

6. Diskussion

Verschiedene Untersuchungen zu den Hochleistungskeramiken Zirconia-TZP [128, 73, 137] und In-Ceram Zirkonia [66, 136, 90, 134], die im Gegensatz zu den herkömmlichen Dentalkeramiken nur einen vernachlässigbar geringen Anteil an amorpher Glasphase besitzen [54], haben gezeigt, dass die hohen Bruchfestigkeitswerte eine Erweiterung des Therapiespektrums von vollkeramischem Zahnersatz auf den Seitenzahnbereich möglich erscheinen lassen.

Zahnärztliche Materialien werden im Mund mechanischen Dauerbeanspruchungen durch die Kaukräfte ausgesetzt. Zusätzlich ergeben sich Beanspruchungen durch das feuchte Milieu der Mundhöhle sowie durch häufige Temperaturwechsel.

Zur Beurteilung der Belastbarkeit eines vollkeramischen Zahnersatzes sind die Festigkeitswerte der einzelnen Systemkomponenten maßgebend [122].

Im Vorfeld des klinischen Einsatzes muss deshalb untersucht werden, ob ein Verbund zwischen der mechanisch hochfesten, dicht gesinterten Zirkondioxid-Keramik bzw. Aluminiumoxidkeramik mit einer nur gering strukturierten Oberfläche und einer glashaltigen Verblendkeramik möglich ist [82, 136].

Bei Simulation der Bedingungen im Mund sollte dieser Verbund weiterhin stabil bleiben. Das Thermowechselbadverfahren simuliert dabei die thermischen und feuchtigkeitsbedingten Belastungen während der Tragezeit in der Mundhöhle.

Das Verbundverhalten der oben genannten Keramiken wurde bis auf zwei Untersuchungen von STEPHAN 1996 [124] und LUTHARDT 1998 [82] in der Literatur bisher nicht berücksichtigt. Haftfestigkeitsuntersuchungen unter künstlicher Alterung haben bis zu diesem Zeitpunkt in der Literatur gar keine Beachtung gefunden.

Gegenstand dieser in - vitro Untersuchungen war die Prüfung der Verbundfestigkeit zwischen der Kernkeramik Zirkondioxid-TZP mit entsprechend geeigneten

Verblendmaterialien sowie des Vollkeramiksystems In-Ceram Zirkonia / Vitadur α unter Berücksichtigung künstlicher Alterung im Thermocyclingverfahren.

WEHNERT [142] konnte 1996 Haftfestigkeitseinbußen nach künstlicher Alterung beim Titan-Keramik-Haftverbund durch Oberflächenkonditionierung der Prüfkörper vor dem Aufbrennen der Keramik mit dem Siliziumionenimplantationsverfahren beheben.

In Anlehnung an diese vorhergehenden Untersuchungen wurden in der vorliegenden Studie Siliziumionen in die Keramikoberfläche implantiert, um das Verbundverhalten der Verblendkeramiken zu verbessern.

Ferner wurde untersucht, ob das in der Halbleitertechnik nach der Ionenimplantation übliche Ausheilen des Ionenimplantationsschadens im Festkörpergefüge (Wärmebehandlung durch Tempern nach der Implantation) zusätzlich zur Ionenimplantation einen positiven Einfluss auf die Verstärkung der Verbundhaftung hat.

6.1. Diskussion von Material und Methode

Der Beurteilung der Ergebnisse der Verbundtestung soll die Diskussion über verfahrensbedingte zufällige Messfehler bei den angewandten Materialien und Methoden vorangestellt werden.

Die Herstellung der Prüfkörperwürfel für den SCHMITZ-SCHULMEYER-Schertest aus Zirkondioxid-TZP bzw. In-Ceram Zirkonia erfolgte aus industriell vorgesinterten Blöcken im CAD-CAM- Verfahren bzw. nach der Celay-Methode. Durch die Wahl der Ionenimplantation als oberflächenmodifizierendes Verfahren zur Verbesserung der Haftfestigkeit wurde keine zusätzliche Schicht auf die Gerüstkeramiken aufgetragen. Die Prüfkörpergeometrie blieb verfahrensbedingt unverändert. Die exakte Maßhaltigkeit sowie eine hohe Homogenität und Endfestigkeit der Probekörper

konnten durch die oben genannten angewandten Methoden der Prüfkörperherstellung realisiert werden.

Manuelle Ungenauigkeiten und materialbedingte Schwankungen können, trotz sorgfältigen Arbeitens mit einer Meßschablone, beim Auftragen des Verblendkeramikschlickers auf die Gerüstkeramik nicht vollständig ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund muss mit einer gewissen Streuung der Messwerte von vornherein gerechnet werden.

