

Roland Frankenberger, Katharina Friedrich, Marie-Christine Dudek, Julia Winter, Norbert Krämer, Matthias J. Roggendorf

Einfluss approximal-zervikal unterminiierter Schmelzareale auf Randqualität und Schmelzintegrität bei Labor- und CAD/CAM-Keramikinlays und -teilkronen

Indizes: Adhäsiv, etch-and-rinse, Inlay, Keramik, Randqualität, Rissbildung, self-etch, Teilkrone

Ziel: Das Vorhaben dieser In-vitro-Studie war es, den Einfluss approximal-zervikal unterminiierter Schmelzränder auf die adhäsive Gesamtperformance (Randqualität und Schmelzintegrität/Rissbildung) unterschiedlich hergestellter (Labor vs. CAD/CAM) und unterschiedlich befestigter (Multistep-Adhäsiv vs. Universaladhäsiv) Keramikinlays und Keramikteilkronen zu untersuchen. **Material und Methode:** 192 extrahierte Weisheitszähne erhielten zirkulär schmelzbegrenzte mod-Präparationen für Keramikinlays ($n = 96$) und -teilkronen ($n = 96$). Der distale approximale Kasten diente als Kontrolle, im mesialen Kasten wurde im Dentin eine zervikale Rille von $2 \times 2 \times 4$ mm angelegt, um eine dort tiefere (Dentin-)Kariesexkavation zu simulieren. Diese Dentinrinne wurde entweder belassen (R/Rille), mit Komposit gefüllt (F/Füllung) oder komplett entfernt, wobei dann der zervikale Rand im Dentin/Zement zu liegen kam (D/Dentin). Laborgefertigte (e.max Press) und CAD/CAM-gefertigte (e.max CAD) mod-Inlays und Teilkronen wurden mit Syntac/Variolink Esthetic (SV) oder Adhese Universal/Variolink Esthetic (AV) adhäsiv befestigt. Bei den laborgefertigten Restaurationen wurde die Provisorientra-gezeit (1.000 Belastungszyklen und 25 Thermozyklen) ebenfalls simuliert. Initial (21 Tage Wasserlagerung) und erneut nach thermomechanischer Belastung (TMB: 1 Mio. Zyklen mit 50 N, 25.000 Thermozyklen mit $5^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}$) erfolgte die Herstellung von Epoxidharz-Replikas, die rasterelektronenoptisch (200-fache Vergrößerung) auf Randspalten untersucht wurden. An den Originalproben erfolgte lichtmikroskopisch (zehnfache Vergrößerung) die Evaluation der Risszunahme im approximal-zervikalen Bereich bei Labside-Restaurationen vor der provisorischen Versorgung und nach TMB, bei Chairside-Restaurationen vor und nach TMB. **Ergebnisse:** Unabhängig vom Adhäsivsystem zeigten generell die D-Gruppen eine signifikant schlechtere Randqualität ($p < 0,05$), wobei das Universaladhäsiv besser performte als das Mehrschrittadhäsivsystem ($p < 0,05$). Die Subgruppen R und F waren unabhängig vom Adhäsivsystem hinsichtlich der Randqualität zwar ähnlich ($p > 0,05$) und nicht schlechter als die Kontrollen ($p > 0,05$), zeigten aber bei F weniger Rissbildung als bei R ($p < 0,05$). Bei CAD/CAM-Restaurationen wurden generell weniger Risse als bei laborgefertigten Restaurationen beobachtet ($p < 0,05$). Teilkronen zeigten bessere Randqualitäten und weniger Risse als Inlays ($p < 0,05$). **Schlussfolgerungen:** Liegt bei Keramikpräparationen nach der Kariesexkavation im approximalen Kasten das Dentinniveau tiefer als das Schmelzniveau, sollte die resultierende unterminierte Schmelzlamelle nicht entfernt werden. Stattdessen sollte der unterminierte Schmelz erhalten und der fehlende Dentinbereich mit einer adhäsiven Aufbau-füllung ausgeglichen werden. Bezüglich der Leistungsfähigkeit der untersuchten Adhäsive hat das Universaladhäsiv Adhese Universal den ehemaligen Goldstandard Syntac abgelöst.

Überarbeitete deutsche Version des englischen Originalbeitrags: Frankenberger R, Friedrich K, Dudek M-C, Winter J, Krämer N, Roggendorf MJ: Influence of proximal-cervical undermined enamel areas on marginal quality and enamel integrity of laboratory and CAD/CAM ceramic inlays and partial crowns. Journal of Functional Biomaterials. 2025; 16(3): 82. <https://doi.org/10.3390/jfb16030082>

EINLEITUNG

Keramikinlays und -teilkronen sind eine weltweit anerkannte Restaurationsart mit exzellenten klinischen Überlebensraten^{1–6}. Dies gilt für Chairside-Arbeiten gleichermaßen wie für CAD/CAM-Restaurationen^{1–6}. Klinische Probleme ergeben sich jedoch noch immer aus der Techniksensitivität der Adhäsivsysteme^{7–9}, bei der Auswahl des Polymerisationsmodus von Adhäsiv und Befestigungskomposit^{10–12} sowie bei der akkuraten, keramikgerechten Präparation¹³. Letztere hängt neben der adhäsiv stabilisierbaren Zahnhartsubstanz auch vom Ausmaß der zu exkavierenden Dentinkaries ab. Dabei ist die proximale Kavitätengeometrie nach der Kariesexkavation klinisch meist unregelmäßig und in vielen Fällen im Dentin tiefer als im Schmelz, woraus charakteristische unterminierte Schmelzlamellen resultieren (Abb. 1).

Selbst wenn man die heute allgemein wissenschaftlich anerkannte selektive Dentinkariesexkavation praktizieren würde¹⁴, würde ja trotzdem die überwiegende Portion kariöser Biomasse entfernt, was zum selben Phänomen führt. Für den oft vorkommenden Fall der beschriebenen ausgeprägten unterminierten Schmelzspange sind zunächst drei klinische Szenarien möglich: Die Kavität wird so belassen, und der Schmelz bleibt dort bis zur adhäsiven Befestigung unterminiert (Abb. 1a) oder die Dentinrinne wird adhäsiv mit direkt appliziertem Komposit gefüllt (Abb. 1b) oder die Schmelzlamelle wird in diesem Bereich komplett entfernt (Abb. 1c), was hypothetisch einer Fraktur- oder Rissgefahr vorbeugen würde, aber fast immer auch zum kompletten approximal-zervikalen Schmelzverlust führt und die Restauration im Dentin/Zement enden lässt.

