

Aus der Abteilung für Kieferorthopädie,  
Orthodontie und Kinderzahnmedizin  
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Evaluation der Oberflächenbeschaffenheit des  
Zahnschmelzes im Bracketumfeld mittels Fokusvariation**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Theresa Visel geb. Jäcker

aus Soest

Datum der Promotion: 16.06.2018

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	2
Abstract deutsch .....	2
Abstract englisch.....	3
Einleitung .....	5
Methodik .....	7
Ergebnisse .....	13
Diskussion.....	16
Literatur.....	21
Eidesstattliche Versicherung und Anteilserklärung .....	24
Druckexemplare .....	28
Publikation 1 .....	28
Publikation 2 .....	39
Publikation 3 .....	55
Lebenslauf.....	66
Publikationsliste.....	67
Danksagung .....	69

# Zusammenfassung

## Abstract deutsch

### **Publikation 1: Oberflächenbeschaffenheit des Zahnschmelzes im Bracketumfeld nach Schmelzkonditionierung über vier Wochen: Eine In-situ-Studie.**

Ziel dieser In-situ-Studie war es, die Rauheit der Schmelzoberfläche im Bracketumfeld nach Anwendung verschiedener Schmelzkonditionierungsverfahren zu untersuchen. 15 gesunde Probanden mit guter Mundhygiene haben für 28 Tage eine herausnehmbare Drahtbogen-Kunststoff-Schiene getragen, in welche beidseits bukkal jeweils vier Schmelzproben von extrahierten, humanen Weisheitszähnen eingearbeitet waren. Je eine Schmelzprobe blieb unbehandelt, die anderen drei wurden mit Brackets versehen. Dabei kamen zwei selbstkonditionierende Adhäsivsysteme sowie ein konventionelles Schmelzätzverfahren zum Einsatz. Mittels Fokusvariation (Infinite Focus Mikroskop, Alicona Imaging) wurde die Rauheit im Bracketumfeld unter standardisierten Bedingungen extraoral als  $S_a$ -Wert in nm bestimmt. Es wurden jeweils die  $S_a$ -Werte der verwendeten Systeme mit den Baseline-Werten quantitativ verglichen. Die Ergebnisse wurden auf Normalverteilung (Kolmogorov-Smirnov-Test) getestet und mithilfe einer einfaktoriellen Varianzanalyse auf Signifikanz untersucht ( $p < 0,05$ ). Alle Adhäsivsysteme zeigten über den Beobachtungszeitraum von vier Wochen eine signifikante Abnahme der  $S_a$ -Werte. Es gab jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den untersuchten Gruppen. Die Fokusvariation erwies sich als leistungsstarke Methode, welche eine effiziente Analyse der Schmelzoberfläche ermöglicht.

### **Publikation 2: Demineralisation des Bracketumfeldes nach Anwendung konventioneller und selbstkonditionierender Schmelzadhäsivsysteme.**

Mit dem gleichen Versuchsaufbau wie oben beschrieben sollte in dieser Untersuchung der Mineralverlust nach Anwendung der verschiedenen Adhäsivsysteme mittels quantitativer Lichtfluoreszenz bewertet werden. Dazu wurde jeweils der Fluoreszenzverlust ( $\Delta F$ ) in % bestimmt. Die unbehandelten Schmelzproben zeigten im Verlauf zunehmende Fluoreszenzverluste, also

Demineralisationen, während die mit Brackets versehenen Proben abnehmende  $\Delta F$ -Werte aufwiesen, was auf remineralisierende Prozesse hindeutet.

### **Publikation 3: Einfluss von Piezotomie und Osteoperforation des Alveolarfortsatzes auf die Geschwindigkeit der orthodontischen Zahnbewegung: Ein systematisches Review.**

Ziel dieser systematischen Übersicht war es, zu prüfen, inwieweit minimalinvasive Verfahren wie piezochirurgische Kortikozision und Osteoperforation die kieferorthopädische Zahnbewegung beschleunigen und somit die Behandlungsdauer verkürzen können. Die wissenschaftlichen Datenbanken Pubmed und Google Scholar wurden nach den Suchbegriffen „piezo“, „tooth movement“, „osteoperforation“ und „piezopuncture“ durchsucht. 13 Artikel erfüllten die zuvor definierten Einschlusskriterien, neun davon waren Patientenbeschreibungen und nur vier klinische Studien. In allen vier Studien wurde zwar von einer Beschleunigung berichtet, das Ausmaß war jedoch widersprüchlich. Insgesamt gibt es nur sehr wenig Anhaltspunkte für eine beschleunigende Wirkung der Kortikozision und der Osteoperforation auf die Zahnbewegung. Auch bleibt es fragwürdig, ob diese minimalinvasiven Verfahren die Dauer der kieferorthopädischen Behandlung verkürzen können.

### **Abstract englisch**

#### **Publication 1: Surface morphology of enamel adjacent to orthodontic brackets after enamel conditioning over four weeks: An in situ study.**

The aim of this in-situ study was to investigate prospectively the surface roughness of the enamel surrounding orthodontic brackets in relation to different enamel conditioning methods. 15 healthy probands with good oral hygiene participated in this 28 days lasting study. All participants wore a removable splint being fixed to the teeth. In this appliance, four enamel specimens from extracted human third molars were embedded on both buccal sides. One specimen remained untreated, the three others were bonded with an orthodontic bracket. Two self-etching primers and a conventional acid-etch technique were used to fix brackets. The surface roughness ( $S_a$ ) was evaluated extraorally by means of a 3D scanning microscope (FVSM,

Alicona Imaging), a non-contact optical microscope based on the focus variation concept. These  $S_a$ -values were compared quantitatively to the baseline-measurements. The results were investigated for normal distribution (Kolmogorov-Smirnov test). The change of the  $S_a$ -value in all four groups was compared by means of a one-way ANOVA ( $p < 0.05$ ). In all four groups a significant difference between the  $S_a$ -value measured at the beginning of the study and the final measurement could be observed. However, no significant difference could be found between the four groups. Focus variation 3D scanning microscopy is a powerful tool for evaluating the surface topography of enamel adjacent to orthodontic brackets.

**Publication 2: Demineralization adjacent to orthodontic brackets after application of conventional and self-etching primer systems.**

With the same experimental setup the aim of this study was to determine the mineral loss after using the different enamel conditioning methods. Mineral loss expressed in percentage fluorescence loss ( $\Delta F$ ) was assessed quantitatively with light-induced fluorescence. The untreated specimens showed increasing  $\Delta F$ -values during the whole observation period, whereas all three bonding agents revealed a decrease of fluorescence loss, thus they received a remineralization.

**Publication 3: Influence of piezotomy and osteoperforation of the alveolar process on the rate of orthodontic tooth movement: A systematic review.**

The aim of this systematic review was to investigate, if there is an impact of minimally invasive procedures like piezosurgical corticocision and osteoperforation on the speed of orthodontic tooth movement. A search in the scientific databases pubmed and google scholar was performed with the key words “piezo”, “tooth movement”, “osteoperforation” and “piezopuncture”. 13 articles fulfilled the previously defined inclusion criteria, nine of them were case series and only four were clinical trials. In all four trials an acceleration was reported. However, the extent of the acceleration was inconsistent.

In summary there is only limited evidence about the accelerating effect on tooth movement and it remains questionable if these methods can shorten the duration of the overall treatment.

## Einleitung

Aufgabe der kieferorthopädischen Adhäsivtechnik ist es, einen zeitlich begrenzten Verbund zwischen dem Zahnschmelz und der Bracketbasis herzustellen.

Bei der Schmelzätztechnik basiert der Haftverbund auf einer mikromechanischen Retention. Das Adhäsiv ist dabei der Haftvermittler zwischen dem zuvor mit Säure behandelten Schmelz und dem Komposit, welches wiederum der Befestigung des Brackets dient.<sup>1,2</sup>

Somit fallen im Grunde zwei Arbeitsschritte an, über die eine Haftung am Zahnschmelz aufgebaut wird: erstens die Phosphorsäureätzung zur Konditionierung des Schmelzes, zweitens die Applikation eines Adhäsivs, welches in die konditionierte Oberfläche des Zahnschmelzes eindringt und die Verbindung zum Komposit herstellt.

Im Zuge der Weiterentwicklung der Adhäsivtechnik wurden in den letzten Jahren neue Produkte eingeführt. Bei den sogenannten selbstätzenden Adhäsivsystemen entfällt die vorherige Schmelzkonditionierung mittels Phosphorsäure. Um das Risiko der Entstehung von Demineralisationen im Bracketumfeld zu reduzieren, haben einige Hersteller Fluoride in die kieferorthopädischen Befestigungsadhäsive eingeführt. Dadurch sollen die Probleme, die durch mangelnde Mundhygiene und fehlende Compliance der Patienten mit Multibracketapparatur auftreten, umgangen werden.

Der Einfluss verschiedener Adhäsivsysteme auf die Oberflächenmorphologie des Zahnschmelzes sollte in der vorliegenden Arbeit untersucht werden.

Zur Analyse der Oberflächenmorphologie von Zähnen und Zahnmaterial existieren zahlreiche Methoden: Die **Rasterelektronenmikroskopie** ist eine häufig verwendete Methode, um die Oberflächenstruktur von Schmelz und Dentin zu analysieren, sofern eine exakte Präparation der Proben erfolgt ist.<sup>3,4</sup> Es gibt jedoch Grenzen: eine dreidimensionale Darstellung der Oberflächenbeschaffenheit ist nicht möglich.<sup>5</sup> Da die Methode von der unterschiedlichen Emission von Elektronen abhängt, ist eine Darstellung flacher, homogener Oberflächen ebenfalls nicht möglich.<sup>6</sup> Die rasterelektronenmikroskopische Abtastung ist ein rein qualitatives Verfahren, das zudem auch destruktiv ist.<sup>7</sup>

Bei der **Profilometrie** wird die Oberflächenbeschaffenheit wahlweise mittels Laser zur optischen Abtastung oder mechanisch mithilfe eines Diamanten analysiert.<sup>8,9</sup> Der

Mineralverlust ergibt sich dabei aus den gemessenen Höhenunterschieden. Es handelt sich um eine Methode, die sowohl qualitativ als auch quantitativ ist. Die Profilometrie wurde auch als Goldstandard bezeichnet <sup>10</sup>, obwohl keine Aussagen über demineralisierte Bereiche unterhalb der Oberfläche möglich sind.

Die **konfokale Laserscanningmikroskopie (CLSM)** ist eine nicht-destruktive dreidimensionale Technik mikroskopischer Tomographie und eignet sich zur qualitativen Bewertung von strukturellen Veränderungen auf der Schmelzoberfläche sowie in Gebieten unter der Oberfläche bis zu einer Tiefe von 100 µm. <sup>11</sup>

**Mikroradiographische Analyseverfahren** basieren auf der Absorption von Röntgenstrahlung im Zahnhartgewebe. Je nach Schnittebene werden zwei Verfahren unterschieden: die longitudinale (LMR) und die transversale Mikroradiographie (TMR). Mithilfe der LMR kann zwar der Mineralgehalt quantitativ erfasst werden, eine Charakterisierung der Läsionstiefe ist jedoch nicht möglich. Diese Methode eignet sich, um oberflächliche Mineralverluste oder -gewinne, wie sie beispielsweise bei Erosionen vorkommen, zu bestimmen. Die Probenvorbereitung für die TMR ist sehr aufwendig, die Proben müssen senkrecht zur Zahnoberfläche präpariert werden, wobei die Probendicke 100 µm nicht überschreiten darf. Der Mineralgehalt wird als Funktion der Tiefe dargestellt. Es werden Läsionstiefe und Mineralverlust untersucht, so dass De- und Remineralisationsvorgänge beurteilt werden können. <sup>12</sup> Die Quantifizierung oberflächlicher Läsionen ist jedoch nur bedingt möglich.

Eine neue alternative Methode zur flächenhaften Analyse der Schmelzoberfläche stellt die **Fokusvariation** dar. Hierbei handelt es sich um eine Methode, welche die geringe Schärfentiefe einer Optik nutzt, um die Tiefen- und Farbinformation eines Objektes zu gewinnen. Das zu untersuchende Objekt wird vertikal gescannt, wobei je nach Oberflächengeometrie nur limitierte Bereiche scharf abgebildet werden. <sup>13</sup> Anders als klassische (taktile) Oberflächenmessgeräte liefert die Fokusvariation also dreidimensionale Messergebnisse ohne die Oberfläche des Objektes zu berühren. Die Messungen sind beliebig oft wiederholbar, da die Oberfläche nicht zerstört oder verändert wird.

Die **quantitative Lichtfluoreszenz** ist eine optische Methode zur Kariesdiagnostik und beruht auf der natürlichen Fluoreszenz des Zahnes. <sup>14,15</sup> Mit ihr wird nicht die Rauheit gemessen, sondern anhand des Fluoreszenzabfalls die Progredienz der Läsionstiefe. An Glattflächen können so Demineralisationen nachgewiesen werden.

## Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit sollte eine longitudinale Beobachtung der Oberflächenbeschaffenheit des Zahnschmelzes im Bracketumfeld ermöglichen. Zwei selbstkonditionierende Adhäsive wurden mit der konventionellen Schmelzätzttechnik hinsichtlich der Entstehung von Demineralisationen im Bracketumfeld verglichen. Da auch die Dauer der Behandlung mit festsitzenden Apparaturen ein wesentlicher Faktor für die Entstehung von Schmelzläsionen ist, wurde außerdem in einem Review untersucht, inwieweit minimalinvasive Verfahren wie piezochirurgische Kortikozision und Osteoperforation des Alveolarfortsatzes die kieferorthopädische Zahnbewegung beschleunigen und somit die Behandlungsdauer verkürzen können. Für die Analyse der Oberflächen wurde das 3D-Oberflächenmesssystem Infinite Focus (IFM, Alicona Imaging, Grambach/Graz, Österreich) sowie die quantitative Lichtfluoreszenz (Inspektor Pro Intraoral Fluorescence Camera, Inspektor Research Systems BV, Amsterdam, Niederlande) verwendet. Es sollten folgende Fragen geklärt werden:

- 1) Gibt es Unterschiede zwischen selbstkonditionierenden und konventionellen Adhäsivsystemen hinsichtlich des Demineralisationsverhaltens im Bracketumfeld?
- 2) Eignet sich die Fokusvariation zur longitudinalen Analyse der Oberflächenbeschaffenheit von Zahnschmelz?
- 3) Können minimalinvasive Verfahren die kieferorthopädische Zahnbewegung beschleunigen?

