

Aus dem Institut für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

***In-vitro*-Untersuchungen zum Einfluss von mechanischen
Oberflächenbearbeitungsverfahren auf den Verbund von
Zirconia-TZP zu ausgewählten Verblendkeramiken**

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von
Susanne Slotosch
aus Berlin

1. Gutachter Prof. Dr. W. B. Freesmeyer
2. Gutachter Prof. Dr. R. J. Radlanski
3. Gutachter Prof. Dr. med. dent. M. Walter

Datum der Promotion: 29. Januar 2010

1	EINLEITUNG	5
2	SCHRIFTTUM	6
2.1	Grundlagen von Dentalkeramiken.....	6
2.2	Historische Entwicklung der Vollkeramikkrone.....	7
2.3	Zirkoniumdioxidkeramik (= Y-TZP = Zirconia = Zirconia-TZP)	8
2.3.1	Eigenschaften von Y-TZP.....	9
2.4	CAD/CAM-Verfahren	11
2.5	Einfluss der Oberflächenbearbeitung	13
2.6	Verblendkeramiken	15
2.7	Verbundtheorien.....	16
2.7.1	Metallkeramik.....	16
2.7.2	Verbund Zirconia-TZP und Verblendkeramik.....	17
2.8	Verfahren zur Prüfung der Verbundfestigkeit.....	18
2.8.1	Zugprüfung.....	18
2.8.2	Druckprüfung	20
2.8.3	Scherprüfung	20
2.8.4	Biegeprüfung.....	21
2.9	Ziele dieser Arbeit.....	23
3	MATERIAL UND METHODE.....	25
3.1	Material	25
3.2	Methode	27
3.2.1	Prüfung der Verbundfestigkeit.....	27
3.2.2	Mechanische Bearbeitung der Verblendflächen.....	28
3.2.3	Bestimmung der Oberflächenrauigkeit.....	30
3.2.4	Darstellung der Verblendfläche im Rasterelektronenmikroskop.....	32
3.2.5	Aufbrennen der Keramiken	32
3.2.6	Durchführung des 3-Punkt-Biege-Schertests nach Schwickerath.....	34
3.2.7	Bestimmung der Verbundfestigkeit.....	35

3.3	Statistik	36
4	ERGEBNISSE	37
4.1	Verbundfestigkeitsprüfung, beschreibende Statistik.....	37
4.1.1	Verbundfestigkeitsprüfung, vergleichende Statistik	40
4.1.2	Vergleich innerhalb der Kontrollgruppe	40
4.1.3	Einfluss der Oberflächenbearbeitung, GC Initial Zr	40
4.1.4	Einfluss der Oberflächenbearbeitung, Lava Ceram®.....	41
4.1.5	Einfluss der Oberflächenbearbeitung Cercon Ceram Kiss und Triceram	41
4.1.6	Einfluss der Oberflächenbearbeitung, Visuelle Unterschiede	42
4.2	Rauigkeitsmessungen	45
5	DISKUSSION	49
5.1	Diskussion der Prüfmethode	49
5.2	Fehlerdiskussion	50
5.3	Diskussion der Rauigkeitsmessungen.....	51
5.4	Diskussion der Ergebnisse der Verbundfestigkeitsprüfung	53
6	SCHLUSSFOLGERUNG.....	62
7	ZUSAMMENFASSUNG.....	63
8	SUMMARY	64
9	ANHANG.....	65
10	LITERATURVERZEICHNIS.....	72
11	DANKSAGUNG.....	79
12	CURRICULUM VITAE	80

1 Einleitung

In der heutigen Zahnheilkunde hat sich das keramische Verblendsystem als Standardversorgung für Kronen und Brücken etablieren können. Durch ständige Weiterentwicklung wurden neben der altbewährten Metallkeramik keramische Systeme geschaffen, die den Wünschen der Patienten nach metallfreier, biologischer und ästhetischer Versorgung und denen des dentalen Teams nach Stabilität, Passgenauigkeit und Funktionalität gerecht werden.

Als modernste Keramik wird zurzeit die Zirconia-TZP-Keramik angewendet, die sowohl eine hohe Biokompatibilität als auch eine hohe Bruchfestigkeit mit ihrem einzigartigen Selbstreparaturmechanismus durch Kristallumwandlung vereint. Durch ihr jedoch sehr opakes Erscheinen und die extreme Härte, im Gegensatz zu den natürlichen Zähnen, ist eine Verblendung mit entsprechenden Verblendkeramiken unumgänglich. Dies erfolgt nach dem Vorbild der Metallkeramik. Leider ist trotz vielversprechender Erfolgsraten immer wieder ein Abplatzen der Verblendung, ein so genanntes „chipping“ zu beobachten. Derzeitige Untersuchungen erklären den Verbund zwischen Zirconia und deren Verblendkeramik widersprüchlich und deuten immer wieder auf den mechanischen Verbund ähnlich wie bei der Metallkeramik hin. In dieser Arbeit sollen die unterschiedlichen mechanischen Vorbehandlungen, wie sie üblicherweise in dentalen Labors vor dem Verblenden durchgeführt werden, vergleichend untersucht werden.

2 Schrifttum

2.1 Grundlagen von Dentalkeramiken

Dentalkeramiken sind als nichtmetallische anorganische Verbindungen, deren Ausgangsmaterial die Silikate sind, definiert (Marxkors and Meiners 2001). Ihr typischer Herstellungsprozess durch Brennen von mit Flüssigkeiten angemischten Pulvern zwischen 700 und 2000°C zu Festkörpern wird Sintern genannt. Dabei verschmelzen die einzelnen Partikel miteinander, wobei die Grenzflächen verschwinden und die Zwischenräume (Poren) kleiner werden. Dadurch kommt es zum Schrumpfen der Keramik. Die entstandenen Atombindungen haben sowohl kovalenten als auch ionischen Charakter (McLean 1981). Dabei wird die Phase der geordneten Kristallstruktur (kristalline Phase) von der Phase des strukturlosen amorphen Glases unterschieden, die von der Abkühlungsgeschwindigkeit abhängt. Je langsamer abgekühlt wird, desto geordneter wird die Struktur. Dentalkeramiken bestehen aus einer Mischung von beiden Phasen (heterogen) und verbinden dadurch eine relativ hohe Härte mit geringer Biegefestigkeit.

Chemisch setzen sich Dentalkeramiken aus 70-80% Feldspat, 20-30% Quarz und 0-3% Kaolin zusammen. Feldspat (Mischkristallsystem aus Kalifeldspat, Natronfeldspat, Kalkfeldspat und Lithiumfeldspat) dient wegen seines niedrigen Schmelzintervalls (1250-1300°C) als Flussmittel und gibt der Keramik die gewünschte Transparenz. Kalifeldspat bildet Leuzitkristalle (kristalline Phase, siehe oben), die für ein breites Brennintervall sorgen, die Standfestigkeit garantieren und entscheidend für den Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK-Wert) sind. Je höher der kristalline Anteil ist, desto größer ist der WAK-Wert der Keramik. Quarz dient der Erhöhung der Festigkeit und verringert durch seine Volumenvermehrung beim Schmelzvorgang die Schrumpfung der Keramik. Auch Kaolin dient der Festigkeitserhöhung. Weitere Zusätze zur Farbgebung, Trübung und um Schmelzpunkt und Viskosität zu beeinflussen sind verschiedene Oxide (Breustedt and Lenz 1978; Claus 1980; Claus 1981; Reuling and Siebert 1987).

2.2 Historische Entwicklung der Vollkeramikkronen

Die Voraussetzung für die Herstellung von Mantelkronen aus keramischen Massen, die so genannten „Jacketkronen“, wurde 1887 von C. H. LAND geschaffen, indem er eine Platinfolie als Platzhalter und Brennträger zwischen Modellstumpf und Keramik in die Zahntechnik einführte. Sein Verfahren wird mit geringen Modifikationen heute noch immer angewendet (Breustedt 1968). Durchgesetzt hat sich die Jacketkrone in Deutschland seit 1925, wozu die Arbeiten von BRILL erheblich beitrugen (Schmitz 1987). Ein entscheidender Nachteil bei dem von LAND entwickelten Verfahren war jedoch, dass sich die Platinfolie beim Aufbrennen der Keramik verziehen konnte, woraus eine schlechte Passgenauigkeit und somit ein Bruch der Kronen nach kurzer Tragezeit resultierte (Krumbholz 1996).

SWANN und HILDEBRANDT verbesserten 1934 die von PARMELY BROWN Ende des 19. Jahrhunderts eingeführte Methode, bei der die Keramikkronen mit Metall verstärkt werden (Schmitz 1987). Die damaligen Bemühungen scheiterten jedoch an der thermischen Inkompatibilität beider Komponenten, was zu häufigen Abplatzungen der Keramik von der Metalloberfläche führte (Strub 1992). GATZKA gelang es 1949 durch die Einführung des Vakuumbrennverfahrens, die in der zu brennenden keramischen Masse eingeschlossene Luft vor dem Dichtbrennen der Keramik nahezu vollständig zu entfernen und damit das Porenvolumen von 5 auf 0,5% zu senken. Dadurch wurde zusätzlich zur besseren Verbundfestigkeit zwischen Metall und Keramik auch eine entscheidende Verbesserung von Farbe und Transparenz der Dentalkeramiken erreicht (Breustedt 1968; Schmitz 1987; Krumbholz 1996).

NIES` Idee von 1911, dentalkeramische Massen direkt auf feuerfestes Material aufzubrennen, wurde in den 1960er-Jahren von LUND und BONLIE wieder neu aufgegriffen (Lund and Bonlie 1962; Breustedt 1968). 1968 wurde durch die Einführung der VITADUR-N-Technik unter Verwendung von speziellen Kernmassen daraus Wirklichkeit (McLean 1981). Der Verzicht der Platinfolie war nun möglich und das oxidverstärkte Kernmaterial (Aluminiumoxidkeramik) von MCLEAN und HUGHES trat in den Vordergrund. Die doppelt so hohen Festigkeitswerte im Vergleich zu herkömmlichen Verblendmassen konnten durch den hohen Tonerdeanteil (Al_2O_3) erreicht werden (McLean 1965; Büchel 1971; Anderson and Oden 1993). Die Verwendung der nahezu reinen Tonerde, die bei 1800°C gebrannt werden musste, ließ

aufgrund der hohen Festigkeit erstmals eine Herstellung von kleinen Brückenkonstruktionen ohne Metallgerüst zu (McLean 1965; Sturm 1968; Büchel 1971; McLean 1988; Anderson and Oden 1993). Weiter verbessert wurden die Festigkeitswerte durch die Verwendung von Yttrium-stabilsierter Zirkoniumdioxidkeramik, die Mitte der 1990er-Jahre von der Firma Metoxit AG vorgestellt wurde (Witkowski 2006).

2.3 Zirkoniumdioxidkeramik (= Y-TZP = Zirconia = Zirconia-TZP)

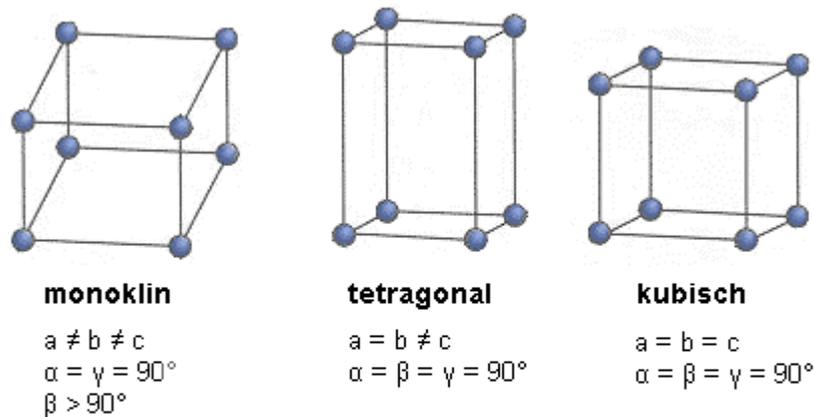
Das Metall Zirkonium wurde 1789 vom deutschen Chemiker Martin Klaproth identifiziert. Sein zur Zeit wichtigstes Salz ist Zirkoniumdioxid ZrO_2 , besser bekannt unter dem Namen Zirconia. Die farblosen Kristalle besitzen eine hohe Brechzahl und werden häufig für Diamantimitate verwendet. Durch seine hohe Stabilität und Hitzebeständigkeit wird Y-TZP (Yttriumoxid-teilstabilisiertes ZrO_2 , Zirconia-TZP) in der Industrie zur Auskleidung feuerfester Öfen, als technische Keramik im Maschinenbau (Kugellager), als Zusatz für kratzfeste Lacke und als Schleifmittel verwendet. Die hervorragende elektrische Leitfähigkeit wird damals (1897 Nernstlampe) wie heute (Lambdasonde im Autokatalysator) zusätzlich genutzt (Li, Gong et al. 2002; Grote and Feldhusen 2007).

Erste Publikationen über Zirkoniumdioxid aus dem Bereich der biomedizinischen Anwendung stammen von 1969 (Helmer and Driskell 1969). Aufgrund seiner guten physikalischen Eigenschaften und seiner hohen Bioverträglichkeit findet Zirconia-TZP in der Medizin als Bestandteil von Hüftgelenksimplantaten seit 1988 seinen berechtigten Platz (Christel, Meunier et al. 1988). Seit Ende der 1990er-Jahre wird Zirconia-TZP vermehrt in der Dentaltechnik zur Herstellung von Kronen- und Brückengerüsten angewendet, nachdem es zuvor erfolgreich als industriegefertigte kieferorthopädische Brackets, Wurzelstifte und Implantatpfosten Einsatz fand. Dabei spielte der Wunsch nach einer Erweiterung der in dieser Zeit aufkommenden CAD/CAM-Verarbeitungstechnik in der Zahntechnik, die zunächst auf den Werkstoff Titan angewendet wurde, eine entscheidende Rolle (Keith, Kusy et al. 1994; Meyenberg, Lüthy et al. 1995; Glauser, Sailer et al. 2004; Witkowski 2005). Die für die Kronentechnik besondere Verarbeitung, das sogenannte CAD/CAM-Verfahren wird weiter unten erläutert.

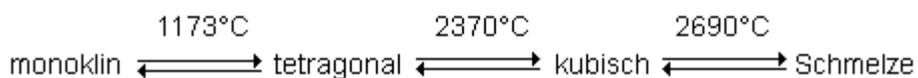
2.3.1 Eigenschaften von Y-TZP

Die Zirkonoxidkeramik verbindet die positiven Eigenschaften der herkömmlichen Oxidkeramiken, wie einen sehr geringen Glasanteil, also eine hohe Dichte mit Porenfreiheit, mit modernen Eigenschaften der Hochleistungskeramiken. Zu diesen gehören die kleine Partikelgröße ($<0,5 \mu\text{m}$) und dadurch eine geringe Oberflächenrauigkeit von ca. $0,008 \mu\text{m}$, eine Biegefestigkeit (σ) von über 950 MPa , ein E-Modul von 210 GPa und eine Vickershärte von 1200 HV .

Eine weitere Besonderheit ist die Fähigkeit zur Selbstreparatur von kleineren Rissen. All diese Eigenschaften sind mit der t/m-Phasentransformation vergesellschaftet. Die Phasentransformation von Zirconia ist eine Kristallgitteränderung bei unterschiedlichen Temperaturen. So liegt Zirconia bei Raumtemperatur im monoklinen (m) Gitter vor. Dieses ist 4% größer als sein Pendant in der tetragonalen (t) Struktur zwischen 1173°C und 2370°C . Ab 2370°C liegt Zirconia im kubischen (k) Raumgitter bis zu seinem Schmelzpunkt bei 2680°C vor (Evans and Cannon 1986; Tinschert, Natt et al. 2004).

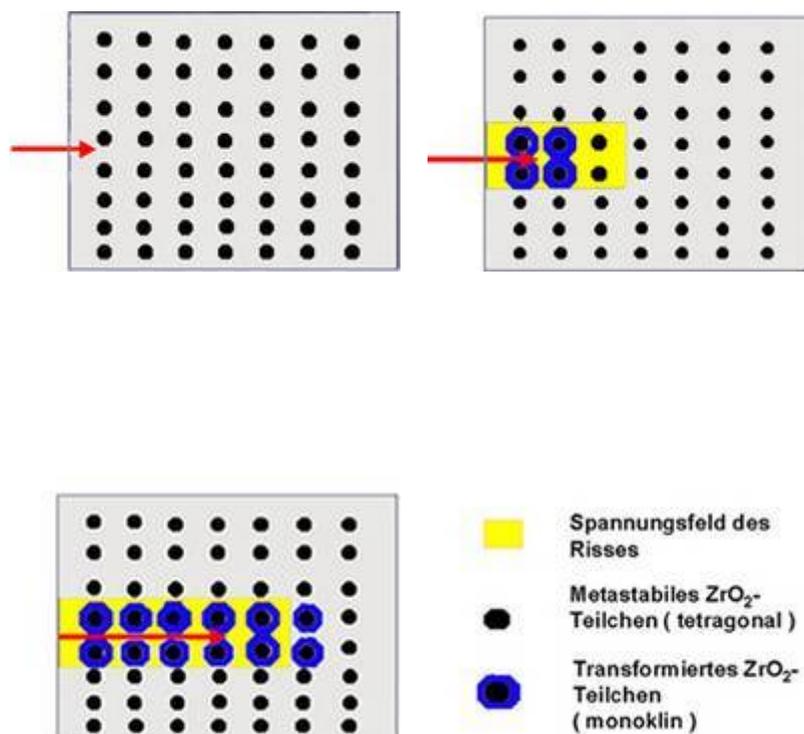


ZrO₂ - Kristallphasen



1. Abbildung: Phasenumwandlung des Zirconia-TZP (Beuer 2007)

Diese kritische t/m-Umwandlung kann durch Zugabe von 5 Gew.-% (ca. 3 mol-%) Yttriumoxid (Y_2O_3) weitestgehend gehemmt werden, so dass Yttrium-stabilisiertes Zirconia (Y-TZP) bei Raumtemperatur entsteht und somit das tetragonale Gitter bestehen bleibt. Durch die Teilstabilisierung bleibt die Möglichkeit der Umwandlung in monoklines Zirkondioxid erhalten, das für die Selbstreparatur wichtig ist. Durch Spannungskräfte an einem Riss wird eine martensitische Umwandlung der anliegenden tetragonalen Kristalle in die monokline Form induziert, so dass durch die Volumenausdehnung lokale Druckkräfte entstehen, die dem Risswachstum entgegentreten. Die notwendige Energie zur Rissausbreitung wird dadurch erhöht und die Rissausbreitung erheblich erschwert beziehungsweise gestoppt. Diese Eigenschaft bedingt die guten physikalischen Eigenschaften des Zirconia-TZP und wird als Transformationsverstärkung bezeichnet (Stevens 1991; Tinschert, Natt et al. 2004).



2. Abbildung: Transformationsverstärkung von Zirconia-TZP (Beuer 2007)

Eine weitere wichtige physikalische Eigenschaft einer dentalen Keramik ist der Wärmeausdehnungskoeffizient (WAK). Der volumenspezifische Ausdehnungskoeffizient gibt an, um welchen Betrag im Verhältnis zum gesamten Volumen sich das Volumen eines Körpers bei einer Temperaturänderung von einem Kelvin vergrößert oder verkleinert (Strietzel 2005). Der WAK ist in der dentalen Verblendtechnik von enormer Wichtigkeit und wird im Kapitel Verbundtheorien weiter behandelt.

2.4 CAD/CAM-Verfahren

Zirconia-TZP ist aufgrund seiner enormen Härte und seines hohen Schmelzpunktes nicht in herkömmlicher Weise in Dentallaboren zu verarbeiten. Daher werden industriell angefertigte Rohlinge in speziellen Fräslaboren nach CAD (Computer Aided Design) / CAM (Computer Aided Manufacturing)-Verfahren behandelt. Dies bedeutet, dass entweder aus einem konventionellen Sägeschnittmodell, welches per Scanner abgetastet wird, oder aus einem digitalen „Abdruck“ aus dem Mund des Patienten mit spezieller Software durch einen geübten Techniker ein virtuelles Kronenbeziehungsweise Brückengerüst auf dem Computerbildschirm erstellt wird (CAD). Diese Daten werden an eine computergesteuerte Fräseinheit weitergeleitet, die dann aus den Y-TZP-Rohlingen das gewünschte Werkstück fräst (CAM).

Dabei sind verschiedene Rohlinge je nach Sinterungsgrad zu unterscheiden: Grünbearbeitung direkt nach primärer Verdichtung, Weißbearbeitung nach Vorbrand (55-70% verdichtet) und Hartbearbeitung nach Dichtsinterung (HIP, siehe unten) (Tinschert, Natt et al. 2004; Witkowski 2005). Je unbehandelter (geringer der Sinterungsgrad) das Zirconia-TZP ist, desto weicher und leichter zu bearbeiten ist das Material. Allerdings ist auch die Schrumpfung des nicht vollständig gesinterten Zirconia-TZP im anschließenden Sinterprozess dementsprechend größer und die industriell perfekt verdichtete Struktur des industriell vollständig gesinterten Zirconia-TZP wird nicht erreicht. Damit verringert sich die Festigkeit des nicht vollständig gesinterten Zirconia-TZP ungeachtet des dem Schleifprozess folgenden Sinterungsprozesses (Luthardt and Musil 1997; Pfeiffer and Hollstein 1997; Tuan and Kuo 1998; Kosmac, Oblak et al. 1999; Luthardt, Sandkuhl et al. 1999; Oblak, Jevnikar et al. 2004). Die Hartbearbeitung des vollständig gesinterten Zirconia-TZP ist zeit- und kostenaufwändig, da sie neben dem hohen Zeitaufwand mit einem entsprechend hohen Verschleiß der Schleifwerkzeuge verbunden ist (Hahn, Wolf et al. 1996; Sturzenegger, Feher et al.

2000; Tinschert, Natt et al. 2004). Auch die mechanische und thermische Behandlung des dichtgesinterten Zirkoniumdioxids übt verschiedene, zurzeit noch kontrovers diskutierte Effekte aus, da es zu unerwünschten Kristallphasentransformationen von der tetragonalen in die monokline Form kommen könnte. Das würde den gewünschten Selbstreparaturmechanismus verhindern.

Die industrielle Herstellung der Zirconia-TZP-Keramik beginnt mit isostatischem Pressen des Rohmaterials. Durch den Einsatz synthetischer Rohstoffe sowie moderner Pulveraufbereitungs- und Formgebungsmethoden können stabile, kreideähnliche Grünkörper mit einer hohen Primärdichte erzeugt werden (Tinschert, Natt et al. 2001). Als nächstes können die dichtgesinterten Grünlinge nach dem von der Firma Metoxit 1986 beschriebenen Verfahren „gehipt“ werden, das heißt durch heißisostatisches Pressen (HIP: Hot Isostatic Postcompaction) bei einem Druck von 1000 bar und einer Temperatur von 50°C unterhalb der Sintertemperatur nochmals nachverdichtet werden. Dies verbessert ihre Beständigkeit gegenüber dem Wachstum von Mikrorissen und somit das mechanische Langzeitverhalten der Oxidkeramik (Christel, Meunier et al. 1989; Rieger 1993; Rieger 2001). Durch anschließendes Sintern in oxidierender Atmosphäre bei 1350-1550°C wird die endgültige Festigkeit erreicht (Tinschert, Natt et al. 2004). Je weiter bearbeitet (gesintert), desto härter und weniger porös ist das Zirkoniumdioxid, was wiederum eine geringere Schrumpfung beim Sintern nach dem Schleifen bedeutet (Tinschert, Natt et al. 2004).