Ziel der vorliegenden In-vitro-Studie war es, diese beschriebenen präpräparativen/prärestaurativen Szenarien im Hinblick auf ihren Einfluss auf die adhäsive Performance von Keramikinlays und -teilkronen zu untersuchen, wobei einerseits die Art der Fertigung sowie die Randqualität, andererseits die Rissbildung im Schmelz untersucht werden sollte. Neben der Kavitätengeometrie wurden außerdem unterschiedliche Befestigungssysteme berücksichtigt; d. h., ein Mehrflächensystem

(Syntac) und ein Universaladhäsiv (Adhese Universal) wurden mit einem dualhärtenden Befestigungskomposit (Variolink Esthetic DC) kombiniert.

Die vier Nullhypothesen der Untersuchung waren, dass 1. der Umgang mit der Schmelzlamelle keinen Einfluss auf die adhäsive Performance (Rand und Schmelzrisse) haben würde, 2. dass das Befestigungssystem keinen Effekt auf die unterschiedlichen Gruppen haben würde, 3. dass sich kein Unterschied zwischen Inlays und Teilkronen zeigen würde und 4. dass kein Unterschied zwischen Chairside- und Labside-Keramik feststellbar sein würde.

MATERIAL UND METHODE

192 aus therapeutischen Gründen frisch extrahierte, kariesfreie menschliche Weisheitszähne ähnlicher Größe (max. 3 mm Differenz) mit > 80 % ausgebildeten und unbeschädigten Wurzeln wurden in die Studie einbezogen. Alle Patienten hatten schriftlich zugestimmt, dass ihre Zähne für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden durften. Die Studie folgte den Maßgaben der Helsinki-Deklaration, und das Studienprotokoll wurde von einem lokalen Ethikkomitee geprüft und befürwortet (Universität Gießen). Die Probenzähne wurden für max. 30 Tage in 0,5 % Chloramin-T gelagert, gesäubert und lichtmikroskopisch (zehnfache Vergrößerung) auf Risse untersucht. Die Stichprobengröße wurde durch die Maximalkapazität des experimentellen Set-ups bestimmt und richtete sich ferner nach den Vorgaben anerkannter Studien in diesem Feld.

Die Probenzähne erhielten standardisierte mod-Kavitäten mit einem approximalem Kastenniveau 2 mm oberhalb der Schmelz-Zement-Grenze; und von diesen wurden 50 % zu Teilkronen mit 1,5 mm vertikaler Höckerstärke weiterpräpariert (Abb. 3). Die Kavitätenpräparation erfolgte mit einem speziellen Keramikset (Experten-Set, Komet, Lemgo) in einem roten Winkelstück mit drei Kühldüsen und einer Fließrate von 30 mL/min. Innere Winkel wurden abgerundet, und die Ränder wurden nicht angeschrägt. In den mesialen Kästen wurde zur



Abb. 1a bis c Unterminierter approximal-zervikaler Bereich (Rille) im histologischen Präparat und unterschiedlicher Umgang damit: (a) belassen (R-Gruppen/Rille), (b) mit Komposit füllen (F-Gruppen/Füllung), (c) Lamelle entfernen (D-Gruppen/Dentin)



Abb. 2 Inlay vs. Teilkrone in vitro (hier: Labside-Verfahren)

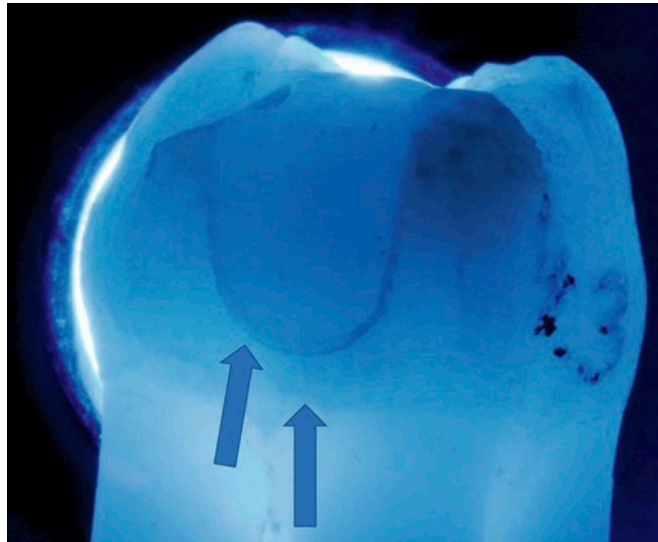


Abb. 3 Approximal-zervikale Risse nach TMB unter Transmission

Simulation der dort oft tieferen Kariesexkavation eine 2×2×4 mm große Rille herauspräpariert (siehe Abb. 1). Diese Rille wurde entweder belassen (R) oder mit Komposit direkt gefüllt (F; Adhese Universal self-etch, Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein, und SDR, Dentsply Sirona, Konstanz, eine Schicht). Alle Lichthärtungsprozesse wurden mit einer Blue-phase Polymerisationslampe (Ivoclar Vivadent) durchgeführt, deren Lichtintensität laufend mit einem Radiometer (Demetron Research Corp, Danbury, CT, USA) überprüft wurde, um sicherzustellen, dass 1.000 mW/cm² immer zuverlässig überschritten wurden.

In Gruppe F wurde nach erfolgter adhäsiver Aufbauauffüllung mit dem o. g. Rotring-Diamantschleifer finiert, um die Schmelzränder wieder freizulegen; die Kompositareale wurden für 5 s sandgestrahlt (Rondoflex 360 plus, KaVo, Biberach).

