

L. Wehnert, S. Fleck, A. Fleck, R. J. Radlanski¹, W. B. Freesmeyer²

Einfluss der Bonder auf die Titan-Keramik-Verbundfestigkeit



L. Wehnert

Gegenstand der vorliegenden Studie war die Untersuchung des Einflusses der Bonder auf die Verbundfestigkeit von Titan und Keramik. Die Keramiken Duceratin plus, GC Initial Ti, Noritake Ti-22, Triceram und Vita-Titankeramik wurden mit und ohne Bonder auf Gusstitan Grad 1 aufgebracht. Die Prüfung der Verbundfestigkeit geschah mit dem 3-Punkt-Biegetest nach Schwickerath gemäß ISO 9693 mit acht Prüfkörpern pro Untersuchungsreihe. Der t-Test diente dem statistischen Vergleich der Ergebnisse. Ohne Anwendung der Bonder wurden folgende Verbundfestigkeiten gemessen: Duceratin plus 31,3 MPa, GC Initial Ti 27,6 MPa, Noritake Ti-22 29,8 MPa, Triceram 28,3 MPa und Vita-Titankeramik 28,8 MPa. Bei Schichtung mit Bonder ergaben sich folgende Verbundfestigkeiten: Duceratin plus 37,8 MPa, GC Initial Ti 48,4 MPa, Noritake Ti-22 36,9 MPa, Triceram 35,5 MPa und Vita-Titankeramik 31,9 MPa. Die Bonder erhöhten die Verbundfestigkeit der untersuchten Titankeramiken statistisch signifikant. Die unterschiedlichen Zusammensetzungen und Eigenschaften der Bonder haben einen erheblichen Einfluss auf die Verbundfestigkeit der jeweiligen Titankeramik.

Schlüsselwörter: Titan, Keramik, Bonder, Verbundfestigkeit

Influence of bonding-porcelain on titanium-porcelain bond strength

The evaluation of the influence of bonding-porcelain on the titanium-porcelain bond strength was the subject of the present investigation. The titanium-porcelain brands Duceratin plus, GC Initial Ti, Noritake Ti-22, Triceram and Vita-Titankeramik were fired on cast cp-titanium grade 1. The Schwickerath crack initiation test was performed to evaluate the bond strength according to ISO 9693 with eight specimens per test series. T-test statistics were performed to compare the results. Without bonding-porcelain the following bond strength values were measured: Duceratin plus 31,3 MPa, GC Initial Ti 27,6 MPa, Noritake Ti-22 29,8 MPa, Triceram 28,3 MPa and Vita-Titankeramik 28,8 MPa. If the respective bonding-porcelains were used, the following bond strength values were measured: Duceratin plus 37,8 MPa, GC Initial Ti 48,4 MPa, Noritake Ti-22 36,9 MPa, Triceram 35,5 MPa and Vita-Titankeramik 31,9 MPa. Using bonding-porcelain significantly increased the titanium-porcelain bond strength. The different compositions and characteristics of the bonding-porcelain have a considerable influence on the bond strength of the respective titanium-porcelain combinations.

Keywords: cp titanium, porcelain, bonding-porcelain, bond strength

¹ Charité-Universitätsmedizin Berlin (Campus Benjamin Franklin), Abteilung Experimentelle Zahnmedizin/Ora/Orle Strukturbiologie

² Charité-Universitätsmedizin Berlin (Campus Benjamin Franklin), Abteilung Restaurative Zahnmedizin, Bereich Zahnärztliche Prothetik

1 Einleitung

Titan hat als Material zur Erstellung zahnmedizinisch-prothetischer Werkstücke eine Reihe von Vorteilen. Neben den günstigen mechanischen Eigenschaften, wie zum Beispiel einer hohen Festigkeit bei niedrigem Gewicht, gilt Titan als biokompatibel [1, 10]. Für die keramische Verblendung des Titans wurden spezielle, in ihren Eigenschaften dem Titan angepasste Keramiken entwickelt. Dabei ist insbesondere die hohe Reaktivität mit Sauerstoff zu berücksichtigen [1, 17, 30]. Um 1990 standen die ersten Titankeramik vor der Markteinführung beziehungsweise waren eingeführt. Weitere Titankeramiken folgten. Diese Keramiken enthielten teilweise bei der Markteinführung spezielle Bonder. Bei anderen Keramiken wurden Bonder zu einem späteren Zeitpunkt angeboten [17, 18, 24, 25].

