

**Einfluss der Bearbeitung  
keramischer Verblendmaterialien  
für Zirkoniumdioxidkonstruktionen  
auf die biaxiale Festigkeit**

**Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Zahnheilkunde  
der Medizinischen Fakultät  
der Eberhard-Karls-Universität  
zu Tübingen**

**vorgelegt von  
Anna Christina Eßer**

**2014**

Dekan: Prof. Dr. med. Ingo B. Autenrieth

1. Berichterstatter: Professor Dr. J. Geis-Gerstorfer

2. Berichterstatter: Professor Dr. C. Löst





## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Historie/Geschichte der Vollkeramik.....	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen.....</b>	<b>7</b>
2.1	Keramik in der Zahnheilkunde.....	8
2.1.1	Einteilung der Dentalkeramiken.....	9
2.1.1.1	Silikatkeramiken.....	10
2.1.1.1.1	Struktur und Eigenschaften.....	11
2.1.1.1.2	Verarbeitung der Silikatverblendung.....	13
2.1.1.2	Oxidkeramiken.....	14
2.1.1.2.1	Struktur und Eigenschaften.....	15
2.1.1.2.2	Verarbeitung der Oxidkeramiken.....	19
2.2	Begriffserklärung Prüfverfahren für Vollkeramik.....	20
2.2.1	Zug- und Biegefestigkeit .....	21
2.2.2	Weibullstatistik.....	24
2.2.3	Elastizitätsmodul.....	25
2.2.4	Unterkritische Belastung.....	25
2.2.5	Spannungsrisskorrosion.....	26
2.2.6	Bruchfestigkeit.....	26
2.2.7	Risszähigkeit.....	26
2.2.8	Wärmeausdehnungskoeffizient.....	27
2.2.9	t-Test.....	28
<b>3</b>	<b>Literaturübersicht.....</b>	<b>30</b>
3.1	Festigkeitsuntersuchungen.....	30
3.2	Klinische Untersuchungen.....	34
3.3	Verbundfestigkeit.....	38
3.4	Oberflächenbearbeitung.....	40

---

<b>4 Ziel der Untersuchung.....</b>	<b>48</b>
<b>5 Material und Methode.....</b>	<b>51</b>
5.1 Materialgruppen.....	51
5.2 Prüfkörpergruppen.....	51
5.2.1 Gruppe 1 beschliffen.....	52
5.2.2 Gruppe 2 beschliffen und poliert.....	52
5.2.3 Gruppe 3 beschliffen und glanzgebrannt.....	53
5.2.4 Gruppe 4 beschliffen, poliert und glanzgebrannt.....	53
5.2.5 Gruppe 5 unbearbeitet.....	53
5.3 Oberflächenbearbeitung Übersicht.....	54
5.4 Prüfverfahren.....	55
5.4.1 Herstellung der Prüfkörper.....	55
5.4.1.1 Das Pelletor-System.....	55
5.4.1.2 Ablauf der Prüfkörperherstellung.....	57
5.4.1.3 Brennvorgang Prüfkörper.....	64
5.4.2 Bearbeiten der Oberflächen.....	68
5.4.2.1 Beschleifen der Prüfkörper .....	69
5.4.2.2 Politur der Prüfkörper.....	73
5.4.2.3 Glanzbrand der Prüfkörper.....	75
5.5 Prüfungen/Messungen.....	78
5.5.1 Rauigkeitsmessungen.....	78
5.5.2 Biaxialer Test.....	80
5.5.2.1 Testprinzip der Biaxialen Biegeprüfung.....	80
5.5.2.2 Berechnung der Biaxialen Festigkeit.....	82

---

5.5.3 Weibull Statistik.....	83
5.5.4 t-Test.....	83
5.5.5 REM Analyse.....	84
5.5.6 Bilder der bearbeiteten Oberflächen.....	85
<b>6 Ergebnisse.....</b>	<b>86</b>
6.1 Rauigkeiten.....	86
6.1.1 Zirox.....	86
6.1.2 Zenoflex.....	88
6.1.3 Zirox und Zenoflex im Vergleich.....	89
6.2 Biegefestigkeit im Biaxialen Test.....	90
6.2.1 Zirox.....	90
6.2.2 Zenoflex.....	92
6.2.3 Zirox und Zenoflex im Vergleich.....	93
6.3 Weibull-Statistik.....	95
6.4 Bruchstückanalyse.....	97
6.4.1 Zirox.....	97
6.4.2 Zenoflex.....	98
6.5 t-Test / Signifikanz .....	100
6.6 REM- Aufnahmen.....	102
6.7 Fotodokumentation.....	108
<b>7 Diskussion.....</b>	<b>110</b>
7.1 Diskussion der Methodik.....	111
7.2 Diskussion des Versuchsaufbaues.....	114

---

7.3	Diskussion der Rauigkeitsmessung.....	119
7.4	Diskussion der Biegefestigkeit.....	123
7.5	Bruchflächenanalyse.....	130
7.6	Diskussion der REM Aufnahmen.....	130
7.7	Zusammenfassende Ergebnisdiskussion-Praxisbezug.....	131
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>132</b>
8.1	Zusammenfassung .....	132
8.2	Summary.....	133
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>134</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>158</b>
10.1	Abbildungsverzeichnis.....	158
10.2	Schemata.....	160
10.3	Tabellenverzeichnis.....	160
10.4	Geräte und Materialliste.....	163
<b>11</b>	<b>Danksagung.....</b>	<b>166</b>
<b>12</b>	<b>Curriculum vitae.....</b>	<b>167</b>

**Abkürzungsverzeichnis**

°C	Grad Celsius
CAD/CAM	Rechnerunterstützte Konstruktion (Computer Aided Design) Rechnergestützte Fertigung (Computer Aided Manufacturing)
Co-Cr	Kobalt-Chrom
DIN	Deutsches Institut für Normung
GPa	GigaPascal
HIP	Hot isostatic postcompaction
HV	Härte nach Vickers
ISO	Internationale Organisation für Normung
K	Kelvin
KIc	Kritischer Spannungsintensitätsfaktor, beschreibt die Bruchzähigkeit
Klin.	Klinisch
Langzeitabk.	Langzeitabkühlung
MPa	MegaPascal (Biegefestigkeitswert in MPa (N/mm <sup>2</sup> ))
N	Newton
REM	Rasterelektronenmikroskopie
Tab.	Tabelle
VMK	Vita (Verblend)-Metall Keramik
WAK	Wärmeausdehnungskoeffizient (10 <sup>-6</sup> /°C)
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yttriumoxid
Y-TZP	Yttriumoxid-teilstabilisierte Tetragonal Zirconia Polycrystal
ZrO <sub>2</sub>	Zirkoniumdioxid

**Hinweis:**

Die im Text genannten Gebrauchsnamen, Handelsnamen und Warenbezeichnungen sind zum Teil patent- und urheberrechtlich geschützt. Aus dem Fehlen eines besonderen Hinweises bzw. des Zeichens ® oder © darf nicht geschlossen werden, dass kein Schutz besteht.