2.5 Einfluss der Oberflächenbearbeitung

Es ist noch nicht vollständig bekannt, welchen Einfluss die zahntechnischen Arbeitsschritte auf die mechanischen Eigenschaften des Y-TZP-Gerüsts ausüben. Die üblichen Schritte für die Herstellung von Zahnersatz bis zum endgültigen Einsetzen sind:

- Fräsen des Gerüsts und anschließendes Aufpassen
- Aufbrennen der Verblendkeramik, üblicherweise bei Temperaturen um etwa 800°C, (je nach Verblendkeramik mit Al₂O₃-Abstrahlen vor dem Aufbrennen der Keramik)
- Abstrahlen vor dem definitiven Einsetzen (Kroneninnenflächen).

Obwohl viele Autoren die Auswirkungen dieser Vorbehandlung untersuchten, sind die Schlussfolgerungen und Empfehlungen unklar und werden kontrovers diskutiert (Marx 1993; Hahn and Wolf 1994; Thompson, Anusavice et al. 1994; Liao, Li et al. 1997; Luthardt and Musil 1997; Pfeiffer and Hollstein 1997; Tinschert and Marx 1997; Tuan and Kuo 1998; Kosmac, Oblak et al. 1999; Luthardt, Holzhüter et al. 2002; Luthardt, Holzhüter et al. 2004; Oblak, Jevnikar et al. 2004; Guazzato, Quach et al. 2005).

Verschiedene Autoren untersuchten die Festigkeit von Y-TZP nach simulierter Innenbearbeitung mit Diamanten unter Wasserkühlung von Kronengerüsten (Kosmac, Oblak et al. 1999; Luthardt, Holzhüter et al. 2000; Luthardt, Holzhüter et al. 2002; Luthardt, Holzhüter et al. 2004). Sie stellten einen signifikanten, etwa 50%igen Biegefestigkeitsverlust nach der Bearbeitung mit wassergekühlten und ungekühlten Diamanten fest. Grund dafür ist, dass es beim Fräsen zum Auftreten kleinerer Abplatzungen und Mikrorissbildungen kommt (Tinschert, Natt et al. 1999). BALTZER et al. konnten keinen statistisch signifikanten Unterschied in der Biegefestigkeit von Y-TZP (YZ Cubes®; Vita) nach maschineller Bearbeitung vor und nach dem Sintern, beziehungsweise nach 10.000 Belastungszyklen à 300 N feststellen (Baltzer and Kaufmann-Jonian 2003).

Eine Untersuchung von DENG et al. weist auf den festigkeitsmindernden Einfluss durch Abstrahlen der inneren Flächen von Kronengerüsten mit Al₂O₃ hin (Deng, Lawn et al. 2002).

GUAZZATO et al. hingegen konnten zeigen, dass die Bearbeitung von Y-TZP durch Abstrahlen mit Al₂O₃ die Biegefestigkeit des Materials erhöht, sofern dabei keine Temperaturerhöhung erfolgt (Guazzato, Quach et al. 2005). Die tetragonalen Kristalle

können spontan oder durch die mechanische Bearbeitung in die monokline Phase transformieren (Luthardt and Musil 1997). Die Folge dieser Umwandlung ist eine Erhärtung der Oberflächenschicht (Kompressionsschicht) durch Abstrahlen, was die Biegefestigkeit der Zirkonoxidkeramik erhöht (Liao, Li et al. 1997; Tuan and Kuo 1998; Kosmac, Oblak et al. 1999; Kosmac, Oblak et al. 2000; Guazzato, Quach et al. 2005). Diese komprimierte Schicht (Kompressionsschicht) aus monoklinem ZrO_2 auf der abgestrahlten Gerüstoberfläche hat eine Tiefe von 0,33 μm . Ein weiterer Effekt durch Abstrahlen des Zirconia-TZP mit Al_2O_3 ist die Entstehung von Oberflächendefekten und Mikrorissen, die Materialschwächungen induzieren und das Langzeitverhalten der Keramik negativ beeinflussen können, wenn sie die komprimierte Schicht überschreiten (Hahn and Wolf 1994; Pfeiffer and Hollstein 1997; Tuan and Kuo 1998; Kosmac, Oblak et al. 1999; Kosmac, Oblak et al. 2000; Oblak, Jevnikar et al. 2004; Guazzato, Quach et al. 2005). Dies bedeutet klinisch, dass Dentalkeramiken bei normaler Belastung nach mehreren Jahren plötzlich versagen können (Marx 1993; Tinschert and Marx 1997).

THOMPSON et al. zeigten in ihrer Untersuchung, dass nicht die Dicke der Kompressionsschicht, sondern vielmehr die Rissverteilung in der Gerüstkeramik deren Misserfolg bestimmt (Thompson, Anusavice et al. 1994).

Die Vita ZAHNFABRIK (2004) empfiehlt im Fall einer mechanischen Nachbearbeitung des Zirconia-TZP einen zusätzlichen „Regenerationsbrand“ bei 1000°C für 15 Minuten. Der Grund dafür liegt in der durch die Nachbearbeitung in das Zirconia-TZP eingebrachten Energie. Diese kann zu einer Phasenumwandlung der tetragonalen Kristalle des Y-TZP in die monokline Modifikation führen. Folge kann die Induzierung von Grenzflächenspannungen sein, die bei der keramischen Verblendung bedeutsam werden und zu einer Beeinträchtigung der Verbundfestigkeit führen können. Der Regenerationsbrand soll die durch die unerwünschte t/m-Umwandlung resultierenden Spannungen zwischen der Verblendkeramik und dem Gerüst verhindern, die sich im Vergleich zu dem tetragonalen Y-TZP anderen WAK-Wert des monoklinen Y-TZP ($\sim 7 \times 10^{-6} K^{-1}$) begründen (Zahnfabrik 2004). Diese Empfehlung muss jedoch kritisch betrachtet werden, denn sie beachtet nicht, dass die thermische Behandlung von Y-TZP (auch bei 900°C für zwei Stunden) umgekehrt eine Umwandlung der monoklinen Partikel in die tetragonale Phase verursacht (Kosmac, Oblak et al. 2000), was zum Schwund der Kompressionsschicht führt. Die Festigkeit der Gerüstkeramik sinkt, da den durch die Bearbeitung entstandenen Defekten und Mikrorissen kein Druck

der Kompressionsschicht entgegensteht (Kosmac, Oblak et al. 1999; Kosmac, Oblak et al. 2000; Guazzato, Quach et al. 2005; Sundh, Molin et al. 2005). Der Regenerationsbrand verursacht daher den gleichen Effekt, der zum Beispiel beim ungekühlten Beschleifen vorkommt, bei dem die kritische Temperatur um etwa 1000°C erreicht wird und die Festigkeit abnimmt (Guazzato, Quach et al. 2005).

2.6 Verblendkeramiken

Die fertigen Kronen- und Brückengerüste aus Zirconia-TZP müssen einerseits wegen ihrer extremen Härte zum Schutz der Antagonisten und andererseits aus ästhetischen Gründen mit speziell angepassten Verblendkeramiken verblendet werden. Dabei ist zu beachten, dass es sich beim Zirconia-TZP um ein in der Regel weißes und vor allem opakes Material handelt, mit dem sich keine ästhetisch befriedigende Zahnfarbe erzielen lässt. Die Verblendkeramiken für Zirconia-TZP haben einen geringfügig niedrigeren Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) mit 8,6 bis $10 \times 10^{-6} \text{ xK}^{-1}$ als das Zirconia-TZP ($10,8 \times 10^{-6} \text{ xK}^{-1}$). Weiterhin haben die Verblendkeramiken eine geringere Vickershärte (um 500 HV), eine größere Körnchengröße (ca. 25 μm) und eine geringere Biegefestigkeit (zwischen 70 und 120 MPA) als die Y-TZP-Gerüstkeramik. Bis auf die LavaCeram® Verblendkeramik, die eine Feldspatkeramik ist, handelt es sich bei den Verblendkeramiken um Silikat-Glaskeramiken (Produktüberblick 2004). Die einzelnen Unterschiede der verschiedenen Verblendkeramiken für Y-TZP werden im Abschnitt Material und Methoden erläutert.

2.7 Verbundtheorien

2.7.1 Metallkeramik

Für die bewährte metallkeramische Bindung im Bereich der Metallkeramik gibt es die chemisch-mechanische Theorie. Diese ist in verschiedene Phasen vereinfacht aufgeteilt:

Als erstes wird durch Sandstrahlen und anschließende Reinigung die Oberfläche des Metallgerüsts aufgeraut und bietet dadurch eine leicht benetzbare retentive Oberfläche (mechanischer Verbund). In Untersuchungen von FREESMEYER, LINDEMANN und von MUSIL und TILLER wurde eine Erhöhung der Verbundfestigkeit von Metall und Keramik durch eine solche Vorbehandlung nachgewiesen (Freesmeyer and Lindemann 1982; Musil, Göbel et al. 1985; Tiller, Magnus et al. 1985). Die keramische Masse kann im geschmolzenen Zustand diese Mikroretentionen umfließen und ist somit im erstarrten Zustand verankert (Reuling and Siebert 1987). Je nach Benetzungsvermögen treten adhäsive Oberflächenspannungseffekte ein (van der Waals Kräfte), die für eine geringe chemische Verankerung sorgen.

Das Erhitzen des Metalls im Vakuum auf 1000°C für 10 Minuten härtet den Guss und sorgt für eine Nichtedelmetalloxidschicht an der Oberfläche (innere Oxidation), da die in den entsprechenden Edelmetall-Legierungen enthaltenen Nichtedelmetalle an die Metalloberfläche diffundieren und oxidieren. Bei Nichtedelmetall-Legierungen befinden sich die oxidbildenden Elemente bereits an der Oberfläche und oxidieren (äußere Oxidation). Es bildet sich eine chemische Bindung durch Sauerstoffbrücken vom Nichtedelmetalloxid zum SiO_2 der Keramik. Es konnte in vielen Untersuchungen gezeigt werden, dass wechselseitige Diffusionsvorgänge zwischen dem Metall und der Keramik existieren (Lindemann 1982; Siebert and Queisser 1985; Arieley 1992; Ganther 1996).

Die dann aufgetragene dünn fließende opake Porzellanmasse zieht sich als dünne Schicht nach dem ersten Brand auf dem Metallgerüst zusammen. Die durch weitere Brände weiter aufsteigenden Oxide sorgen für die Festigung der chemischen Verbindung. Während des Brandzyklus übt die Keramik einen restriktiven Effekt auf die Ausdehnung des Metalls aus, da der Wärmeausdehnungskoeffizient der Keramik kleiner ist als der des Metalls (Claus 1980). Dieses sogenannte Aufschumpfen der Keramik ist die größte mechanische Verankerung (McLean 1978).

2.7.2 Verbund Zirconia-TZP und Verblendkeramik

Die Art des Verbundes zwischen dem Zirkoniumdioxidgerüst und der Verblendkeramik wurde bisher kaum untersucht (Stephan 1996). Durch Beobachtung der Frakturart zweischichtiger Systeme mittels Finite-Elemente-Analyse (FEA) wiesen WHITE et al. auf den schwachen Verbund zwischen Y-TZP und Verblendkeramik hin (White, Caputo et al. 1994). STEPHAN untersuchte den Verbund von unter anderem Y-TZP mit der Verblendkeramik Vitadur Alpha® (Stephan 1996). Der Verbund zeigte in Rasterelektronenmikroskopaufnahmen eine gute Mikroverzahnung beider Materialien. Es wurde jedoch weder eine nachweisbare Diffusion (wie bei dem System der In-Ceram®-Gerüste zur Verblendkeramik (Schmid, Fischer et al. 1990; Stephan 1996)), noch eine Vernetzung bei anderen getesteten vollkeramischen Systemen, wie IPS Empress® 1 oder 2 nachgewiesen (Schmid, Fischer et al. 1990; Aboushelib, de Jager et al. 2005).

Die Haftung der Verblendkeramik auf der Oberfläche von Y-TZP wurde von STEPHAN demnach primär auf eine mikromechanische Verankerung zurückgeführt (Stephan 1996). Der Verbund zwischen Zirkoniumdioxid und Verblendkeramik wird entsprechend den Erfahrungen beim etablierten metallkeramischen Verbund auf die Anpassung des WAK-Werts der Verblendkeramik auf den WAK-Wert des Y-TZP und damit auf einen mechanischen Verbund zurückgeführt (Claus 1980; Luthardt, Herold et al. 1998; Kappert and Krahl 2001). Es wird davon ausgegangen, dass der WAK-Wert der Verblendkeramik geringfügig unterhalb des WAK-Werts des Y-TZP eingestellt ist und sich tangential Druck- und radiale Zugspannungen ausgleichen. Damit ist sowohl bei der Abkühlphase nach dem Sintern als auch bei thermischer Wechselbelastung in der Mundhöhle eine gute Haftung der Materialien gewährleistet (Aboushelib, de Jager et al. 2005).

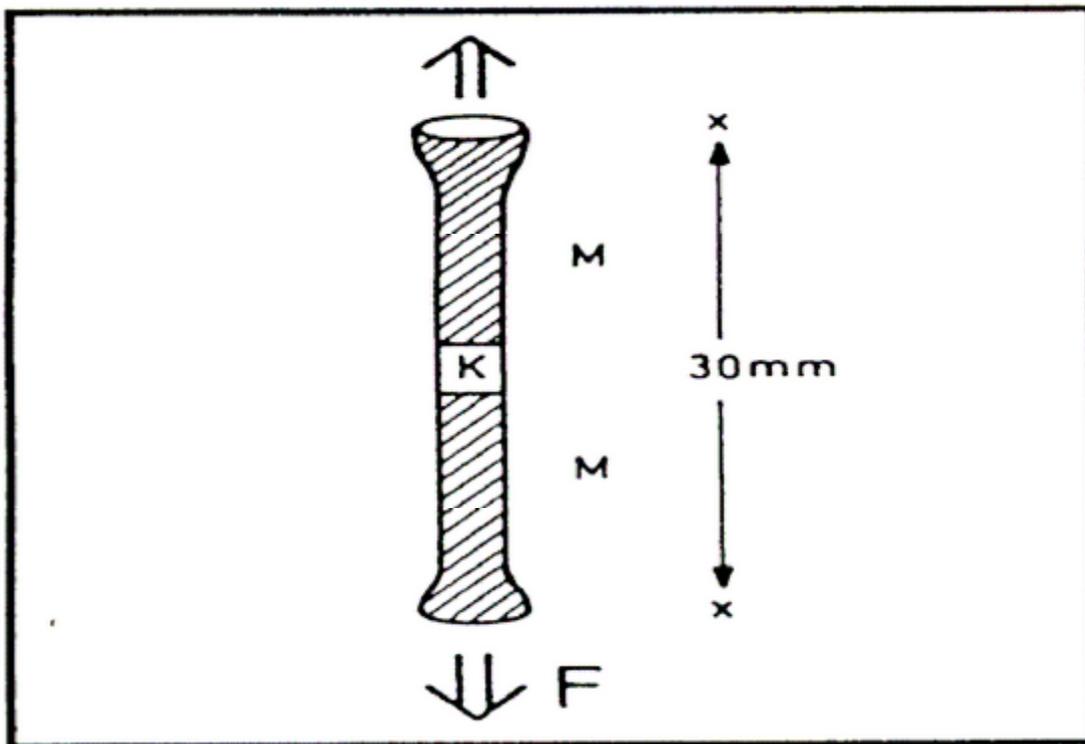
SUTTORS Untersuchungen der Verbundzone zwischen Y-TZP und Verblendkeramik unter dem Tunnel-Rasterelektronenmikroskop deuten dahingegen auf einen chemischen Verbund zwischen beiden Materialien hin (Suttor 2007). THOLEY et al. gehen ebenfalls davon aus, dass zumindest Teilkomponenten der Verbindung des Zirconia-TZP mit der Verblendkeramik chemischer Natur sein müssen, da beide Materialien aus Metalloxiden bestehen (Tholey and Stephan 2007).

2.8 Verfahren zur Prüfung der Verbundfestigkeit

Zur Prüfung der Verbundfestigkeit vollkeramischer Systeme werden derzeit verschiedene Verfahren angewendet. Sie werden an geometrischen Prüfkörpern beziehungsweise stilisierten Verblendkronen durchgeführt und anhand ihrer Krafteinwirkung unterschieden (Marx 1986).

2.8.1 Zugprüfung

Im Gegensatz zur Druckprüfung werden bei Zugprüfungen genau definierte geometrische Prüfkörper verwendet, welche in eine Universalprüfmaschine (zum Beispiel Zwick) eingespannt werden. Die erste derartige Zugprüfung wurde 1950 von HATTEMER und KÜBEL zur Prüfung der Verbundfestigkeit von Zement/Metall/Kunststoff entwickelt (Hattemer and Kübel 1950). Diese Methode wurde dann 2005 in abgewandelter Form auch von ABOUSHELIB et al. zur Prüfung der Verbundfestigkeit zweier Keramiken angewendet (Aboushelib, de Jager et al. 2005). Hier sind die Ergebnisse von Abweichungen in der Geometrie der Prüfkörper, sowie von der Art der Kraftanwendung abhängig (El Zohairy, De Gee et al. 2004; Meira, Souza et al. 2004). Die Zugbelastung erfolgt axial durch Vorschub in transversaler Richtung bis zur Fraktur im Verbundbereich (Marx 1988); die Spannung wird in N/mm² gemessen.

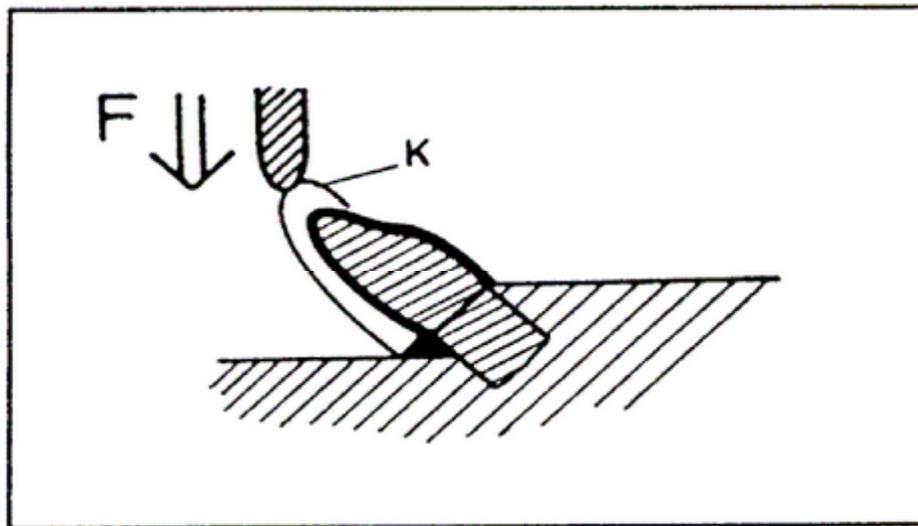


3. Abbildung: Aufzeichnung der Zugprüfung (M – Metall, K – Keramik, F – Kraft [N]) (Eichner and Kappert 1996)

Zugprüfungen an solchen Prüfkörpern sind allerdings problematisch, da der Kraftangriff und die Wirkung nicht eindeutig zu beurteilen sind. So wurde aus dem Zugversuch nach ROSSBACH später ein Zugscherversuch (Rossbach 1969; Marx 1988). Dieser Test ist wegen der Prüfkörperherstellung aber aufwändig und somit auch schwer mit Literaturwerten vergleichbar.

2.8.2 Druckprüfung

VOSS entwickelte ursprünglich für den Metall-Keramik-Verbund 1969 eine Druckprüfmethode für stilisierte Frontzahnkronen bei der durch Druck auf die Inzisalkante einer Verblendkrone die Festigkeit der Verblendung oder der Verbundfestigkeit beider Materialien getestet werden kann.



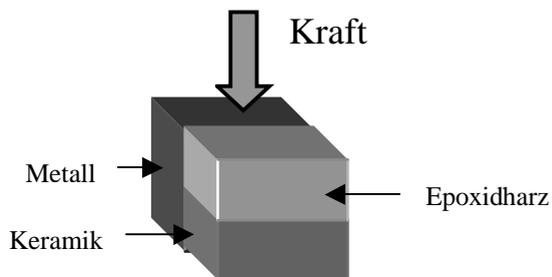
4. Abbildung: Aufzeichnung der Druckprüfung nach Voss (K – Keramik, F – Kraft [N]) (Eichner and Kappert 1996)

Durch diese Methode können herstellungsbedingte Faktoren einer Verblendkrone getestet werden, da sie in natürlicher Funktion belastet werden. Die Testergebnisse werden so mit den tatsächlich in der Mundhöhle auftretenden Kaukräften verglichen und können Aussagen zu Mindestanforderungen an Verblendkronen geben. Durch Angriffspunkt der Kraft und Druckrichtung werden die Ergebnisse allerdings stark beeinflusst, so dass eine Vergleichbarkeit nicht unbedingt gegeben ist. Es ist mit einer großen Streuung der Messwerte zu rechnen, da die Prüfkronen nur bedingt identisch herzustellen sind (Marx 1988).

2.8.3 Scherprüfung

Die Scherprüfung erfolgt an geometrischen Prüfkörpern. Bei diesem Prüfprinzip soll das Verblendmaterial in Richtung der Verbindungsfuge zwischen Gerüst- und Verblendmaterial verschoben beziehungsweise abgeschert werden. Dies geschieht entweder durch Zug oder Druck auf den Verblendmasseanteil (Marx 1988). Bei allen

Scherversuchsvorrichtungen ist die außerhalb der Verbundfuge angreifende Kraft kritisch einzustufen, da dadurch Drehmomente entstehen (Marx 1988). Um diese möglichst zu vermeiden, sollte sich der Abscherstempel möglichst konstant nahe an der Verbundgrenze befinden (Schmitz and Schulmeyer 1975). Beim Abscherversuch nach SCHMITZ und SCHULMEYER werden Metallwürfel auf einer Seite zur Hälfte mit Keramik verblendet. Die nicht verblendete Fläche wird mit einem Epoxidharz aufgefüllt. Der aufgebrannte Keramikblock wird parallel zur Würfeloberfläche abgeschert und die Scherspannung beziehungsweise die Scherverbundfestigkeit als Quotient aus der Bruchlast und der Haftfläche der Metall/Keramik- beziehungsweise Keramik/Keramik-Fläche berechnet (Schmitz and Schulmeyer 1975).



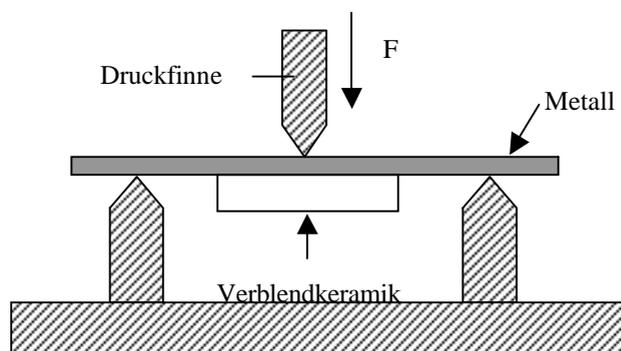
5. Abbildung: Druck-Schertest nach Schmitz-Schulmeyer (Schmitz and Schulmeyer 1975)

Dabei wird vorausgesetzt, dass eine gleichmäßige Belastung an der Grenzfläche zweier Materialien das Abscheren des Verblendkeramikblocks bewirkt. Frakturen innerhalb der Verblendkeramik können die Messergebnisse verfälschen. Die Methode reagiert besonders empfindlich auf Fehlabbestimmungen der WAK-Werte zwischen Legierung und Keramik, da der massive Metallwürfel Spannungen nicht durch Verformung kompensieren kann (Kappert, Riedling et al. 1985).