Die Kavitäten wurden konventionell (Flexitime, Kulzer-Dental, Hanau) oder optisch (Omnicam, Cerec, Dentsply Sirona, Bensheim) abgeformt, und es erfolgte die Herstellung von Chairside- und Labside-Keramikinlays und -teilkronen (e.max CAD/e.max Press, Ivoclar Vivadent). Die Vorbehandlung der Keramikunterseite wurde mit 5 % Flusssäure (Vita Ceramic Etch, Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen) für 20 s durchgeführt; nach dem Absprühen und Trocknen erfolgte die Silanapplikation (Monobond Plus, Ivoclar) für 60 s und keine zusätzliche Adhäsivapplikation. Die Chairside-Restaurationen erhielten provisorische Inlays und Teilkronen (Luxatemp, DMG, Hamburg), die mit Temp-Grip (Dentsply Sirona) befestigt und einer verkürzten TMB unterzogen wurden (1.000 × 50 N und 25 Thermozyklen). Die adhäsive Befestigung der definitiven Restaurationen (Abb. 2) erfolgte mit Syntac oder Adhese Universal (Ivoclar) und Variolink Esthetic DC nach Herstellerangaben, wobei bei Adhese Universal das Adhäsiv in der Kavität separat polymerisiert wurde (20 s) und bei Syntac nicht. Die Polymerisation von Variolink Esthetic DC erfolgte für 20 s pro Seite, insgesamt 120 s pro Restauration

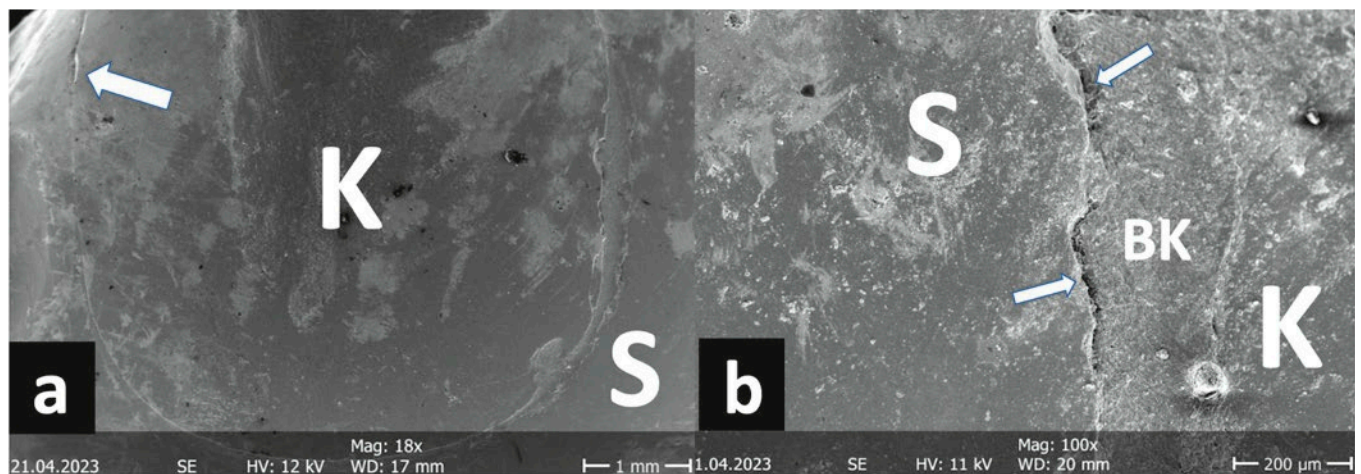


Abb. 4a und b REM-Bild der Randqualitätsvermessung – (a) 18/(b) 100× – aus der Gruppe Inlay/Chairside/R/Syntac. K: Keramik, BK: Befestigungskomposit, S: Schmelz. Das Bild zeigt, dass nach TMB die Schmelzränder fast ausschließlich im oberen Bereich des approximalen Kastens defekt waren (Pfeile).

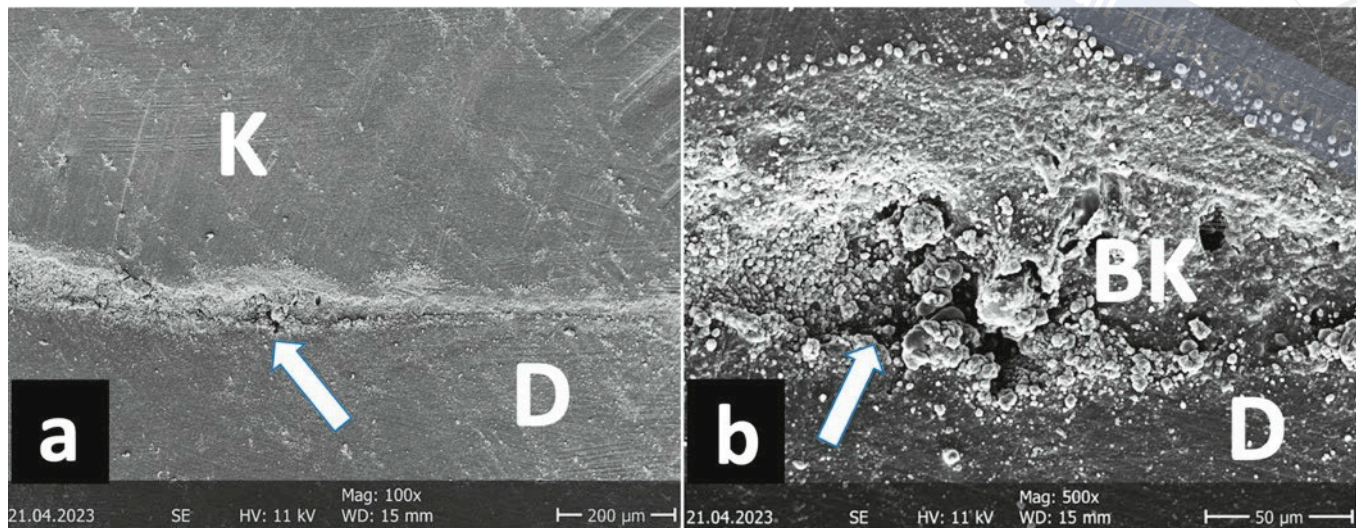


Abb. 5a und b REM-Bild der Randqualitätsvermessung – (a) 100×/(b) 500×. K: Keramik, BK: Befestigungskomposit, D: Dentin. Gruppe Inlay/Labside/D/Syntac. Das Bild zeigt eine mechanische Desintegration zwischen Dentin und Befestigungskomposit mit Exposition einzelner Füllkörper (Pfeile).

bei Adhese Universal und 240 s bei Syntac. Die Ausarbeitung der Restaurationsränder wurde mit Soflex-Scheiben (Solventum, Seefeld) in drei abnehmenden Körnungen durchgeführt.

Direkt nach der adhäsiven Befestigung (Chairside-Restaurationen) bzw. direkt nach der provisorischen Versorgung (Labside-Restaurationen) sowie nach TMB erfolgte die lichtmikroskopische Vermessung der Gesamtlänge von Schmelzrissen unterhalb der distalen (Kontrolle) und mesialen approximalen Kästen an den Originalproben (nur Testgruppen R/F; Aufnahme: Z6 APO, Leica, Wetzlar/zehnfach unter Transmission; Vermessung: Photoshop CS6, Adobe Systems Software Ireland Limited, Dublin, Irland; Abb. 3).