## 1 Einleitung

Der Bedarf und die Akzeptanz der Vollkeramik im Rahmen einer prothetischen Versorgung fehlender Zahnhartsubstanz ist in den letzten Jahrzehnten stetig gestiegen [Atsu SS. 2006] [Pröbster 1997]. Seit etwa zehn bis fünfzehn Jahren ist sie durch den Einsatz von Zirkoniumdioxid als metallfreies Gerüst auch klinisch umsetzbar [Pospiech 2010].

Die Vollkeramik bietet die zur Zeit beste Möglichkeit, dem natürlichen Vorbild Zahn möglichst nahe zu kommen. So ist es verständlich, dass trotz der Nachteile - wie der höheren Sensibilität gegenüber Zug- und Biegekräften und der aufwendigeren Verarbeitung - der Siegeszug der Vollkeramik weiter anhält [Pröbster 1997].

Wie bei vielen Neuerungen in der Zahnheilkunde blieben auch den Vollkeramik-Restaurationen gerade in den ersten Jahren der Anwendung Misserfolge nicht erspart. Diese beruhen vor allem auf der Sprödigkeit und der Neigung zum unterkritischen Risswachstum [Ludwig et al. 2005]. Während die Keramik hohem Druck (z.B. beim Kauen) stand hält, ist sie auf Zugspannungen durch ihre geringe Biegefestigkeit besonders sensibel [Fischer et al. 2000] [Marx et al. 2001] [Geis-Gerstorfer et al. 1999].

Erst die Einführung hochfester Oxidkeramiken, vor allem des Zirkoniumdioxids, mit seinen hohen Festigkeitswerten von über 900 MPa brachte eine deutliche Verbesserung der Überlebensrate vollkeramischer Restaurationen und erlaubte die Einführung von mehrgliedrigen Brückenkonstruktionen [Tinschert 1999] [Schmitter M 2013] [Lüthy H 2005] gerade auch für den Seitenzahnbereich. Dies war zuvor durch die geringere Belastbarkeit der Keramik kaum indiziert und ausschließlich den metallunterstützten Konstruktionen vorbehalten.

Seit vielen Jahren befassen sich Studien vor allem mit dem Werkstoff Zirkoniumdioxid, um Erkenntnisse über die Langlebigkeit und eventuell auftretende Komplikationen und Risiken zu erhalten.

Während dieser als Gerüstwerkstoff für vollkeramische Systeme (Trägersubstanz für die keramische Verblendung) mittlerweile hohe Überlebensraten aufweist [Tinschert 2006] [Sailer 2009], liegt die Misserfolgsrate der Verblendmaterialien signifikant

höher, so dass es immer wieder zu Frakturen dieser kommt [Larsson 2006] [Nothdurft 2006] [Pospiech 2007] [Sailer 2007 und Sailer 2009] [Kerschbaum T 2009] [Reich 2008]. Dabei zeigen sich sowohl Frakturen in der Verbundzone, das heisst zwischen dem Gerüst und der Verblendung, sogenannte Adhäsionsfrakturen, als auch sogenannte Kohäsionsfrakturen, die ein Abschilfern innerhalb des Verblendmaterials darstellen. Diese zuletzt genannten Kohäsionsfrakturen werden in Studien am Häufigsten beobachtet und im Folgenden unter dem Begriff „Chipping“ zusammengefasst.

Bei der Evaluation der Ursachensuche wurden diverse Kriterien diskutiert, unter anderem eine zu grazile Gestaltung des Gerüsts - sowohl die Wandstärke als auch die Konnektoren betreffend - sowie fehlende Höckerunterstützung und den daraus folgenden dicken Verblendschichten [Swain 2009].

Des Weiteren wurden Erkenntnisse hinsichtlich der Berücksichtigung der Wärmeausdehnungskoeffizienten der keramischen Materialien [Fischer 2008] und des Langzeitverhaltens des Zirkoniumdioxides, welches Bearbeitungsfehler erst während der Tragezeit der Konstruktion durch Abplatzungen (Chippings) beantwortet, gewonnen.

Es liegen allerdings noch nicht ausreichend Untersuchungen vor, welchen Einfluss die Oberflächenbearbeitungen auf die Festigkeitswerte der keramischen Verblendwerkstoffe ausüben. Klinische Beobachtungen weisen daraufhin, dass Frakturen der Verblendkeramik von okklusalen Frühkontakten bzw. von ungenügend glasierten und polierten Oberflächen ausgehen können.

Diese Frage gewinnt dadurch an Bedeutung, dass diverse Untersuchungen darauf hinweisen, dass die Verblendung das schwächste Glied bei den ZrO<sub>2</sub> basierten Rekonstruktionen ist, gestützt durch die in den Langzeitstudien gewonnenen Ergebnisse, dass die Frakturen meist innerhalb des Verblendmaterials vorliegen und nicht in der Verbundzone.

Dies deutet auf das Festigkeitsdefizit des Verblendmaterialies hin, welches letztendlich den Misserfolg der gesamten Restauration zur Folge hat.

Es wurde noch nicht ausreichend evaluiert, inwieweit sich die weitere Bearbeitung gerade bei dem Einsetzen der Restauration in den Mund auf die Festigkeit auswirkt. Hier sind zum Teil Einschleifkorrekturen notwendig, die entweder nicht mehr poliert oder dem Zahntechniklabor zugesendet werden, um den die Oberfläche versiegelnden Glanzbrand zu erneuern. Erkenntnisse über die Auswirkungen dieser oberflächlichen Bearbeitungen, gerade durch den Zahnarzt, sind essentiell, um die Schwachstellen der Verblendkeramik zu erkennen und somit die Misserfolgsrate der Gesamtkonstruktionen weiter zu minimieren.