## **Methodik**

### **Publikation 1 und 2**

15 Probanden (gute allgemeine Gesundheit, keine Medikamente, Durchschnittsalter 26,8 ( $\pm$  2,4) Jahre) nahmen an diesem 28 Tage dauernden Experiment teil. Alle waren voll bezahnt und suffizient konservierend versorgt. Sie trugen weder herausnehmbaren Zahnersatz noch kieferorthopädische Geräte mit Ausnahme von geklebten Retainern. Die Mundhygiene wurde anhand des Papillenblutungsindex (PBI nach Lange) <sup>16</sup> und des Approximalen Plaque Index (API nach Saxer und Mühlemann) <sup>17</sup> bestimmt und konnte bei allen Probanden als sehr gut eingestuft werden. Es lag die Zustimmung der Ethikkommission der Charité - Universitätsmedizin Berlin vor (Antragsnummer: EA4/113/10).

Für jeden Teilnehmer wurde eine Drahtbogen-Kunststoff-Schiene für den Unterkiefer hergestellt, welche der Aufnahme von Schmelzproben diente (Abb 1).

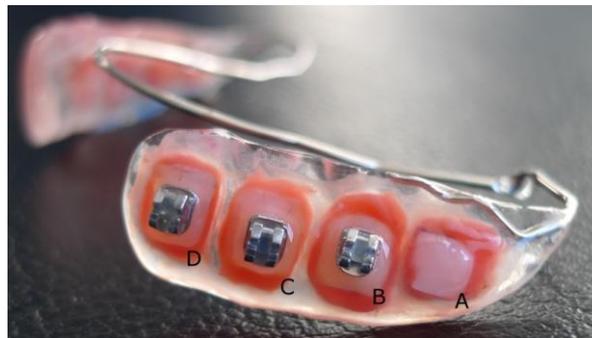
Die passiven Schienen wurden auf Modellen aus Hartgips (Moldano Hartgips, Heraeus Kulzer, Hanau, Deutschland) angefertigt und bestanden aus folgenden funktionellen Anteilen:

*a) Drahtelement*

Eine fortlaufende individuell-handgebogene passive Haltevorrichtung aus federhartem Stahldraht (Durchmesser 0,9 mm, Dentaurum, Ispringen, Deutschland), die lingual exakt entlang der Zahnreihe bis zum letzten Seitenzahn und dort um den Zahn herum nach bukkal verlief, diente zum Einen als Halteelement des Gerätes an den Unterkieferzähnen und zum Anderen der Befestigung des Kunststoffanteils.

*b) bukkaler Kunststoffanteil*

Vestibulär der Molaren mündete der Drahtbogen in je ein Schild aus transparentem Kunststoff (Orthocryl®, Dentaurum, Ispringen, Deutschland) mit je vier Vertiefungen zur Aufnahme der Schmelzproben.



*Abb. 1.: Anordnung der Schmelzproben in der Schiene: Insgesamt fanden acht Proben in jeder Schiene Platz, je zwei aus jeder Gruppe, auf jeder Seite je eine. Die Anordnung war dabei immer gleich: A unbehandelte Kontrollgruppe, B iBond Gluma inside, C Transbond Plus Self etching primer, D konventionelle Ätztechnik (35%ige Phosphorsäure und Transbond XT Primer).*

Die Schmelzproben wurden aus operativ entfernten retinierten Weisheitszähnen gewonnen. Es wurde darauf geachtet, dass die Zähne vor Extraktion von einer intakten Schleimhaut bedeckt waren. So bestand keinerlei Kontakt zur Mundhöhle und bereits bestehende Demineralisationen konnten ausgeschlossen werden. Es wurde je eine Probe aus der Bukkalfläche jedes Zahnes gewonnen.

Für die Auswertung mittels Fokusvariation wurde mit einer diamantierten Trennscheibe jeweils an einer Seite der Schmelzproben eine Kerbe präpariert.

Bis zur weiteren Verarbeitung wurden die Proben in destilliertem Wasser aufbewahrt.

90 der insgesamt 120 Schmelzproben wurden mit Brackets versehen. Dabei kamen folgende Produkte zum Einsatz:

**iBond™ Gluma® inside** (Heraeus Kulzer, Hanau, Deutschland) selbstätzender Primer

**Transbond™ Plus Self Etching Primer** (3M Unitek™, Seefeld, Deutschland) selbstätzender Primer

**Unitek™ Etching Gel** (3M Unitek™, Seefeld, Deutschland) Ätzel

**Transbond™ XT Primer** (3M Unitek™, Seefeld, Deutschland) Primer für lichthärtende Adhäsive

Die 120 Proben wurden nach dem Zufallsprinzip in die folgenden vier Gruppen eingeteilt (n=30):

- Gruppe A Kontrollgruppe (unbehandelt)
- Gruppe B iBond™ Gluma® inside
- Gruppe C Transbond™ Plus Self Etching Primer
- Gruppe D klassische Schmelzätzung mit 35%iger Phosphorsäure (Ätzel) und anschließendem Auftrag von Transbond™ XT Primer

In Anlehnung an die klinische Vorgehensweise wurden die Brackets (APC™ II Victory Series, 3M Unitek™ Seefeld, Deutschland) auf die Schmelzproben geklebt. Anschließend wurden die Proben in den zuvor gefrästen Vertiefungen in der Schiene mit Klebewachs befestigt.

Mittels Infinite Focus Mikroskop und quantitativer Lichtfluoreszenz wurde das Bracketumfeld zu Beginn des Versuches, sowie nach 3, 7 und 14 Tagen untersucht. Die Abschlussmessung erfolgte nach 28 Tagen.

#### Fokusvariation

Das hier verwendete 3D-Oberflächenmesssystem **Infinite Focus** (IFM, Alicona Imaging, Grambach/Graz, Österreich) basiert auf der Technologie der Fokusvariation. Es handelt sich um ein flächenbasiertes Messsystem, welches die Analyse der Oberflächenstruktur einer Probe ermöglicht.



Abb. 2: Infinite Focus Mikroskop mit vertikal verschieblicher Präzisionsoptik und motorisiertem Tisch mit Rahmen für die Proben. Der motorisierte Tisch ist horizontal beweglich (siehe Pfeile).

Hauptbestandteil des Systems ist eine Präzisionsoptik mit verschiedenen Objektiven (Abb. 2 und 3). Die Optik ist in der Höhe beweglich. Auf diese Weise wird das zu untersuchende Objekt vertikal gescannt, wobei je nach Oberflächengeometrie nur limitierte Bereiche scharf abgebildet werden. Die zugehörige Software errechnet aus den Daten ein digitales dreidimensionales Oberflächenmodell.

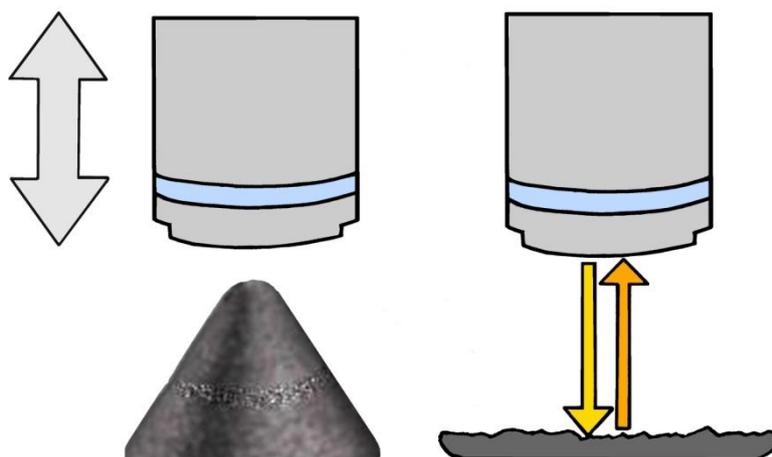


Abb. 3: Prinzip der Fokusvariation: Bedingt durch die geringe Schärfentiefe des Systems wird immer nur ein kleiner Abschnitt des Objektes scharf abgebildet, sodass entsprechend der dreidimensionalen Struktur einer Probe manche Bereiche scharf und andere unscharf dargestellt werden. Um ein vollkommen scharfes Bild zu erhalten, wird die Präzisionsoptik vertikal verschoben. Während dieser kontinuierlichen Veränderung der Distanz zwischen Probe und Objektiv wird jeweils die Änderung der Schärfe gemessen.

In der vorliegenden Studie wurde jeweils der  $S_a$ -Wert (arithmetischer Mittelwert der Höhen der ausgewählten Flächen) bestimmt. Im Gegensatz zu dem bisher gebräuchlichsten Parameter zur Oberflächenmessung, dem  $R_a$ -Wert (Mittelwert der Rauheit), welcher keine Informationen zur charakteristischen Struktur eines Profils enthält, handelt es sich bei dem  $S_a$ -Wert um einen flächenbasierten Parameter, welcher zusätzlich Informationen über die dreidimensionale Rauheit liefert. <sup>18</sup>

Die Messung eines 3D-Datensatzes läuft folgendermaßen ab:

Die gewünschte Aufnahmestelle wird fokussiert und mit moduliertem Licht beleuchtet. Das Licht entstammt einer Weißlichtquelle und wird mithilfe eines halbdurchlässigen Spiegels in den optischen Pfad des Gerätes geleitet und über das Objektiv auf die Probe fokussiert. Auf diese Weise kommt es zu einer coaxialen Ausleuchtung.

Je nach Oberflächenbeschaffenheit der Probe wird das auftreffende Licht unterschiedlich stark reflektiert. Die Lichtstrahlen, die auf das Objektiv treffen, werden dann mithilfe einer Präzisionsoptik gebündelt und auf einen lichtempfindlichen digitalen Sensor projiziert, der sich auf der Rückseite des Spiegels befindet. Die Intensität des reflektierten Lichts wird dabei kontinuierlich mit einer Kamera erfasst (Abb. 3).

Während also die Distanz zwischen Probe und Objektiv durch vertikales Verschieben der Präzisionsoptik verändert wird, werden kontinuierlich Bilder aufgenommen. Dabei wird jeweils die Änderung der Schärfe gemessen und zur Messung der jeweiligen 3D-Position herangezogen. Mit der Information, in welcher Entfernung ein Punkt scharf abgebildet wurde, kann nun die Tiefeninformation bestimmt werden. Die Software registriert Oberflächen- und Farbinformationen und rekonstruiert diese zu einem dreidimensionalen Bild.

Wir verwendeten eine 50-fache Vergrößerung und eine vertikale Auflösung von 20 nm, da sich diese Einstellungen in Vorversuchen bewährt haben.

Für die Analyse der Bilder stand die IFM G 4 Software (Alicona Imaging, Grambach/Graz, Österreich) zur Verfügung. Mit dem Modul „Flächenanalyse“ wurde der  $S_a$ -Wert bestimmt. Der Messbereich ist frei einstellbar. Wir definierten ein Quadrat der Größe  $150\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$ . Als Referenz diente dabei die zuvor präparierte Kerbe am Rand der Schmelzprobe. Das Quadrat wurde so positioniert, dass es mit der Oberkante in direktem Kontakt zur Unterseite der Markierung stand (Abb. 4).

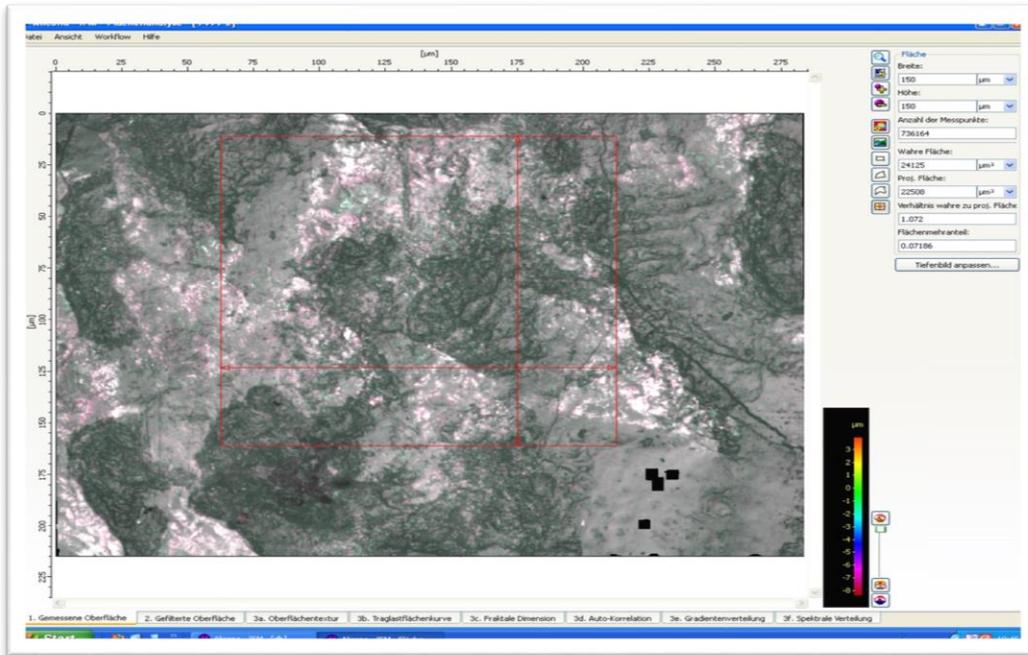


Abb. 4: Flächenanalyse mithilfe der IFM-Software: im oberen Bildrand sieht man die Kerbe, an dessen Unterseite das Quadrat angelegt ist.

Um Welligkeit (langwellige Abweichung von der Oberfläche) und Rauheit (kurzwellige Abweichung von der Oberfläche) von der Gesamtform zu trennen, wurde ein spezieller Filter ( $\lambda_c = 30 \mu\text{m}$ ) verwendet.

Die große Wiederholgenauigkeit wird durch die Funktion zur Beurteilung der Messunsicherheit gewährleistet. Zu jedem 3D-Messpunkt wird die Wiederholbarkeit mit angegeben, damit liefert das System zu jedem Messwert auch eine Abschätzung zur Messunsicherheit.

### Quantitative Lichtfluoreszenz

Im Rahmen eines weiteren Versuchs wurden die gleichen Proben zusätzlich mittels quantitativer Lichtfluoreszenz untersucht. Dazu wurde jeweils der Mineralverlust als prozentualer Fluoreszenzabfall im Bracketumfeld bestimmt. Das Prinzip der quantitativen Lichtfluoreszenz sowie die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in der zweiten Publikation ausführlich erläutert.

### **Publikation 3**

In zwei wissenschaftlichen Datenbanken (Pubmed und Google Scholar) wurde unabhängig von zwei verschiedenen Untersuchern nach relevanten Studien gesucht. Die verwendeten Suchbegriffe waren „piezo“, „tooth movement“, „osteoperforation“ und „piezopuncture“. Bis einschließlich Mai 2016 erfolgte die Suche. Anhand zuvor

definierter Kriterien wurde festgelegt, welche Studien für die Übersichtsarbeit genauer untersucht werden sollten.

Als Haupt-Einschlusskriterium wurde festgelegt, dass nur randomisierte kontrollierte Studien, kontrollierte Studien sowie Fallstudien zur Auswahl kamen. Weiterhin wurden nur solche Artikel ausgewählt, in denen klinische Untersuchungen an Menschen vorgenommen wurden.

