

Max-Richard Seidemann¹, Rainer Haak², Constanze Olms³

Pilotuntersuchung zur Bewertung von Grenzflächen mittels OCT: Belastung einer Resin-Nano-Keramik auf einteiligen ZrO₂-Implantaten

A pilot study for evaluating interfaces by OCT: loading of a Resin Nano Ceramic on one-piece ZrO₂ implants

Warum Sie diesen Beitrag lesen sollten? / Why should you read this article?

Was passiert an Grenzflächen zwischen Krone und Implantat nach dynamischer Belastung? Die OCT kann bei Resin-Nano-Keramik zeigen, was sich am Interface zu starren einteiligen ZrO₂-Implantaten tut. / What happens at interfaces between crown and implant after dynamic loading? For Resin Nano Ceramics OCT can visualize effects on the boundary to rigid one-piece ZrO₂ implants.

Einführung: Die prothetische Versorgung einteiliger Zirkoniumdioxid(ZrO₂)-Implantate ist angesichts der spärlichen Langzeitdaten für Behandler eine Herausforderung. Um auf starren einteiligen Implantatsystemen eine möglichst physiologische Rehabilitation zu erreichen, kann eine gewisse Resilienz nach Vorbild des natürlichen Zahns wünschenswert sein. Diese lässt sich am besten über die Restauration und eine geeignete Befestigung mit einem dauerhaft stabilen Verbund erreichen. Ziel dieser Studie war es, Veränderungen an Grenzflächen vor und nach dynamischer Belastung bei adhäsiv befestigten Resin-Nano-Keramik(RNK)-Kronen auf einteiligen ZrO₂-Implantaten mittels optischer Kohärenztomografie (OCT) darzustellen.

Material und Methode: Es wurden 20 einteilige ZrO₂-Versuchsimplantate hergestellt sowie 20 Kronen mittels CAD/CAM-Verfahren aus LAVA Ultimate (LU, 3M ESPE, Seefeld, Deutschland) angefertigt. Anschließend wurden alle Kronen sowie die Hälfte der Implantataufbauten tribochemisch vorbehandelt (SB, CoJet, 30 µm, 2 bar). Alle Kronen wurden mit Scotchbond Universal (SU) und RelyX Ultimate (RU, beide 3M ESPE) adhäsiv nach Herstellerangaben befestigt. Im Anschluss daran erfolgte die Anfertigung von OCT-Schnittbildern (Telesio II, Thorlabs GmbH) der befestigten Kronen vor und nach Kausimulation (KS; 1,2 Mio. Zyklen mit 50 N bei 5–55 °C für je 60 sec., SD Mechatronik GmbH). Die Verände-

Introduction: The prosthetic treatment of one-piece ZrO₂ implants is a challenge because of the scarce long-term data available. In order to achieve a physiological rehabilitation on rigid, one-piece implant systems, a certain resilience is desired according to the natural tooth. The best way to achieve this, is with the restoration and a suitable bonding procedure to secure a stable and durable bond. The aim of this study was to visualize changes at interfaces before and after dynamic loading of adhesively bonded Resin Nano Ceramic (RNC) crowns on one-piece ZrO₂ implants by optical coherence tomography (OCT).

Material and Method: A total of 20 one-piece ZrO₂ trial implants were produced and 20 crowns from LAVA Ultimate (LU, 3M ESPE, Seefeld, Germany) were made using CAD/CAM procedures. After tribochemical pretreatment (SB) of all crowns, as well as half of the implant abutments (CoJet, 30 µm, 2 bar), the crowns were bonded to the implants with Scotchbond Universal (SU) and RelyX Ultimate (RU) according to the manufacturer's instructions. Subsequently, OCT images (Telesio II, Thorlabs GmbH) of the attached crowns were recorded before and after chewing simulation (CS, 1.2 million cycles with 50 N at 5–55 °C for 60 sec each, SD Mechatronik GmbH). The

¹ Zahnarztpraxis Dr. Kroker, Meppen

² Universitätsklinikum Leipzig AÖR, Department für Kopf- und Zahnmedizin, Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie, Leipzig

³ Universitätsklinikum Leipzig AÖR, Department für Kopf- und Zahnmedizin, Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde, Leipzig

¹ Dental practice Dr. Kroker, Meppen

² Universitätsklinikum Leipzig AÖR, Department für Kopf- und Zahnmedizin, Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie, Leipzig

³ Universitätsklinikum Leipzig AÖR, Department für Kopf- und Zahnmedizin, Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde, Leipzig

Übersetzung: Jacobi Übersetzungen

rungen der in den OCT-B-Scans sichtbaren Signallinien nach KS wurden visuell mit „undeutlicher“, „gleich“ oder „deutlicher“ bewertet.

Ergebnisse: Eine Bewertung der im OCT-B-Scan sichtbaren Veränderungen der Signallinien erfolgte anhand einer visuellen Einteilung in „undeutlicher“, „gleich“ oder „deutlicher“. Sowohl vor als auch nach KS war bei allen Proben im OCT-B-Scan ein Signal entlang der Grenzfläche SU+RU/ZrO₂ sichtbar, das an Proben ohne Vorbehandlung (non-SB) bereits vor KS ausgeprägter war als bei den vorbehandelten Proben (SB). Die Signalintensität am RU/ZrO₂-Interface nahm nach KS bei non-SB nicht zu, bei SB war sie „deutlicher“. Ausschließlich bei den non-SB-Probekörpern trat nach Belastung ein zweites Spaltsignal in den okklusalen B-Scans auf.

Schlussfolgerung: Die Pilotuntersuchung zeigt, dass mittels OCT eine noninvasive Darstellung von Veränderungen an RNK-Grenzflächen möglich ist und damit zusätzliche visuelle Informationen zum Verbund gewonnen werden können.

Schlüsselwörter: Resin-Nano-Keramik; einteilige ZrO₂-Implantate; optische Kohärenztomografie (OCT); Grenzflächen

Zitierweise:

Seidemann M-R, Haak R, Olms C: Pilotuntersuchung zur Bewertung von Grenzflächen mittels OCT: Belastung einer Resin-Nano-Keramik auf einteiligen ZrO₂-Implantaten. *Z Zahnärztl Implantol* 2017; 33: 202–211

DOI 10.3238/ZZI.20170202–0211

Einführung

Zahlreiche Studien belegen den erfolgreichen klinischen Einsatz von Zirkoniumdioxidimplantaten [5]. Besonders einteilige ZrO₂-Implantate stellen eine vielversprechende Alternative zu zweiteiligen Titanimplantaten in der ästhetischen Zone dar [2]. Einteilige Systeme bieten den Vorteil, dass es keinen Spalt zwischen Implantat und Abutment gibt, wodurch jegliche Form unkontrollierter Mikrobewegungen sowie eine bakterielle Besiedlung des Spalts vermieden werden und was zu weniger Knochenverlust krestal führt [6]. Das System ist rigide.