Die Bonder, die als erste Schicht auf das Titan aufgebracht werden, sollen eine Oxidation der Titanoberfläche beim Brennprozess vermindern oder vollständig unterbinden. Auf der Titanoberfläche vor dem keramischen Brand bestehende Oxide sollen darüber hinaus gelöst werden [7, 25, 32]. Dadurch soll die Ausbildung von verbundschwächenden Zwischenschichten in der Titan-Keramik-Kontaktzone vermieden werden. Solche Zwischenschichten entstehen durch eine Diffusion von Sauerstoff aus der Keramik in die Oberfläche des Titans mit der Konsequenz der Formierung von Titanoxidschichten. Parallel dazu bilden sich in der Kontaktzone Titan-Silizium-Verbindungen aus. Als Sauerstofflieferant für diese Grenzflächenreaktionen wird das SiO_2 der Keramik vermutet. Es wird diskutiert, dass es innerhalb dieser spröden Zwischenschichten zum Verbundversagen mit der Konsequenz einer verminderten Haftfestigkeit der Keramik auf dem Titan kommt. Dies äußert sich bei In-vitro-Untersuchungen in vergleichsweise geringe Verbundfestigkeiten der Titankeramiken [1, 4, 6, 10, 14, 16, 22, 23, 27, 33].

Die vorliegende Studie untersucht, inwieweit die Bonder der zum Zeitpunkt der Untersuchung am Markt erhältlichen Titankeramiken in der Lage sind, die Titan-Keramik-Verbundfestigkeit zu erhöhen, woraus Rückschlüsse auf ihre Fähigkeit zu ziehen sind, verbundschwächende Grenzflächenreaktionen



Abbildung 1 Mit Keramik beschichtete Prüfkörper.

Figure 1 Specimens for the Schwickerath crack initiation test.

zu vermindern oder vollständig zu unterbinden. Ferner gilt das Interesse der Studie der Frage, ob sich die Verbundfestigkeiten der geprüften Keramiken bei Anwendung der Bonder unterscheiden.

2 Material und Methode

2.1 Prüfmethode

Die Prüfung der Verbundfestigkeit geschah mit dem 3-Punkt-Biegetest nach Schwickerath (Schwickerath-Test) gemäß ISO 9693 [3].

2.2 Verwendetes Titan, Herstellung der Prüfkörper

Die Prüfkörper wurden aus Titan Grad 1 im Gussverfahren hergestellt. Dabei kamen die Vakuum-Druckgussanlage Rematitan Autocast sowie die Einbettmasse Rematitan plus (Dentaurum GmbH, Ispringen) zum Einsatz. Aus einer vollständig ausbrennbaren Polycarbonat-Folie (Röhm GmbH, Darmstadt) wurden Streifen (3,1 x 28 x 0,5 mm) geschnitten, angestiftet, eingebettet und gegossen. Nach vorsichtigem Ausbetten erfolgte die Entfernung der Reste der Einbettmasse durch Strahlen mit Al_2O_3 der Korngröße 250 μm (2,5 bar, pro Prüfkörper 15 s). Nach dem Abtrennen der Gusskanäle wurden die Prüfkörper auf die erforderliche Länge (25 mm +/- 0,5 mm) und Breite (3 mm +/- 0,1 mm) geschliffen. Anschließend wurde die bei Gusstitan stets vorhandene oberflächliche Aufhärtungszone durch alternierenden Beschleif mit kreuzverzahnten Fräsen und durch Glätten mit SiC-Papier (Körnung 240) sorgfältig ent-

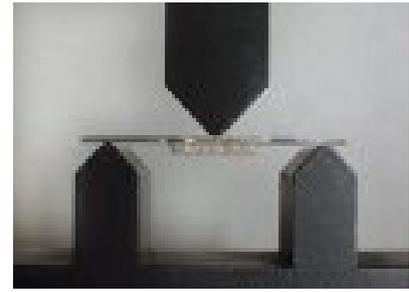


Abbildung 2 Prüfanordnung des Schwickerath-Tests.

Figure 2 Performing the Schwickerath crack initiation test.

fernt und die für die Verblendung vorgesehene Fläche abschließend mit SiC-Papier der Körnung 320 geschliffen.