Im Anschluss an den Schertest wurde die verblendete Oberfläche für den einzelnen Prüfkörper exakt vermessen und für jeden Probekörper individuell zur Berechnung der Scherkraft herangezogen. Die Kontraktion der Verblendkeramik nach dem Aufsintern auf den Gerüstkeramikwürfel stellte insofern kein verfahrenstechnisches und die Ergebnisse beeinflussendes Problem dar.

Die Benetzung und anschließende Kontraktion beim Brand des Verblendkeramikschlickers auf der Gerüstkeramik bedingt, dass an der Innenkante des Schmitz / Schulmeyer Prüfwürfels, an der Kontaktzone, also direkt am Ansatzpunkt der Druckfinne, eine Rundung entsteht. Der Kraftansatzpunkt des abgeschrägten Scherstempels gleitet möglicherweise daran ab und befindet sich dadurch nicht exakt an der Verbundzone. Folglich kann es zu nicht beeinflussbaren Biegemomenten an der Verbundzone kommen. Kräfte, die nicht axial angreifen, können den Prüfkörper zerbrechen, ehe die Grenze der adhäsiven Festigkeit der Verblendkeramik erreicht ist. Damit würde der Schmitz / Schulmeyer Schertest die Verbundfestigkeit der zu untersuchenden Grenzfläche nur dann spezifisch testen, wenn diese mit großem Abstand das schwächste Glied der Kette repräsentiert. Messwertveränderungen durch Kohäsivbrüche in der Verblendkeramik sind die mögliche Folge. Zusätzlich verkantet der Scherstempel möglicherweise durch das oben beschriebene Abgleiten vom Kraftansatzpunkt so im Scherwerkzeug, dass zwischen Führung und Scherstempel eine nicht kalkulierbare Friktion entsteht. Die Scherkraft würde in diesem Fall wegen der Überwindung des Friktionswiderstandes mit höheren, als den tatsächlichen Werten gemessen werden.

Nach einer Untersuchung von ELIADES 1995 [37] können Abweichungen bei Dentalkeramiköfen von der einprogrammierten Brenntemperatur vorkommen. Eine geringe Temperaturabweichung beim keramischen Brand hat bei der Vita Titankeramik Änderungen der Mikrostruktur zur Folge. Diese lassen Veränderungen des WAK-Wertes und der Haftfestigkeit der Dentalkeramik mit negativen Konsequenzen für den Verbund erwarten [37]. Findet beim Brennen oder langsamen Abkühlen der Vitadur α bei Temperaturen unterhalb des Schmelzpunktes eine Auskristallisation statt, so könnte, laut STEPHAN [124] eine verringerte Haftung auf der Gerüstkeramik die Folge sein. Nichtbeeinflussbare Abweichungen der Brenntemperatur oder Brandführung können deshalb Messwertveränderungen hervorrufen.

Die genannten Faktoren (nicht axial angreifende Kräfte beim Abscheren der Verblendkeramik; nicht zu beeinflussende Abweichungen in Brenntemperatur und Brandführung, trotz exakter Programmierung des Keramikofens) gehören zu den sog. zufälligen Fehlern. Sie verändern das Ergebnis in unvorhersehbarer Weise, sind trotz exakter Versuchsdurchführung nicht vermeidbar und führen zu sog. Messwertstreuungen um den Medianwert. Das Ausmaß der Streuung von Messergebnissen (Interquartildistanz) ist ein Kriterium für die Präzision einer Messung [71]. In der Versuchsdurchführung des Schertests nach SCHMITZ / SCHULMEYER werden von anderen Autoren hohe Messwertstreuungen angegeben [98, 140, 82]. Die in der vorliegenden Untersuchung deutlichen Differenzen der Interquartildistanzen der einzelnen Serien (siehe Boxenhöhe der Boxplotdiagramme im Kapitel Ergebnisse) bestätigen dies. Möglicherweise handelt es sich dabei um eine Eigenschaft des verwendeten Schertests, die ursächlich eventuell mit dem oben erläuterten Druckfinnenansatz zusammenhängen könnte. Bekanntermaßen ist jedoch auch die Streuung der Festigkeitswerte keramischer Werkstoffe aufgrund der Materialeigenschaften groß [141, 43].