2.8.4 Biegeprüfung

Die Biegeprüfung erfolgt mit geometrischen Prüfkörpern. Die bekannteste Biegeprüfung ist die Dreipunkt-Biege-Prüfung nach SCHWICKERATH zur Ermittlung der Verbundfestigkeit ursprünglich zwischen Metall und Keramik (Schwickerath 1983). Ein streifenförmiger Prüfkörper aus dem Gerüstmaterial (in der eigentlichen Ausführungsform ein Metall oder eine Metall-Legierung der Metall-Keramik-

Verblendtechnik) wird mittig mit der geeigneten Keramik verblendet. Eine mittig auf die Rückseite des Prüfkörpers aufgesetzte Druckfinne belastet den Prüfkörper durch einen definierten Vorschub. Dabei wird der Prüfkörper gebogen, so dass in der Metall-Keramik-Kontaktzone eine Scherkraft entsteht, die bei einer bestimmten Kraft des Druckstempels zur Ablösung der Keramik führt (Bruchkraft). Multiplikation der Bruchkraft mit einem Faktor k ergibt die Biege-Scherfestigkeit in Megapascal (MPa) als Maß der Verbundfestigkeit der Keramik auf dem Metall. Der Faktor k ergibt sich aus Dicke des Prüfkörpers und E-Modul des Metalls. Als Mindestanforderung definiert sie eine Biegescherkraft von 25 MPa (Schwickerath 1983; Kappert, Riedling et al. 1985).



6. Abbildung : Versuchsanordnung des Drei-Punkt-Biegeversuchs nach SCHWICKERATH (1983) (x - Stützweite in mm (Entfernung der Auflagen), F - Bruchlast des Körpers [N], M – Metall, K –Keramik) (Eichner and Kappert 1996)

Diese Biege-Scher-Prüfung nach Schwickerath eignet sich durch die genormte Prüfkörperherstellung und damit gesicherte Vergleichbarkeit gut zur Prüfung der Verbundfestigkeit (Lenz, Schwartz et al. 1995).

2.9 Ziele dieser Arbeit

Da sich die physikalischen Eigenschaften der Verblendkeramik für Zirkoniumdioxidgerüste im Wesentlichen nicht von etablierten Verblendkeramiken für Metallgerüste unterscheiden, lässt sich das Problem der beobachteten Abplatzungen der Verblendkeramik auf den Verbund der beiden Materialien zurückführen (Filser, Kocher et al. 2001; Filser, Lüthy et al. 2002). Je geringer der Verbund beider Materialien desto weniger hält die sehr starre Verblendkeramik den Biege- und Zugbelastungen des Gerüsts stand und platzt an der schwächsten Stelle, also der Verbundzone, ab (White, Caputo et al. 1994).

Momentan werden verschiedene Oberflächenbearbeitungen vor dem Verblenden von Y-TZP und Verblendkeramik angewendet. Je nach Hersteller soll die Oberfläche des Y-TZPs für den stabileren Verbund angeraut werden oder nicht. Beim Nachfragen bei verschiedenen Verblendkeramikherstellern wird kontrovers geantwortet. So besteht 3M Espe beispielsweise darauf, die Gerüste nicht mit dem in der Zahntechnik üblichen Edelkorund (Al_2O_3) abzustrahlen. Degudent hingegen empfiehlt leichtes Abstrahlen in Anlehnung an Erfahrungswerte aus der Metallkeramiktechnik. Keine der Firmen konnte ein etabliertes Protokoll zur Verfügung stellen aufgrund der unzureichenden Datenlage.

Bisher wurde der Einfluss der unterschiedlichen mechanischen Oberflächenbearbeitungen der Y-TZP auf den Haftverbund in standardisierten Verbundfestigkeitstests noch nicht hinreichend untersucht.

In der vorliegenden *in-vitro*-Untersuchung sollten daher auf folgende Fragen Antworten gefunden werden:

1. Wie wirken sich die verschiedenen in der zahntechnischen Bearbeitung von jeher angewendeten Oberflächenmodifikationen auf die Zirconia-Gerüstkeramik hinsichtlich ihrer Rauigkeit aus? Als Arbeitshypothese ist eine erhöhte Rauigkeit durch Bearbeitung zu erwarten.

Hierfür wurde jeweils eine Serie Y-TZP mit dentalüblichem Edelkorund ($110\ \mu\text{m}\ \text{Al}_2\text{O}_3$) abgestrahlt, eine weitere mit feinen Diamanten ($40\ \mu\text{m}$) und eine Serie mit groben Diamanten ($107\text{-}126\ \mu\text{m}$) bearbeitet und auf diese Weise die in dentalen Laboratorien übliche Oberflächenbearbeitungen durchgeführt. Die Modifikationen

sollten visuell durch Rasterelektronenmikroskopie überprüft werden. Anschliessend sollten die Werte mit einem Perthometer erfasst und statistisch ausgewertet werden.

2. Wie wird die Verbundfestigkeit von Y-TZP zu Verblendkeramik durch die verschiedenen Oberflächenbearbeitungen beeinflusst? Durch eine erhöhte Rauigkeit ist eine erhöhte Verbundfestigkeit anlehnend an die Metallkeramik zu erwarten.

3. Unterscheiden sich die handelsüblichen Verblendkeramiken hinsichtlich ihrer Verbundfestigkeit zu Zirconia-TZP? Da die Verblendkeramiken in ihren Eigenschaften sehr ähnlich sind, sind keine signifikanten Unterschiede zu erwarten.

Die unterschiedlichen Serien sollten mit vier unterschiedlichen für Y-TZP vorgeschlagenen handelsüblichen Verblendkeramiken verblendet werden. Die Verbundfestigkeit sollte mit einem standardisierten Verbundfestigkeitstest ermittelt und ebenfalls statistisch ausgewertet werden.

3 Material und Methode

3.1 Material

Bei der vorliegenden Untersuchung wurde die Verbundfestigkeit folgender Zirkoniumdioxidkeramik und vier Verblendkeramiken überprüft:

Gerüstmaterial	Firma	Chargennummer
Zirconia TZP	Tosoh Corp., Japan	ZR 161007-2 und -3

Verblendmaterial	Firma	Chargennummer
GC Initial Zr	GC	Zr FM-1 875001 Zr DA-2 875712
Lava® Ceram	3M Espe	MO A3 256115 DA3 291558
Cercon® Ceram Kiss	DeguDent / Dentsply	PL A3 41789 DA3 42889
Triceram®	Dentaurum	FL1 010A DA3 (IT59) 020A

7. Tabellen der verwendeten Keramiken

Die Werkstoffe wurden von den Herstellern in Originalverpackung mit den entsprechenden Anmischflüssigkeiten zur Verfügung gestellt.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die physikalischen Eigenschaften der untersuchten Zirkoniumdioxidgerüst- und Verblendmassen.

Eigenschaften	GC Initial Zr	Lava® Ceram	Cercon® ceram kiss	Triceram®	Zirconia TZP
Keramikart	Silikat- Glaskeramik	Feldspatkeramik	Silikat- Glaskeramik	Synthetische Glaskeramik	Hochleistungskeramik
WAK	$9,7 \times 10^{-6} \times K^{-1}$	$10,0 \times 10^{-6} \times K^{-1}$	$9,5 \times 10^{-6} \times K^{-1}$	$8,6 \times 10^{-6} \times K^{-1}$	$10,8 \times 10^{-6} \times K^{-1}$
Biegefestigkeit	70 Mpa	85 Mpa	80 MPa	105 MPa	950 MPa
Mittlere Korngröße	21,5 μm	25 μm	24 μm	26 μm	0,5 μm
Vickershärte	500-550 HV	530 HV	500-530 HV	580 HV	1200 HV

8. Tabelle der physikalischen Eigenschaften der verwendeten Keramiken

Zum Verblenden wurde der Cergo press Keramikpressofen (Charge 19030307) der Firma DeguDent zur Verfügung gestellt. Es wurden handelsübliche Diamanten, Sandstrahler und Abdampfer verwendet.

3.2 Methode

3.2.1 Prüfung der Verbundfestigkeit

Zur Verbundfestigkeitsprüfung wurde der in der ISO 9693 beschriebene 3-Punkt-Biege-Schertest nach Schwickerath gewählt (Anonymus 1998). Die dafür benötigten Gerüstplättchen mit den Maßen 3 mm x 25 mm x 0,5 mm wurden aus dem Pulver TZ-3YS-E (Tosoh Corp., Japan) vergrößert geformt, thermisch entbindert und anschließend gesintert (1400° C, 2h). Zur Kontrolle der Prüfkörper wurden im gleichen Verfahren Biegezugproben hergestellt. Sie zeigen Y-TZP-typische Festigkeiten (> 950 MPa) und Weibullverteilungen (10-20). Das Raumgewicht der Probekörper wurde nach der Herstellung mit der Auftriebsmethode gravimetrisch zu größer 6,0 g·cm⁻³ bestimmt. Man kann davon ausgehen, dass die Prüfkörper in ihrem inneren Aufbau und ihren Werkstoffeigenschaften denen in der dentalen Technologie gebräuchlichen Zirkoniumdioxidkeramiken Y-TZP entsprechen. Die exakte Prüfkörperherstellung ist gegenwärtig zur Patentanmeldung vorgesehen und darf aus diesem Grund nicht näher erläutert werden.

Die verblendete Oberfläche der Prüfkörper wurde vor dem Auftragen der Verblendkeramik nach den Anweisungen des jeweiligen Verblendkeramikherstellers und den hier zu untersuchenden Modi oberflächenbehandelt. Nachdem diese einzeln mit einer digitalen Schiebelehre vermessen wurden, wurden sie in vier Verblendkeramikgruppen mit je 40 Plättchen geteilt. Jede Verblendkeramikgruppe wurde in eine Kontrollgruppe ohne weitere Oberflächenbearbeitung, eine mit feinem Diamant bearbeitete, eine mit grobem Diamant bearbeitete und eine abgestrahlte Probengruppe mit je 10 Prüfkörpern (n=10) weiter unterteilt.

Der 3-Punkt-Biege-Schertest nach Schwickerath wurde auf Grund seiner Reproduzierbarkeit und seiner Bewährung bei Metall-Keramik-Verbundsystemen gewählt. Somit sind vergleichbare Literaturwerte vorhanden. Die von LENZ et al. veröffentlichten Werte sind in folgender Tabelle aufgeführt.

Alloy	Verbundfestigkeit (MPa)
High-gold	
Herador SG	39,2 ± 1,6
Herador H	31,1 ± 3,4
Herador B	28,1 ± 2,3
Herador NH	26,6 ± 2,7
Gold reduced	
Esteticor Plus	34,3 ± 4,4
MT 600	57,3 ± 5,4
Verinor	54,7 ± 3,5
Cobalt-chromium	
Wirobond	56,4±2,8
Unibond 2000	46,4±4,4
Remanium CD	48,6±4,3

9. Tabelle Verbundfestigkeit verschiedener Legierungen mit Vita VMK 68 modifiziert nach LENZ (Lenz, Schwartz et al. 1995)

3.2.2 Mechanische Bearbeitung der Verblendflächen

3.2.2.1 *Bearbeitung mit Diamanten*

Nach flächiger Markierung des Plättchens über die zu verblendende Fläche mit einem Bleistift wurde diese Markierung unter Wasserkühlung mit gleichmäßigem Druck an einer zahnärztlichen Turbine wieder entfernt. Als Diamanten wurden Walzen der Firma Rotodent gewählt; ohne Farbmarkierung für die Grobbearbeitung (entspricht nach DIN 107-126 µm) und mit rotem Farbring (entspricht nach DIN 40 µm) (Anonymus 2003). Diese Bearbeitung wurde entsprechend der Praxis in der Hand mit gleichmäßigem Druck für 5 Sekunden durchgeführt. Anschließend wurden die Prüfkörper mit einem

Dampfstrahler (IP Clean, IP DENTAL DIVISION, Haimhausen, Deutschland) und mit Ethanol gereinigt.



10. Abbildung Diamantbearbeitung



11. Abbildung Abstrahlen der Proben

Aus Sicherheitsgründen wurde das Abstrahlen durch die Abdeckscheibe fotografiert, was die Unschärfe erklärt.

3.2.2.2 *Bearbeitung durch Abstrahlen*

Nach gleicher Markierung des Plättchens mit einem Bleistift wurde diese Markierung in dem Sandstrahlgerät Basic Quattro (RENFERT, Hilzingen, Deutschland) mit Aluminiumoxid mit durchschnittlich 110 µm Korngröße mit 2 bar und 1 cm Abstand 5 Sekunden lang abgestrahlt. Anschließend wurden die Prüfkörper mit einem Dampfstrahler (IP Clean, IP DENTAL DIVISION, Haimhausen, Deutschland) und mit Ethanol gereinigt.

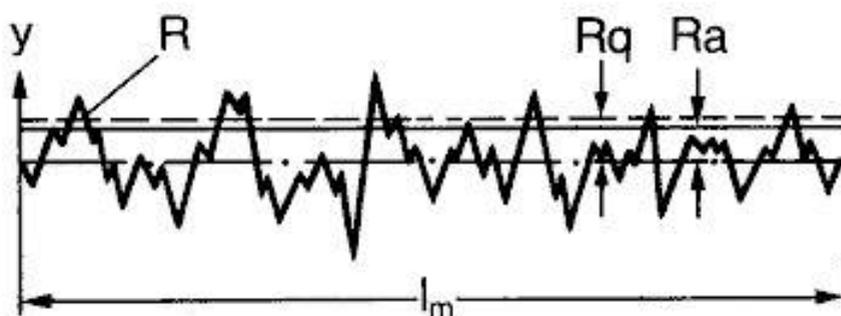
Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Oberflächenbearbeitungen.

Oberflächenbearbeitung	Bezeichnung im Text
Keine	Kontrolle
Beschleifen mit groben, rotierenden, Schleifern, diamantierten	Diamant grob
Beschleifen mit feinen, rotierenden, Schleifern, diamantierten	Diamant fein
Sandstrahlen mit Korund Al_2O_3	abgestrahlt

12. Tabelle: Bezeichnungen der Untersuchungsreihen

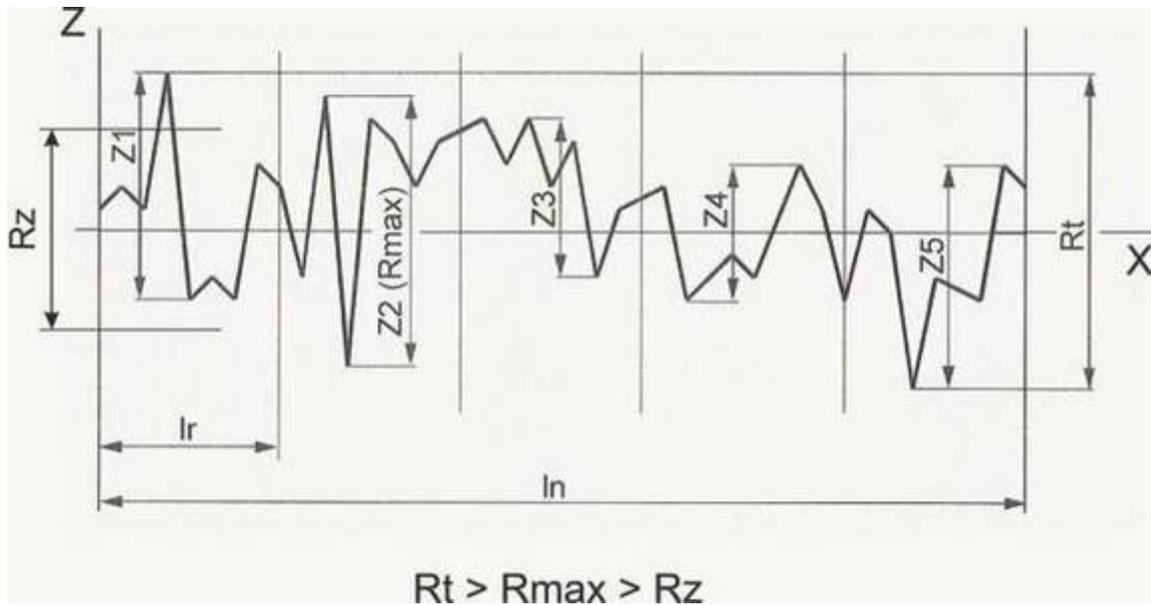
3.2.3 Bestimmung der Oberflächenrauigkeit

Die Rauigkeiten (Mittenrautiefe R_a und Rautiefe R_z nach DIN 4768) der unbehandelten, sandgestrahlten und mit Diamanten bearbeiteten Y-TZP-Plättchen wurden mit dem Oberflächenmessgerät Perthometer S2 V2.05 (Dentaurum, Ispringen, Deutschland) gemessen. Dabei werden jeweils fünf Messungen in Quer- sowie fünf Messungen in Längsrichtung der Probe vorgenommen. Der Mittenrauwert R_a ist das arithmetische Mittel der Beträge aller Profilwerte des Rauheitsprofils und ist somit ein Maß für die Glätte einer Oberfläche (Anonymus 1989).



13. Abbildung Mittenrauwert DIN 4762 (Anonymus 1989)

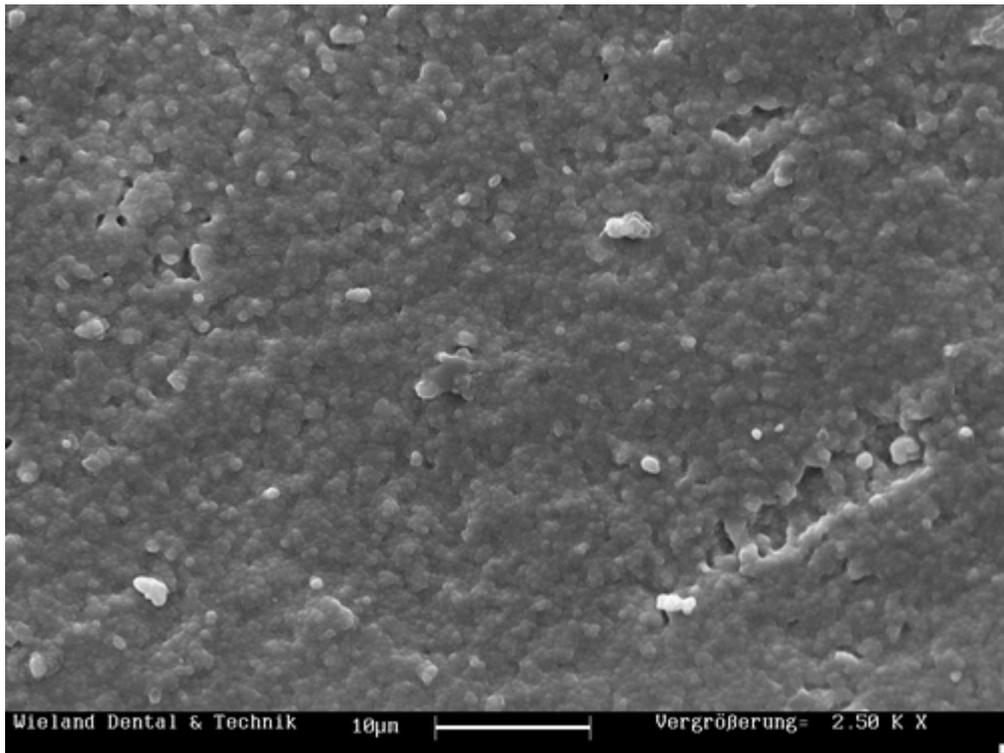
Die gemittelte Rautiefe R_z ist der Mittelwert aus den Einzelrautiefen aufeinander folgender Einzelmessstrecken; R_z entspricht also der mittleren größten Höhe des Profils (Anonymus 1989).



14. Abbildung gemittelte Rautiefe R_z (Heldt 2006)

3.2.4 Darstellung der Verblendfläche im Rasterelektronenmikroskop

In 500- bis 2500facher Vergrößerung wurden Bilder der verschiedenen bearbeiteten Y-TZP-Oberflächen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) S-4700 der Firma Wieland Dental (Wieland Dental und Technik GmbH u. Co. KG, Pforzheim, Deutschland) aufgenommen. Das folgende Bild zeigt beispielhaft die unbehandelte Zirconia-Oberfläche in 2500facher Vergrößerung.

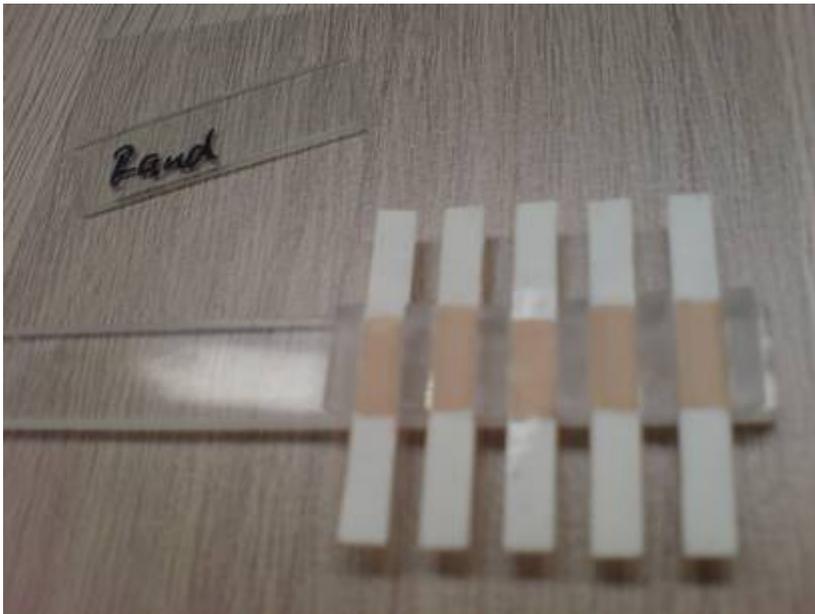


15. Abbildung Zirconia-TZP unbehandelt zeigt die kugelförmig verschmolzene Kristallstruktur, Vergrößerung 2500-fach

3.2.5 Aufbrennen der Keramiken

Nach erfolgter Oberflächenbearbeitung wurden alle Plättchen abgedampft mit dem Dampfstrahler (IP Clean, IP DENTAL DIVISION, Haimhausen, Deutschland) und mit Hilfe einer Lehre mit der entsprechenden Verblendkeramik verblendet. Die Verblendung hat die Maße 3 mm x 8 mm x 1 mm und wird genau mittig auf das Gerüstplättchen gebrannt. Es wurden jeweils ein Linerbrand, erster und zweiter Dentinbrand und ein Glanzbrand entsprechend den Herstellerangaben (Brenntabellen siehe Anhang) durchgeführt. Eine rechteckige Form wurde durch vorsichtiges Beschleifen mit Diamantscheiben vor dem Glanzbrand erzielt. Dabei wurden die Abmaße der

aufgebrannten Keramik mit einer Schublehre gemessen und gegebenenfalls durch vorsichtiges Beschleifen korrigiert. Um bei allen Untersuchungsreihen die gleiche Anzahl von Brennvorgängen durchzuführen, wurde auf den herstellerseitig vorgesehenen zweiten Linerbrand bei der Cercon® Ceram Kiss und bei der Triceram® verzichtet. Es wird vorausgesetzt, dass sich dieses Vorgehen nicht auf die Ergebnisse der Verbundfestigkeitsprüfung der betreffenden Keramiken auswirkt.