Immer wieder gibt es Bestrebungen, bewusst eine Resilienz nach natürlichem Vorbild im Implantatsystem herzustellen. Die Entwicklung resilianter Implantatelemente soll eine ungepufferte Kraftweiterleitung und dadurch ungünstige Spannungsspitzen sowie Überbelastung vermeiden, die im Sinne eines okklusalen Traumas zum Abbau periimplantären Knochens führt [9]. Zur Erhöhung der Resilienz gibt es neben vielen technisch komplexen Konstruktionen [7, 12] auch Ansätze unter Verwendung resilianter Grundmaterialien für Abutments und Implantate [15]. Bei dieser Untersuchung sollen die prothetische Restauration und die entsprechende Befestigung als resiliente Komponente im Fokus stehen, da neben der chirurgischen auch die prothetische Beurteilung für einen klinischen Langzeiterfolg entscheidend ist. Mit der Einführung der Resin-Nano-Keramik Lava Ultimate auf den Dentalmarkt (2012, 3M ESPE, Seefeld, Deutschland) steht ein Restaurationsmaterial mit dentinähnlichem E-Modul und damit verbundener Resilienz zur Absorption eingeleiteter Kräfte zur Verfügung [1]. Die „stoßdämpfende“ Eigenschaft dieser Ma-

changes in the signal lines visible in the OCT-B scans were assessed visually as “indistinct”, “equal” or “more pronounced”.

Results: An evaluation of the visible changes to the signal lines in the OCT-B scan was performed according to a visual classification into “indistinct”, “equal” or “more pronounced”. For all samples in the OCT-B scan a signal was visible along the SU+RU/ZrO₂ interface not only before, but also after the CS. This signal was “more pronounced” for non-SB before CS than for samples that received pretreatment (SB). The signal intensity on the SU+RU/ZrO₂ interface did not increase after CS for non-SB, whereas in SB samples it was “more pronounced”. In the occlusal B-scans, a second signal line was visible only in non-SB test samples after dynamic loading.

Conclusion: The pilot study shows that non-invasive imaging of changes in RNC interfaces by OCT is possible and thereby additional visual information on the bond can be attained.

Keywords: Resin Nano Ceramics; one-piece ZrO₂ implants; optical coherence tomography (OCT); interface

Cite as:

Seidemann M-R, Haak R, Olms C: A pilot study for evaluating interfaces by OCT: loading of a Resin Nano Ceramic on one-piece ZrO₂ implants. *Z Zahnärztl Implantol* 2017; 33: 202–211

DOI 10.3238/ZZI.2017.0202–0211

Introduction

Numerous studies document the successful clinical application of zirconium oxide implants [5]. In particular one-piece ZrO₂ implants represent a promising alternative to two-piece titanium implants in the esthetical zone [2]. The advantage of one-piece systems is that there is no gap between implant and abutment, thus preventing any form of uncontrolled micro-movement as well as bacterial infestation of the gap and leading to less crestal bone loss [6]. The system is rigid.

There are repeatedly intentional aims of creating a resilience based on the natural tooth in the implant system. The development of resilient implant elements is designed to avoid an unbuffered transfer of forces and thus unfavourable tension peaks and overexertion within the sense of an occlusal trauma leading to peri-implant bone deterioration [9]. To increase resilience besides the many complex technical constructions [7, 12] there are also approaches using resilient base materials for abutments and implants [15]. In this examination the prosthetic restoration and the suitable bonding procedure as resilient components are at the focus, as besides the surgical also the prosthetic evaluation is decisive for a long-term clinical success. With the introduction of the Resin Nano Ceramic Lava Ultimate on the dental market (2012, 3M ESPE, Seefeld, Germany), a restoration material with an e-module resembling natural dentine and a thus associated resilience to absorb impacting forces is available [1]. The „shock-absorbing“ properties of this material class [8] and the high flexural resistance speak in favour of a durable restoration material on one-piece



Abbildung 1 Aufbau der OCT-Gerätekonzeption SD-OCT
(Telesto II, Fa. Thorlabs, Dachau)

Figure 1 OCT setup conception for SD-OCT

(Telesto II, Fa. Thorlabs, Dachau)

Abb. 1: Rainer Haak

terialklasse [8] und die hohe Biegefestigkeit sprechen für ein haltbares, der physiologischen Biomechanik entsprechendes Restaurationmaterial auf einteiligen Implantaten. Um entsprechendes Restaurationmaterial und seine Vorzüge auch auf einteiligen Implantaten klinisch nutzen zu können, muss dessen dauerhafte Befestigung gewährleistet sein. Die Untersuchung der vorhandenen Grenzflächen und etwaigen Veränderungen nach dynamischer Belastung zwischen Restauration, Befestigungsmaterial und Implantat ist dabei von Interesse. Bislang gibt es keine publizierten Untersuchungen, die eine non-invasive Methode beschrieben haben, die mögliche Veränderungen an Grenzflächen intakter Kronen auf Implantaten nach dynamischer Belastung zwischen Restaurations-, Befestigungs- und Implantatmaterial darstellen kann.

Durch die besondere Zusammensetzung von Lava Ultimate als hochvernetztes Polymer mit einem Füllkörperanteil von 80 % eröffnen sich im Gegensatz zu Produkten mit ähnlich resilienten Eigenschaften (e.g. VITA Enamic, VITA Zahnfabrik, Bad Säckingen, Deutschland) auch neue Möglichkeiten, dieses zu untersuchen. Ergänzend zu klassischen Methoden der Werkstoffprüfung könnten durch die optische Kohärenztomografie (OCT) zusätzliche visuelle Informationen zur Verbundsituation dieses Materials gewonnen werden und somit in die Bewertung für einen möglichen klinischen Einsatz einfließen.

Die optische Kohärenztomografie (OCT) ist ein noninvasives Verfahren und ermöglicht die Abbildung von Mikrostrukturen auf und in organischen und anorganischen Materialien (Abb. 1). Neben aktuellen Untersuchungen zur Diagnostik und Bewertung kariöser Läsionen [14] bestätigen vor allem Untersuchungen von Grenzflächen an Kompositfüllungen das große Potenzial dieses Verfahrens zur Bewertung von Restaurationen [10, 11]. Die OCT verwendet Licht im nahinfraroten Wellenlängenbereich. Infolge der Schwächung des Lichts in der Probe durch Streuung, Reflexion und Absorption in Abhängigkeit vom Brechungsindex der Materialien können Strukturen maximal bis in eine Tiefe von ca. 2–2,5 mm abgebildet werden. Diese signalgebenden Strukturen (Signallinien) werden an Grenzflächen unterschiedlicher Phasen sichtbar, z. B. bei Mate-

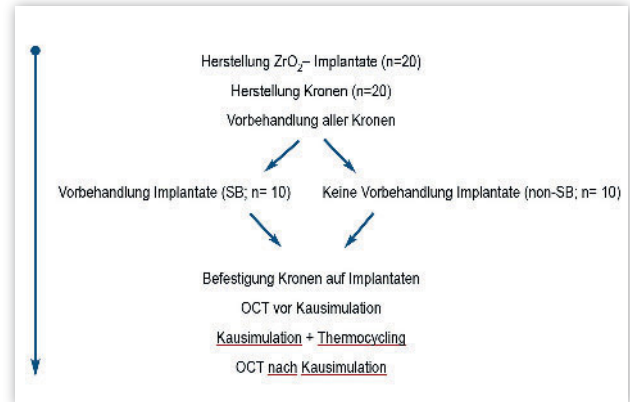


Abbildung 2 Flowchart des Versuchsablaufs

Figure 2 Flowchart of experimental setup Abb. 2–12: Seidemann/Olms

implants which corresponds to physiological biomechanical properties. In order to benefit from a clinical application of appropriate restoration material and its advantages also on one-piece implants, it is necessary to guarantee a long-term bonding. The examination of the existing interfaces and possible changes following dynamic stress between restoration, bonding material and implant is of interest. To date there are no published examinations which have described a non-invasive method and which are able to demonstrate possible changes to interfaces of intact crowns bonded on implants following dynamic stress between restoration, bonding and implant material.