Ziel dieser Arbeit ist es, durch biaxiale Festigkeitsuntersuchungen Hinweise zu erhalten, inwieweit die Oberflächenbearbeitung von zwei verschieden konzipierten Verblendmaterialien für Zirkoniumdioxid einen Einfluss auf die Festigkeitswerte hat. Zusätzlich wird untersucht, wie sehr sich eine leuzitfreie und eine leuzitverstärkte Verblendkeramik in ihren Festigkeitswerten voneinander unterscheiden.

## 1.1 Historie/Geschichte der Vollkeramik

Keramische Werkstoffe wurden bereits in der Frühgeschichte der Menschheit verwendet [Pröbster 1997] [Eichner 2000], so dass der keramische Werkstoff an sich bereits einige tausend Jahre vor Christus bekannt war [Eichner K, Kappert HF 1996].

Der Begriff „Keramik“ geht auf den griechischen Begriff „keramos“ zurück und bedeutet soviel wie „gebrannte Erde“.

Die heutigen dentalkeramischen Massen leiten sich von dem seit circa 700 n. Chr. in China hergestellten Porzellan ab, welches im 14. Jahrhundert durch die Portugiesen über Vorderasien nach Europa importiert werden konnte. Nach jahrelangen Forschungen, eigentlich mit der Intention Gold herzustellen, gelang es dem Alchemisten J.F. Böttcher 1709 am Königshof in Meißen aus Kaolin Porzellan herzustellen.

Fauchard unternahm 1728 Versuche, metallische Basen (Gold, Silber) zu emaillieren, als Einzug der Keramik in die Zahnheilkunde wird spätestens die Herstellung der ersten Zähne aus Porzellan 1774 durch den Apotheker Alexis Duchateau und den Zahnarzt Dubois De Chemant bezeichnet [Dubois de Chemant N1788] [Eichner K Kappert HF 1996] [Pospiech P, Tinschert J 2004].

Mit der Einführung der Platinfole als Brennt Träger durch Charles Henry Land 1887 gelang die Herstellung der ersten vollkeramischen Mantelkrone, der sog. „Jacketkrone“.

Als Nachteil dieser galt die hohe Frakturanfälligkeit, so dass Brown Ende des 19. Jahrhunderts sowie auch Swann und Hildebrandt 1934 versuchten, die Festigkeit der Keramik durch Modifizierung mit Platin-Iridium zu erhöhen. Dieses Vorhaben misslang aber letztendlich, da die thermischen Inkompatibilitäten dazu führten, dass die Keramik vom Metall abplatzte.

Weinstein gelang dies 1952 zu verhindern, in dem er den Wärmeausdehnungskoeffizienten der Verblendkeramik durch Erhöhung des Kaliumoxidgehaltes an den des Metalles annäherte und somit das Abplatzen der Keramik beim Abkühlprozess unterband. Daraufhin meldete er als erster ein Patent für eine Aufbrennkeramik an und der Durchbruch in der Metallkeramik war geschafft.

1949 führte Gatza das Vakuumbrennverfahren ein, wodurch das in der Keramik eingeschlossene Porenvolumen von 5 auf 0,5% gesenkt werden konnte.

1962 folgte in Europa die Einführung der VMK®-Technik (Vita-Metall-Keramik) durch die Firmen Vita, Bad Säckingen, (Keramik) und Degussa (Edelmetalllegierung), die den Erkenntnissen Weinsteins entsprechend ihre Komponenten aufeinander abstimmten.

1965 ebneten McLean und Hughes den Weg in die Vollkeramik, in dem sie erkannten, dass die Silikatkeramik durch Zugabe von Aluminiumoxid (Dispersionsverstärkung) an Festigkeit gewann. Dies führte zur Entwicklung des Vollkeramiksystems Vitadur der Firma Vita.

In den 80er Jahren kamen vollkeramische Systeme vor allem durch die giessfähige Glaskeramik Dicor (Dentsply, D-Dreieich) wieder ins Augenmerk. Es folgten zahlreiche Neuentwicklungen in den 90er Jahren, unter anderem neue Vollkeramikprodukte für die Press- und Frästechnik.

Vor allem die Einführung der aus anderen medizinischen Bereichen bereits bekannten und bewährten Zirkoniumdioxid-Keramik führte in den 90er Jahren zu einer nahezu Renaissance artigen Umbruchstimmung in der Vollkeramik. Gerade in Kombination mit dem Ausbau der Schleif- und Frästechnologien konnte der Indikationsbereich des vollkeramischen Zahnersatzes durch das Zirkoniumdioxid auf Kaulast tragende Brückenkonstruktionen im Seitenzahnbereich ausgedehnt werden

und der Einsatzbereich für die Vollkeramik um einige vorher undenkbar gewesene Indikationen erweitert werden.

Neben speziellen Pressverfahren (z.B. Empress-System, Ivoclar Vivadent, FL-Schaan) entwickeln sich vor allem neue CAD/CAM Technologien (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing), die neue Möglichkeiten sowohl unter qualitativen als auch unter ökonomischen Aspekten ermöglichen.

CAD/CAM Technologien verfolgen das Ziel, den präparierten Stumpf dreidimensional zu erfassen (Schmidt et al. 1998) und als Idealfall alle Produktionsabläufe von der Datenerfassung bis zum Fräsprozess vollautomatisch ablaufen zu lassen. Anfänge dieser Technologie gehen bereits auf Ideen von Francois Duret 1971 zurück, der 1985 die erste Krone fräste, 1973 konnte Altschuler ein optisches Abdruckverfahren entwickeln [Mehl 2001].

Mörmann und Brandestini (Universität Zürich) setzten 1980 mit ihrer Idee die Grundlage für Cerec [Mehl 2001] [Mörmann, Brandestini 1987], ein Chairside-System, welches 1988 als erstes dentales CAD/CAM System zum Einsatz kam [Bornemann et al. 2001] [Schmidt et al. 1998].

Aufgrund unzureichender Passgenauigkeiten und Wirtschaftlichkeit gerieten CAD/CAM Technologien Mitte der 90er in den Hintergrund.

