbedingungen getestet. Diese Getränke besitzen eine natürliche remineralisierende Wirkung.

Sehr schwach gesättigte oder leicht untersättigte artifizielle Lösungen führen jedoch zur Mineraleinlagerung in tiefere Schichten der Läsion, ohne dass es zu einem frühzeitigen Verschluß der „Diffusionsfläche“ Deckschicht kommt. Erst bei größerer Untersättigung schlägt Re- in Demineralisation um.

Das Phänomen „dentale Erosionen“ an der gesunden Zahnhartsubstanz als Folge des erhöhten Softdrinkskonsums stand im Mittelpunkt der vorgelegten in vitro Studie. Das Ziel, diesen Zerstörungsprozess durch die Zugabe einer neuartigen Salzhydratschmelze zu verhindern und sogar zu Gunsten der Remineralisation umzukehren, wurde erreicht und nachgewiesen. Es erscheint vielversprechend zu sein, die gewonnenen Ergebnisse in einem in situ Versuch in der Mundhöhle zu testen.

7. Zusammenfassung

Eine ausreichende Flüssigkeitsaufnahme gehört zur täglichen ausgewogenen Ernährung. Ein Erwachsener sollte ca. 1,5 Liter pro Tag zu sich nehmen. Jedoch gehören heute die säurehaltigen Erfrischungsgetränke zum ständigen Alltagsbegleiter und haben einem relativ großen Anteil am Getränkekonsum.

Diese Softdrinks und Fruchtsäfte werden aber nicht nur wegen ihres hohen Zuckergehalts, sondern auch wegen ihres Säuregehalts immer wieder kritisiert, weil durch die Säuren die Gefahr stark erhöht ist, dass Zahnhartsubstanzen erodieren.

In der vorliegenden Studie wurde das erosive Potential der puren säurehaltigen Erfrischungsgetränke Coca-Cola, Bionade, Apfelsaft, Orangensaft und Redbull in vitro getestet und bestätigt. Ihre demineralisierende Wirkung wurde einerseits mit Getränken mit fast neutralem pH-Wert (Wasser, Milch und Kaffee) verglichen, andererseits mit denselben auch mit denselben säurehaltigen Softdrinks und Fruchtsäften, die mit unterschiedlicher Konzentration (0,03 mol, 0,1 mol oder 0,2 mol) einer calciumhaltigen Salzhydratschmelze (SHS) angereichert worden waren. Diese amorphe Salzhydratschmelze wurde den Testlösungen in glasartiger Pulverform zugefügt, in denen sie sich auflöste. Es wurde dann nicht nur eine Reduktion der Demineralisation, sondern sogar einer reproduzierbare Remineralisation der Probekörper aus Hydroxyapatit durch die mit der SHS angereicherten Getränke beobachtet.

Die remineralisierende Wirkung der calciumhaltigen Salzhydratschmelze beruhte auf dem Prinzip der forcierten dynamischen Remineralisation.

In früheren Untersuchungen war festgestellt worden, dass Zahnschmelz in vitro mit Hilfe des Speichels sowie geeigneter Calcium- und Phosphatkonzentration im Mundmilieu forciert remineralisiert werden kann. Weitere Studien haben gezeigt,

dass die Methode der forcierten Remineralisation auch in situ (Staebler J²², 2008) erfolgreich umsetzbar ist.

Mit Hilfe der Salzhydratschmelze konnte das für die forcierte Remineralisation notwendige calciumreiche Umgebungsmilieu des Zahnes erzeugt werden. Die Mineralmenge, die unter der Wirkung von künstlichem Speichel und mit Calcium angereicherten säurehaltigen Getränken aufgenommen wurde, wurden mit Hilfe einer hochempfindlichen online-Mikroradiografie bestimmt. Die Anlage war in der Lage, 20 nm Hydroxyapatit statistisch gesichert zu diskriminieren.

Es erscheint erfolgversprechend zu sein, das Verfahren der forcierten Remineralisation mit Hilfe der calciumreichen Salzhydratschmelze auch in vivo bzw. in situ mit sauren bzw. säurehaltigen Getränken zu testen.