Die Dicke eines jeden Prüfkörpers wurde mit einem mechanischen Schnelltester (Kroeplin Längenmessgeräte GmbH, Schlüchtern) gemessen und auf den nächstliegenden 1/100 Millimeter gerundet. Die Messung der Breite jedes Prüfkörpers, die in die Berechnung der Verbundfestigkeit einfließt, erfolgte mit einer mechanischen Schiebellehre mit einer Genauigkeit von 0,05 mm.

Die Verblendfläche der Prüfkörper wurde anschließend mit Al_2O_3 der Korngröße 120 μm gestrahlt (3 bar, 15 s). Nach einer Zeit von zehn Minuten zur Passivierung des Titans erfolgte die Reinigung der Prüfkörper im Ultraschallbad mit Aceton für fünf Minuten und anschließend durch gründliches Dampfstrahlen.

2.3 Aufbrennen der Keramiken

Die Titankeramiken Duceratin plus, GC Initial Ti, Noritake Ti-22, Triceram, und Vita-Titankeramik wurden mit und ohne Bonder auf das Titan aufgebracht. Dabei kam der programmierbare Ofen Austromat 3001 (R. Hinterberger GmbH, Freilassing) zum Einsatz. Die Brenntemperatur für jede Keramik wurde durch Brennen von Proben mit transparenten Massen exakt eingestellt. Bei den Serien mit Bonder durchliefen die Prüfkörper folgende Brennvorgänge: 1x Bonder, 1x Opaquer, 2x Dentin, 1x Glanz. Um bei allen Serien eine identische Zahl von Brennvorgängen durchzuführen, wurden bei den Reihen ohne Bonder folgende Brennvorgänge vor-

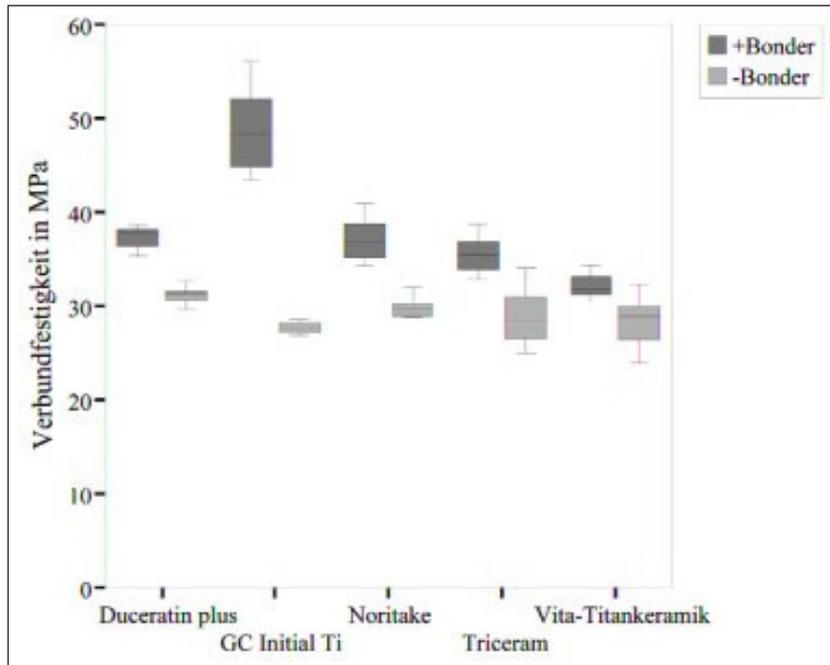


Abbildung 3 Ergebnisse der Verbundfestigkeitsprüfung, Box-Whisker-Plots, n: 8, Endbalken markieren die niedrigsten und höchsten Messwerte.

Figure 3 Results of the Schwickerath crack initiation test, box-whisker-plots, n: 8, Whiskers: lowest and highest values.

genommen: 2x Opaquer, 2x Dentin, 1x Glanz. Dabei wurde der zweite Opaquer-Brand ohne einen zweiten Auftrag von Opaquer-Masse durchlaufen. Dadurch sollte in den Testserien mit und ohne Bonder ein möglicher Einfluss unterschiedlicher Dicken der Opaquer-Schichten auf die Ergebnisse der Verbundfestigkeitsprüfung ausgeschaltet werden. Vor dem Aufbrennen des Bonders der Noritake Ti-22 wurde das Titan einem herstellerseitig vorgesehenen Oxidbrand zugeführt.