Alle Studien, die sich mit nicht-chirurgischen Maßnahmen zur Zahnbewegung beschäftigten, wurden ausgeschlossen. Es wurde darauf geachtet, dass nur minimalinvasive Maßnahmen ohne Lappenbildung untersucht wurden. Tierversuche, reine Beschreibungen der Technik sowie Literaturerhebungen wurden aussortiert. 36 der 576 Arbeiten blieben übrig. Darunter erfüllten nur 13 das weitere Einschlusskriterium: die transmukosale Technik ohne Bildung eines Mukoperiostlappens. Die 13 Studien wurden von zwei Untersuchern nach einem 3-Punkte-Bewertungssystem bewertet.

## **Ergebnisse**

### **Publikation 1**

Zur Auswertung lagen Daten von 120 Versuchen vor. Von jedem Versuch wurden Werte von unterschiedlichen Merkmalen (Variablen) erfasst und elektronisch gespeichert. Die logarithmierten Werte wurden durch Bildung des dekadischen Logarithmus berechnet. Dies nähert die Häufigkeitsverteilung der Daten mehr einer Normalverteilung an, sodass die angewendeten Testverfahren zuverlässige Ergebnisse liefern.

Allgemein ließ sich für alle untersuchten Gruppen eine Abnahme der  $S_a$ -Werte feststellen. Die folgenden Abbildungen (Abb. 5 a-d) zeigen den zeitlichen Verlauf der Messwerte in den verschiedenen Gruppen.

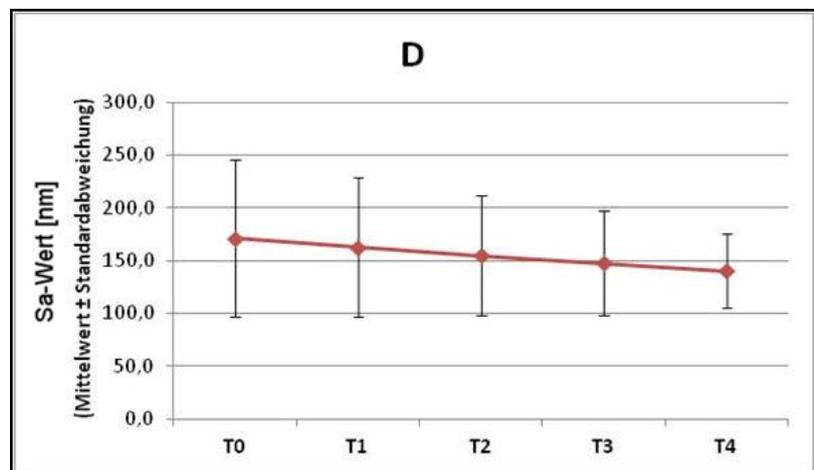
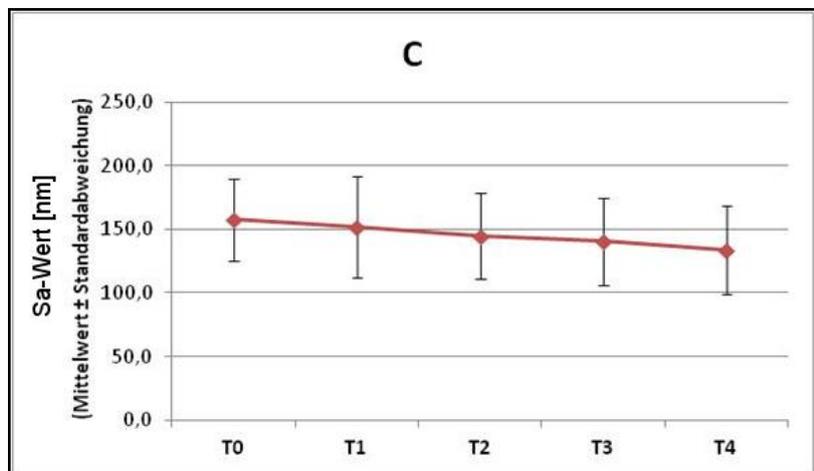
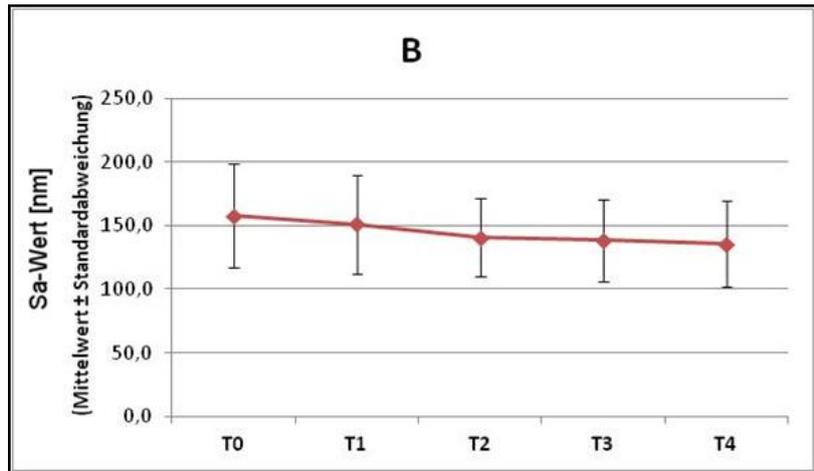
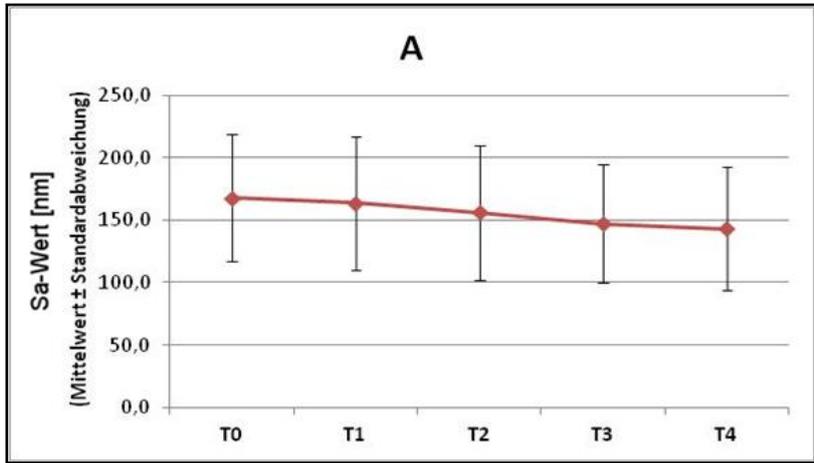


Abb. 5 a-d:  $S_a$ -Werte aller Gruppen im zeitlichen Verlauf.

Zur Untersuchung des Einflusses der Gruppen (A, B, C, D) auf die  $S_a$ -Werte wurde eine einfaktorische Varianzanalyse durchgeführt. Ein statistisch signifikanter Einfluss der Gruppenzugehörigkeit konnte nicht nachgewiesen werden, alle  $p$ -Werte waren größer als 0,05. Es konnte somit für keinen der fünf Zeitpunkte (T0-T4) auf einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen A, B, C und D gefolgert werden.

Auch bei einer Adjustierung der  $S_a$ -Werte zum Zeitpunkt T4 mit denen des initialen Zustandes (T0) waren Unterschiede zwischen den Gruppen nicht nachzuweisen (Covarianzanalyse).

Der Einfluss der Ausgangsmesswerte T0 auf die Werte zum Zeitpunkt T4 war dagegen deutlich statistisch signifikant ( $p < 0,001$ ). Die folgende Abbildung (Abb. 6) zeigt den Zusammenhang zwischen Ausgangs- und Abschlussmessung. Die Anwendung des Korrelationskoeffizienten nach Pearson zeigt deutlich den Zusammenhang zwischen den beiden Größen T0 und T4. Die Untersuchung dieses Zusammenhangs in den einzelnen Gruppen führte zu sehr ähnlichen Ergebnissen, so dass aus dieser Auswertung nicht auf deutliche Unterschiede zwischen den Gruppen hinsichtlich des Zusammenhangs T0 – T4 geschlossen werden kann.

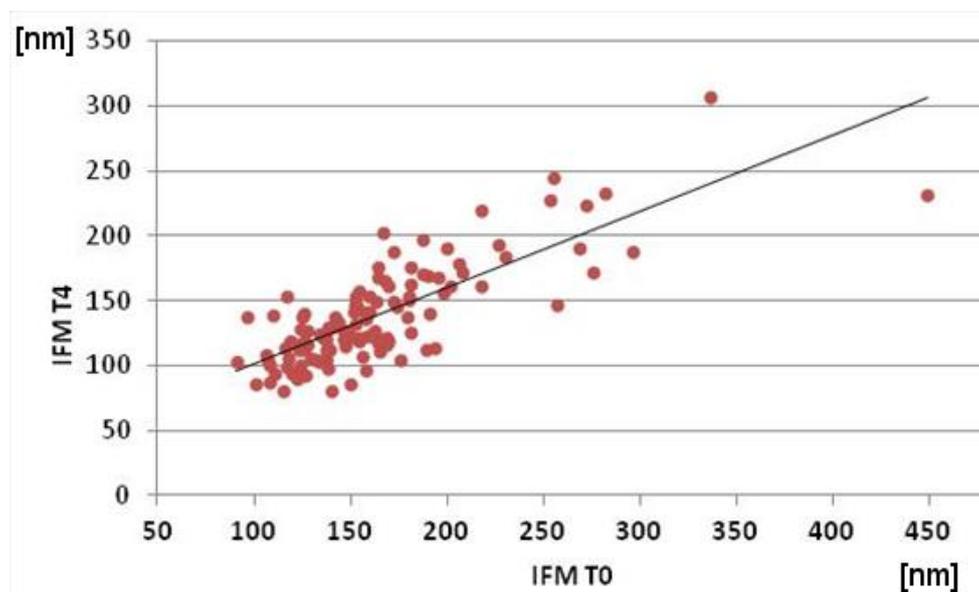


Abb. 6: Zusammenhang zwischen Ausgangs- und Abschlussmessung.

## **Publikation 2**

Hier zeigten die Kontrollgruppe (A) und die Versuchsgruppen (B, C, D) gegensätzliche Verläufe. Während die unbehandelten Proben Demineralisationsvorgänge aufwiesen, zeigten sich bei den mit Brackets beklebten Schmelzproben Remineralisationsvorgänge in Form von abnehmenden Werten für die Fluoreszenzverluste. Signifikant war der Unterschied jedoch lediglich zwischen Gruppe C (Transbond Plus) und Gruppe D (konventionelle Ätztechnik) zum Zeitpunkt T4.

Über den gesamten Beobachtungszeitraum betrachtet fällt auf, dass es ab einer Tragedauer von 14 Tagen bei allen mit Brackets versehenen Schmelzproben zu signifikanten Remineralisationsprozessen kam.

## **Publikation 3**

Die erste Suche lieferte 576 Ergebnisse, 13 davon erfüllten die Einschlusskriterien, neun Fallstudien und vier klinische Studien, im Einzelnen: Acht Patientenberichte mit wenig Signifikanz, eine prospektive klinische Pilotstudie mit wenig Signifikanz und vier randomisierte klinische Studien mit moderater Signifikanz.

Alle vier klinischen Studien konnten eine Beschleunigung der kieferorthopädischen Zahnbewegung nachweisen, wenn auch in geringem Ausmaß. Die übrigen Arbeiten konnten einen solchen Effekt aus Mangel an Kontrollgruppen nicht mit Sicherheit nachweisen.

## **Diskussion**

### **Publikation 1 und 2**

Es gibt bislang keine Studien, welche Oberflächenrauheiten im Bracketumfeld mittels Fokusvariation verglichen haben. Eine Arbeitsgruppe hat morphologische Veränderungen vor und nach jedem Schritt der Infiltrationstechnik analysiert, allerdings an bovinen Schmelzproben.<sup>13</sup> Andere Untersucher haben die Veränderungen am Zahnschmelz durch Softdrinks untersucht, dabei wurde jedoch jeweils der  $R_a$ -Wert bestimmt.<sup>19,20</sup>

Entgegen der in der Literatur beschriebenen Zunahme an Demineralisationen im Verlauf einer Multibracketbehandlung<sup>21-23</sup> deuten die Ergebnisse dieser Arbeit auf Remineralisationsprozesse hin. Das könnte zum Einen an dem relativ kurzen

Untersuchungszeitraum von nur vier Wochen liegen und zum Anderen daran, dass die Apparatur herausnehmbar war und dadurch bessere Reinigungsmöglichkeiten bot als eine Multibracketapparatur.

Die Probanden umfassten eine Gruppe sowohl männlicher (n=8) als auch weiblicher (n=7) Studenten der Zahnmedizin im Alter zwischen 23 und 32 Jahren mit einem durchschnittlichen Alter von 26,8 ( $\pm$  2,4) Jahren. Neben dem Vorteil der guten Verfügbarkeit dieser Gruppe stellt sie eine geeignete Stichprobe dar, um die heterogen strukturierte Grundgesamtheit der Bevölkerung zu repräsentieren.

Es muss allerdings einschränkend festgestellt werden, dass die Gesamtzahl der Probanden verhältnismäßig gering war. Somit sind die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zwar in der Lage, Tendenzen aufzuzeigen, für allgemeingültige Aussagen bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen an einem größeren Probandengut.

Das verwendete Schienenmodell ermöglicht eine Plaqueakkumulation auf den Schmelzproben und eignet sich daher zur Beobachtung einer Kariesentstehung. Störfaktoren wie Ernährungs- und Mundhygienegewohnheiten konnten auf ein Minimum reduziert werden, da es sich um eine herausnehmbare Apparatur handelt. Für die Herstellung der Schmelzproben wurden 120 menschliche retinierte Weisheitszähne verwendet, da sie leicht zu beschaffen sind und mit hoher Wahrscheinlichkeit eine unverletzte Schmelzstruktur aufweisen.

Wie in vielen anderen Studien auch wurden die Zähne zunächst in Chloramin-T-Lösung gelagert.<sup>24-27</sup>

Als Sterilisationsmethode wurde die Plasmasterilisation gewählt, da sie die strukturelle Integrität der Zähne nicht beeinflusst.<sup>28</sup> Alternative Methoden sind die Sterilisation mittels Dampfautoklav, Natriumhypochlorid oder Povidonjodid. Am gebräuchlichsten ist sicherlich die Sterilisation mittels Dampfautoklav. Dabei kommt es allerdings zu einer signifikanten Aufweichung des Zahnschmelzes.<sup>29</sup> Bei der Anwendung von Natriumhypochlorid werden durch Deproteinisation organische Komponenten entfernt, was die Porosität des Zahnschmelzes erhöht und so die Durchlässigkeit gegenüber Säuren beeinflusst.<sup>30,31</sup> Die Verwendung von Povidonjodid erwies sich zwar als effektiv gegen die meisten Bakterien, Viren, Pilze und Sporen, der Einfluss auf die chemische Integrität ist jedoch unbekannt.<sup>32</sup>

Aufgrund der schnellen und einfachen Handhabung, ist die Verwendung selbstkonditionierender Adhäsivsysteme zur Befestigung kieferorthopädischer Brackets weit verbreitet. In der vorliegenden Arbeit wurde sowohl ein für die Kieferorthopädie entwickelter selbstätzender Primer (Tranbond™ Plus) als auch ein zur allgemeinen Anwendung in der restaurativen Zahnheilkunde vorgesehener selbstätzender Primer (iBond™ gluma®) verwendet.