Erst seit den letzten Jahren konnten die Fortschritte die CAD/CAM Technologie wieder in den Blickpunkt des Interesses bringen. Durch die Einführung von Cerec 3D im Jahre 2003 durch Sirona wird die Keramik heute grösstenteils gefräst, bei mehrgliedrigen Brücken überwiegend in Form von Zirkoniumdioxid [Luthardt, Rudolph 2001].

Seitdem haben keramische Systeme neben qualitativen Aspekten auch unter ökonomischen Gesichtspunkten an Attraktivität gewonnen.

Das Wissen und die Technologie um die Keramik selbst und deren Verarbeitung ist noch längst nicht vollends erforscht, so dass ihre geschichtliche Entwicklung noch am Anfang steht und stets weiter ausgebaut und weiterentwickelt wird.

## 2 Grundlagen

Von Vollkeramik spricht man in der Zahnmedizin bzw. der Zahntechnik, wenn der Zahnersatz (z.B. eine Krone oder eine Brücke) nicht metallunterstützt hergestellt wird, sondern rein mineralische Bestandteile beinhaltet [Kern M 2012].

An die dentale Vollkeramik gibt es spezielle Anforderungen, die die ISO DIN EN ISO 6872 beschreibt.

Im Vergleich zur metallkeramischen Alternative liegen die Vorzüge der Vollkeramik vor allem in der überragenden Ästhetik, welche die Keramik vor allem durch ihre lichtbrechenden und lichtleitenden Eigenschaften bei zudem vollkommener Farbstabilität erreicht [Strub et al. 2005], der sehr geringen Plaqueanlagerung der glasierten Keramikoberflächen [Abboud et Stark 2003] [Pospiech et al. 2004] und der sehr hohen biologischen Verträglichkeit [Christel PS 1992] [Covacci 1999] [Garvie 1994] [Cales 1995] [Warashina 2003].

Letzteres liegt durch die Inertheit der Keramik sogar über denen von hochedelmetallhaltigen Legierungen [Kern 2012], da sie selbst im elektrolythaltigen, sauren Mundmilieu nicht in Lösung gehen und sich vollkommen neutral zu anderen Materialien verhalten, während Metalle – und gerade die Nichtedelmetalle - durch Fehlen dieser biologischen Stabilität wesentlich unverträglicher sind und gerade bei Vorhandensein weiterer Metalle Ionen in den elektrolythaltigen Speichel abgeben können.

Auch die Eigenschaft der Keramiken, im Gegensatz zum Metall thermisch zu isolieren, anstatt weiterzuleiten, hat grundlegende medizinisch biologische Vorteile [Kunzelmann et al. 2007]. Somit werden keine zusätzlichen thermischen Noxen auf den vitalen Zahnstumpf weitergeleitet und das Risiko thermischer Schädigung kann minimiert werden.

Darüber hinaus konnten die Festigkeitswerte der Keramiken gerade mit der Einführung der hochbelastbaren Oxidkeramiken signifikant verbessert werden, so dass

ihre Indikationen unter Berücksichtigung der inzwischen gut dokumentierten Verarbeitungs- und Gestaltungsrichtlinien der Vollkeramik-Gerüstwerkstoffe, erweitert werden konnten. Zuvor waren die meist reinen Silikatkeramiken vor allem für den ästhetisch besonders sensiblen Frontzahnbereich mit geringeren Kaukräften konzipiert.

Eine weitere Indikationserweiterung stellt die Eigenschaft dar, dass vollkeramische Brücken sowohl adhäsiv als auch konventionell befestigt werden können [Kern et Kern 2008].

## 2.1 Keramik in der Zahnheilkunde

Keramiken werden in der Zahnmedizin überwiegend zur Verblendung von Metallgerüsten oder in der Variante der Vollkeramik (ohne Metallunterstützung) verwendet [Schüller KH 1985].

Innerhalb der Vollkeramik unterscheidet man zwischen monolithisch, d.h. vollanatomisch hergestellten Keramikrestorationen, und Verbund-/ Verblendsystemen. Bei zuletzt genannten wird die Verblendung nach zunächst erfolgter Gerüsterstellung entweder direkt auf dieses aufgetragen (geschlickert) oder aber zu diesem passgenau angefertigt (gefräst) und anschließend verbunden (Sinterverbundkrone) oder überpresst.

Zu den Verarbeitungsmöglichkeiten von Keramiken zählen das Sintern von pulverförmigen Massen (Schlickern), die heißplastische Verformung von industriell gefertigten Blöcken (Presskeramik), die mechanische Bearbeitung mit CAD/CAM-Verfahren (Fräsen) oder die Glasinfiltration von vorgefertigten Strukturen [Strub et al. 2005].

Monolithische Keramiken zeigten in der Vergangenheit nicht ausreichende Festigkeitswerte, insbesondere bei der Herstellung von mehr als 3-gliedrigen

Brückenkonstruktionen, könnten aber in Zukunft durch die Weiterentwicklung der  $ZrO_2$ -Werkstoffe möglicherweise an Bedeutung gewinnen [Schmitter 2013].

Die hohe Abrasionswirkung monolithischer  $ZrO_2$ -Rekonstruktionen auf die Antagonisten wurde bisher durch die dem Schmelz adäquater angepassten Silikatverblendungen erreicht.

Daher, und aus ästhetischen Gründen, haben Verblendsysteme, gerade im kaulastragenden Seitenzahnbereich, die größte Verbreitung gefunden.

Zur Verblendung von Zirkoniumdioxidgerüsten kommen derzeit verschiedene Keramiken aus der Gruppe der silikatkeramischen Werkstoffe unter Anwendung unterschiedlicher Verarbeitungstechniken zum Einsatz.