8. Literaturverzeichnis

- 1 **ABRAMS R A**, Ruff J C; Oral signs and symptoms in the diagnosis of bulimia; J Am Dent Assoc 113: 761-764 (1986)
- 2 **AHRENS G**; Beziehungen zwischen dem Phosphatgehalt des Speichels und Karies; Arch Oral Biol 6 (1961)
- 3 **AL-DLAIGAN Y H**; Shaw, L; Smith, A.; 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: 145-149 (2001)
- 4 **AL-DLAIGAN Y H**, Shaw L, Smith A; Dental erosion in a group of british 14-year-old school children; Part II; Influence of dietary intake; Br Dent J 190: 258-261 (2001)
- 5 **AL-MALIK M I**, Holt R D, Bedi R; Erosion, caries and rampant caries in preschool children in Jeddah, Saudi Arabia; Community Dent Oral Epidemiol 30: 16-23 (2002)
- 6 **AMAECHI B T**, Higham S M, Edgar W M, Milosevich A; Thickness of acquired salivary pellicle as a determinant of the sites of dental erosion; J Dent Res 78: 1821-1828 (1999)
- 7 **AMAECHI B T** et al; Dental erosion possible approaches to prevention and control; J of Dentistry 33; 243-252 (2005)
- 8 **ÄRVINEN V**, Rytömaa I, Meurmann J H; Location of dental erosion in a referred population; Caries Res 26: 391-396 (1992)
- 9 **ATTIN T**, Koidl U, Buchalla W, Schaller HG, Kielbassa AM, Hellwig E Correlation of microhardness and wear in differently eroded bovine dental enamel. Arch Oral Biol 42, 243-250 (1997)
- 10 **ATTIN T**, Knopfel S, Buchalla W, Tutuncu R; In situ evaluation of different remineralization periods to decrease brushing abrasion of demineralized enamel; Caries Res 35: 216-222 (2001)
- 11 **ATTIN T**; What distinguishes erosive hard tooth structure defects from dental caries; Prophylaxedialog, (Spec Iss): 7-9 (2009)
- 12 **ATTIN T**; Erosionen: Wenn die Zähne Saures kriegen; DFZ; Der Freie Zahnarzt; 10: 92-93 (2010)
- 13 **BACKER-DIRKS O**; Post-eruptive changes in dental enamel; J. Dent Res: 503-51 (1966)
- 14 **BASHIR E**, Gustavsson A, Lagerlöf F; Site specificity of citric acid retention after an oral rinse. Caries Res 29: 467-469 (1995)
- 15 **BASSIOUNY MA**, Yang J; Influence of drinking patterns of carbonated beverages on dental erosion. Gen Dent 53:205-210 (2005)
- 16 **BINUS W**, Pilzm E W, Stiefel A; Initialkaries: Präventiv-therapeutische Alternativen eines pathologischen Phänomens, Leipzig, J.A. Barth-Verlag: 76-80 (1987)
- 17 **BODKY J**; Einfluss der pH-Anstiegsrate auf die Effizienz der Remineralisation