Die von den Herstellern der untersuchten Titankeramiken vorgesehenen Bonder unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Verarbeitungsform. Bei der Vita-Titankeramik wurde der seit mehreren Jahren erhältliche, verwendungsfertige Pasten-Bonder verwendet. Bei den übrigen Keramiken kamen aus Pulver und Flüssigkeit zu mischende Bonder zur Anwendung.

Die Prüfkörper wurden mit Keramik in einer Höhe von 1 mm (+/- 0,05 mm) und auf einer Länge von 8 mm (+/- 0,01 mm) mittig beschichtet (Abb. 1). Dazu wurden spezielle Lehren verwendet. Beim Bonder- und Opaquer-Brand wurde von einer Messung der jeweiligen Schichtdicken abgesehen, da in den Ver-

arbeitungsanleitungen der verwendeten Keramiken keine Angaben über die aufzubringenden Schichtstärken gemacht werden. Die Maßhaltigkeit des vollständigen Keramikauftrages wurde vor dem Glanzbrand mit einer mechanischen Schieblehre überprüft und gegebenenfalls durch vorsichtiges Beschleifen mit einer diamantierten Scheibe korrigiert. Pro Serie wurden acht Prüfkörper angefertigt.

2.4 Durchführung des 3-Punkt-Biegetests nach Schwickerath

Die Prüfung der Verbundfestigkeit wurde nach 24 Stunden Trockenlagerung bei Normalklima durchgeführt. Zur Durchführung des Schwickerath-Tests stand die Material-Prüfmaschine Zwick Z 2,5 (Zwick GmbH & Co., Ulm) zur Verfügung. Abbildung 2 zeigt die Positionierung des Prüfkörpers auf dem nach ISO 9693 angefertigten Werkzeug [3]. Die Vorschubgeschwindigkeit der Druckfinne betrug 1 mm/min. Als Kriterium für die Ablösung der Keramik wurde ein Kraftabfall von 15 % gewählt. Die für die Ablösung der Keramik benötigte Kraft in Newton (Bruchkraft) wurde von einem an die Materialprüfmaschine an-

geschlossenen Computer aufgezeichnet und gespeichert.

Für die Berechnungen der 3-Punkte-Biege-Scherfestigkeit in MPa als Maß für die Verbundfestigkeit sowie für die statistische Auswertung der Ergebnisse stand das Statistik-Programm SPSS 11.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois) zur Verfügung, programmiert entsprechend dem in der ISO-Norm 9693 angegebenen Flussdiagramm [3]. In die Berechnung der Verbundfestigkeit flossen die Bruchkraft, die Dicke und Breite der Prüfkörper sowie der E-Modul des verwendeten Titans Grad 1 von 90 GPa ein [15]. Die Ergebnisse des 3-Punkt-Biegetests werden tabellarisch sowie durch Box-Whisker-Plots dargestellt.

2.5 Statistik

Der Vergleich der Untersuchungsreihen untereinander erfolgte bei einem Signifikanzniveau von 0,05 mit dem robusten t-Test nach Welch, nachdem sich zuvor im Shapiro-Wilk-Test Normalverteilung und im Levene-Test eine Inhomogenität der Varianzen der Messwerte der Untersuchungsreihen ergeben hatten. Für die statistische Auswertung wurden folgende Hypothesen formuliert:

1. Die Bonder erhöhen die Verbundfestigkeit der Keramiken (Tab. 2).
2. Es bestehen Unterschiede zwischen den Keramiken bei Schichtung mit Bonder (Tab. 3).

Da es sich bei der statistischen Bearbeitung der Fragestellung 2 um multiple Vergleiche handelt, wurde hier eine Fehlerkorrektur nach *Bonferroni-Holm* durchgeführt [11].