Nach 21 Tagen Lagerung in Aqua dest. bei 37 °C erfolgte die erste Abformung der Proben (Flexitime), und ein erster Satz Epoxidharz-Replikas (Alpha-Die, Schütz Dental, Rosbach) wurde hergestellt. Die thermomechanische Belastung (TMB) der Probenzähne erfolgte in einem Kausimulator (CS4 professional line, SD Mechatronik, Feldkirchen, Germany) unter Wasser. Es wurde kein künstlicher Speichel o. Ä. verwendet. Je zwei Probenzähne wurden so in eine Kausimulatorkammer eingebaut, dass ein 6-mm-Steatit-Antagonist zwei distale Randleisten „bekaute“. Die Gesamtzahl der mechanischen Zyklen betrug 1 Mio. bei 50 N bei einer Frequenz von 0,5 Hz. Vorher durchliefen die Proben 25.000 Thermozyklen zwischen 5 °C und 55 °C (30 s Tauchzeit, THE 1100, SD Mechatronik; Abb. 5).

Nach der TMB erfolgte die nächste Rissvermessung, und es wurde der zweite Satz Replikas erstellt. Beide Sätze wurden in einem Rasterelektronenmikroskop (Phenom, FEI, Amsterdam, Holland) bei 200-facher Vergrößerung analysiert. Die Randqualität der unterschiedlichen Interfaces (Schmelz-Befestigungskomposit, Dentin-Befestigungskomposit, Keramik-Befestigungskomposit) wurde in „spaltfrei“,

„Spalt/Irregularität“ und „nicht beurteilbar“ unterteilt und als Prozentzahl des Verhältnisses des spaltfreien Randes zum Gesamtrand klassifiziert. Zur besseren Illustration wurden weitere REM-Bilder in unterschiedlichen Vergrößerungen angefertigt (Abb. 4, 5).

Die statistische Auswertung erfolgte mit SPSS 17 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). Nach der Überprüfung der Nicht-Normalverteilung (Kolmogorov-Smirnov-Test) wurden signifikante Veränderungen über die Zeit mit dem Wilcoxon-Test und Unterschiede zwischen den Gruppen mit dem Mann-Whitney-U-Test berechnet bei einem Signifikanzlevel von 5 %.

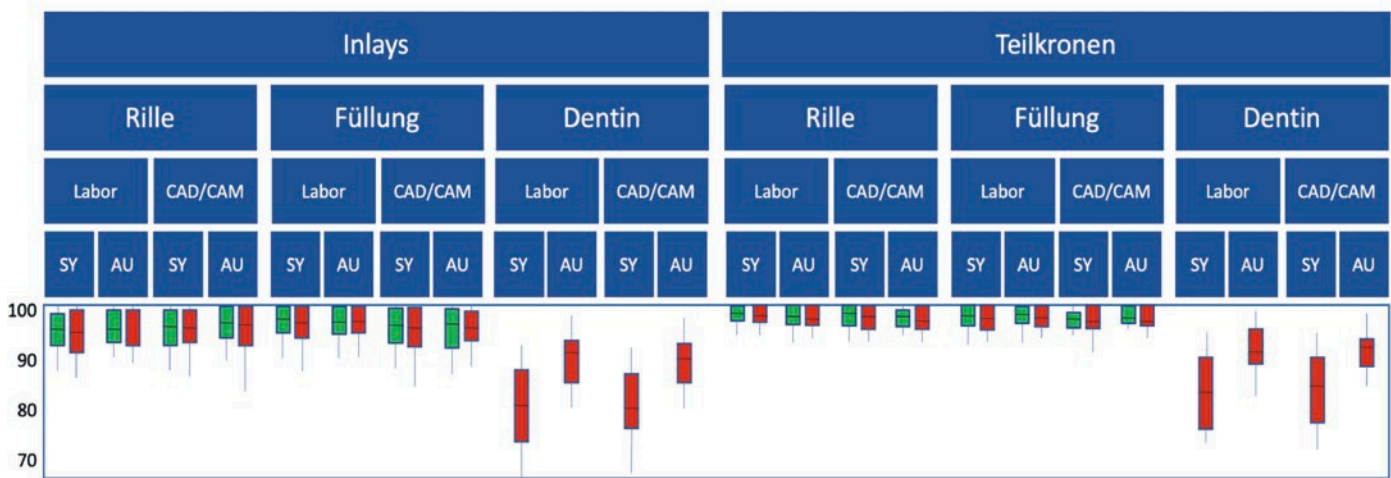
ERGEBNISSE

Die Ergebnisse sind synoptisch in Tabellen 2 und 3 dargestellt.