- initialer Karies bei Anwendung einer fluoridfreien Remineralisationslösung;
Med. Diss. Würzburg (1991)
- 18 **BUSCH S**; Grundlagenforschung auf dem Weg zur "natürlichen Füllung"; ZM
10: 34 (2001)
- 19 **BUSSCHER H J**, Goedhart W, Ruben J, Bos R, Van der Mei C H; Wettability
of dental enamel by soft drinks as compared to saliva and enamel
demineralisation; In Tooth Wear and Sensitivity; Martin Dunitz Ltd: 197-200
(2000)
- 20 **CO. COOPER P J**, Charnock J, Taylor M J; The prevalence of bulimia nervosa.
Br J Psychiatry 151: 684–686 (1987)
- 21 **DAWES C**, Kubieniec K; The effects of prolonged gum chewing on salivary
flow rate and composition. Arch Oral Biol 49; 665 (2004)
- 22 **DGEinfo 02/2008** – Forschung, Klinik, Praxis; Aus dem Bereich: Ernährung;
Trinkverhalten und Gesundheit , 28.03.2008; Quelle: Libuda L et al.: Pattern
of beverage consumption and long-term assoziation with body-weight status in
German adolescents – results from the DONALD study. Br J Nutr 98 (2007)
- 23 **DGEinfo**; Deutsche Gesellschaft für Ernährung; Die
ernährungsphysiologische Bedeutung von Wasser; 05/2010
- 24 **DISTLER W**, Bronner H, Hickel R, Petschelt A: Die Säurefreisetzung beim
Verzehr von zuckerfreien Fruchtbonbons in der Mundhöhle in vivo. Dtsch
Zahnärztl Z 48: 492–494 (1993)
- 25 **DÖRR Nicole**; Vergleichende experimentelle Untersuchungen zur
remineralisierenden Wirkung einer Zahnpflegepaste mit CPP-ACP-Komplex;
Inaug. Diss.; Würzburg; 2009
- 26 **EDWARDS M**, Ascwood R A, Littlewood S J, Brocklebank L M, Fung D E; A
videofluoroscopic comparison of straw and cup drinking: the potential
influence on dental erosion. Br Dent J 185: 244–249 (1998)
- 27 **EISENBURGER M**, Addy M, Hughes J A, Shellis R P; Effect of time on the
remineralisation of enamel by synthetic saliva after citric acid erosion. Caries
Res 35: 211–215 (2001)
- 28 **FEATHERSTONE JDB**, Cutress TW, Rogers BE, Dennison PJ;
Remineralization of early carious lesions in vivo by a self administered
mouthrinseor paste; Caries Res (1981)
- 29 **FERGUSON DB**; Circadian rhythms in human parotid saliva flow rate and
composition; Archs Oral Biol; 1155 (1974)
- 30 **GANSS C**, Klimek J, Schäfer U, Spall T; Effectiveness of two fluoridation
measures on erosion progression in human enamel and dentine in vitro; Caries
Res 35; 325-330 (2001)
- 31 **GEIGER Michael**; Einfluss des pH-Wertes und des Kalzium-Phosphat-
Verhältnisses einer fluoridierten Mineralisationslösung auf die
Mineralisationsrate poröser Hydroxylapatitkörper; Med Diss (1996)
- 32 **GRENBY T H**; Lessening dental erosive potential by product modification. Eur
J Oral Sci 104: 221–228 (1996)
- 33 **HAHN Petra**; Aktuelle Entwicklungen in der Kariesprophylaxe; Dt Zahnärztl
Z: Der Freie Zahnarzt: 54-61 (2011)
- 34 **HARA AT**, Lussi A, Zero DT; Biological factors. Monogr Oral Sci 20:88-99
(2006)
- 35 **HELLSTRÖM I**; Oral complications in anorexia nervosa. Scand J Dent Res 8:
71–86 (1977)
- 36 **HELLWIG E**, Klimek J, Attin Th; Einführung in die Zahnerhaltung; Auflage 3;