As a result of the special composition of Lava Ultimate as cross-linked polymer with a carrier material percentage of 80 %, new possibilities are now also available to examine this in contrast to products with similar resilient properties (e.g. VITA Enamic, VITA Zahnfabrik, Bad Säckingen, Germany). In addition to the conventional methods of materials examination, additional visual information on the compound situation of this material could be derived by means of Optical Coherence Tomography (OCT) and thus contribute to evaluating a possible clinical application.

Optical Coherence Tomography (OCT) is a non-invasive procedure and allows microstructures to be displayed on and in organic and inorganic material. (Fig. 1). In addition to current investigations on diagnostics and on the evaluation of carious lesions [14], above all examinations of interfaces at composite fillings confirm the great potential of this approach in evaluating restorations [10, 11]. The OCT uses light in the near-infrared wavelength range. Due to the attenuation of light in the sample by dispersion, reflection and absorption depending on the refractive index of the materials, structures can be displayed up to a maximum depth of approx. 2–2.5 mm. These signal-emitting structures (signal lines) become visible at interfaces of various different phases, e.g. in the case of inhomogeneous materials, such as air inclusions or gaps which might indicate an impaired bond.

In order to produce a permanent and stable bond with an adhesive bonding material, a tribochemical pre-treatment of the zirconium oxide surfaces is advantageous [3, 16]. At the

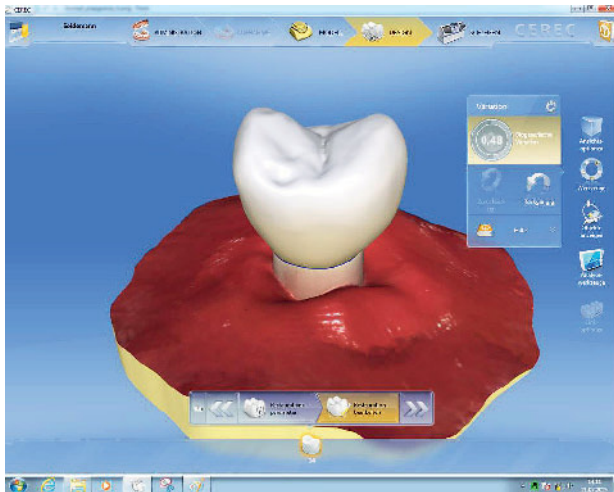


Abbildung 3 Bildschirmansicht der konstruierten Krone
Figure 3 Screen view of the designed crown



Abbildung 4 Implantatstümpfe: links SB und rechts non-SB
Figure 4 Implant abutments: left SB and right non-SB

rialinhomogenitäten wie Luft einschließen oder Spalten, die ein Hinweis auf einen beeinträchtigten Verbund sein können.

Um einen möglichst dauerhaften und stabilen Verbund bei adhäsiver Befestigung herzustellen, hat eine tribochemische Vorbehandlung von Zirkoniumdioxidoberflächen Vorteile [3, 16]. Gleichwohl führt eine solche Vorbehandlung bei einigen Implantatherstellern unter Umständen zum Verlust der Garantie. Bislang fehlen noninvasive Informationen, wie sich das Interface zwischen Implantatoberfläche, Befestigungsmaterial und Restauration darstellt und ob es unter Kausimulation zu Veränderungen kommt. Gegebenenfalls lassen zusätzliche OCT-Informationen einen frühzeitigen Hinweis auf mögliche Schwachstellen des Verbundes zu.

Ziel dieser Studie war es, Veränderungen an Grenzflächen vor und nach dynamischer Belastung bei adhäsiv befestigten Resin-Nano-Keramik(RNK)-Kronen auf einteiligen ZrO₂-Implantaten mittels optischer Kohärenztomografie (OCT) darzustellen.

Material und Methoden

Es wurden insgesamt 20 Versuchsimplantate aus Zirkoniumdioxid (ZrO₂, Y-TZP) hergestellt (Abb. 2). Dazu wurde aus vorgesinterten Blöcken (In-Ceram YZ-55, VITA, Bad Säckingen, Deutschland) die Grundform der Versuchsimplantate gedreht (Werkstatt für Feinmechanik, Fakultät für Physik und Geowissenschaften, Universität Leipzig, Deutschland) und anschließend im zahntechnischen Labor der Sintervorgang durchgeführt (VITA Zyrcomat 6000 MS, Bad Säckingen, Deutschland).

Der Konvergenzwinkel des Implantataufbaus betrug 3° und die Höhe 6 mm. Die Form wurde so gestaltet, dass die Aufnahme einer Prämolarenkrone mit ausreichend Materialstärke in allen Bereichen möglich war. Da es sich um eine In-vitro-Studie handelte, wurde ein schematisches Gewinde konstruiert, um die nötige Retention im Einbettungsmaterial zu gewährleisten und damit eine vollständige Osseointegration zu simulieren. Auf zusätzliche Modifizierungen der Gewindeoberfläche wurde verzichtet

same time such a pre-treatment in the case of some implant manufacturers under certain circumstances does lead to forfeiture of the guarantee. To date non-invasive information as to what the interface looks like between the implant surface, bonding material and restoration is lacking and whether changes under chewing simulation are identified. If applicable, additional OCT information will permit a premature indication of possible weak points in the bond.

This study aimed at identifying changes to interfaces prior to and after a dynamic impact in the case of adhesively bonded Resin Nano Ceramic (RNC) crowns on one-piece ZrO₂ implants by means of optical coherence tomography (OCT).

Material and methods

A total of 20 zirconium dioxide (ZrO₂, Y-TZP) test implants were produced (Fig. 2). The basic form of the test implants was lathed (workshop for fine mechanics, Faculty for Physics and Geosciences, University of Leipzig, Germany) from the presintered blocks (In-Ceram YZ-55, VITA, Bad Säckingen, Germany) and then the sintering process was performed at the dental laboratory (VITA Zyrcomat 6000 MS, Bad Säckingen, Germany).

The convergence angle of the implant structure was 3° and the height 6 mm. The mould was designed in such a way to enable the incorporation of a premolar crown with sufficient material thickness in all areas. As this was an in-vitro study a schematic thread was constructed to guarantee the necessary retention in the embedding material and thus to simulate a complete osseointegration. Additional modifications to the thread surface were deemed to be unnecessary.