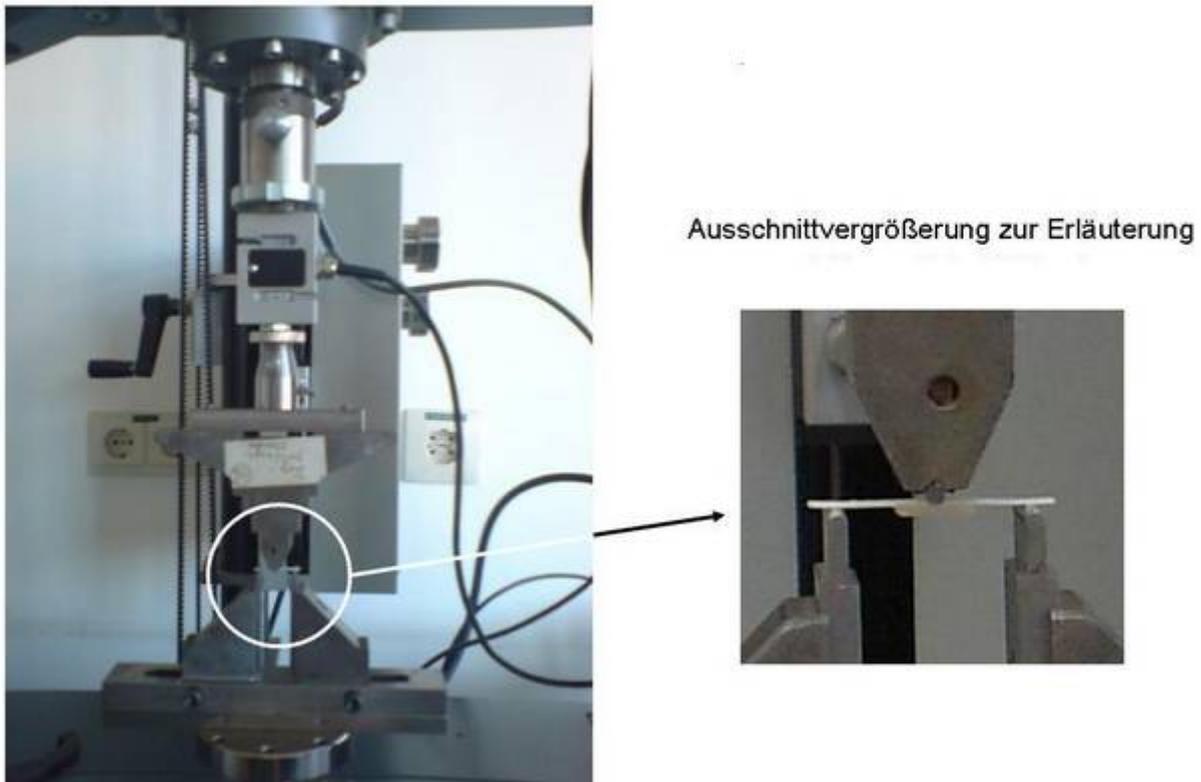
16. Abbildung: Proben in Lehre vor dem ersten Schichten der Dentinmasse



17. Abbildung: Proben auf Brennträger vor dem ersten Dentinbrand

3.2.6 Durchführung des 3-Punkt-Biege-Schertests nach Schwickerath

Für den 3-Punkt-Biege-Schertest nach Schwickerath wurden die Proben mithilfe der Universalprüfmaschine Zwick 10 belastet. Der an die Universalprüfmaschine angeschlossene Rechner ist gleichzeitig Steuereinheit für die Universalprüfmaschine. Das Gerät ermöglicht die konstante Belastung einer Probe mit definiertem Vorschub bis zum Versagen. Dabei werden die Proben mit der Verblendung vom Biegekolben abgewandter Seite mittig auf zwei Auflagen gelegt, die einen Abstand von 20 mm haben. Der Biegekolben hat eine rechtwinklige Spitze, die ebenfalls wie die Auflagen mit einem Radius von 1 mm verrundet ist.



18. Abbildung: Durchführung des 3-Punkt-Biege-Schertest nach Schwickerath

Der Biegekolben wird mit einer Geschwindigkeit von 1 mm pro Minute vorgeschoben. Dabei tritt eine Durchbiegung des Prüfkörpers mit einer Scherkraft zwischen dem Gerüstmaterial und der Verblendkeramik auf. Die zur Durchbiegung des Prüfkörpers notwendige Kraft (Prüfkraft) steigt an bis es zum Ablösen der Verblendkeramik kommt und die Kraft plötzlich abfällt. Ein Kraftabfall von 15%, der auf dem angeschlossenen

Computer (Programm TestXpert 9.0) zu messen war, wurde als Kriterium für die Ablösung der Keramik gewählt. Die Kraft in Newton (N), die zum Ablösen der Keramik notwendig ist, wird als Bruchkraft bezeichnet. Um einen vorzeitigen Abbruch der Prüfung vor dem tatsächlichen Lösen des Verbunds Zirconia-TZP zur Verblendkeramik zu vermeiden, wurde erst oberhalb einer Prüfkraft von 4 N die Bruchkraft ermittelt. Beim Ende der Prüfung hatte sich bei weniger als 5% der Proben die Verblendkeramik augenscheinlich vom Gerüst gelöst.

3.2.7 Bestimmung der Verbundfestigkeit

Die Verbundfestigkeit ist von den geometrischen Abmaßen des Prüfkörpers und seinem Elastizitätsmodul (e-Modul) abhängig. Die Auflagenweite L kann für alle Versuche als konstant angesehen werden, da die Auflagen auf einen Abstand von 20 mm einzustellen sind. Die Breite b hat einen linearen Einfluss, das heißt Verdopplung der Breite führt zur Verdopplung der gemessenen Verbundfestigkeit. Nach Speicherung der Bruchkraftwerte im PC wurde, wie SCHWARZ et al. empfehlen, ein rechnerischer Ausgleich der tatsächlichen Prüfkörperbreite, die mit einer digitalen Schublehre gemessen wurde, vorgenommen (Schwarz, Lenz et al. 1988). Die Dicke d geht mit der 3. Potenz in das Ergebnis ein. Dies findet Berücksichtigung in dem Koeffizient k als Funktion von der Gerüstdicke d (mm) und dem Elastizitätsmodul e der Zirconia-TZP von $220 \text{ kN} / \text{mm}^2$. Die Dicke der Y-TZP Streifen wurde mit einem mechanischen Schnelltaster (Kroeplin Längenmessgeräte GmbH, Schlüchtern) gemessen und auf den nächstliegenden 1/100 Millimeter gerundet (Kappert, Riedling et al. 1985; Christel, Meunier et al. 1989). Die Berechnung der Verbundfestigkeit auf der Basis der Bruchkraft und des Multiplikators k sowie die Korrekturrechnung bezüglich der tatsächlichen Breite der Prüfkörper wurden mit dem nach dem Flussdiagramm gemäß ISO 9693 programmierten Statistikprogramm SSPS durchgeführt (Schwarz, Lenz et al. 1988; Anonymus 1998).

3.3 Statistik

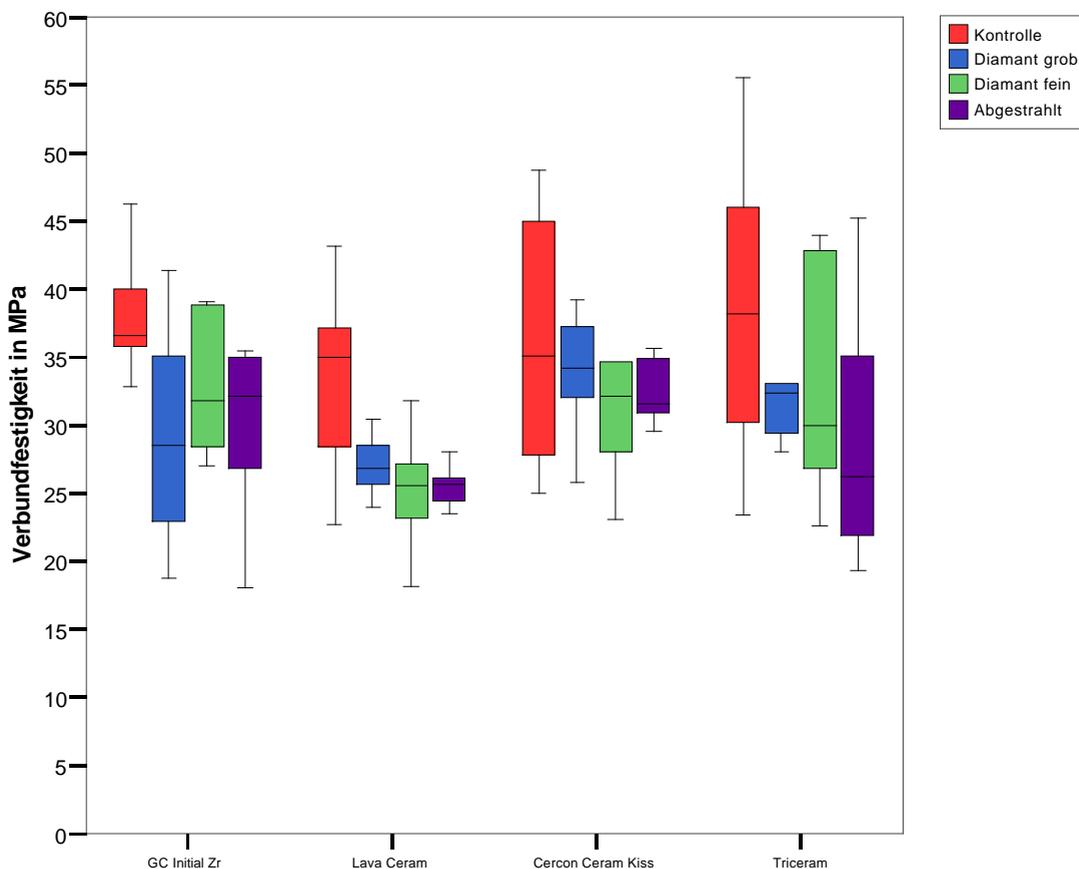
Die Berechnung der Statistik wurde mit dem Statistikprogramm SSPS 11.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA) durchgeführt. Als erstes wurden die einzelnen Prüfserien mit Hilfe des Grubbs-Tests auf das Vorliegen von Ausreißern untersucht und diese gegebenenfalls eliminiert (Grubbs and Beck 1972). Durch den Shapiro-Wilk-Test wurde anschließend überprüft, ob die Messwerte der Prüfserien eine Normalverteilung aufweisen (Shapiro and Wilk 1965). Zur Beschreibung der Messergebnisse wurde als Maß der zentralen Tendenz der Medianwert gewählt. Er hat im Gegensatz zum arithmetischen Mittel (Mittelwert), das häufig für die Beschreibung der zentralen Tendenz angegeben wird, den Vorteil, durch sehr hohe oder niedrige Einzelwerte innerhalb einer Messreihe nicht beeinflusst zu werden. Außerdem wird die Standardabweichung als Streuungsmaß und die jeweiligen Maximal- und Minimalwerte der Untersuchungsreihen angegeben (Sachs 2004). Das Signifikanzniveau α wurde mit 0,05 gewählt. Da einige Serien nach dem Shapiro-Wilk-Test nicht normal verteilt sind, konnten nur non-parametrische Tests zur vergleichenden Statistik herangezogen werden. Der Kruskal-Wallis-Test bietet sich zum Vergleich der einzelnen Testreihen an. Er ermöglicht den direkten Vergleich mehrerer Untersuchungsreihen auf signifikante Unterschiede der Messungen (Kruskal and Wallis 1953). Zusätzlich wurde der Mann-Whitney-Test zum paarweisen Vergleich einzelner Untersuchungsreihen durchgeführt (Mann and Whitney 1947).

4 Ergebnisse

4.1 Verbundfestigkeitsprüfung, beschreibende Statistik

Die Verbundfestigkeitswerte aller untersuchten Proben lagen zwischen 18,2 MPa und 58,1 MPa. Die höchsten Werte von durchschnittlich 35-38 MPa wurden jeweils in der Kontrollgruppe ohne jegliche Bearbeitung der Oberfläche des Zirconia-TZP erzielt. Eine mechanische Bearbeitung der Keramik führte bei diesem Versuch immer zur Verminderung der Verbundfestigkeit. Die Art der Oberflächenbearbeitung wirkte sich jedoch unterschiedlich auf die Stärke des Verbunds aus.

Der folgende Box-Plot zeigt die deskriptive Statistik der Verbundfestigkeitsprüfung.



19. Abbildung: Boxplot deskriptive Statistik Verbundfestigkeit,

Kontrolle: ohne weitere Oberflächenbehandlung

Diamant grob: mit Diamant mit 107-126 µm Korngröße beschliffen

Diamant fein: mit Diamant mit 40 µm Korngröße beschliffen

Abgestrahlt: mit Al₂O₃ der Korngröße 110 µm abgestrahlt

Die Abbildung gibt die erzielten Werte für die Verbundfestigkeit der untersuchten Proben wieder, nachdem deren Oberfläche durch verschiedene mechanische Verfahren angeraut und anschließend verblendet worden war.

Die GC Initial Zr Verblendkeramik erzielte unbehandelt eine Verbundfestigkeit von durchschnittlich 36,5 MPa. Eine vorherige Bearbeitung mit dem groben Diamanten senkte diesen Wert auf 28,5 MPa. Durch Anrauhung mit dem feinen Diamanten fiel die Verbundfestigkeit lediglich auf 31,8 MPa ab. Ein ähnlicher Wert von 32,2 MPa wurde durch vorheriges Abstrahlen der Y-TZP-Keramik erzielt.

Für die Lava Ceram Keramik konnten ähnliche Beobachtungen gemacht werden. Auch hier wurden die höchsten Werte für die Verbundfestigkeit in der unbehandelten Kontrollgruppe erreicht. Sie lagen bei durchschnittlich 35 MPa. Anrauhung mit dem groben Diamanten senkte diesen Durchschnittswert ab auf 26,8 MPa, die Verwendung des feinen Diamanten auf 25,5 MPa und das Abstrahlen auf 25,7 MPa. In dieser Gruppe führte die mechanische Bearbeitung der Keramik zu den höchsten Verlusten an Verbundfestigkeit im Vergleich zur Kontrollgruppe.

Die Verbundfestigkeit der Cercon Ceram Kiss Keramik wurde nicht so stark von der Oberflächenbearbeitung beeinflusst. Dennoch wurden auch hier die höchsten Werte mit durchschnittlich 35,1 MPa in der Kontrollgruppe erreicht. Allerdings liegt der Durchschnittswert der Gruppe Diamant grob nur wenig darunter mit 34,2 MPa.

Bei der Gruppe Diamant fein betrug er 32,2 MPa und bei der abgestrahlten Gruppe 31,6 MPa. Von allen untersuchten Keramiken ergaben sich bei der Cercon Ceram Kiss die geringsten Auswirkungen auf die Verbundfestigkeit durch vorherige mechanische Oberflächenmodifikation.

Bei der Triceram Keramik beeinflusste die mechanische Bearbeitung den Grad der Verbundfestigkeit dagegen wieder stärker. Die Kontrollgruppe zeigte die höchste Verbundfestigkeit mit durchschnittlich 38,1 MPa. Anrauhung durch den groben Diamanten senkte die durchschnittliche Verbundfestigkeit auf 32,3 MPa. Noch schwächer wurde der Verbund durch Bearbeitung mit dem feinen Diamanten (durchschnittlich 30 MPa) und den niedrigsten Wert erzielte die Gruppe, die abgestrahlt worden war mit durchschnittlich 26,3 MPa.

Auffällig an dieser Untersuchung war zum einen, dass die mechanische Bearbeitung immer zu einem schlechteren Verbund zwischen Keramik und Verblendkeramik führte im Vergleich zur unbehandelten Kontrollgruppe. Zum anderen konnte keine Konstanz der Veränderung der Verbundfestigkeit nach der Art der Bearbeitung beobachtet werden. Je nach Keramik beeinflusste die gewählte Methode der Anrauhung die Verbundfestigkeit unterschiedlich stark. Offenbar lässt sich keine einfache Beziehung im Sinne von je rauer desto besser oder schlechter der Verbund feststellen.

Die folgende Tabelle zeigt die genauen Verbundfestigkeitswerte für den oben gezeigten Box-Plot: den Medianwert, die Standardabweichung und die jeweiligen Maximal- und Minimalwerte.

Case Summaries

Verbundfestigkeit in MPa				
Keramik und Oberfläche	Median	Std. Deviation	Minimum	Maximum
GC Initial Zr Kontrolle	36,5	4,001	32,8	46,2
GC Initial Zr Diamant grob	28,5	8,132	18,8	41,3
GC Initial Zr Diamant fein	31,8	5,184	27,0	39,1
GC Initial Zr abgestrahlt	32,2	6,598	18,0	35,4
Lava Ceram Kontrolle	35,0	7,245	22,7	43,1
Lava Ceram Diamant grob	26,8	2,269	24,0	30,5
Lava Ceram Diamant fein	25,5	5,004	18,2	34,6
Lava Ceram abgestrahlt	25,7	2,060	23,5	30,1
Cercon Ceram Kiss Kontrolle	35,1	8,629	25,0	48,7
Cercon Ceram Kiss Diamant grob	34,2	4,454	25,7	39,2
Cercon Ceram Kiss Diamant fein	32,2	8,222	23,1	48,5
Cercon Ceram Kiss abgestrahlt	31,6	2,282	29,6	35,6
Triceram Kontrolle	38,1	10,528	23,4	55,6
Triceram Diamant grob	32,3	6,637	28,0	47,6
Triceram Diamant fein	30,0	8,236	22,6	43,9
Triceram abgestrahlt	26,3	12,623	19,3	58,1

20. Tabelle Mittelwerte, Standardabweichung und Extremwerte

Bei Betrachtung der Standardabweichung im Einzelnen fällt auf, dass die Streuung für die Triceram Keramik mit Werten von 6,637 (Diamant grob) bis 12,623 (abgestrahlt) am höchsten ist. Die Streuung der Messwerte der Lava Ceram dagegen am niedrigsten. Die Standardabweichung liegt hier zwischen 2,060 (abgestrahlt) und 7,245 (Kontrolle). Die Streuung der Messwerte der GC Initial Zr liegt je nach Bearbeitung zwischen 4,001

(Kontrolle) und 8,132 (Diamant grob). Die Cercon Ceram Kiss zeigt eine größere Streuung für die Kontrollgruppe und die Gruppe Diamant fein mit 8,629 beziehungsweise 8,222 und nur wenig Streuung bei den Oberflächenmodifikationen abgestrahlt (2,282) und Diamant grob (4,454).

4.1.1 Verbundfestigkeitsprüfung, vergleichende Statistik

Bei einigen Prüfserien ergab der Grubbs-Test das Vorliegen von Ausreißern. Diese wurden in folgenden statistischen Berechnungen nicht berücksichtigt und sind in den Prüfprotokollen im Anhang markiert. Bei wenigen Untersuchungsreihen (GC Initial Zr Diamant fein ($p=0,026$), GC Initial Zr abgestrahlt ($p=0,019$) und Triceram Diamant grob($p=0,008$)) ergab der Shapiro-Wilk-Test keine Normalverteilung der Messwerte ($p<0,05$).

4.1.2 Vergleich innerhalb der Kontrollgruppe

Da bei allen Verblendkeramiken die Kontrollgruppen die höchsten Verbundfestigkeitswerte hatten, wurde durch den Kruskal-Wallis-Test getestet, ob ein signifikanter Unterschied innerhalb der Kontrollserien besteht. Da hier der p-Wert mit 0,0518 größer als 0,05 ist und somit keine signifikanten Unterschiede innerhalb aller Kontrollserien bestehen, erübrigen sich weitere Vergleiche zwischen den einzelnen Verblendkeramiken. Der Einfluss der Oberflächenbearbeitung auf die einzelnen Verblendkeramiken wird im Folgenden erläutert.

4.1.3 Einfluss der Oberflächenbearbeitung, GC Initial Zr

Der Kruskal-Wallis-Test ergibt einen p-Wert von 0,029 innerhalb der verschiedenen Oberflächenmodifikationen. Daraus ergeben sich folgende signifikante Unterschiede. Die Verbundfestigkeiten von Y-TZP und GC Initial Zr sind nach dem Mann-Whitney-Test signifikant schlechter, wenn die Gerüste mit groben Diamanten bearbeitet oder mit Al_2O_3 abgestrahlt wurden. Die Bearbeitung mit feinen Diamanten zeigt keinen signifikant schlechteren Verbund.

Kontrolle gegen Testserie	p-Wert nach Mann-Whitney
Diamant fein	0,113 > 0,05 keine Signifikanz
Diamant grob	0,028 < 0,05 Signifikanz
Al ₂ O ₃ abgestrahlt	0,001 < 0,05 Signifikanz

21. Tabelle Signifikanztest nach Mann-Whitney für GC Initial Zr (Mann and Whitney 1947)

4.1.4 Einfluss der Oberflächenbearbeitung, Lava Ceram®

Der Kruskal-Wallis-Test ergibt einen p-Wert von 0,047 innerhalb der verschiedenen Oberflächenmodifikationen. Die daraus im Mann-Whitney-Test folgenden signifikanten Unterschiede lauten: die Verbundfestigkeit von Y-TZP und Lava Ceram® sind signifikant schlechter, wenn die Gerüste mit feinen Diamanten bearbeitet oder abstrahlt wurden. Die Bearbeitung mit groben Diamanten zeigt keinen signifikanten Unterschied.

Kontrolle gegen Testserie	p-Wert nach Mann-Whitney
Diamant fein	0,031 < 0,05 Signifikanz
Diamant grob	0,079 > 0,05 keine Signifikanz
Al ₂ O ₃ abgestrahlt	0,040 < 0,05 Signifikanz

22. Tabelle Signifikanztest nach Mann-Whitney für Lava Ceram® (Mann and Whitney 1947)

4.1.5 Einfluss der Oberflächenbearbeitung Cercon Ceram Kiss und Triceram

Der Kruskal-Wallis-Test ergibt bei beiden Gruppen einen p-Wert größer als 0,05, was keine signifikanten Unterschiede in der Verbundfestigkeit je nach Oberflächenbearbeitung zeigt. Es ist allerdings davon auszugehen, dass auch hier die Bearbeitung der Oberfläche keinen Vorteil bringt, unabhängig davon, ob mit Al₂O₃ abgestrahlt oder mit einem rotierenden diamantierten Schleifer bearbeitet wurde.