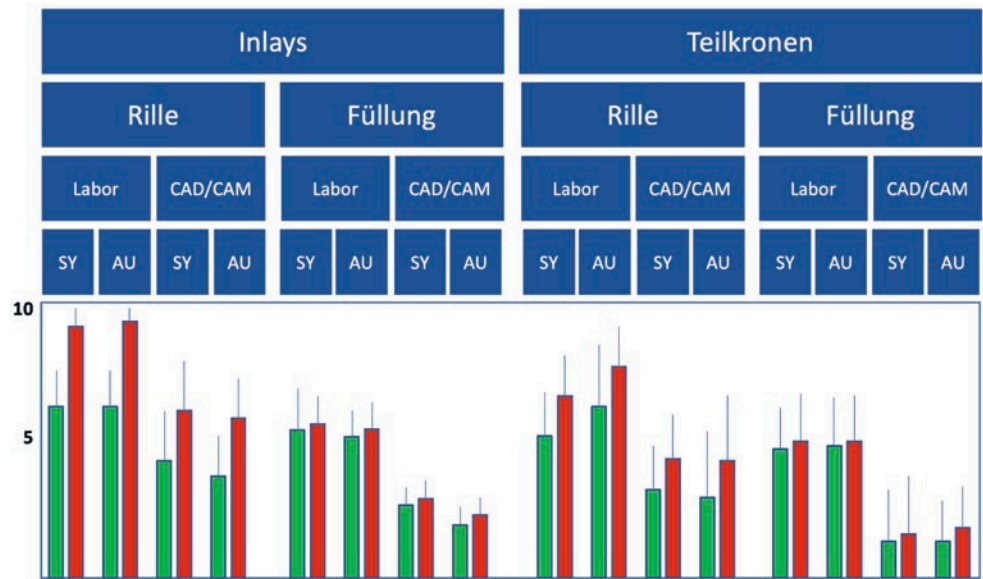
Da in allen Gruppen initial der Anteil spaltfreier Ränder bei 99–100 % lag, wurde zugunsten der Übersichtlichkeit auf die Darstellung verzichtet. Unabhängig vom Adhäsivsystem verschlechterte sich die Randqualität in allen Gruppen nach TMB signifikant ($p < 0,05$; Wilcoxon-Test; Tab. 2). Ebenfalls unabhängig vom verwendeten Adhäsivsystem zeigten generell die D-Gruppen eine signifikant schlechtere Randqualität ($p < 0,05$; Mann-Whitney-U-Test), wobei das Universaladhäsiv besser performte als das Mehrschrittadhäsivsystem ($p < 0,05$; Mann-Whitney-U-Test; Tab. 2). Die Subgruppen R und F waren unabhängig vom Adhäsivsystem in der Randqualität ähnlich ($p > 0,05$; Mann-Whitney-U-Test; Tab. 2) und nicht signifikant schlechter als die Kontrollen ($p > 0,05$; Mann-Whitney-U-Test; Tab. 2). Teilkronen zeigten in den Schmelzarealen bessere Randqualitäten als mod-Inlays ($p < 0,05$; Mann-Whitney-U-Test; Tab. 2), in den Dentinrändern war der Unterschied zwischen Inlays und Teilkronen nicht signifikant ($p > 0,05$; Mann-Whitney-U-Test; Tab. 2).

192 extrahierte Weisheitszähne (n=8)																			
96 MOD-Inlays												96 Teilkronen							
Rille				Füllung				Dentin				Rille				Füllung			
Labor		CAD/CAM		Labor		CAD/CAM		Labor		CAD/CAM		Labor		CAD/CAM		Labor		CAD/CAM	
SY	AU	SY	AU	SY	AU	SY	AU	SY	AU	SY	AU	SY	AU	SY	AU	SY	AU	SY	AU

Tab. 1 Flowchart der Gruppeneinteilung (SY: Syntac; AU: Adhese Universal)



Tab. 2 Ergebnisse der Randqualität (% spaltfreier Schmelzrand im Boxplot-Diagramm mit Kontrolle/grün und Testgruppen/rot, bei den Dentingruppen nur Dentinränder; SY: Syntac; AU: Adhese Universal)



Tab. 3 Ergebnisse der approximal-zervikalen Risszunahme (mm) im Balkendiagramm mit Kontrolle/grün und Testgruppen/rot; SY: Syntac; AU: Adhese Universal. Die D-Gruppen sind nicht aufgeführt, da in ihnen approximal-zervikal kein Schmelz mehr vorhanden war.

Die Evaluation der approximal-zervikalen Risszunahme zeigte sowohl bei den Inlays als auch bei den Teilkronen bei F signifikant weniger Rissbildung als bei R ($p < 0,05$; Mann-Whitney-U-Test; Tab. 3). Bei CAD/CAM-Restaurationen wurden generell signifikant weniger Risse als bei laborgefertigten Restaurationen beobachtet ($p < 0,05$; Mann-Whitney-U-Test; Tab. 3), wobei die größte Risszunahme während der simulierten Provisorienzeit gemessen wurde. Teilkronen zeigten weniger proximale Schmelzrisse als Inlays ($p < 0,05$; Mann-Whitney-U-Test; Tab. 3).

DISKUSSION

Die thermomechanische Belastung (Kausimulation) ist eine etablierte In-vitro-Methode zur präklinischen Evaluation unterschiedlicher Restaurationsmaterialien^{15, 16}. Die TMB ist sozusagen eine zyklische Ermüdungsprüfung mit großer Nähe zur klinischen Situation, in der ja in der Regel dauerhafte, subkritische Belastungen weitaus häufiger vorkommen als direkt zum Versagen führende Kraftereignisse. Im Vergleich zu anderen Studien mag die Gesamtzahl der Zyklen in der vorliegenden Studie mit 1 Mio. sehr hoch sein, aber auch in dieser Hinsicht orientierten wir uns eher an der Majorität der Laborstudien zur Kausimulation und wählten daher das Worst-Case-Szenario. Eine direkte Übertragbarkeit von x Zyklen TMB auf x Jahre klinische Belastung ist unseres Erachtens nicht sachgerecht, man kann aber aufgrund einschlägiger In-vitro-/In-vivo-Vergleiche im Rahmen der vorliegenden Studie von einer klinischen Äquivalenzperiode von annähernd zehn Jahren ausgehen.

Die Entscheidung, die jeweils distalen, nicht zusätzlich präparierten approximalen Kästen als „Kontrollgruppen“ festzulegen, ist auf den ersten Blick zumindest statistisch ein kritischer Aspekt der vorliegenden Methodologie. Noch kritischer könnte man diese Festlegung sehen, da ja wie im Mund eine Ein-Zahn-zu-zwei-Zähnen-Interkuspidation simuliert wurde, aber dabei eben die Testkästen besonders belastet wurden. Ein Blick auf die Resultate zeigt aber klar, dass sich die mesialen (Test) und die distalen Kästen (Kontrolle) in den „guten“ Gruppen nicht signifikant unterschieden und somit das gewählte Vorgehen der Gruppeneinteilung akzeptabel erscheint.

Ein Blick in die Literatur auf dem Sektor der adhäsiven Keramikrestaurationen ergibt, dass das in dieser Studie vorgestellte Problem noch nie untersucht wurde, was überrascht, denn es handelt sich dabei um ein Phänomen, das in der täglichen Praxis sicher tausendfach vorkommt. Es ist offensichtlich ein eher triviales Problem, jedoch von erheblicher klinischer Relevanz für die tägliche Routine. Ob eine Missachtung der hier vorgeschlagenen Vorgehensweise automatisch zum klinischen Misserfolg führen muss, kann jedoch ehrlicherweise nicht komplett unter Beweis gestellt werden. Für den ultimativen Beweis bleibt die randomisierte, klinisch-prospektive Studie noch immer das

geeignetste Instrument^{2, 4, 7}. Letztere ist jedoch in Anbetracht der hier vorliegenden experimentellen Fragestellung ethisch nicht indiziert.