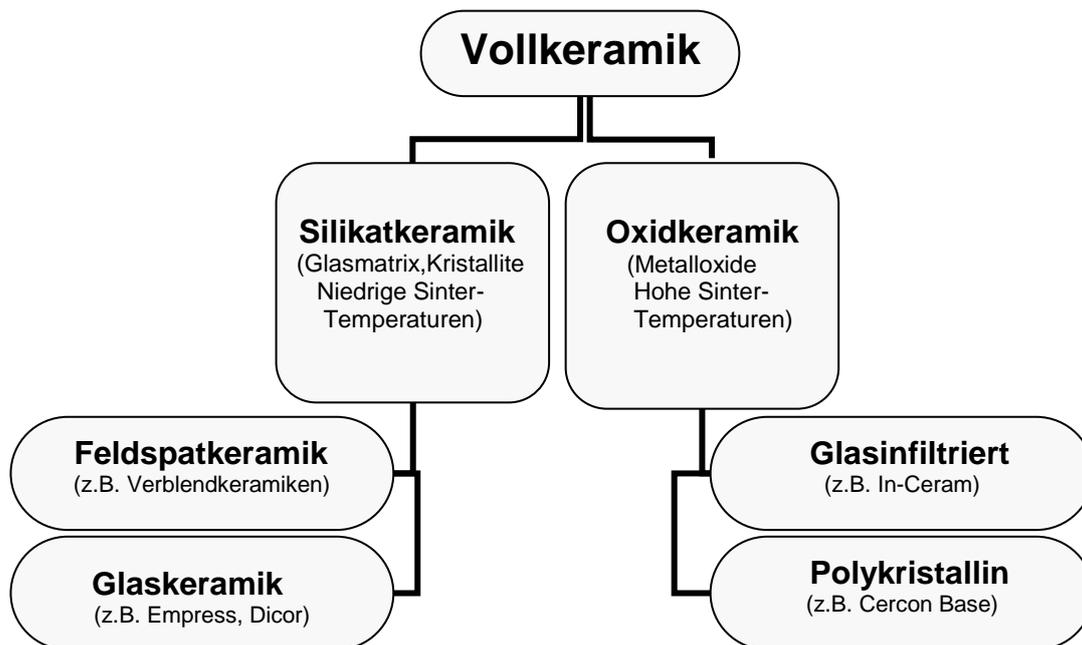
So kann die Komplettierung der Restauration durch Überpressen des Gerüsts mit einer Glaskeramik erfolgen. Eine weitere Möglichkeit bietet das Aufsintern einer CAD/CAM gefertigten Verblendkappe auf das Zirkoniumdioxidgerüst zu so genannten Sinterverbundkronen [Beuer 2009] [Schweiger 2007]. Die derzeit gängigste Technik zur Verblendung von Zirkoniumdioxid besteht jedoch im Aufschichten geeigneter Feldspatkeramiken, analog den Methoden aus dem Bereich der Metallkeramik.

### **2.1.1 Einteilung der Dentalkeramiken**

Die Einteilung der Keramiken kann unter verschiedenen Gesichtspunkten vorgenommen werden. Häufig werden Herstellungsart (Gießen, Pressen, Fräsen) oder der Anwendungsbereich (Gebrauchskeramik, Baukeramik, technische Keramik) als Einteilungskriterium herangezogen. Eine weitere Möglichkeit bietet die Einteilung nach dem chemischen Aufbau. Diese Einteilung scheint für Dentalkeramiken sinnvoll zu sein, da so eine Abschätzung der Festigkeitseigenschaften möglich ist [Pospiech et al. 2004].

Während Oxidkeramiken den Silikatkeramiken aufgrund ihres ästhetischen

Erscheinungsbildes unterlegen sind, weisen die Silikatkeramiken wesentlich schlechtere Festigkeitseigenschaften auf, die sie für eine nachhaltige Verwendung als Brückenkonstruktionen als weniger geeignet ausweisen.



Schema 1 : Einteilung der Vollkeramik [Modifiziert nach Pospiech 2004]

### 2.1.1.1 Silikatkeramiken

Hierbei unterscheiden wir Feldspatkeramik und Glaskeramik [Eichner K, Kappert HF 1996].

In der vorliegenden Untersuchung ist als Verblendmaterial die Feldspatkeramik von Interesse.

Glaskeramiken entstehen durch einen kontrollierten Temperprozess, der in der Glasphase ein gleichmäßiges, porenfreies, feinkristallines Gefüge entstehen lässt und finden als Verblendmaterial in der Zahnmedizin bisher in der Fügetechnik eine Rolle, bei der eine über die CAD/CAM Technik hergestellte Feldspatschale auf ein ebenfalls CAD/CAM hergestelltes  $ZrO_2$  Gerüst geklebt (Vita, Rapid Layer Technology) oder mittels Fügetechnik (Ivoclar, Add-on-Technik) aufgebrannt wird [Hajtó 2010].

### **2.1.1.1.1 Struktur und Eigenschaften**

Im Gegensatz zu herkömmlichem Porzellan bestehen Dentalkeramiken nicht hauptsächlich aus Kaolin, sondern zu 60-80 % aus Feldspat (vor allem Kalifeldspat), zu 15-25% aus Quarz und nur zu 0-5% aus Kaolin [Marxkors/Meiners/Geis-Gerstorfer, Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde 2001].

Bei konventionellen Dentalverblendkeramiken, den Silikatkeramiken, handelt es sich um dispers verteilte, kristalline Partikel, die in eine amorphe und transparente Glasphase eingebettet sind und welche die Eigenschaften der Keramik aus ästhetischer Sicht in Lichtstreuung und Trübung, aus mechanischer Sicht in ihrer Sinterfestigkeit und Endfestigkeit sowie in ihren thermischen Eigenschaften durch Veränderung des Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) beeinflussen.

Je mehr kristalline Partikel in einer Glasphase eingebettet sind, desto stabiler ist der Werkstoff, wobei neben dem Gehalt an kristallinen Partikeln auch ihre Homogenität und Dichte zur Festigkeit beitragen. Entscheidend ist zudem, dass die Kristalle mit der Glasphase einen festen Verbund eingehen.

Limitierend für den Gehalt an Kristallen in der Glasmatrix ist hierbei zunächst das ästhetisch angestrebte Endergebnis, denn bei zunehmendem Kristallgehalt steigt zwar die mechanische Festigkeit, aber zu Lasten der Lichtdurchlässigkeit der transparenten Glasphase und somit der Transluzenz insgesamt [Strub JR et al. 2005; Autor Kappert] .