A total of 20 premolar crowns were produced from Lava Ultimate (3M ESPE, Seefeld, Germany) in the CAD/CAM procedure. Scanning was performed with the BlueCam of the Cerec 3D-System (Sirona, Bensheim, Germany). In the next step the standard design of the crowns (tooth 14, Biogeneric Programme No. 48) at the virtual model was performed according to the customary construction steps of the Cerec System. With the Cerec-MC-XL Grinding Unit (Sirona, Bensheim, Ger-



Abbildung 5 Krone adhäsiv auf Implantat befestigt
Figure 5 Crown adhesively bonded to implant

Insgesamt wurden 20 Prämolarenkronen aus Lava Ultimate (3M ESPE, Seefeld, Deutschland) im CAD/CAM-Verfahren gefertigt. Der Scanvorgang wurde mit der BlueCam des Cerec-3D-Systems (Sirona, Bensheim, Deutschland) durchgeführt. Anschließend erfolgte das einheitliche Design der Kronen (Zahn 14, Biogeneric Programm Nr. 48) am virtuellen Modell nach den üblichen Konstruktionsschritten des Cerec-Systems. Mit der Cerec-MC-XL-Schleifeinheit (Sirona, Bensheim, Deutschland) wurden die Kronen hergestellt und anschließend mit dem Lava Ultimate Polishing Set (Meisinger, Neuss, Deutschland) poliert (Abb. 3).

Danach wurden alle Kronen von innen sowie die Hälfte der Implantataufbauten einer tribochemischen Vorbehandlung unterzogen. Dazu wurden die zu behandelnden Flächen mit schwarzem Filzstift markiert und mit CoJet (Abstand ca. 5–10 mm, 30 µm, 2 bar, 3M ESPE, Seefeld, Deutschland) abgestrahlt, um eine möglichst gleichmäßig und vollständig silikatisierte Oberfläche zu erhalten (Abb. 4).

Nach Reinigung mit Alkohol und Trocknung aller behandelten Flächen mit ölfreier Luft erfolgte die adhäsive Befestigung der Kronen auf den Implantaten. Zunächst wurde Scotchbond Universal (SU, 3M ESPE, Seefeld, Deutschland) für 20 sec auf die Kroneninnenseiten und entsprechende Implantatflächen einmassiert. Anschließend wurde 5 sec lang mit sanftem Luftstrom getrocknet und größere Ansammlungen von Scotchbond wurden mit einem trockenen Microbrush entfernt.

Mit dem Intraoral Tip wurden dann die Kronen mit RelyX Ultimate (3M ESPE, Seefeld, Deutschland) befüllt und auf den Implantaten positioniert. Der Überschuss wurde mit Schaumstoffpellets entfernt. Nach Auftrag von Glyzeringel erfolgte die Lichthärtung unter stetem manuellem Druck für 20 sec pro Fläche (Elipar, 3M ESPE, Seefeld, Deutschland) (Abb. 5).

Die Implantate wurden in einen kaltpolymerisierenden Kunststoff (Technovit 4000, Heraeus Kulzer, Hanau, Deutschland) eingebettet. Dies erfolgte direkt in die Probenhalter des Kausimulators mit individualisierter Vorrichtung im Parallelometer.

Anschließend wurden Schnittbilder der befestigten Kronen vor und nach Kausimulation (KS) und Thermocycling mittels

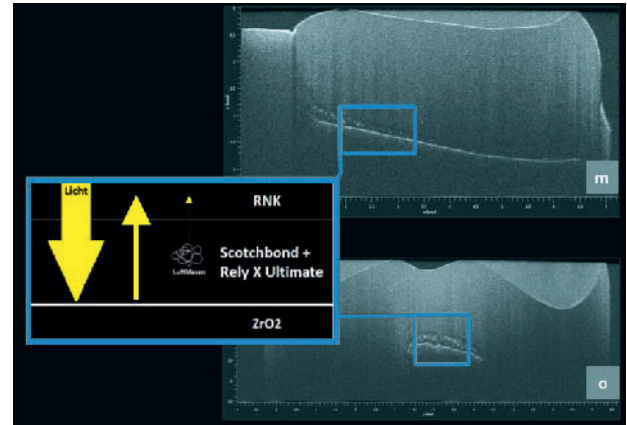


Abbildung 6 Beispiel eines OCT-B-Scan: Ansicht der Grenzflächen mesial und okklusal

Figure 6 Example of an OCT-B-Scan: View of interfaces mesial and occlusal

many) the crowns were produced and then polished in the next step using the Lava Ultimate Polishing Set (Meisinger, Neuss, Germany) (Fig. 3).

After that all crowns were pre-treated from the inside and half of the implant abutment structures were subjected to a tribochemical pre-treatment. For this purpose the surfaces to be treated were marked with a black felt-tip pen and jet blasted with CoJet (distance approx. 5–10 mm, 30 µm, 2 bar, 3M ESPE, Seefeld, Germany) in order to obtain an evenly and completely silicated surface (Fig. 4).

After cleaning all treated surfaces with alcohol and drying these with oil-free air, the crowns were adhesively bonded to the implants. Firstly Scotchbond Universal (SU, 3M ESPE, Seefeld, Germany) was massaged into the inner crown sides and appropriate implant surfaces for 20 sec. In the next step these surfaces were dried for 5 sec using a gentle flow of air and larger build-ups of Scotchbond were removed using a dry microbrush.

The crowns were then filled with RelyX Ultimate (3M ESPE, Seefeld, Germany) using the Intraoral Tip and then positioned on the implants. The surplus was removed using foam pellets. After applying glycerine gel the samples were light-cured under constant manual pressure for 20 sec per surface (Elipar, 3M ESPE, Seefeld, Germany) (Fig. 5).

The implants were embedded in a cold polymerising synthetic material (Technovit 4000, Heraeus Kulzer, Hanau, Germany). This was performed directly in the sample holder of the chewing simulator with an individualised fixture in the parallelometer.

Sectional views of the fastened crowns before and after chewing simulation (CS) and thermocycling by means of optical coherence tomography were produced (OCT, Telesio II, Thorlabs GmbH, Dachau, Lübeck, Germany) (Fig. 6).

The samples were scanned from mesial, distal and occlusal (parameter: 1310 nm, 48 kHz, 1024 × 1024 pixels in B-Scan). Per OCT-Scan 300 frames (optical cutting planes) were generated whereby the region of interest (ROI; well visible, central area of the ZrO₂-abutment) was found in the frame area No. 100–200. In each case 5 photos from this region were used for the purpose

optischer Kohärenztomografie (OCT, Telesto II, Thorlabs GmbH, Dachau, Lübeck, Deutschland) angefertigt (Abb. 6).

Die Proben wurden jeweils von mesial, distal und okklusal gescannt (Parameter: 1310 nm, 48 kHz, 1024×1024 Pixel im B-Scan). Pro OCT-Scan wurden 300 Frames (optische Schnittebenen) erzeugt, wobei die region of interest (ROI; gut sichtbarer, zentraler Bereich des ZrO₂-Stumpfes) im Framebereich Nr. 100–200 anzusiedeln war. Es wurden jeweils 5 Aufnahmen aus dieser Region zur Auswertung herangezogen (Frame Nr. 100, 125, 150, 175, 200), die eine kumulative Bewertung für die jeweilige Fläche ergaben.

Von Interesse waren dabei die Veränderungen der in den OCT-B-Scans sichtbaren Signallinien an den Grenzflächen nach Kausimulation. Diese wurden anhand eines optisch-visuellen Scoringsystems als „deutlicher“, „undeutlicher“ oder „gleich“ bewertet. Dabei waren Helligkeit/Intensität und Breite der Signallinien maßgeblich, wonach die Bewertung „deutlicher“ mit einer Zunahme der Helligkeit/Intensität und/oder der Breite der Signallinie verbunden ist. Analog dazu bedeuten „undeutlicher“/„gleich“ eine Abnahme bzw. keine Veränderung des Signals (Abb. 7).