3 Ergebnisse

Aus den Box-Whisker-Plots und der Tabelle 1 ist ersichtlich, dass die Verbundfestigkeitswerte aller untersuchten Titankeramiken mit Bonder höher liegen als bei Verzicht auf die Bonder. Der statistische Vergleich ergab, dass diese Unterschiede Signifikanz aufweisen (Tab. 2). Die Verbundfestigkeiten der Titankeramiken bei Anwendung der Bonder liegen auf unterschiedlichem Niveau, wobei die Verbundfestigkeiten aller Keramiken mit Bonder – mit Ausnahme der GC Initial Ti – im Bereich zwischen 30 und 40 MPa liegen (Abb. 1, Tab. 1). Die

	+Bonder	-Bonder
Duceratin plus	37,8 (1,21)	31,3 (0,88)
GC Initial Ti	48,4 (4,71)	27,6 (0,62)
Noritake	36,9 (2,31)	29,8 (1,19)
Triceram	35,5 (1,91)	28,3 (3,32)
Vita Titankeramik	31,9 (1,43)	28,8 (2,72)

Tabelle 1 Ergebnisse der Verbundfestigkeitsprüfung, Verbundfestigkeit in MPa: Median, Standardabweichung in Klammern, n: 8.

Table 1 Results of the Schwickerath crack initiation tests, bond strength in MPa: median, standard-deviation in parentheses, n: 8.

	+Bonder vs -Bonder
Duceratin plus	0,000 *
GC Initial Ti	0,000 *
Noritake	0,000 *
Triceram	0,001 *
Vita-Titankeramik	0,004 *

Tabelle 2 Ergebnisse T-Test Statistik, Auswirkungen der Bonder auf den Verbund, p-Werte, *: signifikant.

Table 2 Results, t test statistics, effect of bonder on bond-strength, p values, *: significant.

	Duceratin plus	GC Initial Ti	Noritake	Triceram
Vita-Titankeramik	0,000 *	0,000 *	0,000 *	0,001 *
Triceram	0,027 n.s. ¹	0,000 *	0,146 n.s.	
Noritake	0,797 n.s.	0,000 *		
GC Initial Ti	0,001 *			

¹ nach α -Fehlerkorrektur nicht signifikant

Tabelle 3 Ergebnisse T-Test Statistik mit α -Fehlerkorrektur nach Bonferroni-Holm, Vergleich der Keramiken mit Bonder, p-Werte, *: signifikant, n.s.: nicht signifikant.

Table 3 Results, t test statistics with Bonferroni-Holm α -error correction, comparison of the porcelains with bonder, p values, *: significant, n.s.: not significant.

Differenzen innerhalb dieser Gruppe sind zum Teil signifikant (Tab. 3). Die Ergebnisse der GC Initial Ti mit Bonder fallen besonders auf und liegen signifikant höher als die Verbundfestigkeiten der anderen Keramiken (Tab. 3).

4 Diskussion

4.1 Veränderung der Verbundfestigkeit durch die Bonder

Eine verbundverbessernde Wirkung der Bonder der Titankeramiken wird entsprechend der vorliegenden Untersuchung auch von anderen Autoren beschrieben [2, 7, 13, 23, 31]. Für die Ver-

besserung der Verbundfestigkeit werden verschiedene Faktoren diskutiert. In der Hauptsache wird davon ausgegangen, dass die Bonder infolge ihrer spezifischen Eigenschaften in der Lage sind, die Oxidation des Titans bei keramischen Brennprozessen zu kontrollieren und dadurch die Ausbildung von verbundschwächenden Zwischenschichten in der Titan-Keramik-Kontaktzone zu verhindern. *Gilbert* et al. haben in dem von ihnen untersuchten Bonder der Procera-Titankeramik Anteile von fein gemahlenem Titan gefunden, das die Titanoberfläche möglicherweise dadurch vor exzessiver Oxidation schützt, das es selbst zu Titanoxid reagiert. Durch das Gemisch aus Titanparti-

keln und Keramik im Bonder könnte nach *Gilbert* et al. auch ein Ausgleich der unterschiedlichen Wärmedehnung des Titans und der Titankeramik mit der Konsequenz einer Verbundverbesserung stattfinden [7]. Ohne nähere Ausführungen weisen *Wang* et al. auf den im Vergleich zum Opaquer höheren Anteil der Bonder an SiO_2 und SnO_2 hin, was einen besseren Kontakt und eine höhere Adhäsion des Bonders auf dem Titan bedingt [31]. *Kimura* et al. führen eine Verbesserung des Titan-Keramik-Verbunds durch Bonder ebenfalls auf eine Minderung der Oxidation der Titanoberfläche zurück und untermauern diese Vermutung durch rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Titan-Kera-