## **Feldspat**

Feldspat bildet die Grundmasse (Glasmatrix) dieser Keramiken und besteht aus natürlichem oder synthetisch hergestelltem Feldspat, meist Kalifeldspat (60-80%) als Mischkristallsystem mit Natronfeldspat (20-40%) kombiniert, auch Kalkfeldspat und Lithiumfeldspat werden verwendet [Schwebke 2005].

Der Kalifeldspat hat aufgrund seiner im Vergleich zu den anderen Feldspattypen niedrigen Erweichungstemperatur die größte Bedeutung für die dentalkeramischen Massen, denn bei ca. 1170°C entstehen aus ihm bereits Leuzitkristalle ( $K_2O \times Al_2O_3 \times 4SiO_2$ ) und Schmelze [Strub JR et al. 2005]. Der Leuzit verleiht der Schmelze ihre hohe Viskosität, beeinflusst die mechanische Festigkeit und besonders den Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) [Eichner 2000] [Strietzel 2004]. Aber auch im Hinblick auf die Lichtdurchlässigkeit und damit der für dentale Silikatkeramiken wichtigen Transluzenz ist der Kalifeldspat anderen Feldspaten deutlich überlegen.

## **Quarz**

Quarz dient der Festigkeitssteigerung der Keramik sowie zur Erhöhung der Lichtdurchlässigkeit. Darüber hinaus kann man ihn als Magerungsmittel bezeichnen, da er beim Sintern durch Ausdehnung die Sinterschrumpfung der Keramik insgesamt reduziert [Hohmann 1989][Reuling 1989].

## **Kaolin**

Kaolin dient ebenfalls der Festigkeitssteigerung, wird aber aufgrund seiner hohen Schmelztemperatur (ca. 1750°C) in der Dentalindustrie kaum verwendet.

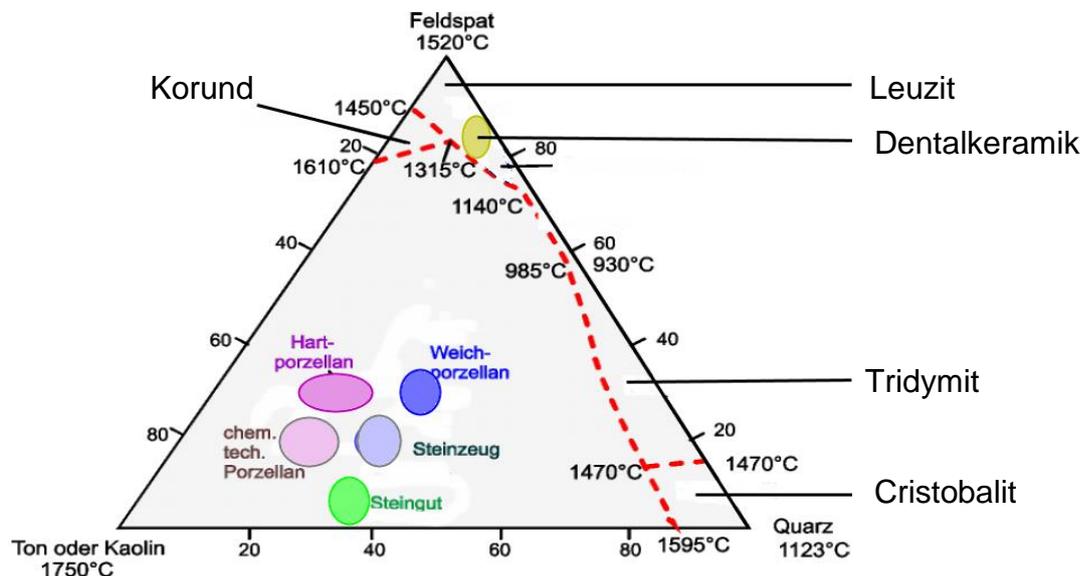


Abb. 1: Ternäres System Quarz-Feldspat-Kaolin [ Eichner , Kappert 1996 ]

### 2.1.1.1.2. Verarbeitung der Silikatverblendung

In der Regel werden die Silikatverblendungen in der Schlickertechnik aufgetragen. Dabei wird die Silikatmasse als Pulver mit einer speziellen Flüssigkeit zu einer auftragbaren Masse vermischt (Schlicker) und auf das Gerüst aufgetragen. Unterschieden wird dabei zwischen Opaque-, Dentin-, Schmelz- und Transpamassen, je nach gewünschten optischen Eigenschaften (Transluzenz, Transparenz, Deckkraft, Opaleszenz, Lumineszenz, usw.) [ Eichner K, Kappert HF 2000].

Diese Masse wird anschließend niedrig- oder hochschmelzend gesintert. Der Masseschwund beim Brand liegt bei 5 – 7%. Der WAK muss auf den Träger-/Gerüstwerkstoff abgestimmt sein.

Grundsätzlich erfolgt die Verblendschichttechnik jedoch in folgenden Arbeitsschritten:

1. Anrauen der Gerüstoberfläche (optional)
2. Auftragen eines Liners und/oder Opakers (optional)
3. Schichten der verschiedenen keramischen Massen (Dentin, Schneide, Schmelz,...) unter Beachtung der unterschiedlichen Brennprogramme/-temperaturen

#### 4. Abschließender Glanzbrand

Bei der Verblendung oxidkeramischer Gerüste wirkt sich die oberflächliche Bearbeitung (z.B. das Anrauchen) eher negativ auf den Verbund aus, der Liner (Punkt 2.) erhöht den Benetzungswinkel und die damit verbundene Benetzung des Oxidkeramikgerüsts durch die Verblendkeramik und wirkt sich somit positiv auf die Verbundfestigkeit aus [Wehnert 2010, Wehnert 2011, Tholey MJ 2007].

#### 2.1.1.2 Oxidkeramiken

Bei den Oxidkeramiken unterscheidet man zwischen den polykristallinen und den glasinfiltrierten Oxidkeramiken, wobei zuletzt genannte eine Sonderform darstellen, die eigentliche Oxidkeramik ist rein kristallin – d.h. ohne jeglichen Glasanteil.

In der Vollkeramik haben sich das Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und vor allem das Zirkoniumdioxid ( $\text{ZrO}_2$ ) etabliert.  $\text{MgO}$ - ,  $\text{TiO}_2$ - sowie  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  (Spinell)-Keramiken stehen in ihrer Bedeutung innerhalb der Werkstoffgruppe dahinter.