- Kap.1; 3-7 (2003)
- 37 **HELLWIG E**, Klimek J, Attin T; Einführung in die Zahnerhaltung; Auflage 5; Kapitel 2; 30-33 (2009)
- 38 **HOTZ PR**; Erosion des Zahnschmelzes. Schweiz Monatsschr Zahnmed 97: 219-222 (1987):
- 39 **HUNTER M L**, West N X, Hughes J A, Newcombe R G, Addy M; Erosion of deciduous and permanent dental hard tissue in the oral environment; J Dent 28: 257-263 (2000)
- 40 http://www.bionade.com/service/BIONADE_Info_Inhaltsstoffe_29092010.pdf (2010)
- 41 http://www.coca-cola-gmbh.de/pdf/Coke_InfGen_Broschuere_2010.pdf; 13-14 (2010)
- 42 **HÖHLING H-J**; Bauelemente von Zahnschmelz und Dentin aus morphologischer, chemischer und struktureller Sicht. Hanser, München-Wien (1966)
- 43 **HÜLSMANN M**; Der Speichel; Göttingen (1992)
- 44 **IMFELD T**; Dental erosion. Definition, classification and links. Eur J Oral Sci; 104: 151-155 (1996)
- 45 **IMFELD C**, Imfeld T; Essstörungen (II): Zahnmedizinische Aspekte. Schweiz Monatsschr Zahnmed; 115:1163-1171 (2005)
- 46 **IRELAND A J**, Mcguinness N, Sherriff M; An investigation into the ability of soft drinks to adhere to enamel. Caries Res 29: 470-476 (1995)
- 47 **JAEGGI T**, Lussi A; Toothbrushabrasion of erosively altered enamel after intraoral exposure to saliva – an in situ study; Caries Res 33: 455-461 (1999)
- 48 **JAEGGI T**, Lussi A; Erosionen bei Kindern im frühen Schulalter; Schweiz Monatschr Zahnmed 114: 876-881 (2004)
- 49 **JAHNS R**; Einfluss der pH-Anstiegsrate auf die Effizienz der Remineralisation initialer Karies bei der Anwendung einer fluoridierten Remineralisationslösung; Med Diss Würzburg: 73 – 74 (1991)
- 50 **JAHNS R**; Einfluss der pH-Anstiegsrate auf die Effizienz der Remineralisation initialer Karies bei der Anwendung einer fluoridierten Remineralisationslösung; Med Diss Würzburg: 80 – 81 (1991)
- 51 **JENSDOTTIR T**, Arnodttir I B, Thorsdottir et al.; Relationship between dental erosion, soft drinks consumption, and gastroesophageal reflux among Icelanders; Clin Oral Investig: 8:91-96 (2004)
- 52 **JOHANNSON A K**, Lingstrom P, Imfeld T, Birkhed D; Influence of drinking method on tooth-surface pH in relation to dental erosion; Eur J Oral Sci: 112:484-489 (2004)
- 53 **JONES R R**, Cleatonl-Jones P; Depth and areas of dental erosions and dental caries in bulimic women; J Dent Res 68: 1275-1278 (1989)
- 54 **JUNG S**; Der Einfluss erosiver Getränke auf die Stabilität von Fluorid auf und im Schmelz in situ ; Inaug Diss; Giessen: 9-17 (2004)
- 55 **JÄRVINEN V**, Rytömaa I, Heinonen O P; Risk factors in dental erosion; J Dent Res 70: 942-947 (1991)
- 56 **KLAIBER B**; Hauptvorlesung ZahnerhaltungII; Universität Würzburg (2005)
- 57 **KLIMEK J**; Speichel und Mundgesundheit; Ein Skript für Studenten zur Examensvorbereitung; Universität Gießen; Auflage I (2007)
- 58 **KOULOURIDES T**, Pigmann W; Remineralisation of dental enamel by saliva in vitro; Ann. NY. Acad. Sci: 751-757 (1965)
- 59 **KRAMER E**; Prophylaxefibel; Grundlagen der Zahngesundheit; Kap.3: 31 (2008)