Eine falsche Vorgehensweise wie beispielsweise falsche Ätzzeit oder insuffizientes Spülen kann zu Problemen bei der Verbundqualität führen. Wichtige Größen sind dabei der Behandlerinfluss und dessen Erfahrung bei der Applikation. Um mögliche Fehlerquellen bei der Anwendung zu minimieren, wurden alle Vorgänge von einem einzigen Behandler in immer der gleich Art und Weise durchgeführt. Der Zahnschmelz wurde entsprechend der Gebrauchsanweisung der Adhäsivsysteme vorbereitet. Das Kleben der Brackets erfolgte exakt nach Herstellerangaben.

Beim Infinite Focus Mikroskop handelt es sich um ein flächenbasiertes Messsystem, das 2 bis 200 Millionen Messpunkte pro Messung verarbeitet und damit eine vertikale Auflösung von bis zu 10 nm erzielt.<sup>33</sup> Diese hohe Messpunktdichte garantiert eine hohe Wiederholgenauigkeit der Messungen auch über größere Flächen.

Ren et al. geben Anforderungen an ein Oberflächenmesssystem an. Die ideale Methode sollte nicht destruktiv sein, longitudinale Messungen der Oberflächenveränderungen in Echtzeit ermöglichen und einen quantifizierbaren Substanzverlust in drei Dimensionen liefern. Die Fokusvariation mittels IFM kombiniert die geringe Schärfentiefe eines optischen Systems mit einem vertikalen Scanvorgang, um dreidimensionale Bilder zu erhalten und wird so allen oben genannten Anforderungen gerecht.<sup>33</sup>

Die taktile Profilometrie stellt in der Literatur die am häufigsten verwendete Methode zur quantitativen Messung von Demineralisationen dar. Die Tastspitze des Profilometers durchläuft dabei die zu messende Oberfläche und stellt ein lineares Profil dar, welches Informationen zur Tiefe des Substanzverlustes liefert.<sup>34</sup> Die Möglichkeiten der taktilen Profilometrie sind jedoch limitiert. Das mechanische Abtasten mittels diamantierter Tastspitze kann den Proben Schaden zufügen und longitudinale Messungen derselben Probe unmöglich machen.<sup>19,34</sup>

Anders als klassische (taktile) Oberflächenmessgeräte liefert das Infinite Focus Mikroskop dreidimensionale Messergebnisse ohne die Oberfläche des Objektes zu

berühren. Die Messungen sind beliebig oft wiederholbar, da die Oberfläche nicht zerstört wird. Dadurch ist das Gerät im Gegensatz zu taktilen Messgeräten verschleißfrei, was eine gleichbleibende Genauigkeit der Messungen garantiert. Die Fokusvariation stellt eine hinreichend etablierte Methode zur flächenhaften Analyse von Oberflächen dar.

Fuji et al. untersuchten die Oberfläche von Schmelzproben nach in vitro erzeugten Erosionen durch Softdrinks. Zum Einsatz kamen zwei Oberflächenmessgeräte, zum Einen die taktil Profilometrie, zum Anderen die berührungslose Messung mittels Fokusvariation, wobei jeweils der  $R_a$ -Wert gemessen wurde. Es konnte eine signifikante Korrelation des  $R_a$ -Wertes zwischen der taktilen Profilometrie und der Fokusvariation nachgewiesen werden. Die optische Oberflächenanalyse mittels Fokusvariation wies jedoch einige Vorteile auf: Die Messungen wurden schneller durchgeführt und ergaben dreidimensionale Bilder ohne die Oberfläche zu zerstören.

19

Ren et al. führten eine Studie zum Einfluss der Fluoridbehandlung auf die Widerstandsfähigkeit des Schmelzes gegenüber erosiven Getränken durch. Die Erosionstiefe wurde dabei mittels Fokusvariation und mithilfe konventioneller taktiler Profilometrie gemessen und zeigte ähnliche Tendenzen bei beiden Methoden. Sie konnten eine deutliche Korrelation der Messergebnisse zwischen Fokusvariation und Kontaktprofilometrie nachweisen. Die Schmelzverluste waren auf den 3D-Bildern deutlich sichtbar und konnten mithilfe der Software (Infinite Focus G4 Surface Characterization Software) problemlos quantifiziert werden. Weiterhin zeigte sich, dass die Tastspitze des Profilometers Furchen auf den Probenoberflächen verursachte, welche wiederum mittels Fokusvariation sichtbar gemacht werden konnten.<sup>33</sup>

Sie bezeichneten die Fokusvariation als leistungsstarke, effiziente Methode mit hohem Potential für zahnmedizinische Studien, die sich mit der quantitativen Evaluation der Oberflächentopographie befassen.

Dennoch erfordert eine valide Auswertung die strenge Kontrolle einer Reihe von Störfaktoren. Vor jeder Aufnahme mittels IFM wurden die Proben mit einer weichen Zahnbürste unter fließendem Wasser gereinigt, um Auflagerungen, die die spätere Analyse der Bilder erschweren können, zu entfernen. Der zuvor gefertigte Silikonschlüssel gewährleistete eine reproduzierbare Position der Proben auf dem motorisierten Tisch des IFM und damit eine gleichbleibende Achsrichtung des auf die

Proben auftreffenden Lichtstrahls. So konnten überwiegend gleichbleibende Bedingungen geschaffen werden.

Auch die quantitative Lichtfluoreszenz kann als hinreichend etablierte Methode betrachtet werden, um Demineralisationen an Glattflächen nachzuweisen. <sup>14,35</sup>

### **Publikation 3**

Anhand einer systematischen Überprüfung der Literatur sollte der Einfluss minimalinvasiver Verfahren wie piezochirurgische Kortikozision und Osteoperforation des Alveolarkammes auf die Geschwindigkeit der kieferorthopädischen Zahnbewegung untersucht werden. Für invasivere Methoden ist eine Beschleunigung bereits nachgewiesen. Kortikotomien beispielsweise können die Zahnbewegung beschleunigen, gehen aber mit einem Weichgewebstrauma einher, da die Bildung eines Mukoperiostlappens erforderlich ist. <sup>36</sup>

Minimalinvasive piezochirurgische Kortikozision und Osteoperforation sind bedeutend weniger traumatisch, da sie Weichgewebe schonen und in Lokalanästhesie vorgenommen werden können.

Sowohl die Literaturrecherche als auch die Qualitätsbewertung der eingeschlossenen Artikel wurde von zwei Untersuchern unabhängig durchgeführt. Dabei wurden die PRISMA Richtlinien streng eingehalten. Keine der untersuchten Studien war älter als 5 Jahre. Es wurde ein 3-Punkte-Bewertungssystem verwendet, um den methodischen Ansatz zu beurteilen. Alle eingeschlossenen Veröffentlichungen wurden mithilfe des Risk-of-bias-tool der Cochrane Collaboration bewertet.

Nach Prüfung aller Ein- und Ausschlusskriterien blieben nur vier klinische Studien am Menschen, welche sich mit dem Einfluss minimalinvasiver Verfahren auf die kieferorthopädische Zahnbewegung beschäftigten. Zwar konnten alle einen wenn auch zeitlich begrenzten beschleunigenden Effekt nachweisen, die Gesamtevidenz sollte jedoch mit Vorsicht betrachtet werden, insbesondere da es keinerlei Langzeitbeobachtungen hinsichtlich einer beschleunigenden Wirkung auf die Zahnbewegung gibt.

## Literatur

1. Crow V. Ex vivo shear bond strength of fibreglass reinforced aesthetic brackets. *Br J Orthod* 1995;22:325-330.
2. Akin-Nergiz N, Nergiz I, Behlfelt K, Platzer U. Shear bond strength of a new polycarbonate bracket - an in vitro study with 14 adhesives. *Eur J Orthod* 1996;18:295-301.
3. Johansson AK, Sorvari R, Birkhed D, Meurman JH. Dental erosion in deciduous teeth - an in vivo and in vitro study. *J Dent* 2001;29:333-340.
4. Ten Bosch JJ, Angmar-Mansson B. A review of quantitative methods for studies of mineral content of intra-oral caries lesions. *J Dent Res* 1991;70:2-14.
5. Van Meerbeek B, Vargas M, Inoue S, Yoshida Y, Perdigao J, Lambrechts P, Vanherle G. Microscopy investigations. Techniques, results, limitations. *Am J Dent* 2000;13:3D-18D.
6. Kakaboura A, Fragouli M, Rahiotis C, Silikas N. Evaluation of surface characteristics of dental composites using profilometry, scanning electron, atomic force microscopy and gloss-meter. *J Mater Sci Mater Med* 2007;18:155-163.
7. Meurman JH, Frank RM. Progression and surface ultrastructure of in vitro caused erosive lesions in human and bovine enamel. *Caries Res* 1991;25:81-87.
8. Attin T, Meyer K, Hellwig E, Buchalla W, Lennon AM. Effect of mineral supplements to citric acid on enamel erosion. *Arch Oral Biol* 2003;48:753-759.
9. Hammadeh M, Rees JS. The erosive susceptibility of cervical versus occlusal enamel. *Eur J Prosthodont Restor Dent* 2001;9:13-17.
10. Hall AF, Sadler JP, Strang R, de Josselin de Jong E, Foye RH, Creanor SL. Application of transverse microradiography for measurement of mineral loss by acid erosion. *Adv Dent Res* 1997;11:420-425.
11. Zentner A, Duschner H. Structural changes of acid etched enamel examined under confocal laser scanning microscope. *J Orofac Orthop* 1996;57:202-209.
12. Amaechi BT, Higham SM, Edgar WM. Use of transverse microradiography to quantify mineral loss by erosion in bovine enamel. *Caries Res* 1998;32:351-356.
13. Mueller J, Yang F, Neumann K, Kielbassa AM. Surface tridimensional topography analysis of materials and finishing procedures after resinous infiltration of subsurface bovine enamel lesions. *Quintessence Int* 2011;42:135-147.
14. Kühnisch J, Heinrich-Weltzien R. Quantitative light-induced fluorescence (QLF) - A literature review. *Int J Comput Dent* 2004;7:325-338.

15. Pretty IA, Ingram GS, Agalamanyi EA, Edgar WM, Higham SM. The use of fluorescein-enhanced quantitative light-induced fluorescence to monitor de- and remineralization of in vitro root caries. *J Oral Rehabil* 2003;30:1151-1156.
16. Lange DE, Plagmann HC, Eenboom A, Promesberger A. Clinical methods for the objective evaluation of oral hygiene. *Dtsch Zahnarztl Z* 1977;32:44-47.
17. Saxer UP, Mühlemann HR. Motivation and education. *SSO Schweiz Monatsschr Zahnheilkd* 1975;85:905-919.
18. Blateyron F. New 3D parameters and filtration techniques for surface metrology  
<http://www.qualitymag.com/ext/resources/QUAL/Home/Files/PDFs/New3DParameterSandFiltrationTechniquesforSurfaceMetrology.pdf> 2006, aufgerufen am 13.04.2017.
19. Fujii M, Kitasako Y, Sadr A, Tagami J. Roughness and pH changes of enamel surface induced by soft drinks in vitro-applications of stylus profilometry, focus variation 3D scanning microscopy and micro pH sensor. *Dent Mater J* 2011;30:404-410.
20. Ren YF, Amin A, Malmstrom H. Effects of tooth whitening and orange juice on surface properties of dental enamel. *J Dent* 2009;37:424-431.
21. Pancherz H, Mühlich DP. Entwicklung von Karies bei kieferorthopädischer Behandlung mit festsitzenden Apparaturen - Ein Vergleich von Zähnen mit und ohne Kariesvorschädigung. *Kieferorthop* 1997;11:138-144.
22. Lovrov S, Hertrich K, Hirschfelder U. Enamel demineralization during fixed orthodontic treatment - incidence and correlation to various oral-hygiene parameters. *J Orofac Orthop* 2007;68:353-363.
23. Tufekci E, Dixon JS, Gunsolley JC, Lindauer SJ. Prevalence of white spot lesions during orthodontic treatment with fixed appliances. *Angle Orthod* 2011;81:206-210.
24. Hobson RS, McCabe JF, Hogg SD. Bond strength to surface enamel for different tooth types. *Dent Mater* 2001;17:184-189.
25. Klocke A, Shi J, Kahl-Nieke B, Bismayer U. Bond strength with custom base indirect bonding techniques. *Angle Orthod* 2003;73:176-180.
26. Millett DT, Doubleday B, Alatsaris M, Love J, Wood D, Luther F, Devine D. Chlorhexidine-modified glass ionomer for band cementation? An in vitro study. *J Orthod* 2005;32:36-42.
27. Yi GK, Dunn WJ, Taloumis LJ. Shear bond strength comparison between

direct and indirect bonded orthodontic brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003;124:577-581.

28. Slaybaugh R. Sterilization: gas plasma, steam and washer-decontamination. <http://www.infectioncontrolday.com/articles/2000/06/sterilization-gas-plasma-steam-and-washer-deconta.aspx> 2000, aufgerufen am 07.06.2017.

29. Chandler NP. Preparation of dental enamel for use in intraoral cariogenicity experiments. *J Dent* 1990;18:54-58.

30. Bitter NC. A scanning electron microscopy study of the effect of bleaching agents on enamel: a preliminary report. *J Prosthet Dent* 1992;67:852-855.

31. Robinson C, Kirkham J, Percival R, Shore RC, Bonass WA, Brookes SJ, Kusa L, Nakagaki H, Kato K, Nattress B. A method for the quantitative site-specific study of the biochemistry within dental plaque biofilms formed in vivo. *Caries Res* 1997;31:194-200.

32. Amaechi BT, Higham SM, Edgar WM. Efficacy of sterilisation methods and their effect on enamel demineralisation. *Caries Res* 1998;32:441-446.

33. Ren YF, Zhao Q, Malmstrom H, Barnes V, Xu T. Assessing fluoride treatment and resistance of dental enamel to soft drink erosion in vitro: applications of focus variation 3D scanning microscopy and stylus profilometry. *J Dent* 2009;37:167-176.

34. Barbour ME, Rees JS. The laboratory assessment of enamel erosion: a review. *J Dent* 2004;32:591-602.

35. Knösel M, Forslund L, Jung K, Ziebolz D. Efficacy of different strategies in protecting enamel against demineralization during fixed orthodontic treatment. *J Orofac Orthop* 2012;73:194-203.