In der vorliegenden Untersuchung interessiert vor allem das (Yttrium-(teil)stabilisierte) Zirkoniumdioxid als Werkstoff für die Gerüstherstellung, so dass man im Weiteren bei Oxidkeramiken den Werkstoff  $\text{ZrO}_2$  wegen seiner höheren Festigkeit und seiner Verbreitung als Gerüstwerkstoff als wesentlichen Vertreter dieser Gruppe ansehen wollen [Munz D, Fett T 1989].

Seitdem das  $\text{ZrO}_2$  durch seine materialspezifischen Eigenschaften die Vollkeramik sozusagen revolutionierte, werden viele verschiedene Begrifflichkeiten für diesen Werkstoff verwendet, die nicht alle korrekt sind, daher einige Erläuterungen an dieser Stelle:

Chemisch exakt lautet der Werkstoff Zirkoniumdioxid und ist die bedeutsamste Verbindung des metallischen Elementes Zirkonium. Zirkonium selbst ist ein eher weiches, silbrig-weiss glänzendes reines Metall, welches in vulkanischem Gestein vorkommt [Tinschert 2011]. Es gehört zur Titangruppe und ist wie dieses, durch sich auf der Oberfläche bildende Passivierungsschichten, korrosionsstabil.

In der Fachwelt hat sich mittlerweile die begriffliche Bezeichnung „Zirkonoxid“ etabliert, ähnlich wie für den ebenfalls in der Dentalmedizin angewandten oxidkeramischen Vertreter des Aluminiumoxides, welches nach seiner Formel  $\text{Al}_2\text{O}_3$  chemisch korrekt als Di-Aluminium-Tri-Oxid bezeichnet werden müsste. Während Zirkonoxid und Zirkoniumdioxid dem Gerüstmaterial  $\text{ZrO}_2$  zugeordnet werden können, sollten die Begriffe Zirkonium (Metall) oder Zirkon nicht für dieses genutzt werden. Denn obwohl im Englischen die Vokabel „zirconia“ dem deutschen Zirkoniumdioxid entspricht, steht der Begriff Zirkon für einen Halbedelstein mit der Formel  $(\text{ZrSiO}_4)$ . Dies ist ein Silikat, welches zwar als Rohstoff durch Selektionsprozesse und Neusynthetisierung der Gewinnung von  $\text{ZrO}_2$ -Pulver dient, jedoch keinesfalls mit der Keramik  $\text{ZrO}_2$  zu verwechseln ist [Edelhoff 2011].

### **2.1.1.2.1 Struktur und Eigenschaften Oxidkeramik**

Aufgrund ihrer höheren Festigkeitswerte sind die Oxidkeramiken insbesondere das  $\text{ZrO}_2$  für hochbelastete Restaurationen wie z.B. drei- und mehrgliedrige Brücken geeignet [Pilathadka et al. 2007] [Lüthy H, Filser F 2005] [Sturzenegger B 2001].

Oxidkeramiken sind anders als die Silikatkeramiken polykristalline Werkstoffe mit einer Dominanz der kristallinen Phase [Pospiech 2004] [Reiber et al. 2008]. In-ceram Systeme bilden hier eine Ausnahme, da diese glasinfiltiert sind. Reines  $\text{ZrO}_2$  kann je nach Temperatur in drei verschiedenen Kristallphasen vorliegen.

[Schweiger 2004] [Pospiech et al. 2004] [Manicone et al. 2007] Eine Übersicht findet sich in Tabelle 1 und Abb. 1.

Tabelle 1: Kristallstruktur von Zirkoniumdioxid in Abhängigkeit von der Temperatur

Temperaturbereich	Kristallstruktur
RT - 1178°C	Monoklin
1178°C - 2370°C	Tetragonal
2370°C - 2716°C	Kubisch

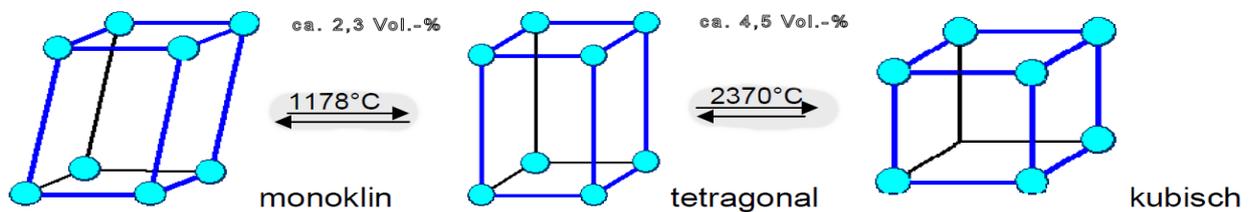


Abb. 2: Schematische Darstellung der temperaturabhängigen Phasentransformation von Zirkoniumdioxid modifiziert nach [Pospiech 2004]

Bestandteile der Oxidkeramiken sind vor allem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oder  $\text{ZrO}_2$ , durch Zusatz weiterer Bestandteile können die Eigenschaften verändert werden [Reckziegel 2004]. So kann durch Zufügung von  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  zu  $\text{ZrO}_2$  [Strub et al. 2005], die beim Abkühlen dieser Oxidkeramik ansonsten durch Umformung der Kristallstruktur auftretende Volumenexpansion um 3-5% und damit einhergehender Rissbildung führen würde, teilweise oder vollständig vermieden werden.

Diese beschriebene Expansion kann zur Festigkeitssteigerung genutzt werden, indem man das Zirkoniumdioxid teilstabilisiert, anstatt voll zu stabilisieren [Weber 1989] [Christel et al. 1992] [Kappert HF 2005].

So konnte vor allem durch den Zusatz von circa 3 Mol% Yttriumoxid ( $Y_2O_3$ ) der Ausgangswerkstoff erheblich verfestigt werden. Durch die Zugabe von  $Y_2O_3$  wird die tetragonale Phase eingefroren und liegt dann bei Raumtemperatur im metastabilen Zustand vor (s. Abb.2).