- 60 **KRÄMER N**; Zahngesundheit bayerischer Schulkinder 2009; Ergebnisse aus der 5. DAJ-Studie; BZB Bayerisches Zahnärzteblatt: 66-69 (2011)
- 61 **KÖNIG Klaus G**; Karies und Parodontopathien: Äthiologie und Prophylaxe; Thieme Verlag (1987)
- 62 **LARSEN M J, Nyvad B**; Enamel erosion by some soft drinks and orange juices relative to their pH, buffering effect and contents of calcium phosphate; Caries Res 33: 81–87 (1999)
- 63 **LEHMANN Klaus M, Hellwig Elmar**; Einführung in die restaurative Zahnheilkunde; 8.Auflage (2008)
- 64 **LUSSI A, Schaffner M, Hotz P, Suter P**; Dental erosion in a population of Swiss adults; Community Dent Oral Epidemiol 19: 286–290 (1991)
- 65 **LUSSI A, Jaeggi T, Schärer S**; The influence of different factors on in vitro enamel erosion; Caries Res 27: 387–393 (1993)
- 66 **LUSSI A, Portmann P, Burhop B**; Erosion on abraded dental hard tissues by acid lozenges: an in situ study. Clin Oral Invest 1: 191–194 (1997)
- 67 **LUSSI A, Schaffner M**; Progression of and risk factors for dental erosion and wedge-shaped defects over a 6-year period; Caries Res 34: 182-187 (2000)
- 68 **LUSSI A, Jaeggi T**; Das erosive Potential verschiedener Zahnpflegeprodukte im Vergleich zu Nahrungsmitteln und Getränken; Schweiz Monatsschr Zahnmed 111: 274-281 (2001)
- 69 **LUSSI A, Jaeggi T, Zero D**; The role of diet in the aetiology of dental erosion; Caries Res 38: 34–44 (2004)
- 70 **LUSSI A, Schaffner M, Jaeggi T**; Dental erosion, Clinical diagnosis, prevention and minimally invasive treatment; Den norske tannlegeforenings TIDENDE; 115 NR 3: 160-164 (2005)
- 71 **LUSSI A, Schaffner M, Jaeggi T, Grüniger A**; Erosionen; Schweiz Monatsschr Zahnmed, Vol 115 : 10: 917-933 (2005)
- 72 **LUSSI A, Schaffner M, Jaeggi T**; Erosionen: Befund, Diagnose, Risikofaktoren, Prävention; ZM (2007)
- 73 **LUSSI A**; Dentale Erosionen. Von der Diagnose zur Therapie, Quintessenz-Verlag (2009)
- 74 **MEURMAN J, Toskala J, Nuutinen P, Klemetti E**; Oral and dental manifestations in gastroesophageal reflux disease. Oral Surg Oral Med Oral Pathol 78: 583–589 (1994)
- 75 **MEURMAN J H, Ten Cate J M**; Pathogenesis and modifying factors of dental erosion. Eur J Oral Sci 104: 199–206 (1996)
- 76 **MILLWARD A, Shaw L, Smith A**; Dental erosion in four-year-old children from differing socioeconomic backgrounds; ASDC J Dent Child 61; 263-266 (1994)
- 77 **MILLWARD A, Shaw L, Harrington E, Smith A J**; Continuous monitoring of salivary flow rate and pH at the surface of the dentition following consumption of acidic beverages; Caries Res 31: 44–49 (1997)
- 78 **MILOSEVIC A, Slade P D**; The orodental status of anorexia and bulimics; Br Dent J 67: 66–70 (1989)
- 79 **MODABBER A**; In-vitro-Untersuchungen zur Demineralisationsresistenz natürlicher initialer Kariesläsionen; Med Diss; Freiburg: 24-30 (2006)
- 80 **MÜLLER Jan Gerrit**; Untersuchung zur Prävalenz von dentalen Erosionen bei Göttinger Kindergartenkindern und Analyse potentieller Risikofaktoren für Erosionen; Med Diss; Göttingen (2006)
- 81 **NIKIFORUK G**; Understanding dental caries Bd 1. und 2. Karger, Basel (1985)
- 82 **O’SULLIVAN E A, Curzon M E J**; A comparison of acidic dietary factors in