36. Shoreibah EA, Salama AE, Attia MS, Abu-Seida SM. Corticotomy-facilitated orthodontics in adults using a further modified technique. *J Int Acad Periodontol* 2012;14:97-104.

## Eidesstattliche Versicherung und Anteilserklärung

„Ich, Theresa Visel, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Evaluation der Oberflächenbeschaffenheit des Zahnschmelzes im Bracketumfeld mittels Fokusvariation“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -[www.icmje.org](http://www.icmje.org)) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an den ausgewählten Publikationen entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Betreuer/in, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

---

Unterschrift

## Anteilserklärung an den erfolgten Publikationen

### **Publikation 1**

Autoren: **Theresa Visel**, Dominik Visel, Paul-Georg Jost-Brinkmann, Ralf Müller-Hartwich, Thomas-Michael Präger

Titel: Oberflächenbeschaffenheit des Zahnschmelzes im Bracketumfeld nach Schmelzkonditionierung über vier Wochen. Eine In-situ-Studie

Zeitschrift: Quintessenz Kieferorthopädie, 2016

Beitrag im Einzelnen: Erstellung eines Konzepts, Entwicklung der Fragestellung und des Studiendesigns zusammen mit Dominik Visel, Durchführung von Vorversuchen zur Eignung des Infinite Focus Mikroskops, Verfassung und Einreichung des Ethikantrags zusammen mit Dominik Visel, Ausarbeitung von Teilnehmerinformation, Einwilligungserklärung und Tagebuch für die Probanden, Rekrutierung der Probanden und Untersuchung auf Eignung für die Studie, Beschaffung der Zähne und Aufbereitung der Proben, Mitarbeit bei der Herstellung der intraoralen Apparaturen auf Gipsmodellen, Befestigen der Brackets auf den Proben, Anfertigen und Speichern von dreidimensionalen Bildern mittels Infinite Focus Mikroskop, Flächenanalyse der angefertigten Bilder mit der Software IFM G4, Auswertung der Untersuchungsergebnisse, statistische Analyse, Verfassen und Einreichen der Publikation kontrolliert durch PD Dr. Dr. T.M. Präger, Bearbeitung der Gutachter-Kommentare

## **Publikation 2**

Autoren: Dominik Visel, **Theresa Jäcker**, Paul-Georg Jost-Brinkmann, Thomas-Michael Präger

Titel: Demineralization adjacent to orthodontic brackets after application of conventional and self-etching primer systems

Zeitschrift: Journal of Orofacial Orthopedics/Fortschritte der Kieferorthopädie, 2014

Beitrag im Einzelnen: Mitarbeit bei der Durchführung der Experimente, Unterstützung bei der Analyse und Diskussion der Daten, Mitarbeit bei der Erstellung des Manuskripts, Literaturrecherche, Korrekturlesen der Publikation, Bearbeiten der Kommentare der Gutachter

## **Publikation 3**

Autoren: Stefan Hoffmann, Nikolaos Papadopoulos, Dominik Visel, **Theresa Visel**, Paul-Georg Jost-Brinkmann, Thomas-Michael Präger

Titel: Influence of piezotomy and osteoperforation of the alveolar process on the rate of orthodontic tooth movement: a systematic review.

Zeitschrift: Journal of Orofacial Orthopedics/Fortschritte der Kieferorthopädie, 2017

Beitrag im Einzelnen: Literaturrecherche und Korrekturlesen des fertigen Manuskripts vor Einreichung, Mitarbeit bei der Beantwortung der Fragen der Gutachter

Unterschrift, Datum und Stempel des betreuenden Hochschullehrers/der  
betreuenden Hochschullehrerin

---

Unterschrift des Doktoranden/der Doktorandin

---

Theresa Visel, Dominik Visel, Paul-Georg Jost-Brinkmann, Ralf Müller-Hartwich, Thomas Michael Präger

## Oberflächenbeschaffenheit des Zahnschmelzes im Bracketumfeld nach Schmelzkonditionierung über vier Wochen Eine In-situ-Studie

**INDIZES** *selbstkonditionierende Adhäsivsysteme, Oberflächenrauheit, Schmelzrauheit, Fokusvariation, Schmelzkonditionierung*

Das Ziel dieser Pilotstudie war es, mittels Fokusvariation die Rauheit der Schmelzoberfläche nach Anwendung zweier selbstkonditionierender Systeme im Vergleich zu konventioneller Schmelzätzung zu untersuchen. 15 Probanden mit guter Mundhygiene trugen eine herausnehmbare Draht-Kunststoff-Schiene, in die jeweils acht Schmelzproben von extrahierten, humanen Weisheitszähnen eingearbeitet waren. Die Apparatur war an den Unterkieferseitenzähnen befestigt und zeigte rechts und links jeweils die gleiche Anordnung der Proben: eine unbehandelte Kontrollgruppe (A) und drei Schmelzproben, die mit Brackets versehen wurden, wobei ein selbstkonditionierender fluoridfreier Primer (B), ein Fluorid freisetzendes Adhäsivsystem (C) und das konventionelle Schmelzätzverfahren (D) zum Einsatz kamen. Die Rauheit wurde mittels Fokusvariation, einem nicht invasiven optischen Verfahren, unter standardisierten Bedingungen extraoral als  $S_a$ -Wert in nm bestimmt. Die Anfangsmessung erfolgte nach Bracketbefestigung und vor Eingliederung der Schiene. Nach 3, 7, 14 und 28 Tagen wurden die  $S_a$ -Werte der verwendeten Systeme mit den Anfangswerten quantitativ verglichen. Die Ergebnisse wurden zunächst auf Normalverteilung getestet und anschließend mit einer einfaktoriellem Varianzanalyse (ANOVA) auf Signifikanz untersucht ( $p < 0,05$ ). Über den Beobachtungszeitraum von 28 Tagen war für alle Adhäsivsysteme insgesamt eine Abnahme der  $S_a$ -Werte zu verzeichnen. Es gab jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den untersuchten Gruppen.



**Theresa Visel**  
Zahnärztin

**Dominik Visel**  
Zahnarzt

**Paul-Georg Jost-Brinkmann**  
Prof. Dr. med. dent.

**Ralf Müller-Hartwich**  
Dr. med. dent.

**Thomas Michael Präger**  
Dr. med. Dr. med. dent.

Abteilung für Kieferorthopädie, Orthodontie und Kinderzahnmedizin  
CharitéCentrum 3 für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
Charité – Universitätsmedizin  
Berlin  
Abmannshauer Straße 4–6  
14197 Berlin  
E-Mail: paul-g.jost-brinkmann@charite.de

### ■ Einleitung

Die konventionelle Adhäsivtechnik, bei der die Schmelzoberfläche mittels 35%iger Phosphorsäure konditioniert wird, gilt als Standardverfahren zur Bracketbefestigung. Nach einer Einwirkzeit von 15 bis 30 s wird die Säure mit Wasser abgespült und die Schmelzoberfläche mit ölfreier Luft getrocknet, bis sie matt weiß erscheint<sup>1</sup>.

Neben der traditionellen Schmelzätztechnik (SÄT) konnten sich selbstätzende Adhäsivsysteme etablieren, bei deren Anwendung die vorherige Konditionierung

mittels Phosphorsäure entfällt. Diese Systeme, bei denen eine einzige Flüssigkeit den Schmelz ätzt und gleichzeitig das Bonding enthält, sollen bei Zeit- und Kostenersparnis gleiche oder sogar bessere Ergebnisse hinsichtlich Ätzmuster und Verbundfestigkeit erzielen<sup>2-5</sup>. Es gibt jedoch gegenwärtig nur wenige Studien über longitudinale Schmelzveränderungen im Zusammenhang mit diesen Systemen<sup>6-8</sup>. Das Ziel dieser Untersuchung war es, verschiedene Methoden der Schmelzkonditionierung im Hinblick auf Demineralisationen im Bracketumfeld zu vergleichen.

### Manuskript

Eingang:  
07.07.2015  
Annahme:  
31.08.2015

**Abb. 1** Unterkiefer-schiene mit bukkal eingearbeiteten Schmelzproben.



Zum Nachweis von Demineralisationen existieren zahlreiche Methoden. Die am häufigsten angewendete Methode zur Quantifizierung von Mineralverlust ist die transversale Mikroradiografie (TMR). Sie ermöglicht eine Beschreibung von De- und Remineralisationsvorgängen in Schmelz und Dentin und dient in erster Linie der quantitativen Erfassung von Kariesprozessen<sup>9</sup>. Die TMR gilt als Goldstandard bei der Bestimmung von Demineralisationen<sup>10</sup>.

Des Weiteren gibt es die Analyse mittels Mikroskopie unter polarisiertem Licht, die Mikrohärtemesung, die konfokale Laser-Scanning-Mikroskopie (CLSM) und die Oberflächenmessung mittels Kontaktprofilometrie.

Die mechanische Profilometrie wurde in der Literatur ebenfalls häufig zur Untersuchung demineralisierter Schmelzflächen angewendet. Die Tastspitze des Profilometers durchläuft dabei die zu messende Oberfläche und erfasst ein lineares Profil, das Informationen zur Tiefe des Substanzverlustes und damit zur Rauheit der Oberfläche liefert<sup>11</sup>. Die Möglichkeiten der mechanischen Profilometrie sind jedoch begrenzt. Das mechanische Abtasten mittels diamantierter Tastspitze kann den Proben Schaden zufügen und longitudinale Messungen derselben Probe unmöglich machen<sup>11,12</sup>.

Eine relativ neue Methode zur flächenhaften Analyse der Schmelzoberfläche stellt die Fokusvariation dar<sup>13</sup>. Anders als klassische (taktile) Oberflächenmessgeräte liefert sie dreidimensionale Messergebnisse, ohne die Oberfläche des Objektes zu berühren. Die Messungen sind beliebig oft wiederholbar, da die Oberfläche nicht zerstört oder verändert wird.

Die Fokusvariation ist eine Methode, welche die geringe Schärfentiefe einer Optik nutzt, um die Tiefen- und Farbinformation einer Oberfläche zu gewinnen. Das zu untersuchende Objekt wird vertikal gescannt, wobei je nach Oberflächengeometrie nur limitierte Bereiche scharf abgebildet werden. Für jeden Messpunkt kann anhand der Variation der Schärfewerte so die entsprechende Tiefeninformation gewonnen werden. Es resultiert ein 3-D-Datensatz, der neben den Höhendaten auch die registrierte 3-D-Farbinformation enthält<sup>13,14</sup>.

Ren et al.<sup>15</sup> bezeichneten die Fokusvariation als leistungsstarke, effiziente Methode mit hohem Potenzial für zahnmedizinische Studien, die sich mit der quantitativen Untersuchung der Oberflächentopografie befassen. Obwohl diverse Studien bestätigen, dass die Fokusvariation eine geeignete Methode zur Analyse der Oberflächentopografie ist, gibt es bisher keine wissenschaftlichen Arbeiten auf Basis der Fokusvariation über die Oberflächenrauheit des Zahnschmelzes nach verschiedenen Konditionierungsmethoden.

Ziel der vorliegenden prospektiv-randomisierten kontrollierten klinischen In-situ-Studie war es, die Veränderungen der Oberflächenbeschaffenheit des Schmelzes im Bracketumfeld mittels Fokusvariation zu bestimmen. Dabei sollten zwei selbstkonditionierende Adhäsivsysteme mit der konventionellen Schmelzätztechnik verglichen werden.

## ■ Materialien und Methode

### ■ Probanden und Materialien

Die Studie wurde von der zuständigen Ethikkommission der Charité genehmigt (Antragsnummer: EA4/113/10).

Auf das Angebot, an der Studie teilzunehmen, meldeten sich 23 Personen, von denen 15 die Einschlusskriterien (Mindestalter 18 Jahre, nicht weniger als zwölf Zähne im Unterkiefer, Papillenblutungsindex [PBI nach Lange<sup>16</sup>] <10 und approximaler Plaqueindex [API nach Saxer und Mühlmann<sup>17</sup>] <25 %) erfüllten. Alle 15 Teilnehmer waren Freiwillige, die ihr schriftliches Einverständnis gegeben haben. Das Durchschnittsalter betrug  $26,8 \pm 2,4$  Jahre, acht Probanden waren männlich,

sieben weiblich. Auf Gipsmodellen wurden passive Draht-Kunststoff-Apparaturen für den Unterkiefer angefertigt (Abb. 1), die der Befestigung von je acht Schmelzproben dienten. Die Proben wurden aus menschlichen retinierten Weisheitszähnen von jugendlichen oder jungen erwachsenen Patienten (< 25 Jahre) gewonnen. Unmittelbar nach der operativen Entfernung wurden die Zähne unter fließendem Wasser gereinigt. Nach einwöchiger Lagerung in bakteriostatischer 0,5%iger Chloramin-T-Lösung bei Raumtemperatur ( $23 \pm 2$  °C) wurden sie in Wasser nach DIN ISO 3696, Qualität 3, im Kühlschrank bei  $4 \pm 2$  °C aufbewahrt.

Mit einem diamantierten Bohrer wurde aus der bukkalen Kronenfläche jedes Zahnes je eine Probe ( $5 \times 6$  mm, Höhe  $2 \pm 0,3$  mm) gewonnen. Die Proben wurden plasmasterilisiert<sup>18</sup>.

Anschließend erfolgte eine randomisierte Verteilung der Proben ( $n=30$ ) auf folgende Versuchsgruppen:

- Gruppe A: unbehandelte Kontrollgruppe
- Gruppe B: iBond™ Gluma® inside (Heraeus Kulzer, Hanau)
- Gruppe C: Transbond™ Plus Self Etching Primer (3M Unitek™, Seefeld)
- Gruppe D: klassische Schmelzätzung mit 35%iger Phosphorsäure (Etching Gel, 3M Unitek™) und anschließend Auftrag von Transbond™ XT Primer (3M Unitek™)

Jede Schiene enthielt acht Schmelzproben, auf jeder Seite je eine aus jeder Gruppe.

Abbildung 2 zeigt die Apparatur in situ. Die Probenanordnung innerhalb der Schiene war immer gleich in der Reihenfolge A, B, C, D von distal nach mesial.

Entsprechend der Gebrauchsanweisung der Adhäsivsysteme wurde der Zahnschmelz der Proben vorbehandelt. Die Proben der Gruppen B wurden mit einer dünnen Schicht iBond™ Gluma® inside versehen, das 20 s unter leichtem Einmassieren einwirken konnte. Für Gruppe C kam Transbond™ Plus zum Einsatz, das 3 bis 5 s einmassiert wurde, bevor es 20 s einwirken konnte. Das für Gruppe D verwendete Ätzgel konnte 15 s einwirken und wurde anschließend für 15 s gründlich abgespült, bevor der Primer aufgetragen wurde. Die Proben der Gruppen



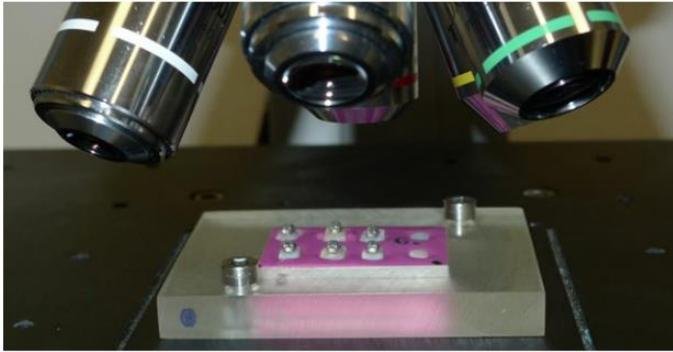
Abb. 2 Schiene aus Abbildung 1 in situ.