Ob sich die untersuchten Messreihen in ihren Werten tatsächlich (signifikant) unterscheiden oder ob die gemessenen Unterschiede auf zufälligen Fehlern beruhen, wurde mit einem statistischen Test überprüft. Die Signifikanz der

Prüfreihenreihen wurde paarweise mit dem verteilungsfreien U-Test nach Mann und Whitney für unverbundene Stichproben getestet. Es wurde mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % auf Signifikanz ($0,05 \geq P$) geprüft [113]. Einige Messreihen unterschieden sich trotz drastischer Differenz der Medianwerte nicht signifikant: z.B. -ION TR / -ION TC der Verblendkeramik D auf ZrO_2 -TZP (Differenz der Medianwerte um 21,5 %); -ION TR / -ION TC des Systems In-Ceram Zirkonia / Vitadur α (19,2 %) und +ION TR / +ION TEMP TR Verblendkeramik D / ZrO_2 -TZP (15,7 %). Es stellt sich daher die Frage, ob herkömmliche statistische Tests für die vorliegende Untersuchung überhaupt geeignet sind. AXMANN äußerte sich dazu in seinem Vortrag auf der 49.DGZPW-Tagung im Jahr 2000 in Berlin über die begrenzte Aussagefähigkeit statistischer Signifikanztests in medizinischen Studien. Eine bessere Alternative zur Berechnung des beobachteten Unterschiedes zwischen zwei „Therapien“ böten seiner Meinung nach, sog. Konfidenzintervalle. Sie würden unter der Annahme berechnet werden, dass sich die beiden Untersuchungsreihen voneinander nicht unterscheiden (Nullhypothese), wobei dann Lage und Breite des berechneten Konfidenzintervalls Aussagen über die praktische Bedeutung des (falls vorhandenen) Unterschiedes in den Messreihen wiedergeben [4]. Für die Auswahl der richtigen Therapie ist dies von entscheidender Bedeutung und praktischer Konsequenz.

Die Meßspitze des Elektronenstrahls (Focus) der EDAX-Analyse hat einen Durchmesser von ungefähr 1 μm [124]. Die Ionenimplantationsbedingten Oberflächenveränderungen in der Gerüstkeramik bewegen sich jedoch im Nanometerbereich. Deshalb sind detaillierte Bestimmungen der atomaren Veränderungen in der Kristallgitterstruktur der Kontaktzone durch die Rasterelektronenmikroskopie und durch die EDAX-Analyse nicht erfassbar. Spezifischere physikalische Untersuchungsmethoden, wie z. B. das Rutherford Backscattering oder die Sekundärionen-Massenspektroskopie (SIMS) in Verbindung mit dem Ionenstrahl-Böschungsschnitt-Verfahren, könnten dies ermöglichen [148, 42]. Die Anwendung dieser sehr aufwendigen Verfahren würde den Rahmen dieser Arbeit jedoch bei weitem überschreiten.

Eine objektive Betrachtung der Untersuchungsergebnisse lässt sich folgerichtig nur innerhalb eines Versuchsaufbaus unter identischen Bedingungen für alle Systeme ermitteln. Aus diesem Grund wird auf den quantitativen Vergleich mit Autoren, die andere Tests [73, 136, 134, 66] zur Bestimmung der Anwendbarkeit der in dieser Studie untersuchten Vollkeramiksyste me benutzten, bewusst verzichtet. In den folgenden Betrachtungen wird deshalb ausschließlich unter den in der vorliegenden Untersuchung ermittelten Werten verglichen. Eine Ausnahme bilden dabei die Untersuchungen von LUTHARDT [82], der ebenfalls den Schertest nach Schmitz / Schulmeyer durchführte.

6.2. Diskussion der Ergebnisse Zirconia-TZP / VITA VERBLENDKERAMIK D

Die Verbundzone aller Prüfkörper dieser Serie stellte sich in den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen äußerst homogen dar, was zum einen auf eine gute Benetzbarkeit der Verblendkeramik D schließen und zum anderen einen akzeptablen Verbund der Keramiken vermuten lässt.

Die Verbundfestigkeit der Vollkeramikkombination ZrO₂-TZP / Vita Verblendkeramik D betrug in dieser Untersuchung bei Trockenlagerung 28,9 MPa. Von LUTHARDT [82] wurde im SCHMITZ-SCHULMEYER-Schertest für die Kombination von Zirconia-TZP mit Vita-Verblendkeramik D ein Verbundfestigkeitswert von 36,2 MPa für trockengelagerte Prüfkörper angegeben. Die Differenz zu den Werten von LUTHARDT wäre, durch die in der vorliegenden Studie modifizierte Anwendung einer schrägen Druckfinne beim SCHMITZ-SCHULMEYER - Schertest erklärbar. LUTHARDT verwendete bei seinen Untersuchungen eine plane Druckfinne, was nach Untersuchungen von MEYER [98] zu 25 % höheren Verbundfestigkeitswerten im Schertest führen kann.