Durch eine individualisierte Haltekonstruktion am OCT-Gerät und das Verbleiben der Proben in der Halterung des Kausimulators wurde eine möglichst genau reproduzierbare Aufnahmeorientierung der Proben vor und nach KS erreicht, was die Auswertung der jeweils zu vergleichenden Frames ermöglichte. Die statistische Auswertung der OCT erfolgte deskriptiv.

Die KS und das Thermocycling erfolgten simultan mittels CS-4.8 professional line (5 Kammern, SD-Mechatronik GmbH, Feldkirchen-Westerham, Deutschland) über 1,2 Mio. Zyklen bei 50 N und 1,6 Hz Frequenz, wobei eine 3-mm-Steatitkugel als Antagonist benutzt wurde und Wechselbäder von 5–55 °C für je 60 sec erfolgten. Damit wurde eine klinische Belastung von ca. 5 Jahren simuliert. Im Anschluss wurde eine stereomikroskopische Kontrolle auf Risse bzw. Frakturen des Restaurationmaterials und/oder der Implantate durchgeführt (Auflicht-Hellfeld, Stemi 2000-C, Digitale Mikroskopkamera Axio-Cam ICc 1 Rev.4, Kontrollsoftware AxioVision Rel. 4.8, Carl Zeiss MicroImaging GmbH, Göttingen, Deutschland).

Ergebnisse

Alle Proben wiesen nach Abschluss der Untersuchungen keinerlei äußerliche Anzeichen einer Fraktur oder Zerstörung auf. Eine Probe zeigte im OCT-B-Scan (Probe 2_SB_o) nach KS einen Haarriss innerhalb der RNK. Dieser war jedoch äußerlich nicht zu erkennen und beeinträchtigte die Stabilität der Krone während der Kausimulation nicht.

Veränderung an Grenzflächen

Keine der Veränderungen nach KS wurde mit „undeutlicher“ bewertet. An der Grenzfläche RNK/SU+RU (= Kronen-Befestigungsmaterial-Interface) ist bei einer Fläche (Probe Nr. 9, SB, distal) ein Spalt signal auszumachen, das nach KS mit „gleich“ zu bewerten war. Alle anderen Proben wiesen kein Spalt signal zwischen Krone und Befestigungsmaterial auf (Abb. 8).

Bei allen Proben war sowohl vor als auch nach KS im OCT-B-Scan für alle bewerteten Flächen (mesial, distal, okklusal) ein

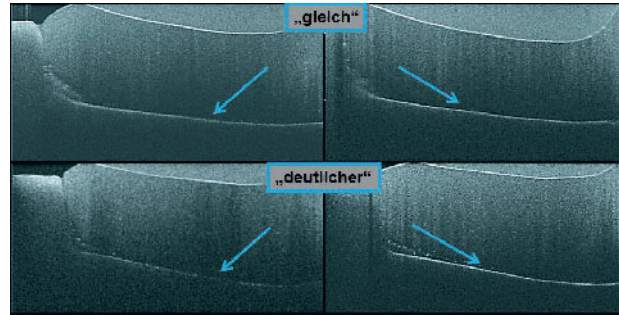


Abbildung 7 Bewertungsbeispiel des visuellen Scores für „gleich“ und „deutlicher“

Figure 7 Assessment examples of visual score for „equal“ and „more pronounced“

of evaluation (frame No. 100, 125, 150, 175, 200) resulting in a cumulative evaluation for the respective surface.

The changes to the signal lines at the interfaces which were visible in the OCT-B-Scans were of note following the chewing simulation. These were evaluated according to an optical/visual scoring system as „more pronounced“, „indistinct“ or „equal“. In this context the brightness/intensity and width of the signal lines were decisive. According thereto the evaluation „more pronounced“ is associated with an increase in brightness/intensity and/or width of the signal line. Accordingly, „indistinct“/„equal“ stand for a decrease or no change of the signal (Fig. 7).

By an individualised retaining construction at the OCT device it was possible to ensure that the samples were maintained in the retainer of the chewing simulator, thus achieving a well reproducible retainer facility of the samples prior to and after the chewing simulation, and furthermore enabling the comparable frames to be optimally evaluated. The static evaluation of the OCT was performed with a descriptive approach.

The CS and thermocycling were both performed simultaneously by means of CS-4.8 professional line (5 chambers, SD-Mechatronik GmbH, Feldkirchen-Westerham, Germany) in over 1.2 million cycles at 50 N and 1.6 Hz frequency whereby a 3 mm steatite ball was used as antagonist and alternating baths of 5–55 °C for 60 sec each took place. That thus simulated a clinical load of approx. 5 years. In the next step a stereomicroscopy control took place to identify cracks and fractures of the restoration material and/or the implants (Auflicht-Hellfeld, Stemi 2000-C, Digital Microscope Camera AxioCam ICc 1 Rev.4, Control Software AxioVision Rel. 4.8, Carl Zeiss MicroImaging GmbH, Göttingen, Germany).

Results

After completing the examinations none of the samples had any signs of a fracture or destruction. One sample revealed a hairline crack within the RNC in the OCT-B-Scan (Sample 2_SB_o) after CS. This, however, was not identifiable from the exterior and did not impair the stability of the crown during the chewing simulation.

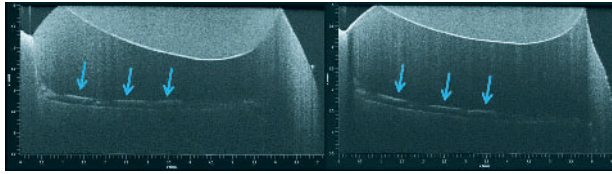


Abbildung 8 Einzige Probe mit Signal an Grenzfläche RNK/SU+RU
Figure 8 Only sample with signal along RNK/SU+RU interface

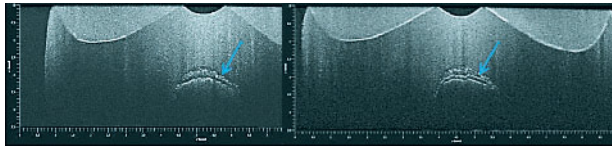


Abbildung 9 Zweite Signallinie okklusal sichtbar nach Belastung bei non-SB-Proben
Figure 9 Second signal line visible occlusal after dynamic loading in the case of non-SB samples

Signal entlang der Grenzfläche SU+RU/ZrO₂ (= Befestigungsmaterial-Stumpf-Interface) sichtbar.

Dieses war bei Proben ohne CoJet-Vorbehandlung (non-SB) bereits vor KS ausgeprägter als bei Proben mit SB.

Nach KS waren die Veränderungen der Signale bei seitlichen Scans (mesial, distal) der non-SB-Proben durchweg mit „gleich“, bei SB hingegen mit „deutlicher“ zu bewerten.

Analog dazu waren auch in den okklusalen B-Scans die Signale bei SB „deutlicher“, aber nur bei 4 der non-SB-Proben „gleich“. Bei den übrigen 6 Proben trat nach Belastung ein zweites Spaltssignal auf, wodurch eine Bewertung der Fläche nach zuvor angewandtem Schema nicht möglich war (Abb. 9).