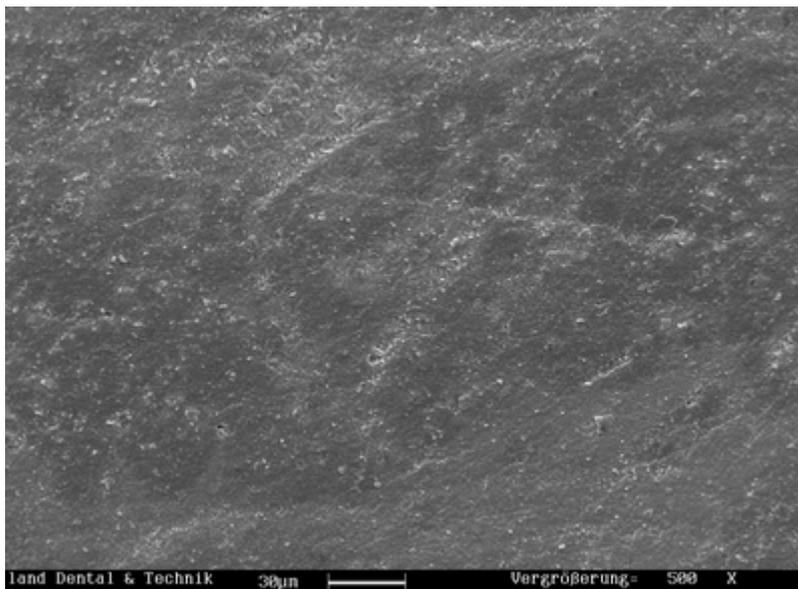
Verblendkeramik	p-Wert nach Kruskal-Wallis
Cercon Ceram Kiss	0,619 > 0,05 keine Signifikanz
Triceram	0,195 > 0,05 keine Signifikanz
GC Initial Zr	0,029 < 0,05 Signifikanz
Lava Ceram®	0,047 < 0,05 Signifikanz

23. Tabelle Signifikanztest nach Kruskal-Wallis

4.1.6 Einfluss der Oberflächenbearbeitung, Visuelle Unterschiede

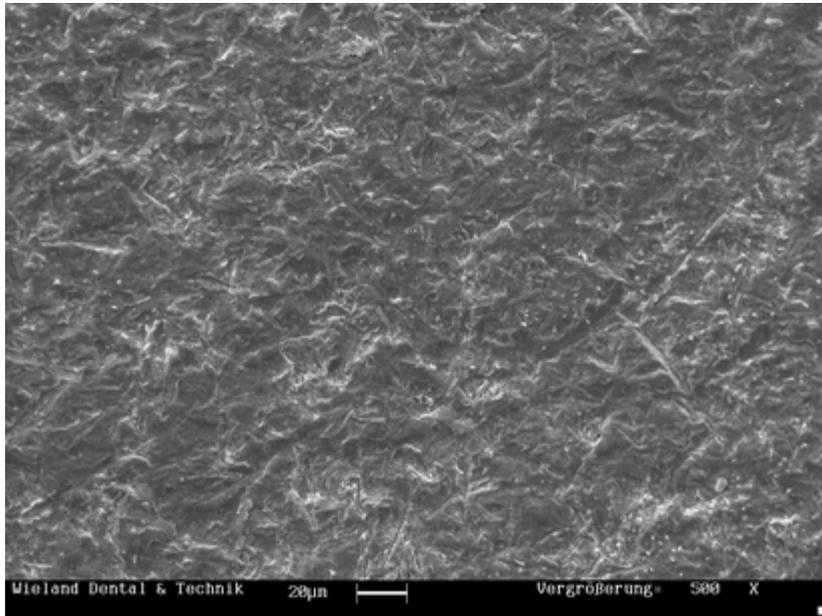
Visuell lassen sich die Proben vor dem Verblenden deutlich unterscheiden. Bei der Kontrollgruppe war ein leichter Glanz auf der Oberfläche zu erkennen. Die mit Al_2O_3 gestrahlte Oberfläche zeigte ein mattes Erscheinungsbild. Die beiden mit diamantierten Schleifern bearbeiteten Oberflächen wiesen deutliche Bearbeitungsspuren in Form von Rillen in Probenlängsrichtung auf. Die weitere Betrachtung im Rasterelektronenmikroskop mit 500facher Vergrößerung verdeutlicht diese Unterschiede.

Das erste Bild zeigt das Zirconia-TZP-Gerüst ohne Bearbeitung.

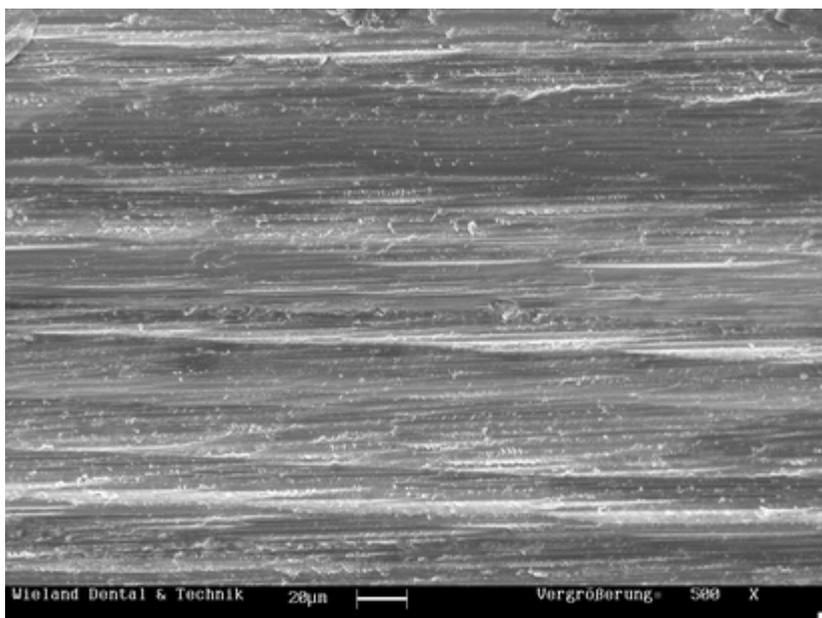


24. Abbildung Kontrolle Zirconia-TZP, Vergrößerung 500fach

Die weiteren Bilder zeigen die unterschiedliche Anrauhung durch Bearbeitung. Als erstes ist die mit Al_2O_3 abgestrahlte Probe dargestellt, dann die durch feinen Diamanten bearbeitete und zum Schluss die durch groben Diamanten bearbeitete Probe. Alle Bilder sind bei 500facher Vergrößerung aufgenommen.

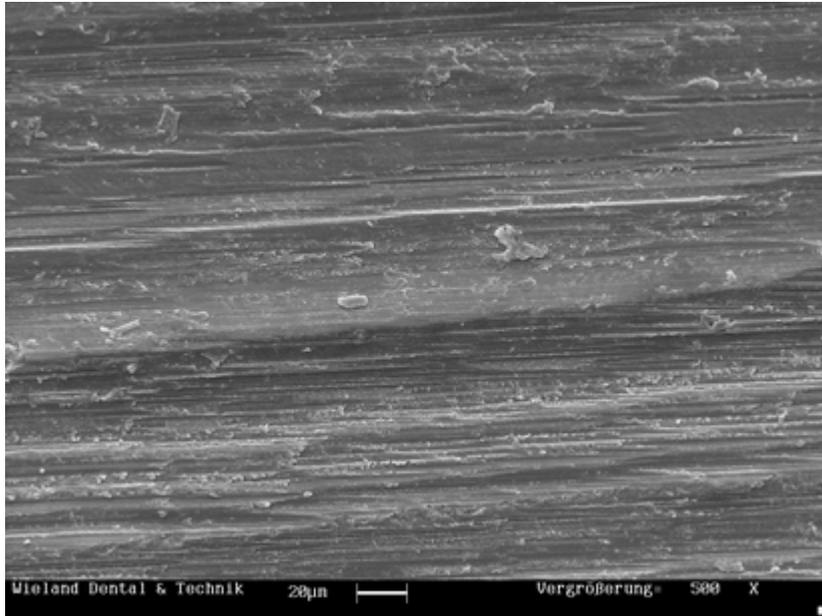


25. Abbildung Zirconia-TZP Al_2O_3 -abgestrahlt: netzartige gleichmäßige Struktur, Vergrößerung 500fach
Das Abstrahlen der Zirconia-TZP-Keramik mit Al_2O_3 zeigt eine gleichmäßige netzartige Struktur bei 500facher Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop. Mit bloßem Auge wurde die Oberfläche von glänzend zu mattiert verändert.



26. Abbildung Zirconia mit feinem Diamanten bearbeitet: feine Riefen mit unterschiedlicher Tiefe in Längsrichtung, Vergrößerung 500fach

Die Bearbeitung mit feinen Diamanten zeigt im Rasterelektronenmikroskop bei 500facher Vergrößerung deutliche Riefen mit unterschiedlicher Tiefe in Längsrichtung. Die Riefen sind gleichmäßig verteilt und sind auch mit bloßem Auge zu erkennen.



27. Abbildung Zirconia-TZP mit groben Diamanten bearbeitet: grobe Riefen unterschiedlichen Ausmaßes in Längsrichtung, Vergrößerung 500fach

Bei der Bearbeitung mit groben Diamanten werden im Rasterelektronenmikroskop bei 500facher Vergrößerung grobe Riefen unterschiedlichen Ausmaßes in Längsrichtung deutlich. Die Oberfläche ist auch mit bloßem Auge leicht als bearbeitet zu erkennen.

4.2 Rauigkeitsmessungen

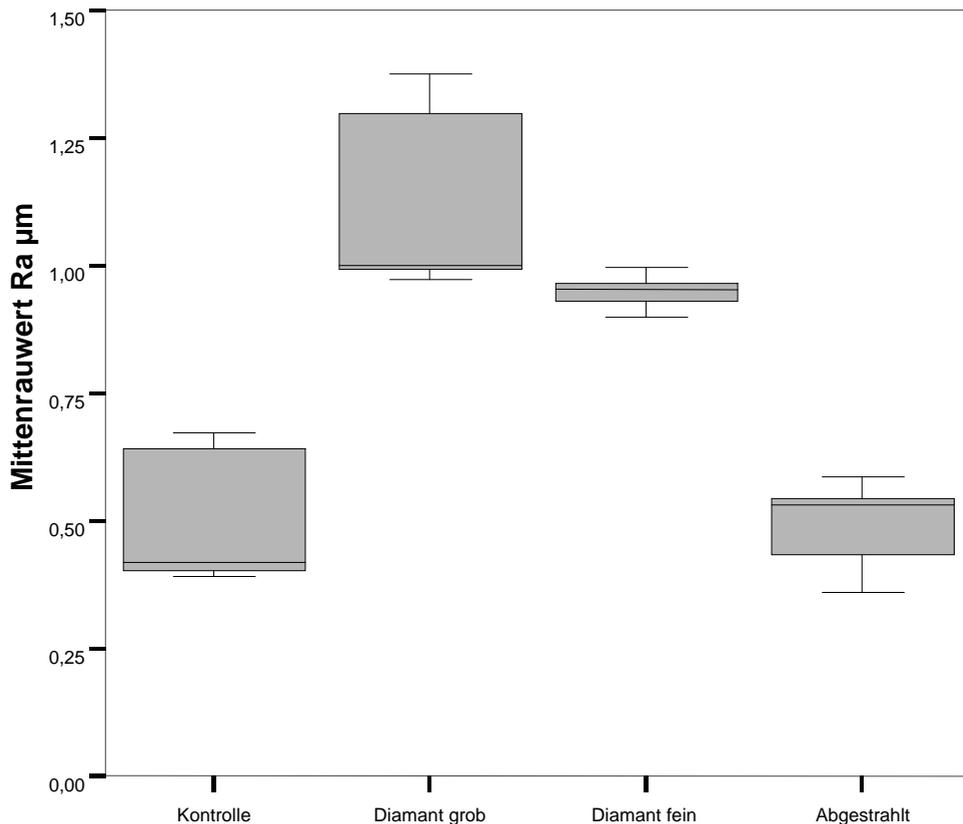
Der Shapiro-Wilk-Test zeigt nur für die verschiedenen Testreihen für die Mittenrauwerte (Ra) der Kontrollgruppe eine Nicht-Normalverteilung an ($p < 0,05$). Die bearbeiteten Testreihen zeigen mit $p > 0,05$ eine Normalverteilung.

		Shapiro-Wilk		
Oberfläche		Statistic	Df	P
Mittenrauwert Ra	Kontrolle	,774	5	,049
	Diamant grob	,781	5	,057
	Diamant fein	,997	5	,998
	Abgestrahlt	,923	5	,548
Mittlere Rautiefe Rz	Kontrolle	,888	5	,346
	Diamant grob	,855	5	,210
	Diamant fein	,915	5	,495
	Abgestrahlt	,910	5	,466

28. Tabelle Normalverteilungstest Shapiro-Wilk

Durch den daraufhin angewendeten Kruskal-Wallis Test wird deutlich, dass signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Testreihen bestehen ($p < 0,05$, im Anhang). Deutlich werden die Unterschiede im Signifikanztest nach Mann-Whitney. So bestehen sowohl bei der Diamant-grob-Gruppe als auch bei der Diamant-fein-Gruppe signifikante Unterschiede in den Mittenrauwerten ($p < 0,05$) im Vergleich zur Kontrollgruppe. Zusätzlich sind auch signifikante Unterschiede zwischen grobem und feinem Diamant zu erkennen ($p < 0,05$). Signifikante Unterschiede für die Rauigkeitswerte der Al_2O_3 abgestrahlten Gruppe im Vergleich zur Kontrolle konnten nicht nachgewiesen werden ($p > 0,05$).

Die unterschiedliche mechanische Bearbeitung der Y-TZP zeigt nach Vermessung mit dem Perthometer deutliche Unterschiede im Rauheitsprofil. Die folgenden Box-Plots zeigen die Mittenrauwerte Ra der Versuchsreihen mit jeweiligem Medianwert.

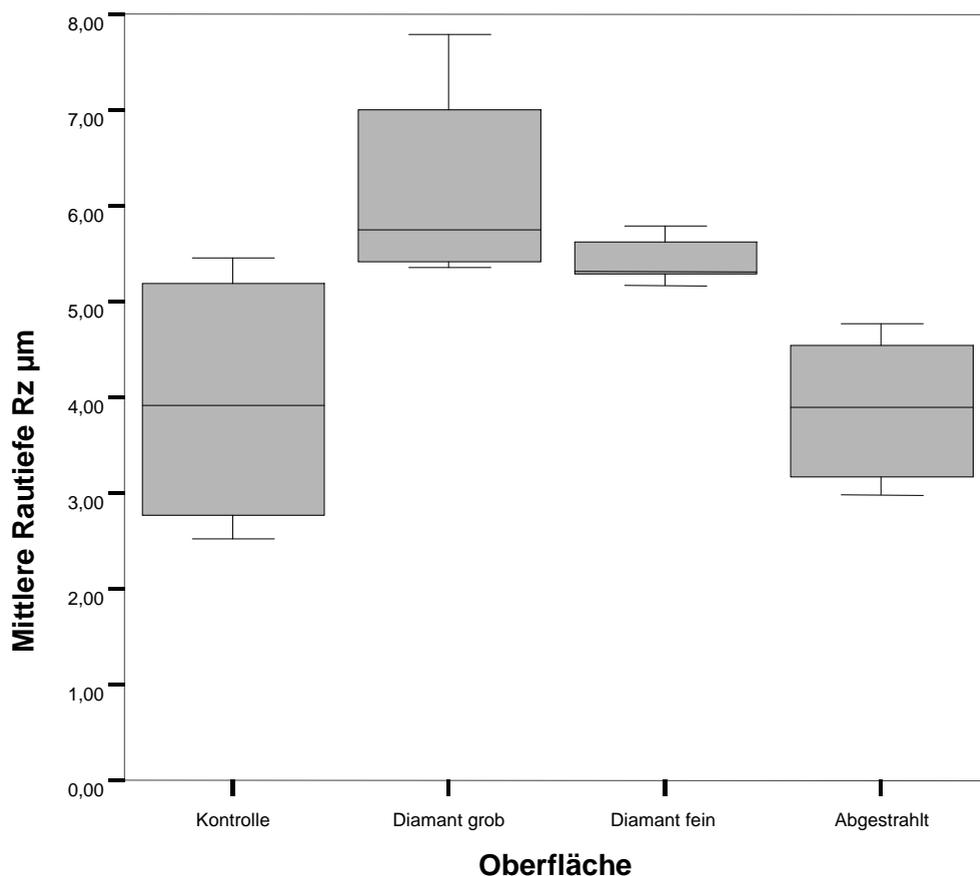


29. Mittenrauwerte Ra der verschiedenen Oberflächenbearbeitungen

Zu erkennen ist, dass die Anraugung durch groben Diamanten mit mehr als dem doppelten Mittenrauwert ($1,001 \mu\text{m}$) im Vergleich zur Kontrollgruppe ($0,420 \mu\text{m}$) die höchsten Werte zeigt. Die Standardabweichung beider Probengruppen ist relativ hoch mit Diamant grob $0,19$ und Kontrolle $0,14$ und deutet auf keine gleichmäßigen Rautiefen hin. Die unerwarteten ungleichmäßigen Rautiefen bei der unbearbeiteten Kontrollgruppe sollten in weiteren Untersuchungen abgeklärt werden. Der Unterschied zwischen der Bearbeitung mit groben ($1,001 \mu\text{m}$) und feinen ($0,953 \mu\text{m}$) Diamanten ist allerdings anhand des Mittenrauwertes kaum nachzuweisen, wobei der feine Diamant gleichmäßigere Rautiefen hervorruft. Dies ist anhand der Standardabweichung von Diamant grob $0,19$ und Diamant fein $0,04$ zu erkennen. Das Abstrahlen der Zirconia-

TZP mit Korund erhöht die Mittenrauwerte im Vergleich zur unbearbeiteten Kontrollgruppe nur geringfügig mit 0,531 μm Rautiefe. Die Standardabweichung von 0,09 deutet auf ein gleichmäßiges Profil hin.

Die folgenden Box-Plots verdeutlichen die mittleren Rautiefen Rz der einzelnen Oberflächenmodifikationen mit den jeweiligen Medianwerten.



30. Mittlere Rautiefe Rz der verschiedenen Oberflächenbearbeitungen

Die Werte der mittleren Rautiefe zeigen nur geringe Abweichungen innerhalb der verschiedenen Oberflächenbearbeitungen der Zirconia. Die Tendenz ist die gleiche wie bei den Mittenrauwerten. So sind die Profile der Diamantbearbeitungen mit Medianwerten von 5,760 μm für grob und 5,320 μm für fein tiefer als die der abgestrahlten Proben mit 3,890 μm . Die Kontrollgruppe ist mit einer durchschnittlichen mittleren Rautiefe von 3,920 μm zwar glatter als die mit Diamanten bearbeiteten Gruppen, aber sogar minimal rauer als die sandgestrahlten Proben. Die Streuung der

Werte ist bei der abgestrahlten Gruppe allerdings kleiner und somit ist das Profil gleichmäßiger.

5 Diskussion

5.1 Diskussion der Prüfmethode

Der Biegeschertest nach Schwickerath wird seit 1980 erfolgreich zum Testen der Verbundfestigkeit für den Metall-Keramik-Verbund verwendet. Die verwendeten Prüfkörper nach Schwickerath bestanden aus einfachen geometrischen Formen, wodurch restaurationsbedingte Fertigungsprobleme entfielen und eine Vergleichbarkeit auch mit Werten aus der Literatur möglich ist. So sind die in dieser Arbeit erreichten Verbundfestigkeitswerte (von 25,5 MPa bis 38,1 MPa) mit denen hochgoldhaltiger Legierungen (26,6 MPa bis 39,2 MPa nach LENZ et al.) direkt vergleichbar und entsprechen der Vorgabe der ISO-Norm von einem Mittelwert von mehr als 25 MPa (Lenz, Schwartz et al. 1995). Diese Prüfmethode ist aufgrund des E-Moduls der Zirconia-TZP von 220 GPa, was dem E-Modul einer Kobalt-Chrom-Legierung entspricht, auch für den Y-TZP-Verblendkeramik-Verbund geeignet, wie BANASIAK et al. 2005 untersuchten (Banasiak, Chu et al. 2005).

Auch neuere Untersuchungen von BEUER et al, in denen vergleichende Verbundtests durchgeführt wurden, zeigten, dass der Schwickerath-Test für die Verbundfestigkeitsprüfung von Zirconia die geeignete Methode ist (Beuer and Sorensen 2008).

GEHRE et al. stellen hingegen in Bezug auf die Übertragbarkeit auf die klinische Anwendung heraus, dass eine vollkeramische Krone ein komplexes System darstellt, das aus zwei parallel verlaufenden Schichten besteht, aus Gerüst- und Verblendkeramik (Gehre 1996). Bei der Methode der vorliegenden Studie konnten durch die fehlende vollständige Verblendung des Gerüsts und die dadurch ausbleibende stabilisierende Wirkung der Verblendkeramik, die Bedingungen, wie sie in der klinischen Anwendung vorkommen, nicht umgesetzt werden (Gehre 1996). Die gemessenen Verbundfestigkeitswerte können daher nur bedingt in die klinische Situation übertragen werden.

Die Verbundfestigkeit eines prothetischen Ersatzes ist nach CLAUS et al. vermutlich größer (Claus 1980). Aus dem Bereich des keramisch verblendeten Zahnersatzes mit Gerüsten aus hochgoldhaltigen Legierungen ist jedoch eine unbestrittene Sicherheit in der klinischen Anwendung hinsichtlich der Haltbarkeit der keramischen Verblendungen bekannt (Coornaert, Adriaens et al. 1984; Moffa, Jenkins

et al. 1984; Kerschbaum 1998). Angesichts der Tatsache, dass hochgoldhaltige Legierungen im 3-Punkt-Biege-Schertest nach Schwickerath im Allgemeinen eine hohe Haftung der Keramik zeigen, welche die in der einschlägigen Norm geforderten 25 MPa deutlich übersteigen, kann ungeachtet der oben genannten Einwände von einer Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die klinische Anwendbarkeit ausgegangen werden (Böning and Walter 1991; Kraft and Stender 1995; Lenz, Schwartz et al. 1995; Al Mutawa, Sato et al. 2000).

5.2 Fehlerdiskussion

Die Abmessungen der individuell hergestellten Prüfkörper für den 3-Punkt-Biege-Schertest nach Schwickerath variieren. Die Dicke der Y-TZP-Plättchen, die laut Norm zwischen 0,45 und 0,55 mm liegen soll, hat dabei besondere Bedeutung, da sie in der dritten Potenz in die Berechnung des Flächenträgheitsmoments des Prüfkörpers eingeht. Dieses wiederum ist für die Berechnung der Biegesteifigkeit des Prüfkörpers zusammen mit dem E-Modul wichtig (Schwarz, Lenz et al. 1988).

Ein Fehler in der Dicke des Prüfkörpers verändert die Berechnung der Verbundfestigkeit zwischen Gerüst und Verblendung merklich (Kappert, Riedling et al. 1988). Um diesen Fehler zu minimieren, wurde jedes der industriell hergestellten Plättchen nachträglich einzeln mit einer Schublehre mit digitaler Anzeige auf 1/100 mm genau vermessen. Ein Ablesefehler für die Ermittlung des Faktors k durch Verwendung des entsprechenden Diagramms wurde durch ein speziell programmiertes Computerprogramm ausgeschlossen. Der trotz allem angenommene Ablesefehler von 0,1 mm hinsichtlich der Dicke des Zirconiaplättchens würde jedoch nur zu einer vergleichsweise geringen Abweichung des Faktors k und der Verbundfestigkeit führen.

Die Breite der Prüfkörper wurde in gleicher Weise einzeln vermessen und mit der von SCHWARZ et al. angegebenen Korrekturrechnung in die Berechnung einbezogen, da auch sie einen verhältnismäßig großen, wenn auch nur linearen Einfluss auf die Verbundfestigkeit der Verblendkeramiken hat (Schwarz, Lenz et al. 1988).