Eine künstliche Alterung mit Thermocycling führte LUTHARDT nicht durch. Die Gegenüberstellung der Messwerte unter unterschiedlichen Lagerungsbedingungen

ist deshalb nicht möglich. Untersuchungen anderer Autoren [119, 103, 68] zeigten jedoch, dass es zu erheblichen Haftfestigkeitsverlusten nach Thermowechselbadbelastung kommen kann. Eine Betrachtung des Verbundverhaltens unter unterschiedlichen Lagerungsbedingungen erscheint deshalb notwendig.

Infolge der künstlichen Alterung trat bei den unmodifizierten Serien ein deutlicher Haftfestigkeitsverlust von 21,5 % auf. Die Verbundfestigkeit betrug nach Thermowechselbadbelastung 22,7 MPa. In der Literatur werden für gängige Metallkeramiksysteme für den Schmitz-Schulmeyer Schertest Verbundfestigkeitswerte zwischen 20 MPa und 30 MPa angegeben [101, 77]. Haftfestigkeitswerte in diesem Bereich können deshalb als klinisch akzeptabel angesehen werden. Alle darunter liegenden Werte sind für die klinische Anwendung eher kritisch zu betrachten. Als unterer Grenzwert der Haftfestigkeit im Schmitz - Schulmeyer -Schertest werden für die klinische Anwendung 15 MPa diskutiert [101, 77]. Nach künstlicher Alterung liegen 25 % der Messwerte im für die klinische Anwendung sehr kritischen Bereich um 15 MPa. Aufgrund der Temperaturveränderungen im Thermowechselbadverfahren entstehen in den Keramiken Temperaturgradienten, die zu einer unterschiedlichen thermischen Ausdehnung zwischen der Oberfläche und dem Innern der Werkstoffe [33] und damit möglicherweise zu Spannungen in der Kontaktzone führen. Überschreitet die thermische Spannung nun die lokale Festigkeit so setzt Risswachstum bzw. kritische Rissausbreitung [33] innerhalb der Verbundzone ein. Die Gegenwart von Wasser beschleunigt diesen Prozess [26, 99]. Der deutliche Haftfestigkeitsverlust der unkontingierten Prüfkörper nach dem Thermowechselbadverfahren könnte sich dadurch erklären.

Während LUTHARDT in seiner Untersuchung 1998 die Verblendkeramik D ohne künstliche Alterung zur Verblendung von ZrO_2 -TZP für geeignet hielt, ist aufgrund der Ergebnisse der Haftfestigkeitsuntersuchung speziell bezüglich der niedrig gemessenen Werte nach Thermowechselbadbelastung in dieser Studie, das System

ZrO₂-TZP / Verblendkeramik D bei der Anwendung im klinischen Bereich als langfristige Versorgung im Mundmilieu kritisch zu betrachten.

Die Ergebnisse der ionenmodifizierten Serie der Kombination ZrO₂-TZP / Verblendkeramik D zeigen bei Trockenlagerung einen Medianwert der Haftfestigkeit bei klinisch akzeptablen 26,3 MPa. Dieser erhöhte sich infolge des Thermocyclingprozesses auf 27,1 MPa. Die Verbundfestigkeit der ionenmodifizierten Serie verbesserte sich statistisch signifikant nach Thermocycling um 16,2 % gegenüber der nichtimplantierten Charge. Alle unteren Messwertstreuungen bewegen sich oberhalb der klinisch subkritischen von 20 MPa [143]. Die Implantation von Siliziumionen in die Zirkondioxid-TZP Oberfläche vor dem keramischen Brennvorgang vermeidet die bei den nicht modifizierten Prüfkörpern bei der Verblendkeramik D deutlich ausgeprägten Haftfestigkeitsverluste infolge künstlicher Alterung. Ähnliche Ergebnisse erzielte WEHNERT 1996 [142] bei dem von ihm untersuchten mit Siliziumionen modifiziertem Titan-Keramik-Verbund.