Diskussion

In der vorliegenden Pilotstudie wurden mithilfe der OCT die Grenzflächen an 20 einteiligen Zirkoniumdioxidimplantaten nach prothetischer Versorgung mit Kronen aus einer Resin-Nano-Keramik und adhäsiver Befestigung untersucht.

Im Folgenden werden einige Aspekte zu Material und Methode diskutiert. Da es sich um eine Pilotstudie handelte und vor allem die Machbarkeit der beschriebenen Methode im Vordergrund stand, wurde die Untersuchung an einer reduzierten Fallzahl an Probekörpern durchgeführt.

Bei den untersuchten OCT-B-Scans handelte es sich um punktuelle Schnittbilder einer Probe, die in einer kumulativen Bewertung zusammengefasst wurden. Um einen ersten Eindruck über die Darstellbarkeit und Visualisierung in der OCT für die untersuchten Bereiche (Grenzflächen) und deren Veränderungen nach Kausimulation zu erhalten, erschien ein erstes visuelles Scoring angebracht. Trotz einfacher Entscheidungsparameter für die jeweilige kumulative Bewertung stellt dieses Scoring keine statistisch objektive Bewertung im klassischen Sinne dar und muss als Limitation dieser Untersuchung gesehen werden. Nach positivem Verlauf unserer Pilotstudie scheint eine Weiterentwicklung des

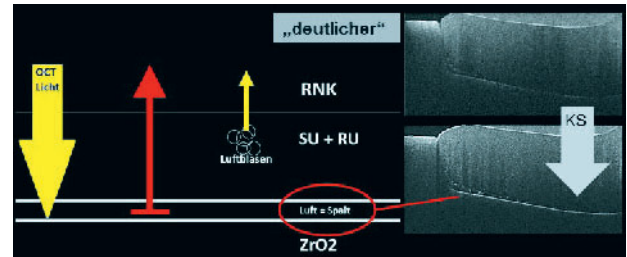


Abbildung 10 Schematisch: Zunahme Signalintensität nach Kausimulation bei SB-Proben

Figure 10 Schematic: Increase of signal intensity after chewing simulation in the case of SB samples

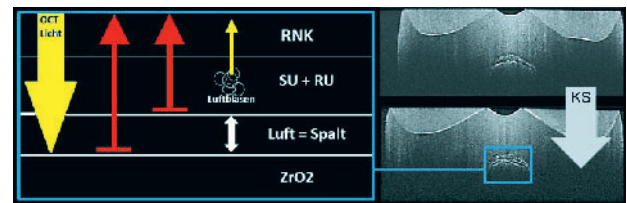


Abbildung 11 Schematisch: Erscheinen einer zweiten Signallinie nach Kausimulation bei non-SB-Proben

Figure 11 Schematic: Second signal line appears after chewing simulation in the case of SB samples

Changes to the interfaces

After CS none of the changes were evaluated with „indistinct“. At the interface RNC/SU+RU (= crown-bonding material-interface) a signal line was identified at a surface (sample No. 9, SB, distal) which, after CS, was evaluated as „equal“. No other samples revealed any signal line between the crown and bonding material (Fig. 8).

In all other samples not only prior to, but also after the CS in the OCT-B-Scan for all evaluated surfaces (mesial, distal, occlusal) a signal was visible along the interface SU+RU/ZrO₂ (= bonding material-abutment-interface).

This was more pronounced in the case of samples without CoJet pre-treatment (non-SB) already before the CS than in the case of samples with (SB).

After the CS the changes to the signals in the case of the lateral scans (mesial, distal) of the non-SB samples were all evaluated with „equal“, in the case of SB, however, these were evaluated with „more pronounced“.

Analog to that the signals in the occlusal B-Scans at SB were „more pronounced“, but only at 4 of the non-SB samples „equal“. In the other 6 samples a second signal line was identified, as a result of which it was no longer possible to evaluate the surface according to a previously applied pattern (Fig. 9).

Discussion

In this pilot study the interfaces at 20 one-piece zirconium dioxide implants were examined with the help of OCT after

Auswertungssystem hin zu einer binären Bewertung respektive die Quantifizierung von Spaltsignalen mit metrischen Angaben sinnvoll. Die Aussagekraft der einzelnen Bewertungen ist daher zunächst in den engen Grenzen dieser Untersuchung zu sehen.

Veränderung an Grenzflächen

An einer Probe kam es an einer der zu bewertenden Flächen im OCT-B-Scan zu einem Spaltsignal am Übergang zwischen Krone und Befestigungsmaterial (Probe Nr. 9_SB). Dies lässt an beurteilter Fläche auf einen fehlenden Verbund schließen, da dort offensichtlich der Übergang des Lichtes von RNK in Luft zu einer Streuung/Reflexion führte. Möglicherweise ist eine mangelnde CoJet-Vorbehandlung oder fehlerhafte Benetzung der Fläche mit adhäsivem Befestigungsmaterial ursächlich. Es kam weder zu einer Dezementierung während KS noch zu sichtbaren Veränderung des vorhandenen Spaltsignals nach KS. Insgesamt lässt das Ausbleiben von Spaltsignalen an den übrigen Proben für die untersuchte Stelle einen homogenen Verbund zwischen Krone und Befestigungsmaterial vermuten.

Trotz größter Sorgfalt könnte die manuelle Vorbehandlung und Befestigung der RNK-Kronen auf den Implantaten als mögliche Fehlerquelle angesehen werden.

Ein Verdacht, dass die durch CoJet-Vorbehandlung matt erscheinende ZrO₂-Oberfläche bei SB-Proben eine verminderte Reflexion zeigt und daher bereits vor KS ein schwächeres Signal resultiert, konnte in Vorversuchen nicht bestätigt werden. Beide Oberflächen (SB und non-SB) stellten sich im OCT gleich dar.

Eine weitere Limitation der Studie bestand darin, dass die OCT in Abhängigkeit vom Brechungsindex der verschiedenen Materialien nur eine Durchdringtiefe von max. 2–2,5 mm hat. Die hergestellten Kronen wurden daher unter Einhaltung der Mindestwandstärken von ≥ 1 mm und $\geq 1,5$ mm im okklusalen Bereich so dünn wie möglich konstruiert. Nach simulierter dynamischer Kaubelastung kam es zu einem Substanzabtrag, so dass die Mindeststärke okklusal sogar unterschritten wurde.

Material ZrO₂

Des Weiteren schränkt das Material Zirkoniumdioxid aufgrund seines Brechungsindex die Aussagekraft der OCT im Vergleich zu anderen Materialien möglicherweise ein. ZrO₂ reflektiert wegen seines hohen Brechungsindex viel Licht (Luft ≈ 1 , Wasser $\approx 1,3$, Kompositenschmelzmasse $\approx 1,5$, natürlicher Schmelz 1,62, ZrO₂ $\approx 1,9$). Das Signal im OCT-B-Scan an entsprechender Grenzfläche darf aufgrund dieser Eigenschaft des ZrO₂ nicht per se mit einem Spalt verbunden oder gar mit „kein Verbund“ gleichgesetzt werden. Da es nach simulierter Kaubelastung zu einer Veränderung des Signals im Sinne der Bewertung „deutlicher“ kommt, muss jedoch eine Zunahme des reflektierten Lichts erfolgt sein. Dies lässt sich durch ein Auseinanderweichen der Flächen RU+SB/ZrO₂ nach Belastung erklären.