mik-Kontaktzone [13]. *Tanaka et al.* beschreiben für die Noritake-Titankeramik nach dem Brennen des Bonders einen Zerfall von TiO_2 -Schichten, die auf der Titanoberfläche infolge des Oxidbrands bestehen [29]. Neben dem Hinweis auf eine Kontrolle der Oxidation des Titans durch die Bonder deuten diese Ergebnisse zusätzlich darauf hin, dass die Bonder auf der Titanoberfläche lokalisierte Titanoxide aufzulösen vermögen. Auf der Basis der Ergebnisse der vorliegenden Studie ist es nicht möglich, exakte Aussagen über die Mechanismen der Verbundverbesserung durch die Bonder der untersuchten Titankeramiken zu machen und im Vergleich mit den Ergebnissen der anderen Autoren zu diskutieren. Aus diesem Grund beschäftigen sich bereits laufende weiterführende Untersuchungen mit der Frage der möglichen Mechanismen der Verbundverbesserung durch die Bonder der in dieser Studie verwendeten Titankeramiken. Es kann jedoch angesichts der zitierten Untersuchungen und der Ergebnisse der vorliegenden Studie davon ausgegangen werden, dass die Kontrolle der Oxidation des Titans durch die Bonder einen erheblichen Anteil an der Verbesserung des Titan-Keramik-Verbunds hat.

4.2 Vergleich der Keramiken bei Verwendung der Bonder

Die Verbundfestigkeit der Vita-Titankeramik liegt signifikant niedriger als die der übrigen Keramiken (Abb. 3, Tab. 1 und 3). Dabei ist zu beachten, dass hier ein Pastenbonder zur Anwendung kam. Für die geringere Verbundfestigkeit dieser Keramik kann eine Blasenbildung innerhalb des Bonders ursächlich sein, wie sie von anderen Autoren beschrieben worden ist [9, 12]. Darüber hinaus bemängeln *Inan et al.* einen unzureichenden Widerstand des Pastenbonders der Vita-Titankeramik gegen Rissausbreitung. Defekte wie die Blasen im Pastenbonder der Vita-Titankeramik können Ausgangspunkt von sich durch die Keramik ausbreitenden Rissen sein, wie sie von *Marx et al.* beschrieben worden sind

[19]. Es ist vorstellbar, dass es daher zum signifikant verfrühten Versagen des Verbundes kommt.

Die Ergebnisse der Verbundfestigkeitsmessungen der Duceratin plus, der Noritake Ti-22 und der Triceram lassen aufgrund der nur geringen Unterschiede den Schluss zu, dass hier neben geeigneten Bondern die Anpassung der Wärmedehnung der Keramiken auf die Wärmedehnung des Titans jeweils vergleichbar gut gelungen ist.

Der Duceratin plus, Noritake Ti-22, Triceram und Vita-Titankeramik gemein ist ihre Bruchcharakteristik beim Verbundfestigkeitstest mit Bondern. Bei diesen Keramiken kam es zu einem praktisch vollständigen adhäsiven Verbundversagen. Die dem Titan zugewandte Seite der abgelösten Keramik zeigte eine dunkelgraue Farbe, was auf die Restanhaftung von Titan(oxid) und einen Bruch innerhalb des Titanoxids oder zwischen Titanoxid und dem metallischen Titan hindeutet. Eine derartige Restanhaftung an Keramikbruchstücken und eine vergleichbare Bruchcharakteristik wird von vielen anderen Autoren beschrieben [6, 10, 12, 14, 23, 26, 34]. Insoweit kann auf der Basis dieser Beobachtungen davon ausgegangen werden, dass durch die Bonder dieser Keramiken keine vollständige Unterbindung der Titanoxidation stattfindet, was durch neuere Untersuchungen von *Grimm et al.* und *Suansuwan et al.* bestätigt wird [8, 28].

Die außerordentlich hohen Verbundfestigkeitswerte für die GC Initial Ti sind auf die speziellen Eigenschaften des Bonders dieser Keramik zurückzuführen. Im Gegensatz zu den anderen Keramiken der Untersuchung fand hier ein Verbundversagen zwischen dem Opaquer und dem Bonder statt, der sich nicht von der Titanoberfläche löste. Es kann einerseits davon ausgegangen werden, dass die Titanoberfläche sehr wirksam vor Oxidation geschützt wurde. Andererseits sprechen die Beobachtungen der Bruchcharakteristik dafür, dass ein chemischer Verbund zwischen dem Bonder und dem Titan zustande gekommen ist.