Bei der Herstellung sowie beim Fügen keramischer Werkstoffe entstehen immer Eigenspannungen. Aus Gleichgewichtsgründen müssen sich die aus ihnen resultierende Kräfte über das Werkstoffvolumen hinweg aufheben. Eigenspannungen überlagern sich den einsatzbedingten Lastspannungen und bestimmen das praktische Werkstoffverhalten signifikant. Die Haftfestigkeit und Rissanfälligkeit der aneinandergefügten Keramiken werden dadurch entscheidend beeinflusst [35]. Mit der Implantation von Siliziumionen in die Zirconia-TZP Oberfläche entstehen zusätzliche Eigenspannungsfelder aus inhomogen über die Kontaktzone verteilten Formveränderungen auf atomarer Ebene [35]. Das Einschließen der Fremdionen führt zu Leerstellen und Atomversetzungen im Kristallgitter [112, 102]. Oberflächennahe Verzerrungen der Gitterstruktur des Zirconia-TZP [94], Umwandlung der tetragonalen in die monokline ZrO₂-Form mit einhergehenden Volumenänderungen [35] und daraus resultierenden Veränderungen des thermischen Ausdehnungskoeffizienten an der Verbundfläche sind die wahrscheinliche Folge. Die geringeren Haftfestigkeitswerte der Verblendkeramik D auf dem ionenimplantierten Zirkonoxid-TZP bei Trockenlagerung gegenüber der

unmodifizierten Charge, sind möglicherweise das Resultat einer solchen durch die Ionenimplantation hervorgerufenen Veränderung in der Kontaktzone.

Die beim Thermocycling hervorgerufenen thermischen Spannungen, bewirken wahrscheinlich eine teilweise Reversibilität dieser Formveränderungen der Kristallgitterstruktur. Die Kräfte der noch resultierenden Eigenspannungen stellen sich möglicherweise so in ein Gleichgewicht ein, dass dadurch die Rissanfälligkeit in der Kontaktzone gesenkt wird. Dies wiederum wirkt sich positiv auf das Verbundverhalten der ionenimplantierten Prüfserie nach dem Thermowechselbadverfahren aus.

Zusätzlich wäre theoretisch denkbar, dass durch die Ionenimplantation hervorgerufenen atomaren Veränderungen in der ZrO_2 -Oberfläche Zirkonatome frei werden. Aufgrund ihrer starken chemischen Reaktionsbereitschaft (chemisches Gleichgewicht auf der Seite von ZrO_2) und der Suche nach einem Reaktionspartner diffundiert ungebundenes Zirkon in die Kontaktzone und vermutlich auch in die Verblendkeramik aus. Die Reaktivität der eigentlich chemisch inerten Zirconia-TZP Oberfläche wird durch den Ionenbeschuss möglicherweise erhöht. Nicht nur der physikalische (Gleichgewicht der Eigenspannungen der Werkstoffe in der Verbundzone), sondern auch der chemische (atomare Zusammenschlüsse im Kristallgitter) Verbund zwischen der Verblendkeramik D und dem Zirconia-TZP würden dadurch verstärkt werden. Mit Hilfe der EDAX-Analyse wurden innerhalb der Kontaktzone (Meßpunkt 2) bei den ionenmodifizierten Prüfkörpern erheblich höhere Mengen an Zirkon (45,2 Gewichtsprozent), im Vergleich zu den unmodifizierten Proben (19,6 Gewichtsprozent) gefunden. Die oben geäußerte Vermutung könnte sich dadurch bestätigen.

Angesichts der guten Ergebnisse der oberflächenmodifizierten Serien ist für die Kombination Verblendkeramik D / ZrO_2 -TZP die Ionenimplantation zur Vermeidung von Haftfestigkeitsverlusten nach künstlicher Alterung empfehlenswert.

Zuführen von Wärmeenergie im Thermowechselbad scheint sich positiv auf das Verbundverhalten der ionenmodifizierten Prüfkörper auszuwirken. Die Frage, ob ein Ausheilen der ionenimplantationsbedingten Schäden in der Kristallgitterstruktur der Prüfkörperoberfläche vor dem Aufbrennen der Verblendkeramik durch das, ähnlich dem in der Halbleitertechnik angewandten, sog. Tempern erreicht werden und damit eine weitere Verbesserung der Haftfestigkeit erzielt werden kann, war unter unterschiedlichen Lagerungsbedingungen Gegenstand einer weiteren Meßserie.

Die thermische Behandlung der ionenmodifizierten Prüfkörper durch Tempern im Vergleich zur konventionellen Behandlung führte nach Trockenlagerung (Median 31,2 MPa) zu einer Erhöhung der Haftfestigkeit um 15,7 %. Nach Thermowechselastbehandlung stellte sich bei einem Medianwert von 22,2 MPa ein statistisch signifikanter Haftfestigkeitsverlust von 28,8 % dar.