Durch die Zunahme der Distanz beider Flächen voneinander entsteht ein Hohlraum, der mit Luft gefüllt ist, d. h. ein Spalt. Durch die zusätzliche Phase Luft zwischen den Grenzflächen RU+SB und ZrO₂ erhöht sich die Reflexion beim Übergang des Lichts zwischen den Phasen, und das Signal im B-Scan

prosthetic treatment of the crowns using a Resin Nano Ceramic with adhesive bonding.

In the following some aspects on material and method will be discussed. As this is a pilot study and above all the feasibility of the method described is at the focus, the examination was performed with a reduced case number of samples.

With regard to the OCT-B-Scans examined, these are selective sectional views of a sample which have been summarised in a cumulative evaluation. In order to obtain an initial impression of the presentability and visualisation in OCT for the areas examined (interfaces) and the changes thereto following chewing simulation, an initial visual scoring is deemed to be necessary. Despite simple decision parameters for the respective cumulative evaluation, this scoring does not represent any statically objective evaluation in the classic sense of the word and has to be seen as limitation of this examination. After a positive development of this pilot study a further development of the evaluation system to a binary evaluation, respectively a quantification of line signals with metric specifications makes sense. The impact on the individual evaluations is therefore to be initially seen in the light of the close limits of this examination.

Changes to interfaces

At one sample a signal line at one of the surfaces to be evaluated in the OCT-B-Scan was identified at the transition between the crown and the bonding material (sample No. 9_SB). This suggests a lacking compound at the evaluated surface, as apparently the transition of light from RNC in air led to a dispersion/reflection. A lacking CoJet pre-treatment or faulty netting of the surface with adhesive bonding material could be the cause. Neither debonding during the CS nor visible changes to the existing signal line after CS took place. In general the lacking signal lines at the other samples imply a more homogeneous compound between the crown and bonding material with regard to the location examined.

Despite utmost care the manual pre-treatment and bonding of the RNC crowns on the implants could be seen as possible error source.

A suspicion that the ZrO₂ surface with a mat appearance as a result of CoJet pre-treatment in the SB samples has a reduced reflection and therefore generates a weaker signal even before CS could not be confirmed in previous tests. Both surfaces (SB and non-SB) were reflected in the same way in the OCT.

A further limitation of the study existed in the fact that the OCT depending on the refractive index of the various materials only has a penetration depth of max. 2–2.5 mm. The crowns produced were therefore constructed as thinly as possible in considering the minimum wall thicknesses of ≥ 1 mm and ≥ 1.5 mm in the occlusal area. After dynamic chewing simulation a substance abrasion occurred so that the minimum thickness of occlusal areas was even underrun.

Material ZrO₂

Furthermore, the material zirconium oxide possibly limits the significance of OCT due to its refractive index in comparison with other materials. Due to its high refractive index ZrO₂ reflects a lot of light (air ≈ 1 , water ≈ 1.3 , composite enamel ≈ 1.5 ,

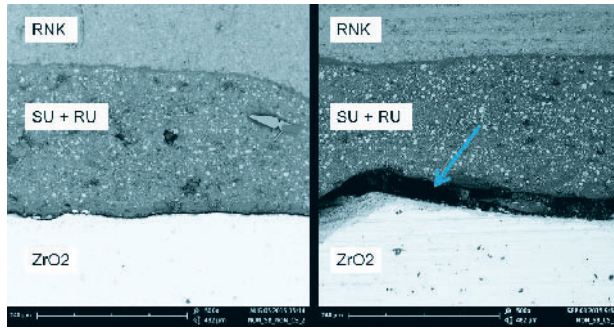


Abbildung 12 REM-Aufnahmen okklusal: Deutliche Spaltbildung bei non-SB-Probe nach Kausimulation

Figure 12 SEM images occlusal: Obvious gap formation in the case of non-SB sample after chewing simulation

ist „deutlicher“ (Abb. 10). Dass beide Grenzflächen nicht auch als zwei voneinander getrennte Signallinien wahrzunehmen waren, lag möglicherweise daran, dass die Grenzflächen noch nicht weit genug auseinandergewichen sind, um dies trotz hoher Auflösung mit der OCT im betrachteten Bereich darzustellen. Es ist möglich, dass die Strecke, die das Licht bei mesialen und distalen Aufnahmen zurücklegen musste, im Vergleich zu okklusalen Aufnahmen, zu groß für eine detaillierte Darstellung war. Dafür spricht das Auftreten einer zweiten Signallinie bei okklusalen B-Scans. Okklusal kam es bei KS zu einer direkten Krafteinleitung, verbunden mit einer höheren Belastung. Daher ist ein Auseinanderweichen der Grenzflächen zuerst okklusal als wahrscheinlich anzusehen (Abb. 11).

Zur Verifizierung der Spaltbildung wurden in einem noch laufenden Versuchsabschnitt rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen angefertigt (Abb. 12).

Die KS simulierte einen 5-jährigen klinischen Einsatz und konnte zeigen, dass es innerhalb der Limitationen dieser Studie zu keiner Dezementierung der RNK-Kronen während dynamischer Belastung kam. Um die Qualität des Verbundes im Hinblick auf eine erfolgte CoJet-Vorbehandlung genauer beurteilen zu können, sind weiterführende konventionelle Untersuchungen (Abzugsversuche) notwendig.

Folgend lässt sich aus den hier dargestellten Ergebnissen eine gegensätzliche Interpretation zur gegenwärtigen Indikationseinschränkung von Lava Ultimate für die Kronenversorgung ableiten. Allerdings wurde in der vorliegenden Studie nur eine Belastungskraft von 50 N während der Kausimulation festgelegt, wohingegen physiologische Kräfte von 60–75 N beim Kauen im Bereich der vorderen Zähne auftreten können [4]. Eine aktuelle randomisierte klinische Studie bei der 40 RNK-Kronen extraoral auf ZrO₂-Abutments adhäsiv befestigt und anschließend intraoral verschraubt wurden, unterstützt trotz Unterbrechung der Integrität der Krone durch den Schraubenkanal einerseits mit einem ermittelten Bondingversagen von 80 % innerhalb des ersten Jahres am SU+RU/ZrO₂-Interface die Indikationsänderung [13]. Andererseits bestärken diese klinischen Daten die ersten Ergebnisse unserer Pilotstudie, da das auffällige Spalt signal sowohl für SB als auch für non-SB in unserer Untersuchung am SU+RU/ZrO₂-Interface und dessen Veränderung nach Kausimulation auf eine mögliche „Schwachstelle“ im Verbund hinweisen.

natural enamel 1.62, ZrO₂ ≈ 1.9). The signal in the OCT-B-Scan at the appropriate interface must not be per se connected to a gap due to this property of ZrO₂ or even be put on the same level as “no composite bonding”. As it is evaluated within the sense of “more pronounced” after a simulated chewing load, the reflected light must, however, have increased. This can be explained by the surfaces RU+SB/ZrO₂ moving apart as a result of the load.

A void is created by the distance increasing between the two surfaces. This void is filled with air, thus representing a gap. As a result of the additional air phase between the interfaces RU+SB and ZrO₂, the reflection is raised at the transition of light between the phases and the signal in the B-Scan is „more pronounced“ (Fig. 10). Why both interfaces were not perceived as two signal lines which are separated from each other may have possibly been due to the fact that the interfaces had not moved far enough apart in order to represent this in the area under review despite the high resolutions with the OCT. It is possible that the distance which the light had to cover in mesial and distal photos in comparison with occlusal photos was too large for a detailed presentation. The occurrence of a second signal line in occlusal B-Scans speaks in favour of that. In CS a direct application of force occlusal can be associated with a higher load. A deviation of the interfaces should therefore be initially viewed occlusal as probable (Fig. 11).