Weiterhin ist die keramische Verblendung bei der Fehleranalyse zu betrachten, da gerade beim individuellen manuellen Aufbrennen der Keramik von Differenzen ausgegangen werden muss. Um reproduzierbare Ergebnisse auch nach der Schrumpfung der Keramik zu erhalten, wurde eine um 0,1 mm überdimensionierte

Lehre angefertigt. Auf diese Weise war es möglich, die Ausmaße der Keramik nahezu exakt zu brennen. Vor dem Glanzbrand wurde dies durch Nachmessen mit einer digitalen Schublehre mit einer Genauigkeit von 1/100 mm überprüft und gegebenenfalls angepasst. Ein Fehler aufgrund nicht exakter Abmessungen der aufgebrannten Keramik ist demnach als sehr gering zu erwarten.

Um Fehlerquellen beim Verblenden zu vermeiden, wurde ein vollautomatischer programmierbarer Keramikbrennofen verwendet, der zuvor kalibriert wurde. Man darf davon ausgehen, dass die Brennvorgänge reproduzierbar durchlaufen wurden. Dentale Brennöfen weisen innerhalb der Brennkammer Brenntemperaturgradienten auf und, ungeachtet der Kalibrierung ist mit einer gewissen Schwankung der tatsächlichen Brenntemperatur zu rechnen. LINDEMANN und PAARSCH wiesen nach, dass dentale Brennöfen die Maximaltemperatur um bis zu 97,5°C über-, aber je nach Fabrikat auch bis zu 14,8°C unterschreiten können (Lindemann 2001; Paarsch 2002). Angesichts derartiger Temperaturschwankungen ist, auch wenn sämtliche keramischen Brennprozesse in dem gleichen Brennofen durchgeführt wurden, mit einem erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse beziehungsweise mit einem entsprechendem Fehler zu rechnen. Es sind in der Literatur keine vergleichenden Untersuchungen bekannt, die diesen Einfluss der unvermeidlichen Brenntemperaturschwankungen innerhalb eines Brennofens auf die Verbundfestigkeit behandeln. Da jedoch jeder Prüfkörper insgesamt vier Brennvorgänge durchlaufen hat, kann angenommen werden, dass über die verschiedenen Brände ein Ausgleich stattfand und der Fehler innerhalb der vorliegenden Untersuchung durch die möglicherweise ungenaue Brennführung des dentalen Brennofens gering bleibt.

5.3 Diskussion der Rauigkeitsmessungen

Der Mittenrauwert Ra ist in vergleichbaren Untersuchungen der generell verwendete Parameter für die Beschreibung der Oberflächenrauigkeit (Curtis, Wright et al. 2006). Aus diesem Grund wird in der weiteren Diskussion ausschließlich auf den Mittenrauwert Ra Bezug genommen. Bei den in dieser Arbeit vorliegenden Rauigkeitsmessungen sind unerwartete Werte gemessen worden. Obwohl durch die mechanische Bearbeitung eine größere Rauigkeit zu erwarten wäre, hat das Abstrahlen mit Edelmetall (Al₂O₃) mit einer Korngröße von 110 µm die Oberfläche der Zirconiaplättchen nicht signifikant angeraut. Die Profiltiefe wurde laut Mittenrauwert Ra von 0,4 µm auf 0,5 µm verändert,

wobei sich die Standardabweichung von 0,14 zu 0,09 verringert hat. Das Profil der abgestrahlten Proben ist demnach gleichmäßiger. CURTIS et al. hat ebenfalls keine Erhöhung des Parameters Ra zwischen unbehandelten und mit Al_2O_3 unterschiedlicher Korngröße gestrahltem Zirconia-TZP gemessen (Curtis, Wright et al. 2006). Dabei liegen die absoluten Werte mit $0,21\ \mu\text{m}$ für unbehandeltes und $0,18\ \mu\text{m}$ für mit $110\ \mu\text{m}$ Al_2O_3 gestrahltem Zirconia-TZP, also mit der gleichen Körnung wie sie in der vorliegenden Untersuchung verwendet wurde, deutlich niedriger. Die unterschiedliche Herstellung der Prüfkörper kann hierfür verantwortlich sein. Da CURTIS et al. die Lava-Prüfkörper ihrer Untersuchung vollständig vorbereitet vom Hersteller 3M ESPE geliefert bekamen, kann darüber nur spekuliert werden. Es ist möglich, dass hier das Verfahren des Herstellers ursächlich ist. Im Gegensatz zum Zirconia-TZP der vorliegenden Untersuchung handelt es sich beim Lava-System um ein Verfahren, in dem vorgesinterte Zirconia-TZP Rohlinge gefräst und anschließend durch einen entsprechenden Brennvorgang dichtgesintert werden.

Die Ergebnisse der Rauigkeitsuntersuchungen der vorliegenden Studie stehen im Kontrast zu der Erhöhung der Oberflächenrauigkeit von Oberflächen von in der Zahntechnik verwendeten Metallen. So gibt PAPADOPUOLOS nach dem Abstrahlen von Titanoberflächen mit einem Al_2O_3 der Korngröße von $110\ \mu\text{m}$, was der Korngröße des in der vorliegenden Studie verwendeten Al_2O_3 entspricht, eine mittlere Oberflächenrauigkeit von $0,87\ \mu\text{m}$ an (Papadopoulos, Tsetsekou et al. 1999). Aufgrund der bei Metall deutlich höheren Oberflächenrauigkeit nach dem Sandstrahlen, ist zu diskutieren, warum die Oberfläche des Zirconia-TZP eine verhältnismäßig geringere Oberflächenrauigkeit nach gleicher Bearbeitung aufweist. Hier könnte die große Härte der Zirconia-TZP einen Einfluss haben. Sie liegt mit einer Vickershärte von 1200 HV um den Faktor 10 höher als die Härte des von PAPADOPUOLOS verwendeten Titans (Brauner 1992). Es ist davon auszugehen, dass die Al_2O_3 -Partikel deshalb nicht in der Lage sind, eine entsprechende Aufrauung der Oberfläche des Zirconia-TZPs zu bewirken.

Das Anrauen durch diamantierte gekühlte Schleifkörper hat die zu erwartende erhöhte Rauigkeit von $\text{Ra } 1,0\ \mu\text{m}$ gezeigt. Die Unterschiede in der Rauigkeit der mit unterschiedlicher Körnung bearbeiteten Proben sind nicht groß aber signifikant. Für die Bearbeitung mit groben Diamanten ergab sich ein Medianwert von Ra von $1,001\ \mu\text{m}$ und für die Bearbeitung mit feinen Diamanten ein Medianwert von $\text{Ra } 0,953\ \mu\text{m}$. Die

erhöhte Rauigkeit im Gegensatz zu den Ergebnissen für die unbehandelte Kontrollgruppe und mit Al_2O_3 gestrahlten Oberflächen ist signifikant. Für die signifikant höhere Rauigkeit im Vergleich zu den mit Al_2O_3 gestrahlten Oberflächen kann die erheblich höhere Vickershärte des Diamanten von etwa 10000 HV, mit denen die Schleifkörper belegt sind, ursächlich sein (Domke 1994). Außerdem ist davon auszugehen, dass durch den manuellen Schleifvorgang erheblich mehr Druck auf die in die Oberfläche des Zirconia-TZP eindringenden Diamantkörner ausgeübt wird, als durch den Luftdruck der Al_2O_3 -Körner beim Abstrahlen.

Mit Wasserkühlung haben CURTIS et al. bei einer Diamantkörnung von 20-40 μm einen mittleren Ra-Wert von 1,17 μm gemessen. In der vorliegenden Studie wurde für die Diamantkörnung von 40 μm , die mit der Körnung von CURTIS et al. vergleichbar ist, mit Ra 0,953 μm eine geringere Rauigkeit gemessen. Es ist denkbar, dass für diese Differenzen das manuelle Verfahren des Beschleifens ursächlich ist, das prinzipbedingt nicht vergleichbar sein kann, andererseits jedoch die Realität in den dentalen Laboratorien widerspiegelt.

Für die gröbere Körnung geben CURTIS et al. Ra mit 2,25 μm an. Die Körnung der Diamantbelegung des von CURTIS et al. verwendeten Schleifers ist dabei mit 125-150 μm etwas gröber als die 107-126 μm der vorliegenden Untersuchung (Curtis, Wright et al. 2006). Dieser Umstand kann im Zusammenspiel mit der oben diskutierten Nicht-Vergleichbarkeit des manuellen Vorgehens beim Beschleifen für die in der vorliegenden Studie mit einem mittleren Ra von 1,001 μm deutlich geringere Rauigkeit verantwortlich sein.

5.4 Diskussion der Ergebnisse der Verbundfestigkeitsprüfung

Für den Biegescherversuch nach Schwickerath wird als Mindestanforderung zur Verbundfestigkeit zwischen Metall und Keramik eine Biegescherkraft von 25 MPa (DIN EN ISO 9693 2000) gefordert (Kappert 1989). Die in der vorliegenden Studie erreichten Werte liegen mit Medianwerten von 25,5 MPa bis 38,1 MPa und damit für alle Testreihen über dem geforderten Maß. Die verschiedenen untersuchten Verblendkeramiken zeigen bei Vergleich jeweils gleicher Oberflächenbearbeitung untereinander keine signifikanten Unterschiede in ihrer Verbundfestigkeit und sind somit hinsichtlich ihrer Haftfestigkeit auf dem Zirconia-TZP als gleichwertig zu betrachten.

Es wird angenommen, dass eine Anpassung des Wärmeausdehnungsverhaltens der Verblendkeramiken, wie es aus der herkömmlichen Metallkeramik bekannt ist, auch für einen guten Verbund von keramisch verblendetem Zirconia-TZP notwendig ist. Die Anpassung der WAK-Werte der untersuchten Keramiken ist angesichts der guten Verbundfestigkeit aller getesteten Keramiken mit Werten von $8,6 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ für die Triceram, $9,5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ für die Cercon Ceram Kiss, $9,7 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ für die GC Initial und $10,0 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ für die Lava Ceram ähnlich gut gelungen. Sie liegt bei allen Verblendkeramiken leicht unter dem WAK-Wert der Zirconia-TZP ($10,8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$).

Im Vergleich zu BANASIAK et al., die für die Keramiken Ceramo PFZ, Cerabien CZR und Cercon Ceram S im 3-Punkt-Biege-Schertest nach Schwickerath allgemein eine Verbundfestigkeit von etwa 25 MPa auf Cercon Zirconia-TZP angeben, liegen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung höher. Dies ist insbesondere bezüglich der Cercon Ceram S auffällig, da davon auszugehen ist, dass diese mit der Cercon Ceram Kiss der vorliegenden Untersuchung weitgehend identisch ist. Eine Diskussion dieser Unterschiede wird neben der nur sehr allgemeinen Angabe der gemessenen Verbundfestigkeiten zusätzlich dadurch erschwert, dass BANASIAK et al. unterschiedliche mechanische Vorbereitungen der Oberfläche des Zirconia-TZP vorgenommen haben, diese aber nicht beschreiben. Es kann jedoch als sehr wahrscheinlich angenommen werden, dass neben unvermeidbaren Unterschieden bei der manuellen Herstellung der Prüfkörper sowie der unterschiedlichen verwendeten Zirconia-TZP-Gerüstmaterialien der keramischen Brennprozess, beziehungsweise der verwendete Brennofen, einen erheblichen Einfluss auf die unterschiedlichen Ergebnisse hat. Auf diese Problematik ist im Kapitel Fehlerdiskussion eingegangen worden. Es betrifft hier jedoch weniger Brenntemperaturschwankungen innerhalb der Brennkammer eines Ofens, als vielmehr Unterschiede der tatsächlichen Temperatur in der Brennkammer der verschiedenen in den verglichenen Untersuchungen verwendeten Öfen. Aus dem Bereich herkömmlicher Metall-Keramik-Verbunde ist bekannt, dass insbesondere ein Unterschreiten der optimalen Brenntemperatur zu geringerer Verbundfestigkeit führt (Rosi 1995). Es ist demnach denkbar, dass die geringeren von BANASIAK et al. gemessenen Verbundfestigkeiten auf eine niedrigere Brenntemperatur des verwendeten Brennofens zurückzuführen sind.

BEUER et al. geben für Zeno Zirconia-TZP mit der dazugehörigen Verblendkeramik Zirox im Schwickerath-Test eine Verbundfestigkeit von 57 MPa an

(Beuer and Sorensen 2008). Diese Ergebnisse liegen auffällig höher als die in der vorliegenden Studie gemessenen Verbundfestigkeiten. Wieder könnten die leicht differierenden Materialien und der verwendete Ofen dafür verantwortlich sein. Es fällt jedoch auf, dass BEUER et al. die Verblendkeramik nur in einer Länge von 5 mm aufgebrannt haben. Der deutliche Unterschied zu den im Schwickerath-Test geforderten 8 mm Länge der Verblendkeramik lässt annehmen, dass die Ergebnisse von BEUER et al. generell nicht mit anderen Ergebnissen von Verbundfestigkeitstests im 3-Punkt-Biegeschertest nach Schwickerath vergleichbar sind.

KVAM et al. geben im Schwickerath-Test für die Vita-Titankeramik eine Verbundfestigkeit von 39 MPa und für die Cerabien Zirconia von 24 MPa an. Dies liegt innerhalb der Bandbreite der Ergebnisse der vorliegenden Studie. Dabei ist jedoch zu beachten, dass diese Keramiken in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt wurden. Die Verbundfestigkeit der Cercon Ceram S wird von KVAM et al. mit 35 MPa angegeben. Unter erneuter Annahme, dass diese Keramik im Wesentlichen der Cercon Ceram Kiss der vorliegenden Studie gleicht, ist dieses Ergebnis von KVAM et al. vergleichbar mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung auf unbehandeltem Zirconia-TZP mit einem Medianwert von 35,1 MPa. Dabei ist jedoch erneut zu berücksichtigen, dass KVAM et al. keine Angaben über die mechanische Vorbereitung der Oberfläche des Zirconia-TZP machen (Kvam, Tibbals et al. 2006).

5.4.1.1 Kontrollgruppe

Unklar ist, warum die jeweiligen Kontrollgruppen ohne mechanische Bearbeitung der Oberfläche des Zirconia-TZP die höchsten Verbundfestigkeitswerte zeigen. Es wird im Folgenden angenommen, dass die Theorie über das Zustandekommen des Verbunds Metall und Keramik auch auf den Verbund Verblendkeramik zu Zirconia-TZP übertragbar ist. Hierbei wird zwischen einem chemischen Verbund durch Sauerstoffbrückenbildung zwischen dem Siliziumoxid der Keramik und oxidierten Metallatomen in der Oberfläche des Metalls ausgegangen (Vickery and Badinelli 1968). Zusätzlich findet ein Aufschumpfen der Keramik auf das Metall statt, da der WAK-Wert der Keramik etwas unterhalb des WAK-Werts des Metalls eingestellt wird. Ferner kommt es zu einem mechanischen Verbund, indem sich die Keramik an Rauigkeiten oder Unterschnitte der durch die Al_2O_3 -Abstrahlung aufgeraute Metalloberfläche verankert beziehungsweise diese umfließt.

Da bei der Kontrollgruppe keine Aufrauung der Oberfläche des Zirconia-TZPs durchgeführt wurde und die plane Oberfläche der Prüfkörper kein hohes Maß an Aufschumpfung der Verblendkeramik erwarten lässt, kann nur die chemische Komponente für den guten Verbund, insbesondere der Serien der Kontrollgruppe verantwortlich sein. Wie THOLEY et al. diskutieren, kann ein chemischer Verbund von Verblendkeramik zu Zirconia-TZP durch eine Verbindung der Metalloxide des Zirconia-TZP und der Verblendkeramik zustande kommen. Die Autoren haben sogar auf Hochglanz polierten Y-TZP-Oberflächen einen exzellenten Verbund zwischen Zirconia-TZP und der Verblendkeramik Vita VM 9 festgestellt, was durch Untersuchungen von ABOUSHELIB et al. bestätigt wird. Hier wird das Gerüst gleichmäßig bedeckt und zeigt keine Fehlstellen in der Verbundzone. Dies weist auf eine Haftung hin, die nicht nur mechanisch sondern vielmehr auch chemisch unterstützt sein muss (Aboushelib, Kleverlaan et al. 2006; Tholey and Stephan 2007).

Anhand von durch SUTTOR veröffentlichte Aufnahmen der Verbundzone von Zirconia-TZP und Verblendkeramik unter dem hochauflösenden Tunnel-Rasterelektronenmikroskop ist ein chemischer Verbund der beiden Keramiken als höchstwahrscheinlich anzunehmen (Suttor 2007). Insoweit ist die Annahme von STEPHAN, der Verbund zwischen Zirconia-TZP und der Verblendkeramik sei aufgrund des inerten Verhaltens des Zirconia-TZP rein mechanisch, mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht korrekt (Stephan 1996). Der Einsatz an tetragonalem Zirkoniumdioxid zur Erhöhung der Bruchzähigkeit, Festigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen thermische Belastungen von dentalen Verblendkeramiken, wie er von MORENA et al. diskutiert wird, spricht ebenfalls dafür, dass sich das Zirconia-TZP chemisch mit den Siliziumoxiden einer dentalen Verblendkeramik verbindet (Morena, Lockwood et al. 1985).

5.4.1.2 Sandstrahlen

In der vorliegenden Untersuchung setzt die Bearbeitung durch Sandstrahlen die Verbundfestigkeit herab, wobei die Unterschiede zum Teil statistische Signifikanz aufweisen. Der Einfluss des Sandstrahlens ist laut HILL nicht signifikant auf die Verbundfestigkeit von Zirconia-TZP zur Verblendkeramik (Hill 2007). Dabei ist zu beachten, dass HILL andere Verblendkeramiken untersucht hat (e.max Ceram, Lava Ceram und Vita VM 9). Außerdem benutzt HILL einen nicht näher beschriebenen

Verbundtest, der unter Umständen nicht sensitiv genug ist, die in der vorliegenden Studie gefundenen, signifikanten Erniedrigungen der Verbundfestigkeit nach Al_2O_3 -Abstrahlung herauszuarbeiten. Die hohe Sensitivität für verbundbeeinflussende Faktoren werden von SCHREINER als Stärke des Schwickerath-Tests hervorgehoben (Schreiner 1985; Marx 1986). Der Sandstrahlprozess und seine Einwirkungen auf Dentallegierungen wurden hinreichend untersucht. Es kommt neben der Reinigung, Anrauhung und Oberflächenvergrößerung auch zu Veränderungen im Metallgefüge durch lokalisierte Energiespitzen (Tiller, Magnus et al. 1985).

Unter Annahme der Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf das Zirconia-TZP wäre in der vorliegenden Untersuchung theoretisch eine Erhöhung der Verbundfestigkeit durch Erhöhung der Rauigkeit des Zirconia-TZP mit der Folge einer Erhöhung der mechanischen Verbindung zu erwarten gewesen. Es lies sich durch das Abstrahlen mit Al_2O_3 jedoch keine Erhöhung der Rauigkeit erzielen, wie oben bereits eingehend diskutiert wurde. In der Folge sollte erwartet werden, dass die Verbundfestigkeit der Verblendkeramiken auf Al_2O_3 gestrahltem Zirconia-TZP zumindest auf dem Niveau der Kontrollgruppe liegen. Tatsächlich lagen die Ergebnisse der Serien mit Al_2O_3 -Abstrahlung jedoch zum Teil signifikant niedriger als die der Kontrollgruppe. Die folgenden Untersuchungen geben Hinweise auf mögliche Ursachen, wobei jeweils Edelmetall vergleichbarer Korngröße verwendet wurde.

In der Untersuchung von GUAZZATO et al. wurde der Einfluss von Oberflächenmodifikationen auf die Biegefestigkeit des Y-TZPs und deren Phasenumwandlung betrachtet. So erhöht das Sandstrahlen mit $110\ \mu\text{m}\ \text{Al}_2\text{O}_3$ die Biegefestigkeit des Y-TZP signifikant, was auf die Erhöhung des monoklinen Anteils an der Oberfläche des Y-TZPs auf 9,5% zurückzuführen ist. Dadurch entsteht eine sogenannte Kompressionsschicht in der Oberfläche durch den erhöhten Volumenbedarf der monoklinen Modifikation des Y-TZPs (Guazzato, Quach et al. 2005). KOSMAC et al. untersuchten 1999 den Effekt des Sandstrahlens auf die Phasenumwandlung der Zirconia-TZP und verwendeten ebenfalls Al_2O_3 der Korngröße $110\ \mu\text{m}$. Ihr Ergebnis zeigt in der abgestrahlten Zirconia-TZP-Oberfläche den höchsten Anteil monokliner Kristalle. So wurde der monokline Anteil von nahezu 0% der Kontrollgruppe auf bis zu 15,2% durch Sandstrahlen erhöht. Diese Transformationsvorgänge konnten bis zu einer Tiefe von $0,33\ \mu\text{m}$ nachgewiesen werden (Kosmac, Oblak et al. 1999). Zu ähnlichen

Ergebnissen bezüglich der Phasentransformation infolge des Abstrahlens mit $110\ \mu\text{m}$ Al_2O_3 kommen auch CURTIS et al. (Curtis, Wright et al. 2006).

Die Erhöhung der Biegefestigkeit des Zirconia-TZP als Folge des Al_2O_3 -Abstrahlens wird zusätzlich von KOSMAC et al. und PAPANAGIOTOU et al. beschrieben (Kosmac, Oblak et al. 1999; Papanagiotou, Morgano et al. 2006). Dabei wird besonders die Umwandlung der Oberfläche des Zirconia-TZPs von der tetragonalen in die monokline Form als vermindern für den Verbund zur Verblendkeramik angesehen. Es wird davon ausgegangen, dass aufgrund eines differierenden Wärmeausdehnungsverhaltens des monoklinen Zirconia-TZPs Spannungen in die Verbundzone eingebracht werden (Tholey and Stephan 2007). Wird das Zirconia-TZP allerdings nach mechanischer Bearbeitung erneut einer Hitzebehandlung ausgesetzt, sinkt der durch das Abstrahlen erreichte monokline Anteil von 9,5% auf nahezu 0% wieder ab. Die Biegefestigkeit der untersuchten Zirconia-TZP-Proben fiel dann durch Hitzebehandlung ebenfalls wieder ab. Nach GUAZZATO et al. sind die Temperaturen, die beim Aufbrennen der Verblendkeramiken, beziehungsweise bei zwei Dentinbränden entstehen, bereits ausreichend für die Umwandlung in tetragonales Y-TZP (Kosmac, Oblak et al. 2000; Guazzato, Quach et al. 2005).

Aufgrund dieser Ergebnisse ist nicht davon auszugehen, dass die Umwandlung der Oberfläche des Zirconia-TZP von der tetragonalen in die monokline Form oder die damit einhergehende Erhöhung der Biegefestigkeit des Zirconia-TZP für die geringere Verbundfestigkeit der Verblendkeramik der vorliegenden Studie verantwortlich ist.