Eine mögliche Erklärung für die niedrigen Verbundfestigkeitswerte der getemperten Prüfkörper nach künstlicher Alterung könnte sein, dass sich durch die Oxidationsprozesse des implantierten Siliziums während des Temperns in der nicht vollständig O₂-freien Atmosphäre des Brennofens eine glasartige Schicht (SiO_x) auf der Oberfläche der Zirkonprüfkörper bildet. Diese SiO_x-Schicht befindet sich zwischen dem Zirkonoxid und der aufgesinterten Verblendkeramik D und bildet beim Verbundtest das schwächste Glied der Kette. Der verbesserte Verbund bei Trockenlagerung der getemperten Serie gegenüber der konventionell behandelten, ließe dies vermuten. Der Grund dafür, sind wahrscheinlich unterschiedliche thermische Ausdehnungen von Zirkondioxid-TZP, SiO_x-Schicht und Verblendkeramik D während der Temperaturwechselbeanspruchung, die innerhalb der Glasschicht zur Rissausbreitung führen. Zusätzlich wird, wie oben schon erläutert, durch das anwesende Wasser die Rißfortplanzung begünstigt.

Das an die Ionenimplantation anschließende Temperverfahren führte nach künstlicher Alterung bei der Verblendkeramik D somit zu keiner verbesserten Haftfestigkeit. Im Vergleich zu allen anderen Messreihen der Kombination Verblendkeramik D / ZrO₂-TZP erreichte diese Serie die geringsten Verbundwerte.

Bei dem System Zirkonia-TZP / Verblendkeramik D ist deshalb ein Tempern nach der Oberflächenmodifikation durch Siliziumionenimplantation vor dem Aufbrennen der Verblendkeramik für die klinische Anwendung nicht empfehlenswert.

6.3. Diskussion der Ergebnisse Zirconia-TZP / VITA TITANKERAMIK

Die durch den Elektrokorundstrahl aufgerauhte Zirkondioxidoberfläche zeigt in den rasterelektronenmikroskopischen Bildern eine gute Benetzung zwischen den beiden Keramiken.

Die Haftverbundwerte der Vita Titankeramik auf dem ZrO_2 lagen bei 23,7 MPa für die trockengelagerte Messreihe und bei 25,4 MPa nach Thermocycling. Entgegen der Erwartung eines Verbundverlustes, war nach Thermocycling eine Haftfestigkeitszunahme von 6,7 % zu verzeichnen. Sie stellte sich jedoch als nicht signifikant heraus und liegt folglich möglicherweise im Bereich der Messwertstreuungen. Entsprechend der vorliegenden Ergebnisse sind bei der Vita Titankeramik auf dem unmodifiziertem ZrO_2 -TZP nach Thermocycling zumindest keine Verbundfestigkeitsverluste zu erwarten.

Während der Scherversuche stellte sich heraus, dass die Vita Titankeramik bei der Verblendung des ZrO_2 -TZP mit der angegebenen Brenntemperatur laut Herstellerangaben nicht vollständig durchsinterte. Erst durch die Erhöhung der Brenntemperatur um $10^\circ C$ konnte dies erreicht werden. Abweichungen der programmierten von der tatsächlichen Brenntemperatur des Keramikofens könnten vorhanden gewesen sein. Nach ELIADES 1995 [37] können solche Abweichungen vorkommen. ELIADES fand 1995 außerdem heraus, dass geringe Temperaturabweichungen beim keramischen Brand sich bei der Vita Titankeramik auf die Mikrostruktur der Keramik mit negativen Konsequenzen für den WAK und den Haftverbund auswirken können. Bestehen ungünstige WAK-Differenzen der Systemkomponenten, so können sich diese beim Abscherversuch nach Schmitz-Schulmeyer ungünstig auf die Ergebnisse auswirken [77].

Im Schertest kennzeichnete sich die Vita Titankeramik an einigen Prüfkörpern durch makroskopisch sichtbare Kohäsionsbrüche innerhalb der Verblendkeramik. TINSCHERT (1995) [133] und YILMAZ (1999) [150] stellten in ihren Untersuchungen zur Struktur von Titankeramiken fest, dass gebrannte titankeramische Massen hauptsächlich aus amorpher Glasphase bestehen und im Gegensatz zu herkömmlichen Dentalkeramiken eine leuzithaltige Kristallstruktur nicht mehr nachweisbar ist. Dadurch wurden die für Titan zu hohen Sintertemperaturen konventioneller keramischer Verblendmassen gesenkt. Durch die fehlenden Kristallanteile würde einem initialen Riss in der amorphen Glaskeramik der Vita Titankeramik beim Schertest kein Widerstand entgegengesetzt. Die Folge davon könnten möglicherweise die in dieser Studie beobachteten Kohäsionsbrüche sein. Bei dem System Vita Titankeramik / ZrO_2 -TZP scheint deshalb „das schwächste Glied der Kette“ nicht die Verbundzone, sondern die Verblendkeramik zu sein. In diesen Fällen wurde im Schertest die Verbundfestigkeit der beiden Keramiken nicht spezifisch erfasst. Eine negative Beeinflussung der Messwerte durch Kohäsionsbrüche lag bei der Prüfung der Verbundfestigkeit der Vita Titankeramik deshalb möglicherweise vor.