Alle drei in der vorliegenden In-vitro-Studie untersuchten klinischen Szenarien sind bei Vorliegen von approximal im Vergleich zum Schmelz tieferen Dentinniveaus plausibel: Die Rille zu belassen (R) und später einfach mit dem Befestigungskomposit zu füllen erscheint pragmatisch, einfach und auf den ersten Blick mit Adhäsivtechnik ohne größeren Aufwand gut durchführbar zu sein. Trotzdem stellt man sich bei diesem Ansatz die Frage, ob z. B. beim Einprobieren oder im Zuge der adhäsiven Befestigung diese Areale aufgrund ihrer fehlenden Dentinunterstützung frakturgefährdet sind, was sicher mit dem Ausmaß der Unterminierung korreliert, aber in keinem Fall klinisch akzeptabel wäre.

Ein weiterer wichtiger Faktor der Rissevaluation ist die nichtadhäsive provisorische Versorgung bei laborgefertigten Restaurationen. Daher wurden in die vorliegende Studie sowohl CAD/CAM-Restaurationen (ohne Provisorien) als auch laborgefertigte Restaurationen (mit Provisorien und entsprechender verkürzter Kausimulation in dieser begrenzten Zeit) einbezogen¹⁶. Es zeigte sich tatsächlich im Verlauf der vorliegenden In-vitro-Untersuchung, dass die adhäsive Restabilisierung mit dem Befestigungskomposit nicht in puncto Randqualität, sehr wohl aber hinsichtlich der Rissausbreitung problematisch war, und dies in wesentlich ausgeprägterem Maße bei den laborgefertigten Restaurationen. Die zeitlich im Vergleich zur Gesamtbeobachtungsperiode stark limitierte Kausimulation der provisorisch versorgten Zähne reichte offenbar aus, um das Endergebnis der Rissausbreitung signifikant zu beeinflussen, was das klinische Potenzial von Chairside-CAD/CAM-Restaurationen erneut bestätigt.

Auch ohne diese soeben beschriebene Erkenntnis aus den R-Gruppen schien den Autoren das Auffüllen der beschriebenen Dentinrille mit Komposit (F) ein probater Ansatz zu sein. Dazu wurde mit einem Universaladhäsiv im Self-Etch-Modus gebondet und mit einem etablierten Bulk-Fill-Komposit restauriert. Nachteil dieser Vorgehensweise ist traditionell, dass zur Reexposition der Schmelzränder nochmals nachfiniert werden muss, was die zervikale Extension der Präparation immer tiefer liegen lässt als in den R-Gruppen. Es zeigte sich in allen Gruppen, dass diese Vorgehensweise trotzdem signifikant besser war als die übrigen Gruppen und somit auch klinisch empfohlen werden kann.

Generell interessant war, dass Randspalten im Schmelz nach der TMB hauptsächlich im oberen Drittel des approximalen Kastens zu finden waren (Abb. 4) und nicht wie oft postuliert im zervikalen Anteil. Dieses Phänomen wurde bereits in den 1990er-Jahren von Mehl et al. beschrieben¹⁵. Anders verhielt sich die Risszunahme über die Zeit (vor/nach TMB): Es zeigte sich klar, dass hauptsächlich der approximal-zervikale Anteil von signifikanten Risszunahmen in den R-Gruppen betroffen war. Interessant war schließlich auch, dass beide evaluierten Parameter (spaltfreie Ränder und Risszunahme) für die Teilkronen besser als für die Inlays waren, und dies unabhängig vom Befestigungsmodus.

In den D-Gruppen schließlich wurde die unterminierte Schmelzspange komplett entfernt, was dazu führte, dass diese Restaurationen stets im Dentin/Wurzelzement endeten. Man würde mit dieser Technik zwar die zervikalen Schmelzrisse und die Frakturgefahr eliminieren, aufgrund der größeren Hydrolyseanfälligkeit und der enzymatischen Degradation im Dentin aber per se mehr Haftungsermüdung erwarten^{17–19}. Dieser Verdacht wurde anhand der Ergebnisse der Randqualitätsuntersuchung klar bestätigt: Die Dentinränder waren in allen Gruppen signifikant schlechter als die Schmelzränder, auch wenn die gemessenen Anteile spaltfreier Ränder im Dentin nicht katastrophal waren (Abb. 5). Die D-Gruppe wäre nur dann eine empfehlenswerte Alternative, wenn z. B. beim Einpassen oder Einprobieren Schmelzanteile ausgebrochen wären oder die Risszunahme im angrenzenden, nicht dentinunterstützten Schmelz sehr ausgeprägt gewesen wäre. Generell lässt sich zum Thema Ermüdung des Komposit-Dentin-Verbunds festhalten, dass dieser heute kein unlösbares Problem mehr darstellt, dass man jedoch nicht ohne Not Restaurationsränder in das Wurzelzement legen sollte, wenn gangbare Alternativen (Gruppen R und F) vorhanden sind¹⁸.

Ein Nebenergebnis der vorliegenden Untersuchung ist die standardisierte Evaluation der Effektivität unterschiedlicher adhäsiver Strategien beim adhäsiven Befestigen, die aus den Testgruppen hervorgehen und zusätzliche, klinisch relevante Hinweise auf die tägliche Arbeit geben. So war die Verwendung von Mehrflaschenadhäsiven nicht zuletzt bei der adhäsiven Befestigung von Keramik in der Zahnerhaltung ein anerkannter Goldstandard. Dieser Status ergibt sich aus Tausenden von erfolgreichen In-vitro- und In-vivo-Studien, klar dokumentierter geringer Techniksensitivität und nicht zuletzt aus der Präsenz eines hydrophoben Bonding Agents, dem eine geringere Hydrolyseanfälligkeit attestiert wurde und wird^{20,21}. Studien vor allem aus der letzten Dekade zeigen aber auch, dass die Universaladhäsive in ihrer adhäsiven Gesamtperformance extrem aufgeholt haben und heute in ihrer Eigenschaft als Einflaschenbondings nicht mehr zweitklassig sind^{18,19}. Darüber hinaus lösen sie ein wichtiges Problem im Rahmen der adhäsiven Befestigung indirekter Restaurationen wie in der vorliegenden Untersuchung: Im Vergleich zu den doch eher hochviskosen Bonding Agents der Mehrflaschenadhäsive, bei denen eine separate Polymerisation stets das Risiko birgt, die Restauration beim Befestigen nicht mehr in die Endposition zu bringen, kann man Universaladhäsive problemlos so dünn verblasen, dass man sie jederzeit separat polymerisieren kann²³. Genau dies zeigte sich auch in der vorliegenden Untersuchung. Da bei Syntac das Heliobond nicht separat polymerisiert wurde, waren auch die tiefen Ränder trotz 240 s Polymerisation im Vergleich zu den Universaladhäsivgruppen signifikant schlechter. Bei nicht separat durchgeführter Polymerisation des Adhäsivs ist es möglich, dass die Evaluation des Randes ein noch immer zu positives Bild ergibt, da die Lichtquelle zumindest am Rand eine ausreichende Polymerisation