In der vorliegenden Untersuchung wurden zwei weitere Brände (Liner, Glanzbrand) vorgenommen, was auf jeden Fall die Umwandlung von monoklin zu tetragonal wieder umkehrt. Als mögliche Ursache für die Herabsetzung der Verbundfestigkeit der Verblendkeramiken auf dem Al_2O_3 gestrahlten Zirconia-TZP kommen durch den Sandstrahlprozess in die Oberfläche des Zirconia-TZP und damit in die Verbundzone zur Verblendkeramik eingebrachte Defekte wie Brüche, Risse, Kratzer oder oberflächliche Sprünge, wie sie von KOSMAC et al., PAPANAGIOTOU et al. und GUAZZATO et al. beschrieben werden, in Frage (Kosmac, Oblak et al. 2000; Guazzato, Quach et al. 2005; Papanagiotou, Morgano et al. 2006). Auf der entsprechenden rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme der vorliegenden Studie sind ebenfalls Defekte auf der Oberfläche des Zirconia-TZP und damit im Bereich der späteren Kontaktzone zur Verblendkeramik erkennbar, wie sie von den genannten Autoren

beschrieben werden. Für die Annahme einer durch mechanische Beschädigung der Oberfläche des Zirconia-TZP induzierte Verringerung der Verbundfestigkeit der Verblendkeramik spricht auch der Umstand, dass durch den Al_2O_3 Abstrahlprozess der Weibull-Modul herabgesetzt wird. Durch einen kleineren Weibull-Modul wird die Wahrscheinlichkeit des Versagens der Zirconia-TZP durch eine inhomogenere Struktur erklärt. Dieser Effekt deutet auf eine Beschädigung des Zirconia-TZP durch den Al_2O_3 Abstrahlprozess hin (Kosmac, Oblak et al. 1999; Guazzato, Quach et al. 2005; Papanagiotou, Morgano et al. 2006). Da über eine mögliche Reversibilität der Beschädigungen respektive der Erniedrigung des Weibull-Moduls durch den keramischen Brennprozess keine Angaben gemacht werden, darf davon ausgegangen werden, dass die Beschädigungen nach dem Aufbrennen der Verblendkeramik noch vorhanden sind und den Verbund beeinträchtigen.

Untersuchungen von ABOUSHELIB et al. zeigen auf rasterelektronenmikroskopischen Bildern der Kontaktzone von mit $110\ \mu\text{m}$ Al_2O_3 gestrahlten Zirconia-TZP (Cercon, Vita-Zahnfabrik) mit Cercon Ceram S strukturelle Defekte. Dies deutet zusätzlich auf die Richtigkeit der Annahme hin, dass die oberflächlichen Defekte der mit Al_2O_3 gestrahlten Oberfläche des Zirconia-TZP für den herabgesetzten Verbund zur Verblendkeramik verantwortlich sind (Aboushelib, de Jager et al. 2005; Aboushelib, Kleverlaan et al. 2006). Weiterhin ist zu überlegen, ob durch das Abstrahlen die oberste Schicht der Zirconia-TZP durch Al_2O_3 verunreinigt wurde. Allerdings wurden die Proben nach dem Abstrahlen mit Ethanol gereinigt und abgedampft.

5.4.1.3 *Bearbeitung mit Diamanten*

Die Oberflächenrauigkeit des Zirconia-TZP in der vorliegenden Untersuchung wurde durch Beschleifen mit Diamanten signifikant erhöht. Die mechanische Haftung sollte sich infolge der Vergrößerung der Retentionsfläche verbessern und somit sollte von einer erhöhten Verbundfestigkeit ausgegangen werden können. Dennoch reduzierte sich die Verbundfestigkeit zur Verblendkeramik analog zur Serie mit Al_2O_3 Abstrahlung im Vergleich zur Kontrollserie mit statistischer Signifikanz.

In der Literatur sind keine vergleichbaren Untersuchungen verfügbar. Näherungsweise vergleichbar ist eine Untersuchung von FAHMI et al.. Hier wurde für die Verblendkeramik Vita VM 9 auf Zirconia-TZP der Firma Vita-Zahnfabrik im Vergleich zu unbehandeltem Zirconia-TZP eine Erhöhung der Verbundfestigkeit angegeben, wenn

die Oberfläche mit einer diamantierten Schleifscheibe (120er grit) vorbereitet wurde. Allerdings wurde auch hier von den Autoren ein nicht näher beschriebener, nicht standardisierter Test zur Bestimmung der Verbundfestigkeit angewendet, was neben den differierenden Materialien und Schleifkörpern für die im Gegensatz zur vorliegenden Studie unterschiedlichen Ergebnisse verantwortlich sein kann (Fahmi, Pober et al. 2007).

Mögliche Ursachen für den signifikant schlechteren Verbund können in Anlehnung an die in der Literatur diskutierten Effekte des Abstrahlens des Zirconia-TZP mit Al_2O_3 gesucht werden. Eine Umwandlung der Oberfläche des Zirconia-TZP von der tetragonalen in die monokline Form mit einer Erhöhung der Biegefestigkeit durch oberflächliche Kompressionseffekte (siehe oben) tritt ebenfalls beim Beschleifen der Oberfläche des Zirconia-TZP auf, wie Untersuchungen zeigen, die nicht aus dem Bereich der dentalen Anwendung des Werkstoffs stammen (Gupta 1980; Green 1983). Darüber hinaus werden von LUTHARDT et al. Defekte in der Oberfläche von Zirconia-TZP in Form von Rissen und Brüchen als Resultat des Bearbeitens mit einem Diamanten mit einer gemischten Körnung bei der CAD/CAM-Bearbeitung beschrieben (Luthardt, Holzhüter et al. 2004). Ergebnisse der Untersuchungen von CURTIS et al., GUAZZATO et al. und KOSMAC et al., die sich ebenfalls mit dem Beschleifen der Zirconia-TZP Oberflächen beschäftigen, sind auf die vorliegende Untersuchung entsprechend der Abstrahlung mit Al_2O_3 direkt übertragbar. Auch hier lagen die Körnungen mit 20-40 μm und 107-126 beziehungsweise 125-150 μm im Bereich der in der vorliegenden Studie verwendeten Diamantkörnungen. Außerdem wurde bei den zitierten Untersuchungen ebenfalls mit Wasserkühlung geschliffen (Kosmac, Oblak et al. 1999; Guazzato, Quach et al. 2005; Curtis, Wright et al. 2006). Die durch das Beschleifen mit Diamanten bedingten Vorgänge der Umwandlung der oberflächlichen Schicht des Zirconia-TZPs von der tetragonalen in die monokline Form mit Erhöhung der Biegefestigkeit sind wiederum unter dem Einfluss von Temperaturen, wie sie beim keramischen Brennvorgang vorliegen, reversibel (Guazzato, Quach et al. 2005). Es ist demnach analog zur Diskussion des Einflusses des Sandstrahlens nicht wahrscheinlich, dass sich die geringere Verbundfestigkeit der Diamant-Serien auf die offensichtlich reversible Phasenumwandlung oder Erhöhung der Biegefestigkeit des Zirconia-TZP zurückführen lässt. Ebenso wie beim Abstrahlen mit Al_2O_3 wird das Einbringen von Defekten in die Oberfläche des Zirconia-TZPs und damit in die Verbundzone zur

Verblendkeramik beschrieben und für die geringere Verbundfestigkeit dieser Serien verantwortlich gemacht. Die entsprechenden rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der vorliegenden Untersuchung lassen dies ebenfalls erkennen (Kosmac, Oblak et al. 2000; Guazzato, Quach et al. 2005). Auch für das Beschleifen mit Diamanten wird eine Erniedrigung des Weibull-Moduls angegeben, was auf eine Beschädigung des Zirconia-TZPs hindeutet. Über die Umkehrbarkeit dieser Herabsetzung des Weibull-Moduls durch den keramischen Brennprozess werden keine Angaben gemacht. Es darf deshalb auch hier angenommen werden, dass die Beschädigungen oder Defekte auch nach dem Aufbrennen der Verblendkeramik bestehen bleiben und den Verbund beeinträchtigen.

Angesichts dieser Ergebnisse, bei denen eine signifikante Erhöhung der Oberflächenrauigkeit des Zirconia-TZP tendenziell eine Schwächung der Verbundfestigkeit bewirkt, erscheint ein rein mechanischer Verbund zwischen dem Zirconia-TZP und der Verblendkeramik, wie er von STEPHAN angenommen wird, eher unwahrscheinlich (Stephan 1996).

6 Schlussfolgerung

Die üblichen Methoden der Oberflächenbearbeitung in der Dentaltechnik durch Abstrahlen oder Anrauen mit Diamanten dienen im Metall-Keramik-Verbund der Oberflächenvergrößerung und somit der besseren mechanischen Haftung. In der vorliegenden Arbeit konnten durch Abstrahlen mit $110\ \mu\text{m}\ \text{Al}_2\text{O}_3$ oder durch Anschleifen mit gängigen dentalen Diamanten (fein $40\ \mu\text{m}$, grob $107\text{-}126\ \mu\text{m}$) für Zirconia nicht die gleichen Rauigkeiten wie für dentale Legierungen erzielt werden.

So wird die Oberfläche durch die leichte Erhöhung der Oberflächenrauigkeit zwar nachweisbar größer, dennoch zeigte die Kontrollgruppe die höchsten Verbundfestigkeitswerte, die denen einer Edelmetalllegierung entsprechen.

Die Y-TZP-Keramik wird vermutlich in der durch die Bearbeitung entstandenen kompressiven Schicht in ihrer Kristallstruktur gestört, und es findet eine Umformung der tetragonalen in die monokline Struktur statt. Diese Phasenumwandlung wird durch die weiteren Brände wieder umgekehrt. Das vorerst entstandene monokline Zirconia ist um 4% größer als das tetragonale. Durch die Bearbeitung und spätere Erhitzung in weiteren Bränden entstehen durch die Volumenänderungen Mikrorisse an der Verbundzone. Diese Mikrorisse erzeugen Spannungen und reduzieren die Verbundfestigkeit zwischen Gerüst und Verblendung. Aus diesem Grund wäre von einer mechanischen Oberflächenbearbeitung des Y-TZP-Gerüsts vor dem Verblenden abzuraten.

Die unterschiedlichen handelsüblichen Verblendkeramiken verhalten sich ähnlich ohne signifikante Unterschiede und können daher als gleichwertig betrachtet werden.

Es bleibt für weitere Untersuchungen die Frage des chemischen Verbunds zwischen Y-TZP und Verblendkeramik offen.

7 Zusammenfassung

In der vorliegenden *In-vitro*-Untersuchung sollte der Einfluss verschiedener mechanischer Oberflächenmodifikationen des Zirconia-TZP-Gerüsts vor dem Verblenden mit entsprechender Verblendkeramik auf die Verbundfestigkeit untersucht werden. Es wurden die Verblendkeramiken GC Initial Zr, Lava Ceram, Cercon Ceram Kiss, und Triceram verwendet. Dafür wurden jeweils 10 Prüfkörper entweder sandgestrahlt, mit feinen Diamanten oder mit groben Diamanten angeraut. Eine Untersuchungsreihe ohne Bearbeitung der Oberfläche des Zirconia-TZP dient als Kontrollserie. Die angerauten Oberflächen wurden rasterelektronisch betrachtet und die angefertigten Rauigkeitsmessungen statistisch ausgewertet.

Die Bearbeitung mit groben Diamanten gibt die höchsten Rauigkeitswerte, danach folgten die feinen Diamanten. Die Bearbeitung durch Abstrahlen erhöht im Vergleich zur Kontrollgruppe die Rauigkeit der Oberfläche nur wenig. Nach dem Verblenden wurde der 3-Punkt-Biege-Schertest nach Schwickerath durchgeführt und statistisch ausgewertet. Nach Auswertung zeigt sich, dass keine der Oberflächenbearbeitungen eine Erhöhung der Verbundfestigkeit der Verblendkeramik bewirkt. Vielmehr wird die Verbundfestigkeit herabgesetzt, wobei die Verbundfestigkeitsverluste teilweise statistische Signifikanz aufweisen. Die jeweiligen unbehandelten Kontrollgruppen zeigen die höchsten Verbundfestigkeitswerte mit 35 MPa bis 38 MPa, was der Verbundfestigkeit einer hochgoldhaltigen Legierung mit Verblendkeramik entspricht. Das Sandstrahlen sowie das Bearbeiten mit rotierenden diamantierten Schleifern ändert die Kristallstruktur des Y-TZP. Es kommt zunächst zur Umwandlung der Oberfläche des Zirconia-TZP in die monokline Form. Durch die Temperaturen der keramischen Brennprozesse wird die Phasenumwandlung zwar wieder umgekehrt, aber der Verbund wird durch die entstandenen oberflächlichen Defekte wie Mikrorisse oder Spalten verschlechtert. Die Verluste an Verbundfestigkeit weisen teilweise statistische Signifikanz auf. Zwischen den untersuchten Verblendkeramiken besteht unabhängig, ob die Oberfläche des Zirconia-TZP mechanisch bearbeitet worden ist oder unbehandelt bleibt, kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Verbundfestigkeit.

Schlussfolgernd ist von der Bearbeitung der Zirconia-Gerüste vor dem Verblenden abzuraten, um den Haftverbund nicht zu gefährden. Zum Aufpassen auf die Stümpfe könnten im Ausnahmefall feine wassergekühlte Diamanten verwendet werden.

8 Summary

The influences of different mechanical modifications on the surface of Zirconia frames with regard to their bond strength have been investigated in this *in-vitro*-study. The modifications were carried out by either sandblasting or roughening with diamonds. Fine and rough water-cooled diamonds were used. All modifications were done as commonly found in dental laboratories. Each group contained 10 specimens. After the surface was modified, the specimens' surface structures were evaluated with a scanning electron microscope.

Treatment with the rough diamonds created the roughest surface followed by the finer diamonds. Sandblasting the specimens did not increase the roughness significantly compared to the unmodified control group. The following veneering ceramics have been examined comparatively: GC Initial Zr, Lava Ceram, Cercon Ceram Kiss and Triceram. After bonding the specimens, the 3 point bending test (Schwickerath) was carried out and the results analyzed. The test showed that none of the mechanical modifications improved bond strength, but actually reduced the bond between Zirconia and the veneering ceramics to a degree that is partially of statistic significance. The untreated control group of each different veneering ceramic exhibited the highest bond strength with values between 35 MPa and 38 MPa, which is comparable to the bond strength of precious metal alloy and veneering ceramic.

Modifications by sandblasting or rotating diamonds change the crystal structure of the Zirconia and initially cause the transformation from tetragonal to monoclinic crystals. This process is reversed again by high temperatures during the firing cycle, but bond strength deteriorates due to mechanical defects in the surface such as microcracks and fissures. The loss of bond strength is partially of statistic significance.

No significant differences were found between the different ceramic brands.

In conclusion it is not advisable to roughen the Zirconia surface before bonding with veneering ceramic. In exceptional cases there may be a possibility to use fine water-cooled diamonds.

9 Anhang

Brenntabellen für Degudent Cergo Press Keramikofen

GC Initial Zr	Linerbrand	Dentinbrand 1	Dentinbrand 2	Glanzbrand
Bereitschaftstemp. (°C)	450	450	450	480
Verschlusszeit (min.)	4	6	6	2
Trockenzeit (min.)	1	1	1	1
Anstiegsgeschwindigkeit (°C/min.)	55	45	45	45
Vakuumstart (°C)	450	450	450	-
Vakuumende (°C)	800	810	800	-
Vakuumgrenze (mmHg)	730	730	730	
Brenntemperatur (°C)	800	810	800	820
Verzögerung (min.)	1	1	1	-

31. Brenntabelle GC Initial Zr und Cergo Press Keramikofen

Lava Ceram	Linerbrand	Dentinbrand 1	Dentinbrand 2	Glanzbrand
Bereitschaftstemp. (°C)	450	450	450	480
Verschlusszeit (min.)	-	-	-	-
Trockenzeit (min.)	6	6	6	2
Anstiegsgeschwindigkeit (°C/min.)	45	45	45	45
Vakuumstart (°C)	450	450	450	-
Vakuumende (°C)	810	810	800	-
Vakuumgrenze (mmHg)	730	730	730	
Brenntemperatur (°C)	810	810	800	820
Verzögerung (min.)	1	1	1	-

32. Brenntabelle Lava Ceram und Cergo Press Keramikofen

Triceram	Linerbrand	Dentinbrand 1	Dentinbrand 2	Glanzbrand
Bereitschaftstemp. (°C)	500	500	500	500
Verschlusszeit (min.)	-	-	-	-
Trockenzeit (min.)	4	6	4	2
Anstiegsgeschwindigkeit (°C/min.)	65	55	55	55
Vakuumstart (°C)	500	500	500	-
Vakuumende (°C)	800	760	760	-
Vakuumgrenze (mmHg)	730	730	730	
Brenntemperatur (°C)	800	760	760	760
Verzögerung (min.)	1	1,5	1,5	1

33. Brenntabelle Triceram und Cergo Press Keramikofen

Cercon Ceram kiss	Linerbrand	Dentinbrand 1	Dentinbrand 2	Glanzbrand
Bereitschaftstemp. (°C)	575	450	450	450
Verschlusszeit (min.)	3	3	3	2
Trockenzeit (min.)	6	2	2	-
Anstiegsgeschwindigkeit (°C/min.)	55	55	55	55
Vakuumstart (°C)	575	450	450	-
Vakuumende (°C)	960	830	820	-
Vakuumgrenze (mmHg)	730	730	730	
Brenntemperatur (°C)	960	830	820	800
Verzögerung (min.)	1	1,5	1,5	1

34. Brenntabelle Cercon Ceram kiss und Cergo Press Keramikofen

Ergebnistabellen 3-Punkt-Biege-Schertest nach Schwickerath

Die Ausreißer, die anhand des Grubbs-Tests bestimmt und eliminiert wurden, wurden grau markiert.

Probe	Breite(mm)	Dicke(mm)	Bruchkraft (N)	Kommentar
1	3	0,5	8,9	GC Kontrolle
2	3,01	0,48	9,2	
3	3,02	0,45	8,2	
4	3,04	0,5	12,7	
5	2,95	0,47	5,3	
6	3,06	0,51	10,4	
7	2,96	0,51	9,7	
8	2,99	0,48	10	
9	3	0,46	8,3	
10	2,98	0,48	10,2	
1	3,03	0,47	5,6	GC grob
2	3,04	0,45	6,6	
3	3,14	0,48	7,3	
4	3,1	0,46	4,5	
5	3,01	0,47	8,5	
6	3,03	0,51	5,6	
7	3,05	0,44	9	
8	3,04	0,43	5,3	
9	3,09	0,45	7,8	
10	3,03	0,45	9,2	
1	3,01	0,5	10,6	GC fein
2	3,03	0,45	8,8	
3	3,03	0,5	10,1	
4	2,99	0,5	10,5	
5	3,07	0,52	8,1	
6	3,2	0,49	7,9	
7	3,03	0,48	7,2	
8	3,05	0,5	8,1	
9	3,03	0,49	7,3	
10	3	0,52	10	
1	3	0,47	8,5	GC abgestrahlt
2	3,02	0,47	8,5	
3	3,04	0,47	4,6	
4	3,01	0,48	7,8	
5	3,01	0,45	7,7	
6	3,09	0,5	8,3	
7	3,01	0,51	5,1	
8	3,02	0,45	6	
9	3,05	0,5	9,2	
10	3,09	0,47	8,8	

35. Ergebnistabellen 3-Punkt-Biege-Schertest nach Schwickerath für GC

Probe	Breite(mm)	Dicke(mm)	Bruchkraft(N)	
1	3,03	0,45	5,1	Lava Kontrolle
2	3,01	0,45	8,3	
3	3,06	0,45	9,8	
4	3,1	0,46	6,9	
5	3,03	0,44	13,8	
6	3,01	0,51	9,9	
7	2,93	0,43	5	
8	3,01	0,45	9,3	
9	3,06	0,46	8,6	
10	3,03	0,48	7,2	
1	3,07	0,47	7,5	Lava grob
2	2,99	0,49	6,7	
3	3,1	0,47	7,6	
4	3	0,49	6,7	
5	3,06	0,48	7,3	
6	3,06	0,46	6,2	
7	3,04	0,48	6,2	
8	3,06	0,48	7,1	
9	3,1	0,48	7,1	
10	2,97	0,49	6,2	
1	2,99	0,43	4,5	Lava fein
2	3,12	0,44	5,2	
3	3,02	0,44	5,5	
4	3,08	0,44	5,1	
5	3,05	0,46	6,4	
6	3,07	0,46	8,2	
7	3,1	0,5	5,1	
8	3,03	0,45	6	
9	3	0,44	6,8	
10	3,03	0,47	15,7	
1	3	0,46	6	Lava abgestrahlt
2	3,1	0,47	6,1	
3	3,1	0,47	6	
4	3,1	0,53	8,8	
5	3,09	0,48	6,5	
6	3,07	0,5	9,5	
7	3,02	0,48	7,6	
8	3,07	0,47	5,8	
9	3,12	0,48	6,7	
10	3,09	0,5	7,3	

36. Ergebnistabellen 3-Punkt-Biege-Schertest nach Schwickerath für Lava Ceram

Probe	Breite(mm)	Dicke(mm)	Bruchkraft(N)	
1	3,08	0,44	7,3	Kiss Kontrolle
2	3,04	0,49	9,5	
3	3,05	0,45	10,3	
4	3,06	0,48	6,4	
5	3,08	0,48	11,6	
6	3,02	0,49	6,6	
7	3,02	0,49	7,3	
8	3,09	0,48	12,6	
9	3,06	0,5	11,2	
10	3,11	0,47	8,6	
1	3,1	0,46	9,4	Kiss grob
2	3,09	0,48	10	
3	3,11	0,45	6,9	
4	3,18	0,5	7,4	
5	3	0,45	8,3	
6	3,03	0,45	11,9	
7	3,14	0,46	8,3	
8	3,06	0,43	7,1	
9	3,07	0,45	7,3	
10	3,03	0,46	8,7	
1	3,07	0,47	5,7	Kiss fein
2	3,09	0,46	7,9	
3	3,1	0,47	7	
4	3,06	0,48	8,5	
5	3,05	0,44	6,8	
6	3,1	0,43	10,3	
7	3,11	0,48	6,8	
8	3,01	0,45	6,9	
9	3,16	0,47	8,8	
10	3,08	0,43	9,9	
1	3,13	0,51	8,7	Kiss abgestrahlt
2	3,06	0,46	7,4	
3	3,11	0,47	7,9	
4	3,07	0,49	9,3	
5	3,07	0,45	8,1	
6	3,12	0,48	9,3	
7	3,08	0,47	8,1	
8	3,13	0,45	7,1	
9	3,06	0,46	7,3	
10	3,04	0,48	10,9	

37. Ergebnistabellen 3-Punkt-Biege-Schertest nach Schwickerath für Cercon Ceram
kiss

Probe	Breite(mm)	Dicke(mm)	Bruchkraft(N)	
1	3,02	0,42	6,9	Triceram Kontr.
2	2,97	0,44	6,4	
3	3,05	0,43	4,9	
4	3,04	0,46	12,3	
5	3,04	0,42	7,9	
6	3,14	0,43	9,9	
7	3,07	0,42	9,1	
8	3,11	0,45	8,5	
9	3,01	0,45	6,3	
10	2,98	0,45	12,3	
1	3,09	0,47	10,9	Triceram grob
2	3,04	0,47	7,9	
3	3,13	0,47	7,4	
4	3,04	0,48	7,7	
5	3,03	0,49	7,4	
6	3,07	0,47	8	
7	3,07	0,46	7,8	
8	3,07	0,48	7,2	
9	3,01	0,48	12	
10	3,04	0,48	8,4	
1	3,12	0,5	7,9	Triceram fein
2	3,01	0,5	7,3	
3	3,02	0,48	5,7	
4	3,1	0,48	11,4	
5	3	0,44	9,4	
6	2,98	0,5	8,2	
7	3,05	0,51	9,5	
8	3,05	0,51	6,8	
9	3,06	0,52	12,8	
10	3,03	0,49	7,8	
1	3,03	0,47	4,7	Triceram gestr.
2	3,05	0,47	6,9	
3	3,04	0,49	6	
4	3,03	0,45	7,5	
5	3,06	0,46	8,3	
6	3,05	0,47	11,1	
7	3,04	0,47	14,2	
8	3,07	0,47	5,4	
9	3,03	0,49	5,1	
10	3,03	0,48	6,2	

38. Ergebnistabellen 3-Punkt-Biege-Schertest nach Schwickerath für Triceram

	Mittenrauwert Ra	Mittlere Rautiefe Rz
Chi-Square	15,549	12,029
df	3	3
Asymp. Sig.	,001	,007

39. Kruskal-Wallis-Test für die unterschiedlichen Testreihen siehe Rauigkeitsmessungen

10 Literaturverzeichnis

- Aboushelib, M. N., H. de Jager, et al. (2005). "Microtensile bond strength of different components of core veneered all-ceramic restorations." Dent Mater **21**: 984-991.
- Aboushelib, M. N., C. J. Kleverlaan, et al. (2006). "Microtensile bond strength of different components of core veneered all-ceramic restorations Part II: Zirconia veneering ceramics." Dent Mater **22**: 857-863.
- Al Mutawa, N., T. Sato, et al. (2000). "A Study of the Bond Strength and Color of Ultralow-Fusing Porcelain." Int J of Prosthodontics **13**: 159-165.
- Anderson, M. and A. Oden (1993). "A new all-ceramic crown." Acta Odontol Scand(51): 59-64.
- Anonymus (1989). DIN 4762 Kenngrößen Oberflächenrauheit. Genf, International Organization for Standardization.
- Anonymus (1998). ISO 9693:1999 Metal-ceramic dental restorative systems. Genf, International Organization for Standardization.
- Anonymus (2003). DIN EN ISO 13485 Medizinprodukte-Qualitätsmanagementsysteme-Anforderungen für regulatorische Zwecke. Genf, International Organization for Standardization.
- Arieley, E. (1992). "Licht-, REM- und Mikrosondenanalyse an sieben metallkeramischen Systemen." Dtsch Zahnärztl Z **47**: 217-222.
- Baltzer, A. and V. Kaufmann-Jonian (2003). "Die Belastbarkeit von Vita In-Ceram." Quintessenz Zahntech **29**: 1318-1342.
- Banasiak, S. W., C. C.-Y. Chu, et al. (2005). Evaluation of ISO9693 Bond Test with Zirconia Ceramics.
- Beuer, F. (2007). {<http://www.zirkondioxid.de/index.php?id=16>}. München, Arbeitsgruppe Vollkeramik München.
- Beuer, F. and J. A. Sorensen (2008). Testing Methods to Determine the Shear-Bond-Strength of Veneering-Porcelain to Zirconia. München
Portland, OR, USA.
- Böning, K. and M. Walter (1991). "Metall-Keramik-Verbund von gegossenem Titan." Dtsch Zahnärztl Z **46**: 750-753.
- Brauner, H. (1992). "Titan als Dentalwerkstoff - eine Standortbestimmung." Quintessenz Zahntech **18**: 221-239.
- Breustedt, A. (1968). Geschichte und Entwicklung der zahnärztlichen Keramik. Zahnärztliche Keramik. A. Breustedt. Berlin, VEB Verlag Volk und Gesundheit.
- Breustedt, A. and E. Lenz (1978). Stomatologische Werkstoffkunde. Leipzig, Johann Ambrosius Barth Verlag.
- Büchel, K. (1971). "Die Vitadur-Vollporzellanbrücke." Quintessenz **8**: 67-72.
- Christel, P., A. Meunier, et al. (1988). "Biomechanical compatibility and design of ceramic implants for orthopaedic surgery. Bioceramics: material characteristics versus in vivo behavior." Ann NY Acad Sci **523**: 234-256.