Nach Ionenimplantation liegt die Haftfestigkeit unter Trockenlagerung bei 17,9 MPa und damit um 24,5 % signifikant unterhalb des Wertes der nicht modifizierten Serie unter derselben Lagerungsbedingung. Nach künstlicher Alterung trat jedoch gegenüber der Trockenlagerung innerhalb der ionengestrahlten Messreihen eine statistisch signifikante Verbesserung der Verbundfestigkeit um 23,2 % auf 23,3 MPa ein.

Die geringen Verbundwerte nach der Ionenimplantation bei Trockenlagerung sind wahrscheinlich auf die durch den Ionenstrahl hervorgerufenen Verspannungen im Gefüge des Zirkondioxids an der Kontaktzone zurückzuführen. Möglicherweise werden initial vorhandene WAK-Inkompatibilitäten zwischen den Keramiken durch den Ionenimplantationbedingten Stress in der Verbundzone noch verstärkt. Beim keramischen Brennprozess ist dadurch vermutlich auch das Benetzungsverhalten der Vita Titankeramik negativ beeinflusst worden.

In Abhängigkeit des nicht zu bestimmenden Ausmaßes der oberflächennahen Destruierung des Kristallgitters durch den Ionenbeschuß entstehen Eigenspannungen im Gefüge der Gerüstkeramik. Die thermischen Spannungen beim keramischen Brand addieren sich diesen initial vorhandenen Eigenspannungen und führen möglicherweise infolge dessen zu einer anderen Wärmeausdehnung (Veränderung des WAK-Wertes an der ZrO_2 -Oberfläche) im Vergleich zu den nicht modifizierten Prüfkörpern. Vermutlich geriet die Vita Titankeramik beim Abkühlen nach dem keramischen Brand an der Kontaktzone unter Zugspannung, wodurch sich die leichtere Rissausbreitung beim Schertest erklären könnte. Das Thermowechselbad bewirkt wahrscheinlich eine Reversibilität der Formveränderungen der Kristallgitterstruktur des ZrO_2 -TZP. Dies hingegen führte möglicherweise dazu, dass an der Kontaktzone Spannungen abgebaut wurden. Die Rissanfälligkeit der Verbundzone wurde dadurch wahrscheinlich geringer und es konnten folglich höhere Werte für die Verbundfestigkeit gemessen werden.

Durch die EDAX-Analyse wurden innerhalb der Kontaktzone der ionenmodifizierten und konventionell behandelten Prüfserie im Meßpunkt 2 Zirkonmengen (38,5 Gewichtsprozent), im Vergleich zur nicht-ionenimplantierten Messreihe (27,0 Gewichtsprozent) gefunden. Eine Erhöhung der Reaktivität der ZrO_2 -TZP Oberfläche scheint durch die Ionenimplantation wie oben beschrieben auch bei der Verblendung mit der Vita Titankeramik hervorgerufen worden zusein.

Der Medianwert der ionenimplantierten und getemperten Prüfserie betrug im Falle der Verblendung des ZrO_2 -TZP mit der Vita Titankeramik 17,9 MPa unter Trockenlagerung und 16,0 MPa nach künstlicher Alterung. Eine statistisch signifikante Verschlechterung der Haftwerte nach künstlicher Alterung war gegenüber der konventionell behandelten Serie um 31,3 % zu verzeichnen. Oben beschriebene Verglasungseffekte spielen auch hier möglicherweise eine Rolle.

Generell erscheint eine Verblendung der ZrO_2 -TZP Keramik mit der Vita Titankeramik anhand der vorliegenden Ergebnisse eher kritisch. Bei akzeptablen Medianwerten der unmodifizierten Serien unter beiden Lagerungsbedingungen

bewegten sich trotzdem immerhin 25 % der Messwerte beider Prüfreihe unterhalb von 20 MPa. Extensive Brücken sollten deshalb bei der Verblendung des ZrO_2 -TZP mit der Vita Titankeramik auf jeden Fall vermieden werden.