gewährleistet. Bezüglich der internen Adaptation kann die vorliegende Studie keine Aussage treffen. Auch wenn der direkte Vergleich mit zervikalen Füllungen etwas hinkt, bestätigen unsere Resultate die Beobachtungen anderer Arbeitsgruppen mit Vorteilen für die Universaladhäsive im Vergleich zu älteren Mehrflaschenadhäsiven, was bereits in vivo bestätigt wurde^{24,25}.

Aufgrund der vorliegenden Resultate mussten die vier Nullhypothesen zurückgewiesen werden.

KLINISCHE SCHLUSSFOLGERUNG

Liegt bei Keramikpräparationen nach der Kariesexkavation im approximalen Kasten das Dentinniveau tiefer als das Schmelzniveau, sollte die resultierende unterminierte Schmelzlamelle nicht entfernt werden. Stattdessen sollte der unterminierte Schmelz erhalten und der fehlende Dentinbereich mit einer adhäsiven Aufbaufüllung ausgeglichen werden. Bezüglich der Leistungsfähigkeit der untersuchten Adhäsive im Dentin hat das Universaladhäsiv Adhese Universal den ehemaligen Goldstandard Syntac abgelöst.

INTERESSENKONFLIKT

Roland Frankenberger und Norbert Krämer haben Drittmittel und Vortragshonorare von Dentsply Sirona und Ivoclar erhalten. Die übrigen Autoren erklären, dass im Sinne der Richtlinien des International Committee of Medical Journal Editors kein Interessenkonflikt besteht.

LITERATUR

1. Strasding M, Sebestyén-Hüvös E, Studer S, Lehner C, Jung RE, Sailer I: Long-term outcomes of all-ceramic inlays and onlays after a mean observation time of 11 years. *Quintessence Int* 2020; 51: 566–576
2. van Dijken JW, Hasselrot L: A prospective 15-year evaluation of extensive dentin-enamel-bonded pressed ceramic coverages. *Dent Mater* 2010; 26: 929–939
3. Borgia Botto E, Baró R, Borgia Botto JL: Clinical performance of bonded ceramic inlays/onlays: a 5- to 18-year retrospective longitudinal study. *Am J Dent* 2016; 29: 187–192
4. Reich SM, Wichmann M, Rinne H, Shortall A: Clinical performance of large, all-ceramic CAD/CAM-generated restorations after three years: a pilot study. *J Am Dent Assoc* 2004; 135: 605–612
5. Reiss B: Clinical results of Cerec inlays in a dental practice over a period of 18 years. *Int J Comput Dent* 2006; 9: 11–22
6. Collares K, Corrêa MB, Laske M, Kramer E, Reiss B, Moraes RR, Huysmans MC, Opdam NJ: A practice-based research network on the survival of ceramic inlay/onlay restorations. *Dent Mater* 2016; 32: 687–694
7. Castro AS, Maran BM, Gutierrez MF, Chemin K, Mendez-Bauer ML, Bermúdez JP, Reis A, Loguercio AD: Effect of dentin moisture in posterior restorations performed with universal adhesive: a randomized clinical trial. *Oper Dent* 2022; 47: E91–E105
8. Costa T, Rezende M, Sakamoto A, Bittencourt B, Dalzochio P, Loguercio AD, Reis A: Influence of adhesive type and placement technique on post-operative sensitivity in posterior composite restorations. *Oper Dent* 2017; 42: 143–154
9. Peschke A, Blunck U, Roulet JF: Influence of incorrect application of a water-based adhesive system on the marginal adaptation of Class V restorations. *Am J Dent* 2000; 13: 239–244

10. Taschner M, Stirnweiss A, Frankenberger R, Kramer N, Galler KM, Maier E: Fourteen years clinical evaluation of leucite-reinforced ceramic inlays luted using two different adhesion strategies. *J Dent* 2022; 123: 104210
11. de Kijper MCFM, Ong Y, Gerritsen T, Cune MS, Gresnigt MMM: Influence of the ceramic translucency on the relative degree of conversion of a direct composite and dual-curing resin cement through lithium disilicate onlays and endocrowns. *J Mech Behav Biomed Mater* 2021; 122: 104662
12. Ashy LM, Marghalani H, Silikas N: In vitro evaluation of marginal and internal adaptations of ceramic inlay restorations associated with immediate vs delayed dentin sealing techniques. *Int J Prosthodont* 2020; 33: 48–55
13. Ahlers MO, Mörig G, Blunck U, Hajtő J, Pröbster L, Frankenberger R: Guidelines for the preparation of CAD/CAM ceramic inlays and partial crowns. *Int J Comput Dent* 2009; 12: 309–325
14. Schwendicke F, Walsh T, Lamont T, Al-Yaseen W et al.: Interventions for treating cavitated or dentine carious lesions. *Cochrane Database Syst Rev* 2021; 7: CD013039
15. Mehl A, Godescha P, Kunzelmann K-H, Hickel R: Randspaltverhalten von Komposit- und Keramikinlays bei ausgedehnten Kavitäten. *Dtsch Zahnärztl Z* 1996; 51: 234–238
16. Frankenberger R, Krämer N, Appelt A, Lohbauer U, Naumann M, Roggendorf MJ: Chairside vs. labside ceramic inlays: effect of temporary restoration and adhesive luting on enamel cracks and marginal integrity. *Dent Mater* 2011; 27: 892–898
17. Ma KS, Wang LT, Blatz MB: Efficacy of adhesive strategies for restorative dentistry: a systematic review and network meta-analysis of double-blind randomized controlled trials over 12 months of follow-up. *J Prosthodont Res* 2023; 67: 35–44
18. Carrilho E, Cardoso M, Marques Ferreira M, Marto CM, Paula A, Coelho AS: 10-MDP based dental adhesives: adhesive interface characterization and adhesive stability-a systematic review. *Materials (Basel)*. 2019 7; 12: 790
19. Elkaffas AA, Hamama HHH, Mahmoud SH: Do universal adhesives promote bonding to dentin? A systematic review and meta-analysis. *Restor Dent Endod* 2018; 43: e29
20. Fuentes MV, Perdigão J, Baracco B, Giráldez I, Ceballos L: Effect of an additional bonding resin on the 5-year performance of a universal adhesive: a randomized clinical trial. *Clin Oral Investig* 2023; 27: 837–848
21. Ermis RB, Ugurlu M, Ahmed MH, Van Meerbeek B: Universal adhesives benefit from an extra hydrophobic adhesive layer when light cured before-hand. *J Adhes Dent* 2019; 21: 179–188
22. Madrigal EL, Tichy A, Hosaka K, Ikeda M, Nakajima M, Tagami J: The effect of curing mode of dual-cure resin cements on bonding performance of universal adhesives to enamel, dentin and various restorative materials. *Dent Mater J* 2021; 40: 446–454
23. Ahmed MH, Yao C, Van Landuyt K, Peumans M, Van Meerbeek B: Extra bonding layer compensates universal adhesive's thin film thickness. *J Adhes Dent* 2020; 22: 483–501
24. Merle CL, Fortenbacher M, Schneider H, Schmalz G et al.: Clinical and OCT assessment of application modes of a universal adhesive in a 12-month RCT. *J Dent* 2022; 119: 104068
25. Haak R, Hähnel M, Schneider H, Rosolowski M, Park KJ, Ziebolz D, Häfer M: Clinical and OCT outcomes of a universal adhesive in a randomized clinical trial after 12 months. *J Dent* 2019; 90: 103200