To verify the gap formation scanning electron microscope recordings are made in an ongoing test section (Fig. 12).

Our CS simulated a 5-year clinical application and was able to document that within the limitations of this study no debonding of the RNC crowns was observed during dynamic loading. In order to be able to evaluate the quality of the compound with regard to a completed CoJet pre-treatment, further conventional examinations (pull-out tests) are required.

In consequence thereof a conflictive interpretation of the current limited indication of Lava Ultimate for the treatment of crowns can be derived from the results presented. In this study under review, however, only a load force of 50 N during chewing simulation was laid down, whereas physiological forces of 60–75 N, when chewing in the area of the anterior teeth can arise [4]. A current randomised clinical study in which 40 RNC crowns are adhesively bonded extraoral to ZrO₂ abutments and then intraorally screwed on, supports the change of indication despite interrupting the integrity of the crown through the screw canal on the one hand with an identified bonding failure of 80 % within the first year at the SU+RU/ZrO₂-interface [13]. On the other hand these clinical data support the first results of our pilot study as the remarkable gap signal not only for SB, but also for non-SB in our examination at the SU+RU/ZrO₂-interface and its change following the chewing simulation refers to a possible “weak point” in the bond.

Conclusions

The pilot study presented shows that a non-invasive presentation of changes to RNC interfaces is possible using OCT and that additional visual information can be derived. In addition to the conventional methods of materials testing the OCT is able to supply information on possible weak points in the bond

Schlussfolgerungen

Die hier vorgestellte Pilotstudie zeigte, dass eine noninvasive Darstellung von Veränderungen an RNK-Grenzflächen mithilfe der OCT möglich ist und so zusätzliche visuelle Informationen gewonnen werden können. Ergänzend zu den konventionellen Methoden der Materialprüfung kann die OCT optische Hinweise auf mögliche Schwachstellen im Verbund liefern („deutlichere“ Signallinie, Doppellinie). Trotz vielversprechender Werte unserer Untersuchung mit einer Überlebensrate von 100 %, weisen diese ersten OCT-Ergebnisse auf Optimierungsbedarf der adhäsiven Befestigung von RNK auf ZrO₂ unabhängig von erfolgter Vorbehandlung hin. Gerade angesichts spärlicher klinischer Daten besteht somit die Notwendigkeit weiterführender experimenteller und klinischer Untersuchungen, mit Fokus auf Grenzflächen und geeigneten Materialkombinationen, um die Vorteile von RNK-Restaurationen auf einteiligen ZrO₂-Implantaten auch klinisch nutzen zu können. Mit der OCT steht dafür ergänzend ein noninvasives Verfahren zur Verfügung.

Interessenkonflikt: Die Autoren erklären, dass kein Interessenkonflikt im Sinne der Richtlinien des International Committee of Medical Journal Editors besteht.

(„more pronounced“ signal line, double line). Despite promising values of our examination with a survival rate of 100 % the initial OCT results refer to the need for optimising the adhesive bond from RNC to ZrO₂, irrespective of the pre-treatment performed. In particular, as a result of meagre clinical data, there is thus the need for further experimental and clinical examinations with focus on interfaces and suitable material combinations to also clinically benefit from the advantages of RNC restorations on one-piece ZrO₂-implants. With OCT a non-invasive procedure is additionally available.

Conflict of interests: The authors declare that no conflict of interest exists within the sense of the regulations laid down by the International Committee of Medical Journal Editors.

Korrespondenzadresse

Dr. Constanze Olms, MME
Oberärztin, Spezialistin für Prothetik
Universität Leipzig
Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
und Werkstoffkunde
Liebigstr. 12, Haus 1, 04103 Leipzig
Constanze.olms@medizin.uni-leipzig.de

Literatur

- Awada A, Nathanson D: Mechanical properties of resin-ceramic CAD/CAM restorative materials. *J Prosthet Dent* 2015; pii S0022–3919, Epub ahead of print
- Censi R, Vavassori V, Arnaboldi O, Maiorana C, Re D: Zirconia implants in esthetic areas: 4-year follow-up evaluation study. *Int J Dent* 2015; 2015: 415029
- Elsaka SE: Influence of surface treatments on the bond strength of Resin cements to monolithic zirconia. *J Adhes Dent* 2016; 18: 387–395
- Fontijn-Tekamp FA, Slagter AP, Van Der Bilt A et al.: Biting and chewing in overdentures, full dentures, and natural dentitions. *J Dent Res* 2000; 79: 1519–1524
- Hashim D, Cionca D, Courvoisier DS, Mombelli A: A systematic review of the clinical survival of zirconia implants. *Clin Oral Invest* 2016; 20: 1403–1417
- Hermann JS, Cochran DL, Nummikoski PV, Buser D: Crestal bone changes around titanium implants. A radiographic evaluation of unloaded nonsubmerged and submerged implants in the canine mandible. *J Periodontol* 1997; 68: 1117–1130
- Kirsch A, Ackermann K: The IMZ osteo-integrated implant system. *Dent Clin North Am* 1989; 33: 733–791
- Magne P, Silva M, Oderich E, Boff LL, Enciso R: Damping behavior of implant-supported Restorations. *Clin Oral Implants Res* 2013; 24: 143–148
- Misch CE, Suzuki JB, Misch-Dietsh FM, Bidez MW: A positive correlation between occlusal trauma and peri-implant bone loss: literature support. *Implant Dent* 2005; 14:108–116
- Park K, Schneider H, Haak R: Assessment of defects at tooth/self-adhering flowable composite interface using swept-source optical coherence tomography (SS-OCT). *Dent Mater* 2015; 31: 534–541
- Park K, Schneider H, Haak R: Assessment of interfacial defects in composite restorations by swept-source optical coherence tomography. *J Biomed Opt* 2013; 18: 76018
- Pektaş Ö, Tönük E: Mechanical design, analysis, and laboratory testing of a dental implant with axial flexibility similar to natural tooth with periodontal ligament, *Proc IMechE Part H: J Engineering in Medicine* 2014; 228: 1117–1125
- Schepke U, Meijer HJ, Vermeulen KM, Raghoobar GM, Cune MS: Clinical bonding of Resin nano-ceramic restorations to zirconia abutments: A case series within a randomized clinical trial. *Clin Implant Dent Relat Res* 2016; 18: 984–992
- Schneider H, Gottwald R, Meißner T et al.: Assessment of uncavitated carious enamel lesions by optical coherence tomography and x-ray microtomography. *Caries Res* 2016; 50: 60–61
- Sheikhassani R, Anvari P, Taei S, Sheikhassani Y: Potential use of a polycarbonate-urethane matrix reinforced with polyethylene fibers for shock-absorbing dental implants. *Medical hypotheses* 2015; 85: 241–244
- Tzanakakis EG, Tzoutzas IG, Koidis PT: Is there a potential for durable adhesion to zirconia restorations? A systematic review. *J Prosthet Dent* 2016; 115: 9–19