B, C und D wurden mit Brackets (APCTM II Victory Series, 3M Unitek™) versehen, wobei auch hier die Herstellerangaben genau befolgt wurden. Überschüssiges Adhäsiv wurde mit einer zahnärztlichen Sonde sorgfältig entfernt. Die Polymerisation erfolgte mittels Polymerisationslampe (Ortholux™ LED Curing Light, 3M Unitek™) jeweils für 20 s von mesial und distal. Die Proben wurden mit Klebewachs in den Schienen fixiert.

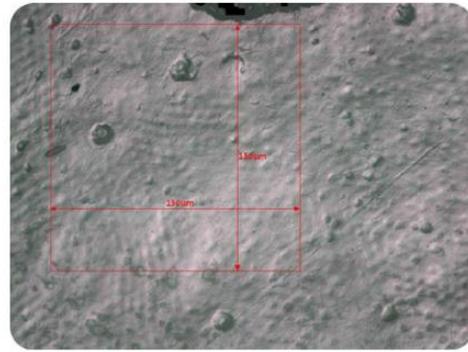
Alle Probanden erhielten die gleiche Zahnpasta (elmex®, Gaba, Lörrach) und eine weiche Zahnbürste (elmex® inter X, Gaba).

Die Probanden wurden angewiesen, die Schiene insgesamt 28 Tage für mindestens 20 Stunden täglich zu tragen. Zum Essen, Zähneputzen, Rauchen und Kaffeetrinken sollte die Schiene herausgenommen werden. Eine manuelle Reinigung der Schiene und der darin befindlichen Proben erfolgte einmal täglich für maximal eine Minute mit der oben genannten Zahnbürste unter fließendem Wasser. Die eigene Mundhygiene sollte unter Verwendung der ausgegebenen Zahnpasta wie gewohnt durchgeführt werden.

Die Anfangsmessung (T0) erfolgte nach Bracketbefestigung und vor Eingliederung der Schiene. Weitere Messungen erfolgten nach 3 (T1), 7 (T2) und 14 (T3) Tagen. Nach vorsichtiger Entnahme aus der Schiene wurden die Proben mit einer Zahnbürste (elmex® inter X) unter fließendem Wasser gereinigt. Dann erfolgte die jeweilige Messung mittels Fokussvariation. Nach Wiederbefestigung der Schmelzproben in der Schiene und anschließender Desinfektion in 70%igem Alkohol wurde die Schiene wieder eingegliedert. Nach 28 Tagen wurde die Abschlussmessung (T4) vorgenommen.



**Abb. 3** Nahaufnahme der Objektive des InfiniteFocus-Mikroskops und Haltevorrichtung mit Schmelzproben.



**Abb. 4** IFM-Analyse: Der zu untersuchende Bereich wird manuell festgelegt und befindet sich direkt unter der zuvor präparierten Markierung.

Sowohl der klinische Teil der Studie als auch die Messungen wurden verblindet durchgeführt. Weder die wissenschaftlichen Mitarbeiter noch die Studienteilnehmer waren über die Zuordnung zu den einzelnen Gruppen informiert.

#### ■ Fokusvariation

Die vorliegende Studie sollte in einer Verlaufskontrolle die Veränderungen der Oberflächenbeschaffenheit des Schmelzes im Bracketumfeld aufzeigen. Dazu wurde jeweils der  $S_a$ -Wert (arithmetischer Mittelwert der Höhen der ausgewählten Fläche) bestimmt, der ein gebräuchlicher Parameter zur Beschreibung der Oberflächenrauheit ist. Als Oberflächenmesssystem kam das InfiniteFocus-Mikroskop der Firma Alicona (IFM, Alicona Imaging, Grambach/Graz, Österreich) zum Einsatz, das 2010 als Referenz in die ISO-Standards (ISO 25178) aufgenommen wurde<sup>14</sup>.

Zunächst wurde das zu untersuchende Objekt auf dem motorisierten Tisch fixiert. Dazu stand ein spezieller Rahmen zur Verfügung, der mit dem Tisch verschraubt werden konnte. Um eine definierte Position der einzelnen Proben innerhalb dieses Rahmens zu gewährleisten, wurden Silikonschlüssel (Futar®, Kettenbach, Eschenberg) gefertigt, in denen jeweils acht Proben Platz fanden (Abb. 3).

Während die Distanz zwischen Probe und Objektiv durch vertikales Verschieben der Präzisionsoptik verändert wird, erfolgt die kontinuierliche

Bildaufnahme. Dabei wird jeweils die Änderung der Schärfe gemessen und zur Berechnung der jeweiligen 3-D-Position herangezogen. Die Software registriert Oberflächen- und Farbinformationen und rekonstruiert diese zu einem dreidimensionalen Bild.

In der vorliegenden Untersuchung wurden eine 50-fache Vergrößerung und eine vertikale Auflösung von 20 nm verwendet, da sich diese Einstellungen in Vorversuchen bewährt hatten. Für die Analyse der Bilder stand die IFM G 4 Software (Alicona Imaging) zur Verfügung.

Mithilfe des Moduls „Flächenanalyse“ wurde der  $S_a$ -Wert bestimmt. Als Messbereich wurde ein Quadrat der Größe  $150 \times 150 \mu\text{m}$  gewählt. Als Referenz diente dabei eine zuvor präparierte Markierung am Rand der Schmelzproben. Das Quadrat wurde so positioniert, dass es mit der Oberkante in direktem Kontakt zur Unterseite der Markierung stand (Abb. 4).

Bei der Auswertung der Ergebnisse wurden die Proben der rechten und linken Seite jeweils gepoolt, da eine Untersuchung auf Abweichungen keine signifikanten Unterschiede ergeben hatte.

#### ■ Statistische Auswertung

Die erhobenen Daten wurden mithilfe des Tabellenkalkulationsprogramms Microsoft® Excel 2010 (Microsoft Inc., Redmond, Washington, USA) erfasst. Die statistische Auswertung erfolgte mit der

Statistiksoftware Statistica, Version 9.1 (Statsoft Inc., Tulsa, Oklahoma, USA).

Durch Bildung des dekadischen Logarithmus wurden zunächst die logarithmierten Werte zu allen Messwerten berechnet. Dies nähert die Häufigkeitsverteilung der Daten mehr einer Normalverteilung an, sodass die angewendeten Testverfahren zuverlässige Ergebnisse liefern.

Die ermittelten Werte wurden mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung überprüft. Anschließend wurden die Daten entsprechend ihrer Verteilung mit parametrischen Testverfahren analysiert. Die  $S_a$ -Werte der verschiedenen Gruppen wurden mittels einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) verglichen. Das Signifikanzniveau wurde mit  $p < 0,05$  festgelegt. Zur Untersuchung des gleichzeitigen Einflusses der Gruppe (A, B, C, D) und der Werte der Anfangsmessung (T0) auf die Messwerte zum Zeitpunkt T4 wurde eine einfaktorielle Kovarianzanalyse durchgeführt. Die Korrelation der Messwerte zum Zeitpunkt T0 und T4 wurde nach Pearson bestimmt. Für quantitative Merkmale wurden Minimum, Maximum und Mediane, Mittelwerte und Standardabweichungen angegeben.

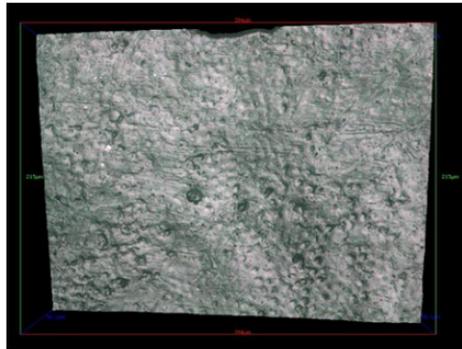


Abb. 5 Screenshot des 3-D-Oberflächenmodells einer Schmelzprobe.

lediglich der Faktor Zeit als statistisch signifikant ( $p < 0,0001$ ). Dagegen waren weder die Gruppenunterschiede ( $p = 0,81$ ) noch die Wechselwirkung zwischen Zeit und Gruppe ( $p = 0,99$ ) statistisch signifikant. Es kann also auf einen Einfluss der Zeit auf die Messwerte geschlossen werden. Allerdings besteht kein Unterschied zwischen den Gruppen

### ■ Ergebnisse

Es gab keine Verluste, alle 120 Schmelzproben konnten analysiert werden.

Tabelle 1 zeigt als Übersicht die Mediane der  $S_a$ -Werte der einzelnen Gruppen zu den verschiedenen Untersuchungszeitpunkten.

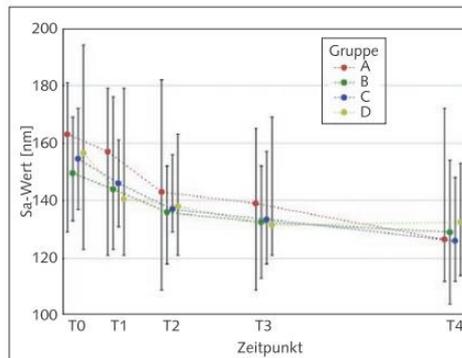
Insgesamt ist die Streuung der Messwerte sehr hoch. Das heißt, die Oberflächenrauheit der Proben variiert erheblich. Abbildung 5 zeigt die Oberflächenbeschaffenheit einer Schmelzprobe im Infinite-Focus-Mikroskop.

Allgemein ließ sich für alle untersuchten Gruppen über den Untersuchungszeitraum eine Abnahme der  $S_a$ -Werte feststellen. Die Oberflächenrauheit aller Schmelzproben hat also im Verlauf der Untersuchung abgenommen. In den Abbildungen 6 und 7 ist jeweils der zeitliche Verlauf der Messwerte in den verschiedenen Gruppen dargestellt.

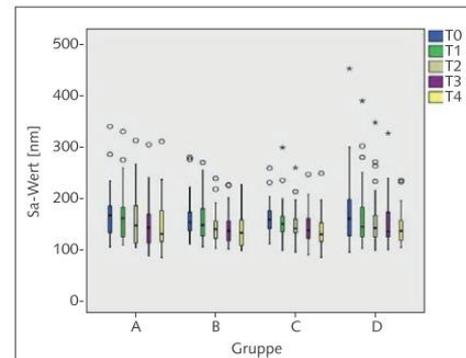
Es wurde eine Varianzanalyse zur gleichzeitigen Untersuchung des Einflusses von Zeit und Gruppe auf die  $S_a$ -Werte durchgeführt. Dabei erwies sich

Tab. 1 Medianwerte der  $S_a$ -Werte in nm aller Gruppen für jeden Zeitpunkt (T0 bis T4).

Unter-suchungs-zeitpunkt		Gruppe			
		A n = 30	B n = 30	C n = 30	D n = 30
T0	Median	163,00	149,50	154,50	156,50
	75er-Perzentil	181,00	167,75	171,50	193,25
	25er-Perzentil	130,25	133,25	137,25	123,25
T1	Median	157,00	142,50	146,00	140,50
	75er-Perzentil	178,75	152,50	161,00	178,75
	25er-Perzentil	122,25	120,57	131,25	121,00
T2	Median	143,00	136,00	137,00	138,00
	75er-Perzentil	181,00	150,50	155,75	162,50
	25er-Perzentil	109,25	118,25	129,25	121,50
T3	Median	139,00	132,50	133,50	131,50
	75er-Perzentil	164,50	150,75	155,50	168,75
	25er-Perzentil	111,25	114,00	118,75	121,00
T4	Median	126,50	129,00	126,00	132,50
	75er-Perzentil	171,00	153,75	147,75	151,50
	25er-Perzentil	112,25	106,75	112,00	114,00



**Abb. 6** Medianwerte der  $S_a$ -Werte über die Zeit. Abnehmende  $S_a$ -Werte verweisen auf abnehmende Rauheit. T0 Baseline-Messung, T1 nach 3 Tagen, T2 nach 7 Tagen, T3 nach 14 Tagen, T4 nach 28 Tagen.



**Abb. 7** Boxplot-Darstellung der  $S_a$ -Werte der Versuchsgruppen (A, B, C, D) über die Zeit.

und auch der zeitliche Verlauf der  $S_a$ -Werte in den verschiedenen Gruppen zeigte keine signifikanten Unterschiede.

Die Proben der unbehandelten Kontrollgruppe wiesen bei der Anfangsmessung höhere  $S_a$ -Werte (Median 163,0 nm) auf als die mit Brackets versehenen Proben (Gruppe B 149,5 nm, Gruppe C 154,5 nm, Gruppe D 156,5 nm). Den niedrigsten Rauheitswert zum Zeitpunkt T0 zeigte Gruppe B mit 149,5 nm.

Bei der Abschlussmessung nach vier Wochen lagen die  $S_a$ -Werte aller Gruppen mit 126,0 nm (Gruppe C) bis 132,5 nm (Gruppe D) insgesamt sehr nahe beieinander.

Die Varianzanalyse zur Untersuchung des Einflusses der Gruppen auf die  $S_a$ -Werte ergab keinen statistisch signifikanten Einfluss der Gruppenzugehörigkeit. Es konnte somit für keinen der fünf Zeitpunkte (T0-T4) ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen A, B, C und D belegt werden.

Die Vergleiche zwischen den vier Gruppen für den Zeitpunkt T4 ergaben auch dann keinen statistisch signifikanten Unterschied, wenn eine rechnerische Adjustierung der T4-Werte mit denen der Ausgangsmessung (T0) vorgenommen wurde.

Mithilfe des Korrelationskoeffizienten nach Pearson konnte ein statistisch signifikanter ( $p < 0,001$ ) Zusammenhang zwischen den Ausgangswerten (T0) und den Abschlussmesswerten (T4) nachgewiesen

werden. Die Untersuchung dieses Zusammenhangs in den einzelnen Gruppen A bis D führte zu jeweils sehr ähnlichen Ergebnissen, sodass auch aus dieser Auswertung nicht auf deutliche Unterschiede zwischen den Gruppen geschlossen werden konnte.

## ■ Diskussion

In der vorliegenden Pilotstudie sollten zwei selbstätzende Adhäsivsysteme mit der konventionellen Ätztechnik in einer einfachen, reproduzierbaren Testprozedur hinsichtlich der Oberflächenrauheit im Bracketumfeld verglichen werden.