EDX-Analysen von *Chakmakchi et al.* zeigen, dass der Bonder der GC Initial Ti auffällig hohe Konzentrationen an LaO_2 sowie kein SiO_2 aufweist [5]. Dadurch werden die zwischen dem SiO_2 und dem Titan zu erwartenden Oxidationsvorgänge (siehe oben) unterbunden. Die Annahme des Zustandekommens eines chemischen Verbunds wird durch die Ergebnisse der Untersuchungen von *Mo et al.* gestützt. Hier wurden experimentelle Lanthanoxid-Keramiken zur Verblendung von Titan untersucht. Die Verbesserung der Verbundfestigkeit im Vergleich zu herkömmlichen Titankeramiken führen die Autoren auf eine verbesserte Integrität des Verbundes mit Diffusion der Lanthan-Keramik in die Titanoberfläche zurück. Sie vermuten, dass ein chemischer Verbund zwischen der Keramik und dem Titan zustande kommt [20, 21]. Eine weitere Besonderheit des Bonders der GC Initial Ti ist der ungewöhnlich hohe Anteil an B_2O_3 [5]. Ob infolge der hohen Löslichkeit des B_2O_3 die Korrosionsstabilität des Bonders und folglich des Verbundes zum Titan negativ beeinflusst wird, ist fraglich und Gegenstand weiterführender Untersuchungen.

5 Schlussfolgerungen

1. Bonder erhöhen die Verbundfestigkeit von Titan zu Titankeramiken.
2. Es bestehen Unterschiede in der Verbundfestigkeit der verschiedenen Titankeramiken bei Verwendung der Bonder.
3. Die Zusammensetzung und Eigenschaften der Titankeramik-Bonder haben einen erheblichen Einfluss auf die Verbundfestigkeit.