Eine Oberflächenmodifikation des Zirkonia-TZP durch Siliziumionenimplantation führte im Vergleich zur nicht-implantierten Charge bei der Verblendung mit der Vita Titankeramik unter Trockenlagerung zu einer deutlichen Verschlechterung der Verbundfestigkeit. Wie aus den Boxplotdiagrammen auf Seite 50 ersichtlich ist, lagen 90 % der Messwerte der ionenimplantierten und trockengelagerten Serie im für die klinische Anwendung subkritisch (20 MPa) bis sehr kritischem (15 MPa) Bereich. Nach künstlicher Alterung trat zwar eine Verbesserung der Haftwerte ein, jedoch kann das Ionenimplantationsverfahren aufgrund der klinisch kritischen initialen Verbundfestigkeitswerte für diese Keramik Kombination nicht empfohlen werden.

6.4. Diskussion der Ergebnisse In-Ceram Zirconia / VITADUR α

Eine grau-weiße wolkenartige Struktur kennzeichnete die In-Ceram Zirconia in der rasterelektronischen Aufnahme. Die grauen Schattierungen stellten die Aluminiumoxidanteile dar. Die weißen Anteile bildeten das zur Verstärkung in die Gerüstkeramik eingelagerte Zirkondioxid-TZP. Im REM-Bild fiel besonders der gute Übergang der VITADUR α zur In-Ceram Zirconia an der Kontaktzone auf, worin sich eine gute Benetzbarkeit der Verblendkeramik und ein inniger Verbund der beiden Keramiken andeuten könnte. Inhomogenitäten waren innerhalb des Gefüges von Verblend- und Gerüstkeramik erkennbar.

Das Verbundverhalten des Vollkeramiksystems In-Ceram Zirconia mit der Verblendkeramik Vitadur α war gekennzeichnet durch Messwerte von 24,9 MPa bei Trockenlagerung und 20,1 MPa nach Thermocycling. Ein hoher Haftfestigkeitsverlust der nichtmodifizierten Serien von 19,2 % nach Thermocycling war zu verzeichnen.

Bei der ionenimplantierten Vergleichscharge war der Verbundfestigkeitsverlust nach künstlicher Alterung mit 1,5 % (22,5 MPa bei Trockenlagerung / 20,4 MPa nach Thermocycling) deutlich geringer. Ein positiver Einfluss der Siliziumionenimplantation auf das Verbundverhalten der beiden Keramiken war nach künstlicher Alterung festzustellen.

Der Medianwert für die Messreihe der nach der Ionenimplantation erfolgten Temperung nach Thermocycling liegt bei 15,2 MPa und ist damit für die klinische Anwendung eindeutig abzulehnen. Der Unterschied zur konventionell behandelten Serie war mit statistisch signifikanten um 25,5 % geringeren Verbundfestigkeitswerten verbunden.

Das Tempern der ionenmodifizierten Serie führte zu keiner Verbesserung der Verbundhaftung.

Die Implantation von Siliziumionen in die Aluminiumoxidkeramik In-Ceram Zirkonia führte im Vergleich zum ionenimplantierten ZrO_2 -TZP in der EDAX-Analyse zu keiner erhöhten Konzentration von Zirkon in der Kontaktzone. Zum Einen, betrug der Anteil an Zirkondioxid-TZP des In-Ceram Zirkonia nur ca. 30% und es konnte folglich nur wenig Zirkon in die Verblendkeramik diffundieren. Zum anderen, scheint die Ionenimplantation die Reaktivität der Al_2O_3 -Keramik und damit die Neigung von Bestandteilen der Kernkeramik in die Verblendkeramik zu diffundieren nicht zu verstärken, da auch der Aluminiumanteil der Kontaktzone bei den implantierten Proben nicht erhöht ist.

Im Rahmen der klinischen Anwendung sollte beachtet werden, dass sich sowohl bei den nicht-implantierten, als auch bei den ionenmodifizierten Serien 50 % der Messwerte im klinisch subkritisch bis kritischem Bereich (unter 20 MPa bis 15 MPa) befinden.

KAPPERT führt die Probleme, die in seinen Untersuchungen 1995 beim Verblenden des In-Ceram Zirkonia mit der Vitadur α auftraten, auf WAK-Inkompatibilitäten zurück [66]. Der Wärmeausdehnungskoeffizient der Vitadur α wurde nach Angabe von

STEPHAN [124] auf den des In-Ceram Alumina angepasst und kann deshalb, auf den gegenüber der Alumina etwas höher liegenden WAK der In-Ceram Zirkonia schlecht abgestimmt sein. Vermutlich sind diese WAK-Differenzen für die niedrigen Scherwerte dieser Vollkeramikombination in der vorliegenden Studie verantwortlich.

Die Indikation der Vitadur α zur Verblendung der In-Ceram Zirkonia für Seitenzahnrestorationen sollte daher eher eingeschränkt betrachtet werden.