Der  $S_a$ -Wert, das heißt die Rauheit, hat bei allen Gruppen im zeitlichen Verlauf abgenommen. In der Literatur gibt es bislang nur wenige Studien, welche die Oberflächenbeschaffenheit von Zahnschmelz mittels Fokusvariation untersucht haben.

Müller et al.<sup>14</sup> analysierten die morphologischen Veränderungen boviner Schmelzproben vor und nach jedem Schritt der Infiltrationstechnik. Nach Politur der Proben wurden mithilfe einer Demineralisationslösung Initialläsionen künstlich erzeugt. Anschließend wurde die Oberfläche mit 20%iger Phosphorsäure für 5 Sekunden geätzt und das Infiltrationsmaterial aufgetragen. Vor und nach jedem Schritt der Infiltrationstechnik wurde der  $S_a$ -Wert bei 50-facher Vergrößerung und einer vertikalen Auflösung von 20 nm bestimmt. Bei gesundem Schmelz

betrug der mittlere  $S_a$ -Wert  $59,3 \pm 12,7$  nm, bei künstlich erzeugten Läsionen  $65,8 \pm 12,3$  nm. Nach Ätzen mit 20%iger Phosphorsäure kam es zu einem signifikanten Anstieg des  $S_a$ -Wertes im Mittel um 249,2 nm. Die Untersuchung von Müller et al. ist jedoch nur bedingt mit der vorliegenden Arbeit vergleichbar, da zum einen bovine Schmelzproben verwendet wurden und zum anderen der Zahnschmelz zuvor glatt geschliffen und poliert wurde.

Des Weiteren gibt es verschiedene Studien, die mittels Fokusvariation die Oberflächenrauheit von Zahnschmelz nach Säureangriffen durch Softdrinks untersuchten<sup>12,19</sup>. Da allerdings jeweils der  $R_a$ -Wert bestimmt wurde, sind auch diese Ergebnisse nicht mit denen der vorliegenden Arbeit vergleichbar.

Zum Vergleich unterschiedlicher Adhäsivsysteme existieren zahlreiche Untersuchungen. Holzmeier et al.<sup>20</sup> haben verschiedene selbstkonditionierende Adhäsive mit der konventionellen Ätztechnik hinsichtlich des Ätzmusters und der Ätztiefe verglichen. Die verschiedenen Produkte wurden auf bovine Schmelzproben aufgebracht. Anschließend wurde jeweils ein Bracket mit Transbond™ XT befestigt. Die Ätztiefe wurde nach Bracketentfernung mittels konfokaler Laserscanningmikroskopie bestimmt. Die geringste Penetrationstiefe zeigte iBond™ mit 0,5  $\mu$ m, gefolgt von Transbond™ Plus mit 8–10  $\mu$ m. Die größte Ätztiefe wurde für die klassische Schmelzätzung mit 35%iger Phosphorsäure und anschließender Applikation von Transbond™ XT mit 15–20  $\mu$ m gemessen. Diese Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass selbstkonditionierende Adhäsive mit Blick auf die geringere Ätztiefe und den damit verbundenen geringeren konditionierungsbedingten Schmelzverlust der konventionellen Ätztechnik überlegen sind. Die Ergebnisse von Holzmeier et al. sind jedoch nur bedingt mit denen der vorliegenden Arbeit vergleichbar, da die Messung nach Bracketentfernung, also direkt unter der Bracketbasis stattfand, während in der vorliegenden Studie das Bracketumfeld untersucht wurde.

Die in der Literatur beschriebene Zunahme an Demineralisationen im Verlauf einer Multibracketbehandlung<sup>21–24</sup> konnte in der vorliegenden Untersuchung nicht bestätigt werden. Vielmehr bedeuten sinkende  $S_a$ -Werte eine abnehmende Oberflächenrauheit und deuten eher auf Remineralisationsprozesse hin. Diese Unterschiede lassen sich wie folgt

erklären. Zum einen betrug der Untersuchungszeitraum in der vorliegenden Studie nur vier Wochen, während die durchschnittliche Behandlung mit festsetzenden kieferorthopädischen Geräten >12 Monate dauert.

Zum anderen war die hier verwendete Apparatur herausnehmbar und bot dadurch bessere Reinigungsmöglichkeiten als eine festsetzende Apparatur. Auch spielten sicher die Ernährung und die sehr gute Mundhygiene der Probanden sowie die Positionierung der Proben (vestibulär, nahe am Parotisausgang, wo die Speichelfließrate größer ist) eine nicht zu unterschätzende Rolle bei der Entstehung einer weniger kariogenen Umgebung.

Visel et al.<sup>25</sup> haben das Demineralisationsverhalten von Zahnschmelz im Bracketumfeld in einem Zeitraum von vier Wochen mittels quantitativer Lichtfluoreszenz (QLF) untersucht. Zur Bracketbefestigung kamen dieselben selbstkonditionierenden Adhäsive (iBond™, Transbond™ Plus) sowie die konventionelle Schmelzätzung mittels Phosphorsäure zum Einsatz. Diese Studie kam zu dem Ergebnis, dass sich selbstkonditionierende Systeme hinsichtlich der Entstehung von Demineralisationen im Bracketumfeld nicht von der traditionellen Ätztechnik unterscheiden.

Die verwendeten Adhäsivsysteme beinhalten sowohl einen rein für die Kieferorthopädie entwickelten selbstkonditionierenden Primer (Transbond™ Plus) als auch einen zur universellen Anwendung in der restaurativen Zahnheilkunde vorgesehenen selbststättenden Primer (iBond™).

Nach Angaben des Herstellers setzt Transbond™ Plus eine in der Literatur nicht beschriebene Menge an Fluorid frei<sup>7,26</sup>. In der vorliegenden Untersuchung konnten keine Unterschiede zwischen dem fluoridhaltigen Adhäsiv (Transbond™ Plus) und dem fluoridfreien Adhäsiv (iBond™) beziehungsweise der Schmelzätzung mittels Phosphorsäure festgestellt werden.

Paschos et al.<sup>7</sup> haben in einer In-vitro-Studie den Effekt verschiedener Adhäsive auf das Bracketumfeld untersucht. Mittels Mikrotomografie und Lichtmikroskopie unter polarisiertem Licht wurden jeweils Läsionstiefe und Mineralverlust verglichen. Signifikante Unterschiede zwischen einem fluoridhaltigen (Transbond™ Plus) und einem fluoridfreien Adhäsiv (Transbond™ XT) konnten nicht nachgewie-

sen werden. Lediglich für Zähne, die mit kunststoff-modifiziertem Glasionomierzement (Fuji Ortho LC) behandelt wurden, konnten signifikant geringere Läsionstiefen und weniger Mineralverlust ermittelt werden.

Die verwendete Apparatur ermöglichte eine Plaqueakkumulation auf den Schmelzproben und entspricht daher den klinischen Verhältnissen bei Multibracketbehandlungen. Alle Probanden wurden mit der gleichen Zahnbürste ausgestattet und erhielten detaillierte Informationen zum Reinigen ihrer Schiene. Da die Reinigung der Proben extraoral stattfand, ist davon auszugehen, dass sie effizienter ausfiel als bei Patienten mit festsitzender Multibracketapparatur. Die Proben wurden jeweils vestibulär der Unterkieferseitenzähne in der Schiene fixiert. Diese Lokalisation wird in verschiedenen Studien empfohlen und sollte eine Plaqueakkumulation ermöglichen, die der bei Brackets im Seitenzahnbereich entspricht<sup>27-29</sup>.

Es wurden 120 gesunde menschliche Weisheitszähne zur Herstellung der Schmelzproben verwendet, da sie leicht zu beschaffen sind und mit hoher Wahrscheinlichkeit eine unverletzte Schmelzstruktur aufweisen. Um Kariesfreiheit zu gewährleisten, kamen ausschließlich retinierte Zähne zum Einsatz, deren posteruptionale Schmelzreifung noch nicht stattgefunden hatte. Der Zahnschmelz retinierter Zähne weist eine höhere Permeabilität auf als derjenige bereits durchgebrochener Zähne. Diese Tatsache wurde jedoch wahrscheinlich teilweise wieder ausgeglichen, da sich die Permeabilität nach Extraktion eines Zahnes verringert<sup>30</sup>.

Da die zervikalen Bereiche zuletzt mineralisiert werden<sup>31</sup>, erfolgte die Probenentnahme im Bereich der bukkalen Höckerabhänge. Es wurde sichergestellt, dass die Bukkalflächen frei von sichtbaren Schäden waren. Eine Kontrollaufnahme mit quantitativer Lichtfluoreszenz diente dazu, Proben, die bereits leichte, klinisch nicht sichtbare Demineralisationen aufwiesen, auszusortieren.

Die Anordnung der Proben innerhalb der Apparatur war bei jedem Probanden gleich (Abb. 2). Da die Reinigung der Schiene und der darin befindlichen Proben außerhalb des Mundes stattfand, und der Abstand zwischen der am weitesten mesial (Gruppe D) und der am weitesten distal gelegenen Gruppe (A) nur etwa 2,5 cm betrug, ist jedoch nicht davon

auszugehen, dass die Position der Proben innerhalb der Schiene Einfluss auf die Messergebnisse hatte. Dennoch sollte in weiterführenden Untersuchungen auf eine randomisierte Verteilung geachtet werden.

Die Anzahl der untersuchten Proben lag in Studien mit ähnlichem Versuchsaufbau zwischen 5<sup>32</sup> und 40<sup>6</sup>, meistens jedoch bei 10 bis 20 Proben pro Gruppe<sup>7,26,33,34</sup>. In der vorliegenden Pilotstudie wurde deshalb eine Fallzahl von 30 Proben pro Gruppe gewählt.

Es wurde je eine separate Kontrollgruppe ohne Bracket mitgeführt, um bewerten zu können, wie sich un behandelter Zahnschmelz verhält. Hinsichtlich unterschiedlicher Mineralisationsgehalte der Zähne wäre ein Kontrollbereich innerhalb derselben Probe sicherlich auch sinnvoll gewesen. Dies sollte in weiterführenden Untersuchungen berücksichtigt werden.

Die Lagerung der Zähne bis zur Herstellung der Proben erfolgte in Chloramin-T-Lösung<sup>35-38</sup>. Zur Abtötung relevanter Mikroorganismen wurden die Proben plasmasterilisiert, da dieses die strukturelle Integrität der Zähne nicht beeinflusst<sup>39,40</sup>.

Die Aufbewahrung der Proben zwischen den einzelnen Arbeitsschritten der Fokusvariation erfolgte in destilliertem Wasser, da sich die chemische Zusammensetzung und Struktur der Proben in dieser sich neutral verhaltenden Lösung nicht verändern<sup>40</sup>.

Die Studienteilnehmer waren größtenteils Zahnmedizinstudenten, wobei es sich um eine Gruppe handelte, die über eine besondere Vorbildung und Sensibilität hinsichtlich der Mundhygiene verfügt. Dies bestätigt eine Studie, die einen geringeren DMF/T-Wert und einen höheren Sanierungsgrad des Gebisses bei Zahnmedizinstudenten fand als in vergleichbaren Altersgruppen anderer Profession<sup>41</sup>.

Die zuvor erhobenen Indizes (PBI und API) belegen ebenfalls eine sehr gute Mundhygiene der Probanden. Diese Tatsache lässt vermuten, dass Demineralisationen bei den hier untersuchten Probanden möglicherweise geringer ausfielen, als es bei anderen Patienten mit Multibracketapparaturen der Fall wäre.

Für die vorliegende Studie erschien die Fokusvariation als geeignete Methode zur Analyse von Oberflächenveränderungen im Zahnschmelz.

Der gebräuchlichste Parameter zur Oberflächenmessung in der Zahnheilkunde war lange Zeit der

$R_a$ -Wert (Mittelwert der Rauheit), der üblicherweise mittels Kontaktprofilometrie bestimmt wurde<sup>42,43</sup>. Der  $R_a$ -Wert erfasst die Rauheit nur zweidimensional. Außerdem kann das mechanische Abtasten die Oberfläche der Probe beschädigen. Dies kann longitudinale Messungen derselben Oberfläche unmöglich machen.

Im Gegensatz dazu ist der mittels Fokusvariation ermittelte  $S_a$ -Wert ein flächenbasierter Parameter. Er liefert Messergebnisse über die Beschaffenheit der ganzen gescannten Oberfläche<sup>44</sup>.

Verschiedene Arbeitsgruppen zeigten diverse Vorteile des InfiniteFocus-Mikroskops (IFM) gegenüber anderen Oberflächenmessgeräten auf: Da keine Präparation der Proben notwendig ist, sind auch longitudinale Beobachtungen derselben Probenoberfläche möglich. Weiterhin kommt es zu keiner Veränderung/Zerstörung der Oberfläche, da alle Messungen vollkommen berührungslos vonstatten gehen<sup>14,15</sup>.

Die große Wiederholgenauigkeit wird durch die Funktion zur Beurteilung der Messunsicherheit gewährleistet. Zu jedem 3-D-Messpunkt wird die Wiederholbarkeit mit angegeben, damit liefert das System zu jedem Messwert auch eine Abschätzung zur Messunsicherheit. Die hohe Reproduzierbarkeit konnte zudem in Vorversuchen durch Wiederholungsmessungen belegt werden.

Um einen reproduzierbaren Messbereich zu gewährleisten, wurde im Rahmen der Vorbereitung jede Probe mit einer Markierung versehen, die später dazu diente, den zu untersuchenden Bereich zu definieren (Abb. 4).

## ■ Schlussfolgerungen

Diese In-situ-Studie unter Verwendung eines einfachen experimentellen Ansatzes zur Messung der Oberflächenrauheit von Zahnschmelz nach Anwendung verschiedener Adhäsivsysteme hat für alle hier verwendeten Systeme im untersuchten Zeitraum von vier Wochen abnehmende  $S_a$ -Werte (abnehmende Rauheit) gezeigt.

Die Rauheit der Schmelzoberfläche im Bracketumfeld unterscheidet sich bei selbstkonditionierenden Adhäsivsystemen nicht von der bei konventioneller Adhäsivtechnik.

Es kann also anhand der vorliegenden Untersuchung nicht auf Vorteile der selbstkonditionierenden Systeme gegenüber der konventionellen Schmelzätztechnik im Hinblick auf das Demineralisationsverhalten im Bracketumfeld geschlossen werden.

Die Analyse mittels Fokusvariation bietet die Möglichkeit, Probenoberflächen automatisch zu erfassen. Die Auswertung verläuft weitgehend benutzerunabhängig und ist damit wenig fehleranfällig. Die Methode ermöglicht eine effiziente Analyse der Schmelzoberfläche.

Veränderungen der  $S_a$ -Werte sind mittels Fokusvariation quantitativ messbar.

Allerdings muss angemerkt werden, dass die verwendete Methodik spezifische Limitationen aufweist und künftig durch ergänzende Experimente erweitert werden sollte.