Korrespondenzadresse

Dr. Lothar Wehnert
 Rathenower Str. 50
 10559 Berlin
 E-Mail: lotowski@web.de

Literatur

- Adachi M, Mackert jr JR, Parry EE: Oxide adherence and porcelain bonding to titanium and Ti-6-Al-4V alloy. *J Dent Res* 69, 1230–1235 (1990)
- Al Hussaini I, Al Wazzan KA: Effect of surface treatment on bond strength of low-fusing porcelain to commercially pure titanium. *J Prosth Dent* 94, 350–356 (2005)
- Anonymus: ISO 9693:1999 Metal-ceramic dental restorative systems. International Organization for Standardization, Genf 1998
- Böning K, Walter M: Metall-Keramik-Verbund von gegossenem Titan. *Dtsch Zahnärztl Z* 46, 750–753 (1991)
- Chakmakchi M, Barbagadaki X, Chronopoulos V, Zinelis S: Elemental analysis of bonding agents fusing Ti-porcelains. In IASL online. URL: <http://iadr.confex.com/iadr/israel07/techprogramforcd/A96690.htm> (1.9.2007)
- Derand T, Herø H: Bond strength of porcelain on cast versus wrought titanium. *Scand J Dent Res* 100, 184–188 (1992)
- Gilbert JL, Covey DA, Lautenschlager EP: Bond characteristics of porcelain fused to milled titanium. *Dent Mater J* 10, 134–140 (1994)
- Grimm WD, Schenke R, von Schön-Angerer R, Arnold WH: Bonding characteristics of low-fusing porcelain bonded to pure titanium (Abstract No. 1647). *J Dent Res* 82, CD-ROM of Abstracts (2003)
- Gürtler T, Raser G, Dietz W, Welker D, Küpper H: Festigkeit und Bruchcharakteristik von 2 Titankeramiksystemen. *ZWR* 114, 19–27 (2005)
- Hautaniemi JA, Herø H, Juhanoja JT: On the bonding of porcelain on titanium. *J Mater Sci Mater Med* 3, 186–191 (1992)
- Holm S: A simple sequential rejective multiple test procedure. *Scand J Stat* 6, 65–70 (1979)
- Inan Ö, Acar A, Halkaci S: Effects of sandblasting and electrical discharge machining on porcelain adherence to cast and machined commercially pure titanium. *J Biomed Mater Res* 78B, 393–400 (2006)
- Kimura H, Horng CJ, Okazaki M, Takahashi J: Effects of retention beads and bonding agent on bond strength of the titanium-porcelain system. *Osaka Univ Dent Sch* 31, 23–32 (1991)
- Kimura H, Hrong CJ, Okazaki M, Takahashi J: Oxidation effects on porcelain-titanium interface reactions and bond strength. *Dent Mater J* 9, 91–99 (1990)
- King AW-C, Chai J, Lautenschlager E, Gilbert J: The mechanical properties of milled and cast titanium for ceramic veneering. *Int J Prosthodont* 7, 532–537 (1994)
- Könönen M, Kivilihti J: Fusing of dental ceramics to titanium. *J Dent Res* 80, 848–854 (2001)
- Küpper H, Bachmann K: Reintitan als Alternativmetall in der restaurativen Zahnheilkunde II. *Titankeramik. Quintess Zahntech* 15, 1091–1098 (1989)
- Lindigkeit J: Hohe technische Qualität, einfache Verarbeitung und natürliche Ästhetik. *DZW Spezial* 1, 40–41 (1999)
- Marx R: Moderne keramische Werkstoffe für ästhetische Restaurationen – Verstärkung und Bruchzähigkeit. *Dtsch Zahnärztl Z* 48, 229–236 (1993)
- Mo A, Cen Y, Liao Y, Wang J, Shi X: A study on the bond interface between low-fusing dental porcelain and pure titanium. *Hua Xi Yi Ke Da Xue Xue Bao* 32, 441–443 (2001)
- Mo A, Wang J, Liao Y, Cen Y, Shi X: The influences of crystallized compositions in the porcelain on bonding strength of titanium to porcelain. *Hua Xi Kuo Qiang Yi Xue Za Zhi* 19, 357–359 (2001)
- Nergiz I, Meine HC, Niedermeier W: Untersuchungen zur Scherverbundfestigkeit von titankeramischen Systemen. *Dtsch Zahnärztl Z* 54, 688–691 (1999)
- Oshida Y, Fung LW, Isikbay SC: Titanium-porcelain system. Part II: Bond strength of fired porcelain on nitrided pure titanium. *Bio-Med Mater Eng* 7, 13–34 (1997)
- Päßler K, Bestellmeyer F, Ohnmacht P, Sernetz F: Einflüsse auf die Qualität und Eigenschaften von dentalen Titangüssen. *Dent Lab* 39, 809–815 (1991)
- Pröbster L, Geis-Gerstorfer J, Simonis A, Setz J, Weber H: Titan zum gegenwärtigen Stand eines neuen Dentalwerkstoffes. *Dent Lab* 46, 1073–1078 (1991)
- Reyes MJ, Oshida Y, Andres CJ, Barco T, Hovijitra S, Brown D: Titanium-porcelain system. Part III: Effects of surface modification on bond strength. *Bio-Med Mater Eng* 11, 117–136 (2001)
- Rinke S, Schulz-Finke V, Schäfers F, Özümücü A, Hüls A: Vergleichende Qualitätsbeurteilung von Einzelzahnrestaurationen aus Titan und einer Edelmetall-Legierung. *Dtsch Zahnärztl Z* 53, 272–275 (1998)
- Suansuwan N, Swain M: Adhesion of porcelain to titanium and a titanium alloy. *J Dent* 31, 509–518 (2003)
- Tanaka Y, Watanabe I, Miura E, Shirahishi T, Atsuta M, Hisatsune H: TEM study on the microstructure of titanium/bonding-porcelain fused interface (Abstract). *J Dent Res* 79 Special Issue Abstract no. 1024, 271 (2000)
- Togaya T, Suzuki M, Tsutsumi S, Ida K: An application of pure titanium to metal porcelain system. *Dent Mater J* 2, 210–219 (1983)
- Wang RR, Meyers E, Katz JL: Scanning acoustic microscopy study of titanium-ceramic interface of dental restorations. *J Biomed Mater Res* 42, 508–516 (1998)
- Weber H, Pröbster L, Geis-Gerstorfer J: Titan als prothetischer Werkstoff. *Dtsch Zahnärztl Z* 47, 473–481 (1992)
- Wehnert L, Moormann A, Freesmeyer WB: Simulationsrechnungen zur Thermodynamik des konventionellen Titan-Keramik-Verbundes und zum Einfluß des verbundverbessernden Ionenimplantationsverfahrens. *Quintessenz Zahntech* 10, 1027–1037 (1998)
- Yilmaz H, Dincer C: Comparison of the bond compatibility of titanium and an NiCr alloy to dental porcelain. *J Dent* 27, 215–222 (1999)