Influence of Proximal-Cervical Undermined Enamel Areas on Marginal Quality and Enamel Integrity of Laboratory and CAD/CAM Ceramic Inlays and Partial Crowns

Keywords: adhesive, etch-and-rinse, inlay, ceramic, marginal quality, crack formation, self-etch, onlay

Objective: The aim of this in vitro study was to investigate how proximally and cervically undermined enamel margins affect the overall adhesive performance (marginal quality and enamel integrity/crack formation) of ceramic inlays and onlays, depending on their fabrication method (laboratory vs. CAD/CAM) and adhesive system (multi-step adhesive vs. universal adhesive). **Materials and methods:** A total of 192 extracted third molars received MOD preparations with enamel-bordered margins for ceramic inlays ($n = 96$) and onlays ($n = 96$). The distal proximal box served as a control. In the mesial box, a $2 \times 2 \times 4$ mm cervical groove was placed in dentin to simulate a deeper (dentin) caries excavation. This dentin groove was either left untouched (R/groove), filled with composite (F/filling), or entirely removed, placing the cervical margin within dentin/cementum (D/dentin). Laboratory-fabricated (e.max Press) and CAD/CAM-fabricated (e.max CAD) MOD inlays and onlays were adhesively cemented using either Syntac/Variolink Esthetic (SV) or Adhese Universal/Variolink Esthetic (AV). For lab-fabricated restorations, provisional wear was simulated (1,000 load cycles and 25 thermal cycles). Epoxy resin replicas were produced after initial water storage (21 days) and again following thermomechanical loading (TML: 1 million cycles at 50 N, 25,000 thermal cycles at $5^\circ\text{C}/55^\circ\text{C}$) and examined under scanning electron microscopy (SEM, $200\times$ magnification) for marginal gaps. Crack propagation in the proximocervical region was evaluated under light microscopy ($10\times$ magnification) on original specimens: for labside restorations, before provisionalization and after TML; for chairside restorations, before and after TML. **Results:** Regardless of the adhesive system used, the D groups showed significantly poorer marginal quality ($p < 0.05$). The universal adhesive outperformed the multi-step system ($p < 0.05$). R and F subgroups demonstrated similar marginal quality ($p > 0.05$) and were not inferior to the control ($p > 0.05$), but the F subgroup exhibited significantly less crack formation than R ($p < 0.05$). CAD/CAM restorations generally showed fewer cracks compared to lab-fabricated ones ($p < 0.05$). Onlays exhibited superior marginal quality and fewer cracks than inlays ($p < 0.05$). **Conclusions:** If, after caries excavation, the dentin level in the proximal box lies apical to the enamel level, the resulting undermined enamel lamella should not be removed. Instead, the undermined enamel should be preserved, and the missing dentin should be replaced with an adhesive build-up. Regarding adhesive performance, the universal adhesive Adhese Universal has surpassed the former gold standard Syntac.



Roland Frankenger

Prof. Dr. med. dent. Roland Frankenger Poliklinik für Zahnerhaltung, UniversitätsZahnMedizin Marburg, Philipps-Universität Marburg und Universitätsklinikum Gießen und Marburg

Dr. med. dent. Katharina Friedrich Poliklinik für Zahnerhaltung, UniversitätsZahnMedizin Marburg, Philipps-Universität Marburg und Universitätsklinikum Gießen und Marburg

Dr. med. dent. Marie-Christine Dudek Poliklinik für Zahnerhaltung, UniversitätsZahnMedizin Marburg, Philipps-Universität Marburg und Universitätsklinikum Gießen und Marburg

Dr. med. dent. Julia Winter, MSc. Poliklinik für Zahnerhaltung, UniversitätsZahnMedizin Marburg, Philipps-Universität Marburg und Universitätsklinikum Gießen und Marburg

Prof. Dr. med. dent. Norbert Krämer Poliklinik für Kinderzahnheilkunde, Justus-Liebig-Universität Gießen und Universitätsklinikum Gießen und Marburg

Priv.-Doz. Dr. med. dent. Matthias J. Roggendorf Poliklinik für Zahnerhaltung, UniversitätsZahnMedizin Marburg, Philipps-Universität Marburg und Universitätsklinikum Gießen und Marburg

Kontakt: Prof. Dr. med. dent. Roland Frankenger, Poliklinik für Zahnerhaltung, UniversitätsZahnMedizin Marburg, Philipps-Universität Marburg und Universitätsklinikum Gießen und Marburg, Georg-Voigt-Str. 3, 35039 Marburg, frankbg@med.uni-marburg.de

Porträtfoto R. Frankenger, Abb. 1–5: R. Frankenger