## ■ Danksagung

Wir danken 3M Unitek™, Heraeus Kulzer und Gaba für die Bereitstellung der Materialien. Weiterhin gilt unser Dank Dr. W. Reimers und Dr. E. Dietrich für ihre Unterstützung bei der statistischen Auswertung.

## ■ Literatur

1. Hellwig E, Klimek J, Attin T. Schmelzkonditionierung. In: Einführung in die Zahnerhaltung. Hellwig E, Klimek J, Attin T (Hrsg). Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag, 2009:200–204.
2. Sirirungrojying S, Saito K, Hayakawa T, Kasai K. Efficacy of using self-etching primer with a 4-META/MMA-TBB resin cement in bonding orthodontic brackets to human enamel and effect of saliva contamination on shear bond strength. *Angle Orthod* 2004;74:251–258.
3. Cal-Neto JP, Miguel JA. Scanning electron microscopy evaluation of the bonding mechanism of a self-etching primer on enamel. *Angle Orthod* 2006;76:132–136.
4. Horiuchi S, Kaneko K, Mori H et al. Enamel bonding of self-etching and phosphoric acid-etching orthodontic adhesives in simulated clinical conditions: debonding force and enamel surface. *Dent Mater J* 2009;28:419–425.
5. Øgaard B, Rezk-Lega F, Ruben J, Arends J. Cariostatic effect and fluoride release from a visible light-curing adhesive for bonding of orthodontic brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1992;101:303–307.
6. Tanna N, Kao E, Gladwin M, Ngan PW. Effects of sealant and self-etching primer on enamel decalcification. Part I: an in-vitro study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009;135:199–205.
7. Paschos E, Kleinschrodt T, Clementino-Luedemann T, Huth KC, Hickel R, Kunzelmann KH, Rudzki-Janson I. Effect of different bonding agents on prevention of enamel demineralization around orthodontic brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009;135:603–612.

8. Ghiz MA, Ngan P, Kao E, Martin C, Gunel E. Effects of sealant and self-etching primer on enamel decalcification. Part II: an in-vivo study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009;135:206–213.
9. Amaechi BT, Higham SM, Edgar WM. Use of transverse microradiography to quantify mineral loss by erosion in bovine enamel. *Caries Res* 1998;32:351–356.
10. Clementino-Luedemann T. Micro-computed tomography in caries research. München: Zahnmed Diss, 2007.
11. Barbour ME, Rees JS. The laboratory assessment of enamel erosion: a review. *J Dent* 2004;32:591–602.
12. Fujii M, Kitasako Y, Sadr A, Tagami J. Roughness and pH changes of enamel surface induced by soft drinks in vitro-applications of stylus profilometry, focus variation 3D scanning microscopy and micro pH sensor. *Dent Mater J* 2011;30:404–410.
13. Danzl R, Helml F, Scherer S. Focus Variation – a new technology for high resolution optical 3D surface metrology 2009.
14. Mueller J, Yang F, Neumann K, Kielbassa AM. Surface tridimensional topography analysis of materials and finishing procedures after resinous infiltration of subsurface bovine enamel lesions. *Quintessence Int* 2011;42:135–147.
15. Ren YF, Zhao Q, Malmstrom H, Barnes V, Xu T. Assessing fluoride treatment and resistance of dental enamel to soft drink erosion in vitro: applications of focus variation 3D scanning microscopy and stylus profilometry. *J Dent* 2009;37:167–176.
16. Lange DE, Plagmann HC, Eenboom A, Promesberger A. Clinical methods for the objective evaluation of oral hygiene. *Dtsch Zahnärztl Z* 1977;32:44–47.
17. Saxer UP, Mühlemann HR. Motivation and education. *SSO Schweiz Monatsschr Zahnheilkd* 1975;85:905–919.
18. Haro Divin XP. Evaluation der quantitativen lichtinduzierten Fluoreszenz (QLF) zur Diagnostik der Karies im frühen Stadium. Freiburg: Zahnmed Diss, 2005.
19. Ren YF, Amin A, Malmstrom H. Effects of tooth whitening and orange juice on surface properties of dental enamel. *J Dent* 2009;37:424–431.
20. Holzmeier M, Schaubmayr M, Dasch W, Hirschfelder U. A new generation of self-etching adhesives: comparison with traditional acid etch technique. *J Orofac Orthop* 2008;69:78–93.
21. Bergstrand F, Twetman S. Evidence for the efficacy of various methods of treating white-spot lesions after debonding of fixed orthodontic appliances. *J Clin Orthod* 2003;37:19–21.
22. Lovrov S, Hertrich K, Hirschfelder U. Enamel demineralization during fixed orthodontic treatment – incidence and correlation to various oral-hygiene parameters. *J Orofac Orthop* 2007;68:353–363.
23. Øgaard B. Prevalence of white spot lesions in 19-year-olds: a study on untreated and orthodontically treated persons 5 years after treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1989;96:423–427.
24. Tufekci E, Dixon JS, Gunsolley JC, Lindauer SJ. Prevalence of white spot lesions during orthodontic treatment with fixed appliances. *Angle Orthod* 2011;81:206–210.
25. Visel D, Jäcker T, Jost-Brinkmann P-G, Präger TM. Demineralization adjacent to orthodontic brackets after application of conventional and self-etching primer systems. *J Orofac Orthop* 2014;75:358–373.
26. Rosenbeck KA. Effektivität der Bracketumfeldbehandlung – eine in vitro Untersuchung. München: Zahnmed Diss, 2010.
27. Arends J, ten Bosch JJ. Demineralization and remineralization evaluation techniques. *J Dent Res* 1992;71:924–928.
28. Sonju Clasen AB, Øgaard B, Duschner H, Ruben J, Arends J, Sönju T. Caries development in fluoridated and non-fluoridated deciduous and permanent enamel in situ examined by microradiography and confocal laser scanning microscopy. *Adv Dent Res* 1997;11:442–447.
29. Zero DT. In situ caries models. *Adv Dent Res* 1995;9:214–230.
30. Brudevold F, Aasenden R, Bakhos Y. A preliminary study of post-eruptive maturation of teeth in situ. *Caries Res* 1982;16:243–248.
31. Schroeder HE. Präeruptive Schmelzreifung. In: *Orale Strukturbioologie*. Stuttgart: Thieme, 2000:51–55.
32. Papacchini F, Goracci C, Sadek FT, Monticelli F, Garcia-Godoy F, Ferrari M. Microtensile bond strength to ground enamel by glass-ionomers, resin-modified glass-ionomers, and resin composites used as pit and fissure sealants. *J Dent* 2005;33:459–467.
33. Cain K, Hicks J, English J, Flaitz C, Powers JM, Rives T. In vitro enamel caries formation and orthodontic bonding agents. *Am J Dent* 2006;19:187–192.
34. Knösel M, Forslund L, Jung K, Ziebol D. Efficacy of different strategies in protecting enamel against demineralization during fixed orthodontic treatment. *J Orofac Orthop* 2012;73:194–203.
35. Hobson RS, McCabe JF, Hogg SD. Bond strength to surface enamel for different tooth types. *Dent Mater* 2001;17:184–189.
36. Klocke A, Shi J, Kahl-Nieke B, Bismayer U. Bond strength with custom base indirect bonding techniques. *Angle Orthod* 2003;73:176–180.
37. Millett DT, Doubleday B, Alatsaris M, Love J, Wood D, Luther F, Devine D. Chlorhexidine-modified glass ionomer for band cementation? An in vitro study. *J Orthod* 2005;32:36–42.
38. Yi GK, Dunn WJ, Taloumis LJ. Shear bond strength comparison between direct and indirect bonded orthodontic brackets. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003;124:577–581.
39. Amaechi BT, Higham SM, Edgar WM. Efficacy of sterilisation methods and their effect on enamel demineralisation. *Caries Res* 1998;32:441–446.
40. Strawn SE, White JM, Marshall GW, Gee L, Goodis HE, Marshall SJ. Spectroscopic changes in human dentine exposed to various storage solutions – short term. *J Dent* 1996;24:417–423.
41. Kern M, Jonas I. Kariesbefall und Parodontalverhältnisse bei 100 Zahnmedizinstudenten der klinischen Semester. *Oralprophylaxe* 1988;2:47–54.
42. Field J, Waterhouse P, German M. Quantifying and qualifying surface changes on dental hard tissues in vitro. *J Dent* 2010;38:182–190.
43. Turssi CP, Messias DC, de Menezes M, Hara AT, Serra MC. Role of dentifrices on abrasion of enamel exposed to an acidic drink. *Am J Dent* 2005;18:251–255.
44. Blateyron F. New 3D parameters and filtration techniques for surface metrology <http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCYQFJAA&url=http%3A%2F%2Fwww.qualitymag.com%2Fext%2Fresources%2FQUAL%2FHome%2Ffiles%2FDPFs%2FNew3DPParametersandFiltrationTechniquesforSurfaceMetrology.pdf&ei=zqyNVfvACIT-UNbPgvgO&usg=AFQjCNGHXf0LmFp7oMERzarSOANvGm-wtg&bvm=bv.96783405.d.d24&cad=rja> 2006 aufgerufen am: 3.1.2016

### Evaluation of the surface roughness of enamel adjacent to orthodontic brackets by means of focus variation microscopy

**KEYWORDS** *Self-etching primer, surface roughness, enamel roughness, focus variation scanning microscopy, enamel conditioning*

The aim of this study was to investigate the surface roughness of enamel using focus variation microscopy after application of two self-etching primers, and to compare these with conventional acid etching. Fifteen subjects wore a removable orthodontic appliance, each carrying 8 human enamel samples from 120 extracted third molars. The device was attached to the mandibular posterior teeth. Both sides bore the same distribution of samples, categorized into four groups: one untreated control sample (A) and three samples with brackets bonded to their surface after conditioning with (B) a self-etching non-fluoride primer, (C) a self-etching fluoride-releasing primer, (D) or traditional etching with phosphoric acid. Prior to study initiation, all enamel samples were randomly assigned to one of the 8 different positions. Surface roughness was evaluated by a blinded observer using focus-variation 3D-scanning microscopy, a non-contact optical method. Results were expressed as  $S_a$  values in nm. Baseline measurements were taken immediately after bracket application and before the appliance was first inserted. Surface roughness was analyzed after 3, 7, 14, and 28 days. The results were initially examined for normal distribution. A One-way ANOVA was used to compare the results for statistical significance ( $p < 0.05$ ). All four groups presented total decreases in roughness, indicating remineralization. However, no significant difference was found between the groups. Regardless of the method of enamel conditioning, the surface roughness of enamel may decrease if good oral hygiene is performed. Focus-variation 3D-scanning microscopy is a powerful tool for evaluating the surface topography of enamel adjacent to orthodontic brackets.

## Publikation 2

Visel D, **Jäcker T**, Jost-Brinkmann P-G, Präger TM. Demineralization adjacent to orthodontic brackets after application of conventional and self-etching primer systems. Journal of Orofacial Orthopedics, 2014;75(5):358-373. doi:10.1007/s00056-014-0233-9

<http://dx.doi.org/10.1007/s00056-014-0233-9>































### Publikation 3

Hoffmann S, Papadopoulos N, Visel D, **Visel T**, Jost-Brinkmann P-G, Präger TM. Influence of piezotomy and osteoperforation of the alveolar process on the rate of orthodontic tooth movement: a systematic review. Journal of Orofacial Orthopedics, 2017;78(4):301-311. doi: 10.1007/s00056-017-0085-1

<http://dx.doi.org/10.1007/s00056-017-0085-1>





















## Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

# Publikationsliste

## Posterpräsentationen

- Jäcker T, Visel D, Jost-Brinkmann P-G, Präger TM  
Evaluation of the surface roughness of enamel adjacent to orthodontic brackets  
90th Congress of the European Orthodontic Society  
Warschau 2014
- Jäcker T, Visel D, Jost-Brinkmann P-G, Präger TM  
Evaluation der Oberflächenbeschaffenheit des Zahnschmelzes im Bracketumfeld mittels Fokusvariation  
87. Jahrestagung der DGKFO  
München 2014  
*Preis für das beste Poster des Themengebietes klinische Forschung*
- Visel D, Jäcker T, Jost-Brinkmann P-G, Präger TM  
Demineralisation des Bracketumfeldes nach Anwendung konventioneller und selbstkonditionierender Schmelzadhäsivsysteme  
86. Jahrestagung der DGKFO  
Saarbrücken 2013  
*Preis für das beste Poster des Themengebietes klinische Forschung*

## Veröffentlichungen

- Visel T, Visel D, Jost-Brinkmann P-G, Müller-Hartwich R, Präger TM  
Oberflächenbeschaffenheit des Zahnschmelzes im Bracketumfeld nach Schmelzkonditionierung über vier Wochen. Eine In-situ-Studie  
Quintessenz Kieferorthopädie, 2016; 30(1):1-11

- Visel D, Jäcker T, Jost-Brinkmann P-G, Präger TM  
Demineralization adjacent to orthodontic brackets after application of conventional and self-etching primer systems  
Journal of Orofacial Orthopedics, 2014;75(5):358-373  
*Jahresbestpreis für eine Arbeit aus der Hochschule, verliehen von der DGKFO anlässlich der 88. Wissenschaftlichen Jahrestagung in Mannheim 2015*  
Impact Factor: 0.819
- Hoffmann S, Papadopoulos N, Visel D, Visel T, Jost-Brinkmann P-G, Präger TM  
Influence of piezotomy and osteoperforation of the alveolar process on the rate of orthodontic tooth movement: a systematic review.  
Journal of Orofacial Orthopedics, 2017;78(4):301-311  
Impact Factor: 0.819

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen herzlich bedanken, die mich bei der Anfertigung der Arbeit unterstützt haben.

Ich bedanke mich bei Herrn Professor Dr. Jost-Brinkmann für die freundliche Überlassung dieses vielseitigen und interessanten Dissertationsthemas, dessen Bearbeitung mir viel Freude bereitet hat.

Besonderer Dank gebührt Herrn Privatdozent Dr. Dr. Präger für die Einführung in die Methodik sowie die engagierte und konstruktive wissenschaftliche Betreuung.

Herrn Toll und Frau Steinke aus dem zahntechnischen Labor danke ich für die unermüdliche Geduld bei der Arbeit mit dem Infinite Focus Mikroskop.

Dr. Edgar Dietrich danke ich für die Hilfe bei der statistischen Auswertung meiner Ergebnisse.

Weiterhin gilt mein Dank allen Probanden, die tapfer vier Wochen die intraorale Schiene getragen und so dieses Projekt erst möglich gemacht haben.

Bei meiner Familie bedanke ich mich für ihr reges Interesse am Fortgang meiner Arbeit und die stetige Motivation.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei meinem Ehemann und Kollegen, Dominik Visel, für elf gemeinsame Semester mit vielen Lern- und Forschungsabenden, für die konstruktive Zusammenarbeit und für seine Skepsis und kritischen Nachfragen im Rahmen der gemeinsamen Forschung, die dadurch immer besser geworden ist.