- children with and without dental erosion; *J Dent Child*: 186–192 (2000)
- 83 **PARRY J**, Shaw L, Arnaud M J, Smith A J; Investigation of mineral waters and soft drinks in relation to dental erosion; *J Oral Rehabil* 28: 766–772 (2001)
- 84 **PETERS J**; Strukturuntersuchungen an Cellulose und Cellulosederivaten aus ionischen Lösemitteln; Dissertation Freiberg (2004)
- 85 **ROBB N**, Smith B G N, Geidrys-Leeper E; The distribution of erosion in the dentitions of patients with eating disorders; *Br Dent J* 178: 171–175 (1995)
- 86 **SAUTER M**; Vergleich der durch Bleichen bedingten Mikrohärteveränderung des Schmelzes an Menschen- und Rinderzähnen unter Verwendung von zwei unterschiedlichen carbamidperoxidhaltigen Bleichmitteln; Albert-Ludwigs-Universität Freiburg:10 (2006)
- 87 **SAUTER M**; Vergleich der durch Bleichen bedingten Mikrohärteveränderung des Schmelzes an Menschen- und Rinderzähnen unter Verwendung von zwei unterschiedlichen carbamidperoxidhaltigen Bleichmitteln; Inaug Diss; Freiburg: 21-22 (2006)
- 88 **SCHEUTZEL P**; Zahnmedizinische Befunde bei psychogenen Essstörungen; *Dtsch Zahnärztl Z* 47: 119–123 (1992)
- 89 **SCHLUETER N**, Ganss C, Mueller U, Klimek J (Department of Conservative and Preventive Dentistry, Dental Clinic of the Justus Liebig University, Giessen); Effect of titanium tetrafluoride and sodium fluoride on erosion progression in enamel and dentine in vitro (Der Effekt von Titantetrafluorid und Natriumfluorid auf die Erosionsprogression im Zahnschmelz und Dentin in vitro); Informationskreis Mundhygiene und Ernährungsverhalten (IME): Ausgabe 5, Beitrag Nr. 2 (2007)
- 90 **SCHWEIZER-HIRT C M**, Scheit A, Schmid R, Imfeld T, Lutz F, Mühlemann H R; Erosion und Abrasion des Schmelzes: Eine experimentelle Studie; *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 88:497–529 (1978)
- 91 **SHELLIS RP**, Finke M, Esienburger M, Parker DM, Addy M; Relationship between enamel erosion and liquid flow rate; *Eur J Oral Sci*;113:232-238 (2005)
- 92 **STAEBLER Julia**; Vergleichende experimentelle und klinische Untersuchungen über den Einfluss einer calciumhaltigen Salzhydratschmelze in Fruchtgummis auf die Remineralisation von porösem, künstlichen Zahnschmelz; Med Diss; Würzburg (2008)
- 93 **TEN CATE JM**; Remineralization of enamel lesions. A study of the physico-chemical mechanism; Naturwissenschaftliche Dissertation (1979)
- 94 **TEN CATE JM**, Duijsters PP: Alternating demineralization and remineralization of artificial enamel lesions; *Caries Res* 16, 201-10 (1982)
- 95 **TEN CATE JM**, Larsen MJ, Pearc EIF, Fejerskov O; Chemical interactions between the tooth and oral fluids. In: Fejerskov O, Kidd EAM, editors. *Dental Caries; The Disease and its Clinical Management*. Blackwell; Munksgaard, 49-69 (2003)
- 96 **VAN LOVEREN C** (Academic Centre for Dentistry Amsterdam, Niederlande); Diet and the prevention of dental disorders; *Aktuelle Ernährungsmedizin*, Suppl. 1 pp. S76-S80 (2006); Informationskreis Mundhygiene und Ernährungsverhalten (IME); Ausgabe 4; Beitrag Nr. 4 (2006)