- Christel, P., A. Meunier, et al. (1989). "Mechanical properties and short-term in-vivo evaluation of yttrium-oxide-partially-stabilized zirconia." J Biomed Mater Res **23**: 45-61.
- Claus, H. (1980). "Entwicklung der Metallkeramik." Zahnärztl Welt **89**: 36-39.
- Claus, H. (1980). "Werkstoffkundliche Grundlage der Dentalkeramik." Dent Lab **28**: 1743-1750.
- Claus, H. (1981). "Die Bedeutung des Leuzits für die Dentalkeramik." Zahnärztl Welt **90**: 44-46.
- Coornaert, J., P. Adriaens, et al. (1984). "Long-term clinical study of porcelain-fused-to-gold restorations." J Prosth Dent **51**: 338-342.
- Curtis, A. R., A. J. Wright, et al. (2006). "The influence of surface modification techniques on the performance of a Y-TZP dental ceramic." J Dent **34**: 195-206.
- Deng, Y., B. R. Lawn, et al. (2002). "Characterization of damage modes in dental ceramic bilayer structures." J Biomed Mater Res **63**: 137-145.
- Domke, W. (1994). Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. Berlin, Cornelsen Verlag.
- Eichner, K. and H. F. Kappert (1996). Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band I. Heidelberg, Hüthig.
- El Zohairy, A. A., A. J. De Gee, et al. (2004). "The influence of specimen attachment and dimension on microtensile strength." J Dent Res **83**: 420-424.
- Evans, A. G. and R. M. Cannon (1986). "Toughening of brittle solids by martensitic transformations." Acta Metall **34**: 761.
- Fahmi, M., R. Pober, et al. (2007). Effect of Surface Treatment on Porcelain Bond Strength to Zirconia, http://iadr.confex.com/iadr/2007orleans/techprogram/abstract_92290.htm.
- Filser, F., P. Kocher, et al. (2001). "Zuverlässigkeit und Festigkeit vollkeramischen Zahnersatzes hergestellt im DCM-Verfahren." Int J Comput Dent **4**: 89-106.
- Filser, F., H. Lüthy, et al. (2002). "Vollkeramischer Zahnersatz im Seitenzahnbereich." Quintessenz Zahntech **28**: 48-60.
- Freemeyer, W. B. and W. Lindemann (1982). "Verbundfestigkeit zwischen keramischer Masse und NEM-Legierungen in Abhängigkeit von der Vorbehandlung des Metallgerüsts." Dtsch Zahnärztl Z **37**: 288-291.
- Ganther, B. (1996). Zur Anreicherung der Haftoxide in metallkeramischen Systemen abhängig von der Anzahl der Brände. Berlin.
- Gehre, G. (1996). Keramische Werkstoffe. Heidelberg, Eichner, K. Klappert, H. F.
- Glauser, R., I. Sailer, et al. (2004). "Experimental zirconia abutments for implant-supported single-tooth restorations in esthetically demanding regions:4-years results of prospective clinical study." Int J Prosthodont **17**: 285-290.

Green, D. (1983). "A technique for introducing surface compression into zirconia ceramics." J Am Ceram Soc **66**: C178-C179.

Grote, K.-H. and J. Feldhusen (2007). Dubbel- Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin, Springer.

Grubbs, F. E. and G. Beck (1972). "Extension of sample sizes and percentage points for significance tests of outlying observations." Technometrics(14): 847-854.

Guazzato, M., L. Quach, et al. (2005). "Influence of surface and heat treatments on the flexural strength of Y-TZP dental ceramic." J Dent **33**: 9-18.

Gupta, T. (1980). "Strengthening by surface damage in metastable tetragonal zirconia." J Am Ceram Soc **63**: 117-121.

Hahn, R. and M. Wolf (1994). "Fraktographische Bruchflächenanalyse laminiertes vollkeramischer Frontzahnkronen." Deutsch Zahnärztl Z **49**: 316-320.

Hahn, R., M. Wolf, et al. (1996). "Hochleistungskeramik- eine aktuelle Standortbestimmung." Phillip J **13**: 311-320.

Hattemer, A. and K. Kübel (1950). "Zur Frage der Prüfungsvorschriften für zahnärztliche Werkstoffe." Deutsch Zahnärztl Z **5**: 1031-1033.

Heldt, E. (2006). Oberflächenrauheit. Wiesbaden, http://www2.qe-online.de/qe/live/fachartikelarchiv/qe_ha_artikel/detail/30663053.html.

Helmer, J. D. and T. D. Driskell (1969). Research on bioceramics. Symposium on Use of Ceramics as Surgical Implants. Anonymus. Clemson, South Carolina, Clemson University.

Hill, T. J. (2007). Effect of Sandblasting on Bond Strength of Three Zirconia Porcelains.

Kappert, H. F. (1989). Verarbeitungsprobleme bei Palladium- und NEM-Legierungen. Dentallegierungen in der zahnärztlichen Prothetik. G. K. Siebert. München-Wien, Hanser: 115-168.

Kappert, H. F. and M. Krahl (2001). "Keramiken - eine Übersicht." Quintessenz Zahntech **27**: 668-704.

Kappert, H. F., W. Riedling, et al. (1985). "Eine Vergleichende Studie von drei Methoden zur Untersuchung des Metall-Keramik-Verbundes bei NEM-Legierungen." Dtsch Zahnärztl Z **40**: 1179-1186.

Kappert, H. F., W. Riedling, et al. (1988). "Prüfung der Biegefestigkeit von Metall-Keramik-Verbundsystemen bei Verwendung von verschiedenen Dentallegierungen." Dtsch Zahnärztl Z **43**: 445-452.

Keith, O., R. P. Kusy, et al. (1994). "Zirconia brackets: an evaluation of morphology and coefficients of friction." Am J Orthod Dentofacial Orthop **106**: 605-614.

Kerschbaum, T. (1998). "Langzeit-Erfolgsaussichten von festsitzendem Zahnersatz." Zahnärztl Mitt **88**(21): 2698-2703.

Kosmac, T., C. Oblak, et al. (1999). "The effect of surface grinding and sandblasting on flexural strength and reliability of Y-TZP zirconia ceramic." Dent Mater **15**: 426-433.

- Kosmac, T., C. Oblak, et al. (2000). "Strength and reliability of surface treated Y-TZP dental ceramics." J Biomed Mater Res **53**: 304-313.
- Kraft, J. and E. Stender (1995). "Verbund palladiumfreier Au-Legierungen mit niedrigschmelzenden Dentalkeramiken." Dtsch Zahnärztl Z **50**: 371-374.
- Krumbholz, K. (1996). "Stand und Entwicklung von Dentalkeramiken." Zahnärztl Welt **101**: 193-199.
- Kruskal, W. H. and W. A. Wallis (1953). "Errata to Use of ranks in one-criterion variance analysis." J Amer Statist Assoc **48**: 907-911.
- Kvam, K., J. E. Tibbals, et al. (2006). Bond strength and thermal relaxation of 3Y-TZP and dental porcelains.
- Lenz, J., S. Schwartz, et al. (1995). "Bond Strength of Metal-Ceramic Systems in Three-Point Flexure Bond Test." J Appl Biomat **6**: 55-46.
- Li, Y., J. Gong, et al. (2002). "Engineering Materials." Engineering Materials **224-226**: 163-168.
- Liao, T. W., K. Li, et al. (1997). "Flexural strength of ceramics ground under wildely different conditions." J Mater Process Tech **70**: 198-206.
- Lindemann, W. (1982). "Elektronenmikroskopischer und röntgenographischer Nachweis der Haftoxide auf unedelen Metallen." Dtsch Zahnärztl Z **37**: 285-287.
- Lindemann, W. (2001). Vergleichende Temperaturmessungen zur Kenntnis des Temperaturgradienten in Keramik-Brennöfen verscheiden Fabrikate. Sindelfingen, Vortrag Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Dentale Technologie.
- Lund, M. R. and D. R. Bonlie (1962). "Paked porcelain restorations without the use of platinum matrix." J Dent Res **41**(spec. issue 94): Abstr. 1233.
- Luthardt, R. G., V. Herold, et al. (1998). "Kronen aus Hochleistungskeramik." Deutsch Zahnärztl Z **53**: 280-285.
- Luthardt, R. G., M. Holzhüter, et al. (2002). "Reliability and Properties of Ground Y-TZP-Zirconia Ceramics." J Dent Res **81**(7): 487-491.
- Luthardt, R. G., M. Holzhüter, et al. (2000). "Festigkeit und Randzonenschädigung von Zirconia-TZP-Keramik nach simulierter Innenbearbeitung von Kronen." Deutsch Zahnärztl Z **55**: 785-789.
- Luthardt, R. G., M. Holzhüter, et al. (2004). "CAD/CAM-machining effects on Y-TZP zirconia." Dent Mater **20**: 655-662.
- Luthardt, R. G. and R. Musil (1997). "CAD/CAM-gefertigte Kronengerüste aus Zirkoniumdioxidkeramik." Deutsch Zahnärztl Z **52**: 380-384.
- Luthardt, R. G., O. Sandkuhl, et al. (1999). "Zirconia-TZP and Alumina - Advanced Technologies for Manufacturing of Single Crowns." Eur J Prosthodont Res Dent **7**: 113-119.
- Mann, H. B. and D. R. Whitney (1947). "On a test of whether one of two random variables is stocistically larger than the other." Ann Math Statis **23**: 50-60.

Marx, H. (1986). "Die metall-keramische Verbundfestigkeitsprüfung - Ein besonderes werkstoffkundliches Problem." ZWR **12**: 524-527.

Marx, H. (1988). "Zur Frage der Festigkeitsprüfung des Metall-Kunststoff-Verbundes." Deutsch Zahnärztl Z **43**: 1024-1027.

Marx, R. (1993). "Moderne keramische Werkstoffe für ästhetische Restaurationen - Verstärkung und Bruchzähigkeit." Dtsch Zahnärztl Z **48**: 229-236.

Marxkors, R. and H. Meiners (2001). Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde, Deutscher Zahnärzte-Verlag
Deutscher Ärzte Verlag-Hanser.

McLean, J. W. (1965). "A higher strength porcelain for crown and bridge work." Br Dent J **21**: 268-272.

McLean, J. W. (1978). Wissenschaft und Kunst der Dentalkeramik. Berlin, Quintessenzverlag.

McLean, J. W. (1981). Wissenschaft und Kunst der Dentalkeramik
Band 2: Brückenkonstruktionen und Laborarbeiten in der Dentalkeramik. Berlin, Quintessenz.

McLean, J. W. (1988). "Ceramics in clinical Dentistry." Br Dent J **164**: 187-194.

Meira, J. B., R. M. Souza, et al. (2004). "Stress concentration in microtensile tests using uniform material." J Adhes Dent **6**: 267-273.

Meyenberg, K. H., H. Lüthy, et al. (1995). "A new all-ceramic concept for non-vital abutment teeth." J Esthet Dent **7**: 73-80.

Moffa, J. P., W. A. Jenkins, et al. (1984). "A clinical evaluation of two base metal alloys and a gold alloy for use in fixed prosthodontics: A five-year study." J Prosth Dent **52**: 491-500.

Morena, R., P. E. Lockwood, et al. (1985). "Toughening of Dental Porcelain by Tetragonal ZrO₂ Additions; J Am ceram Soc." J Am Ceram Soc **69**: 75-77.

Musil, R., R. Göbel, et al. (1985). "Der Sandstrahlprozeß und seine Einwirkungen auf den Oberflächenzustand von Dentallegierungen 2." Quintessenz **11**: 2151-2158.

Oblak, C., P. Jevnikar, et al. (2004). "Fracture resistance and reliability of new zirconia posts." J Prosthet Dent **91**: 342-348.

Paarsch, M. T. (2002). Zur Kenntnis des Temperaturgradienten in Dentalbrennöfen für die Titankeramik. Tübingen.

Papadopoulos, T., A. Tsetsekou, et al. (1999). "Effect of Aluminium Oxide Sandblasting on Cast Commercial Pure Titanium Surface." Eur J Prosthodont Res Dent **7**(1): 15-21.

Papanagiotou, H. P., S. M. Morgano, et al. (2006). "In vitro evaluation of low- temperature aging effects and finishing procedures on the flexural strength and structural stability of Y-TZP dental ceramics." J Prosthet Dent **96**: 154-164.

Pfeiffer, W. and T. Hollstein (1997). "Characterisation and assessment of machined ceramic surfaces." Interceram **46**: 98-102.

Produktüberblick (2004). "Hochleistungs-Ästhetik, Sechs Verblendkeramiken für Zirkoniumdioxid." teamwork Special: 52-54.

Reuling, N. and G. K. Siebert (1987). "Keramische Werkstoffe - Entwicklungsgrad und Bedeutung in der restaurativen Zahnheilkunde." Zahnärztl Welt **96**: 1139-1146.

Rieger, W. (1993). "Aluminium- und Zirkonoxidkeramik in der Medizin." Sonderdruck aus der Industrie Diamanten Rundschau.

Rieger, W. (2001). Ceramics in Orthopedics - 30 years of evolution and experience. World Tribology Forum in Anthroplasty. Bern, Rieker, C.

Oberholzer, S.

Wyss, U.: 3-13.

Rosi, D. (1995). Vergleichende Schlag- und Biege-Scherprüfung an drei Titan-Keramik-Verbundsystemen und einem NEM-Keramik-System in Abhängigkeit von verschiedenen Aufbrenntemperaturen. Berlin.

Rossbach, A. (1969). "Vergleichende Untersuchungen zu Kunststoffretentionen an Verblendkronen." Deutsch Zahnärztl Z **24**: 861-863.

Sachs, L. (2004). Angewandte Statistik. Berlin-Heidelberg-New York, Springer.

Schmid, M., J. Fischer, et al. (1990). "Chemische und thermische Kompatibilität vollkeramischer Verbundsysteme." Deutsch Zahnärztl Z **45**: 505-508.

Schmitz, K. H. (1987). Dentalkeramik. Zahnärztliche Werkstoffe und Ihre Verarbeitung, Bd. 2. K. Eichner. Heidelberg, Hüthig: 191-218.

Schmitz, K. H. and H. Schulmeyer (1975). "Bestimmung der Haftfestigkeit dentaler metallkeramischer Verbundsysteme." Dent Lab **23**: 1416-1420.

Schreiner, J. U. (1985). Vergleichende Untersuchungen von vier Verfahren zur Prüfung der Haftung Metall-Keramik. Mainz.

Schwarz, S., J. Lenz, et al. (1988). "Zur Festigkeit des metallkeramischen Verbundes bei der Biegeprüfung." Dtsch zahnärztl Z **43**: 1152-1158.

Schwickerath, H. (1983). "Prüfung der Verbundfestigkeit Metall-Keramik." Dtsch Zahnärztl Z **38**: 21-25.

Shapiro, S. S. and M. B. Wilk (1965). "An analysis of variance test for normality (complete samples)." Biometrika **52**(3 und 4): 591-611.

Siebert, G. K. and A. Queisser (1985). "Elementverteilung des Verbundes Metall - Keramik im Bereich der Grenzschicht bei NEM- und EM-Legierungen." Dtsch Zahnärztl Z **40**: 1163-1168.

Stephan, M. (1996). Beschichtungsverhalten von Verblendmaterialien auf Dentalkeramiken. Inaug.-Diss. Geowiss. Fak. Tübingen, Universität Tübingen.

Stevens, R. (1991). Engineering properties of zirconia. Engineered materials handbook. USA, ASM International. **4**.

Strietzel, R. (2005). Die Werkstoffkunde der Metall-Keramik-Systeme. München, Verlag Neuer Merkur GmbH.

Strub, J. R. (1992). "Vollkeramische Systeme." Dtsch Zahnärztl Z **47**: 566-571.

Sturm, W. (1968). "Die Vitadur-Keramik." ZWR **13**: 446-448.

Sturzenegger, B., A. Feher, et al. (2000). "Klinische Studie von Zirkonoxidbrücken im Seitenzahnggebiet, hergestellt mit DCM-System." Schweiz Monatsschr Zahnmed **110**: 131-139.

Sundh, A., M. Molin, et al. (2005). "Fracture resistance of yttrium oxide partially-stabilized zirconia bridges after veneering and mechanical fatigue testing." Dent Mater **21**: 476-482.

Suttor, D. (2007). Möglichkeiten und Grenzen der Vollkeramik. 11. Wilmersdorfer Symposium der Freunde und Förderer der Zahnmedizin an der Freien Universität Berlin, Berlin.

Tholey, M. J. and M. Stephan (2007). "Haftverbundmechanismen in dentalen Schichtsystemen." Quintess Zahntech **33**: 160-168.

Thompson, J. Y., K. J. Anusavice, et al. (1994). "Fracture surface characterisation of clinically failed all-ceram crowns." J Dent Res **73**: 1824-1832.

Tiller, H.-J., B. Magnus, et al. (1985). Der Sandstrahlprozess und seine Einwirkungen auf den Oberflächenzustand von Dentallegierungen. Jena.

Tinschert, J. and R. Marx (1997). "Klinische Bewertung von Materialien für die Vollkeramik mit bruchmechanischen Methoden." Stomatologie **97**: 7.

Tinschert, J., G. Natt, et al. (1999). "Seitenzahnbrücken aus hochfester Strukturkeramik." Dtsch Zahnärztl Z **54**: 545-550.

Tinschert, J., G. Natt, et al. (2004). "Ein Kompendium für die keramikgerechte Anwendung vollkeramischer Systeme in der Zahnmedizin." 3 M ESPE: 52-55.

Tinschert, J., G. Natt, et al. (2001). "Aktuelle Standortbestimmung von Dentalkeramiken." Dental Praxis **18**: 293-309.

Tuan, W. H. and J. C. Kuo (1998). "Effect of abrasive grinding on the strength and reliability of alumina." J Eur Ceram Soc **18**: 799-806.

Vickery, R. C. and L. A. Badinelli (1968). "Nature of attachment forces in porcelain gold systems." J Dent Res **47**: 683-689.

White, S. N., A. A. Caputo, et al. (1994). "Moduli of rupture of layered dental ceramics." Dent Mater **10**: 52-58.

Witkowski, S. (2005). "(CAD-)/CAM in Dental Technology." QDT Yearbook **28**: 169-184.

Witkowski, S. (2006). "Hightech-Biokeramiken für die Zukunft." Quintessenz Zahntech **32**: 66-76.

Zahnfabrik, V. (2004). "Veneering Material Vita VM9 für vollkeramische Gerüstmaterialien." Verarbeitungsanleitung.

11 Danksagung

Ich möchte mich bei Prof. Freesmeyer für die Überlassung meines Themas und allen Firmen, die mir die Untersuchung durch ihre Materialien möglich machten, bedanken.

Meiner Freundin Dr. Pinar Akman danke ich mit aller Liebe für die aufregende Zeit und das gemeinsame Gehen durch dick und dünn.

Tausend Dank gilt Dr. Lothar Wehnert für die ständige Mithilfe und den Glauben an meine Arbeit.

Meinem Bruder und Zahntechnikermeister Karl Slotosch danke ich für die fachliche Beratung auch am Wochenende beim Verblenden der Proben.

Herrn Dr. Reise möchte ich für die Rauigkeitsmessungen und die Anfertigung der Rasterelektronenmikroskopbilder danken.

Frau Bölling möchte ich für die konstruktive Unterstützung beim Schwickerathtest danken.

Ich danke meinen Freunden Birgit Hollenbach, Dr. Ulrike Heintzenberg, Antje Großmann und meiner Schwester Dr. Christina Lifschitz für die unendliche Unterstützung in allen meinen Entscheidungen und die nötigen stundenlangen Telefonate, um mich wieder auszugleichen.

Meinen Katzen Püppi und Mister Ripley danke ich für die gelassene Ausstrahlung und das Bewachen meiner Arbeit.

Dem englischen Wetter danke ich, dass ich nicht das Gefühl hatte, etwas verpasst zu haben.

Thank you.

12 Curriculum Vitae

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

Erklärung

„Ich, Susanne Slotosch, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema: „*In-vitro*-Untersuchungen zum Einfluss von mechanischen Oberflächenbearbeitungsverfahren auf den Verbund von Zirconia-TZP zu ausgewählten Verblendkeramiken“ selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.“

Datum

Unterschrift