- 97 **WETTON S**, Hughes J, West N, Addy M; Division of Restorative Dentistry Amsterdam, University of Bristol, Dentals School, Bristol, UK; Exposure time of enamel and dentine to saliva for protection against erosion: A study in vitro. *Caries Research*, 40; 213-217 (2006). Informationskreis Mundhygiene und Ernährungsverhalten; Ausgabe 7/8/2006, Beitrag Nr. 4; Die Speichel-Expositionszeit von Zahnschmelz und Dentin zum Schutz vor Erosion: Eine In-vitro-Studie (2006)
- 98 **WIEDEMANN W**; Die Bärchen mit dem kleinen Plus; *ZM* 99, Nr. 2: 34-36 (2009)
- 99 **WIEDEMANN W**, Klinger HG; Die Bestimmung der Massenbilanz bei Remineralisationsexperimenten; persönliche Mitteilung (1999)
- 100 **WIEDEMANN W**; Projekt; Remineralisierender Fruchtgummi (2005)
- 101 **WIEDEMANN W**; Projekt; Remineralisierenden Fruchtgummiprodukte; Würzburg (2006)
- 102 **WIEDEMANN W**; Vergleichende klinische Untersuchungen über den Einfluß einer calciumhaltigen Salzhydratschmelze in Fruchtgummis auf die Remineralisation von porösem Zahnschmelz; Würzburg (2007)
- 103 **WIEGEND Annette**, Attin Thomas; Dentale Erosionen – präventive und therapeutische Empfehlungen für Risikopatienten; *Z Quintessenz*; 57, (11):1157-1164 (2006)
- 104 **WILLERHAUSEN Brita**; Schulz-Dobrik Burkhard et al.; Alcopops, Limo und Co. *ZM* 21: 34 (2004)
- 105 **YOUNG W**, Khan F, Brandt R, Savage N, Razek AA, Huang Q; Syndromes with salivary dysfunction predispose to tooth wear: Case reports of congenital dysfunction of major salivary glands, Prader-Willi, congenital rubella, and Sjogren`s syndromes; *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*: 92:38-48 (2001)
- 106 **ZERO D T**, Fu J, Scott-Anne K, Proskin H; Evaluation of fluoride dentifrices using a short-term intraoral remineralization model; *J Dent Res* 73 (Special issue): 272 (1994)
- 107 **ZERO D T**; Etiology of dental erosion – extrinsic factors; *Eur J Oral Sci* 104;162-177 (1996)
- 108 **ZERO D T**, Lussi A; Etiology of enamel erosion – Intrinsic and extrinsic factors; In: *Tooth Wear and Sensitivity*. Martin Dunitz Ltd: 121–139 (2000)
- 109 **ZIPKIN J**, McClure F J; Salivary citrate and dental erosion; *J Dent Res* 28: 613–626; (1949)

Danksagung

Mein allergrößter Dank gilt Herrn Prof. Dr. Wiedemann für die Überlassung des Themas. Ich bedanke mich für die enorme Unterstützung während der Promotionszeit, für die wertvollen fachlichen und weiterführenden Ratschläge und für die wunderschöne Teamarbeit. Nicht zuletzt bedanke ich mich bei Ihnen für Ihre Menschlichkeit, die ich weiter geben werde!

Herrn Prof. Dr. Holste danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Einen ganz besonderen Dank spreche ich Frau Helga Diettrich aus! Danke für die grenzenlose Unterstützung bei Fragen und Problemen, für die harmonische Zeit im Labor, inklusive Yoga-Pausen, für die langen ermutigenden Telefonate und die Hilfe bei der Korrektur. Es war die größte Bereicherung, Herrn Prof. Dr. Wiedemann und sie als Mentoren zu haben. Vielen Dank!

Für die produktive und fröhliche Zeit im Labor während der Versuchsphase bedanke ich mich bei Fr. Agnes Juhas, Fr. Dr. Natalie Stockschläder und insbesondere bei Fr. Dr. Nicole Dörr, die mir immer wertvolle Tipps gegeben hat.

Ich möchte mich auch ganz herzlich bei Frau Nicole Eis und meinen Assistentinnen Frau Nicole Schögl und Frau Monika Vidmar dafür bedanken, dass sie während des Schreibens mit mir mitgefiebert haben.

Zum Schluss bedanke ich mich vom ganzen Herzen auch bei meiner Familie, die immer mit Rat und Tat an meiner Seite war und mir eigentlich dieses Abenteuer ermöglicht hat. Обучам Бу! (Ich liebe euch!)

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Monova, Asya Lyubomirova

Geburtsdatum: 03.04.1982

Geburtsort: Sofia, Bulgarien

Schulbildung:

1988 – 1995 Grundschule in Sofia, Bulgarien

1995 - 2000 Fremdsprachengymnasium „Sv. Methodij“ in Sofia, Bulgarien

Schwerpunkte: „Deutsch und Russisch“

Studium:

WS 00/01 – SS 2001 Informatikstudium an der Julius-Maximilians Universität Würzburg

WS 01/02 Beginn des Zahnmedizinstudiums an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg

WS 08/09 Abschluss des Studiums mit Staatsexamen und Approbation als Zahnärztin

Berufstätigkeit:

Seit Oktober 2009 Assistenz Zahnärztin in der Praxis Dr. Jakobs, Fürstenfeldbruck

München, Juni 2011

Asya Monova