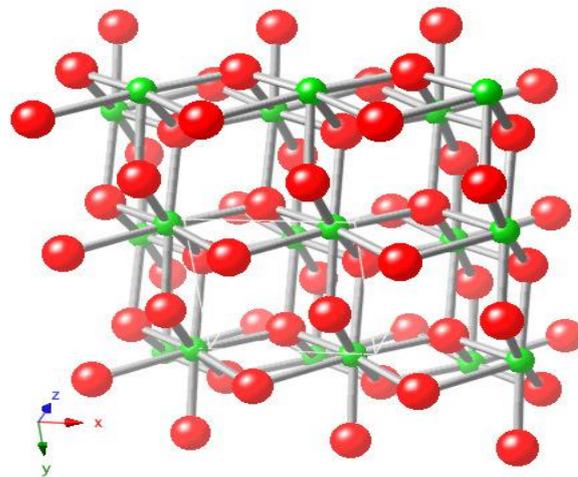


Abb. 3: Yttriumstabilisiertes Zirkondioxid [Boiko 2009]

Das  $Y_2O_3$  verhindert, dass sich das Kristallgitter bei Abkühlung wieder in seine ursprüngliche monokline Phase umwandelt. Dadurch können in dem Material entstehende Risse oder Mikrorisse bei auftretenden Belastungen und Spannungen aufgehalten und an ihrer Ausbreitung gehindert werden. Denn durch die Umwandlungsverstärkung beim Auftreten von Mikrorissen, induzieren die Spannungen an der Risspitze in diesem Bereich eine Phasenumwandlung von tetragonal zu monoklin, mit der damit verbundenen Volumenzunahme (der Rückumwandlung entsprechend um die zuvorige Abnahme von 4-5 %).

Durch diese lokale Volumenzunahme, werden die Rissflanken aneinandergedrückt und der Rissfortschritt an seiner Fortführung gehindert [Suttor et al. 2001] [Schweiger 2004] [Raigrodski 2004] [Pospiech et al. 2004] [Reich et al. 2005] [Klink 2006] [van der Zel 2007] [Pilathaadka et al. 2007] [Mörmann et al. 2007] [Manicone et al. 2007].

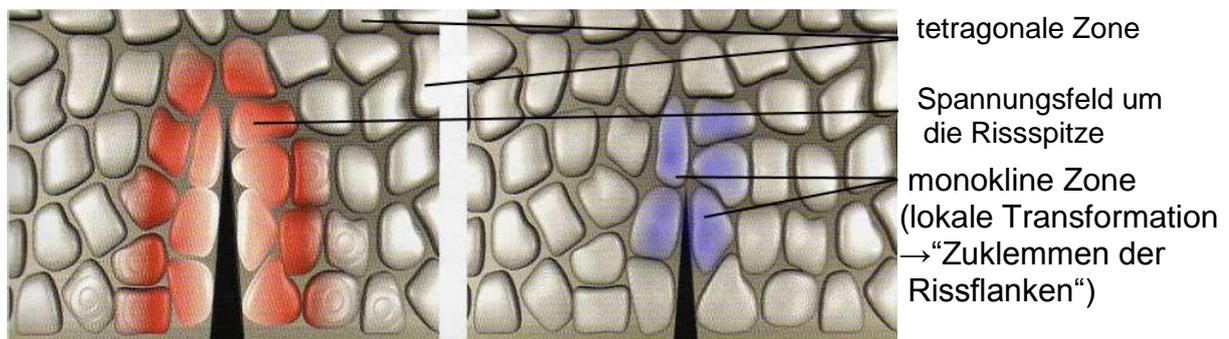


Abb. 4: Spannungsinduzierte Umwandlung metastabiler Zirkoniumdioxidteilchen [Pospiech et al. 2004] [Maier 1995]

Dieses Phänomen wird als Transformationsverfestigung oder auch als spannungsinduzierte Umwandlungsverstärkung bezeichnet [Stawarczyk 2011] (s.Abb.4).

Durch den Zusatz von weniger als 5 Gew.-%  $Y_2O_3$  entstand so eine neue Werkstoffklasse mit einer nahezu vollständigen tetragonalen Phase im  $ZrO_2$  - das yttrium-stabilisierte tetragonale polykristalline Zirkoniumdioxid (Y-TZP, Tetragonal-Zirconia-Polycrystals). Es erreicht Biegefestigkeitswerte von 900-1200 MPa [Pospiech et al. 2004] [Manicone et al. 2007] und Bruchzähigkeiten von 9 – 10 MPam<sup>0,5</sup> [Raigrodski 2004].

Eine weitere Modifikation der Oxidkeramiken besteht aus komplexeren Oxiden (Mischoxiden); diese komplexeren Komponenten führen zu einer eigenen Struktur oxidischer Verbindungen, deren wichtigste Gruppe die Spinelle darstellen ( $MgO + Al_2O_3$ ) [Tinschert 2007].

Die Oxidkeramiken besitzen aufgrund der dichten Sinterung im Gegensatz zu Silikatkeramik, welche eine hohe Transluzenz aufweist, eine starke Opazität, so dass eine weitere Charakterisierung durch Verblendung oder in eingeschränktem Umfang durch Bemalung notwendig ist, um ästhetisch akzeptable Ergebnisse zu erreichen [Lüthy 2005] [Groten 2006] [Tinschert 2007].

Insgesamt gehen Bestrebungen dahin, die Transluzenz der Oxidkeramiken zu erhöhen und die Festigkeitseigenschaften weiter zu modifizieren, damit monolithische und damit vollanatomisch hergestellte Oxidkeramiken als Vollkeramik

für den Seitenzahnbereich angewandt werden können. Eine Verblendung mit den höher ästhetischen Silikatkeramiken ist aus ästhetischer Sicht dem natürlichen Zahn assimilierter.

### 2.1.1.2.2 Verarbeitung der Oxidkeramiken

Oxidkeramiken können derzeit nur als industriell gefertigten Keramikblöcken verarbeitet werden [Lauer et Weigl 2005] [van der Zel 2007].

#### a) Pressen [ Tinschert, Natt 2006]

Durch Erhitzen wird die Oxidkeramik in den pressfähigen Zustand versetzt und in eine feuerfeste Form gepresst.

#### b) Kopierfräsen

Der gewünschte Körper wird in Kunststoff oder Wachs modelliert und anschließend mittels einer speziellen Fräse kopiergefräst.

#### c)CAD/CAM

Über eine Modellherstellung oder intraorales Einlesen werden digitallesbare Daten der Mundsituation erfasst, die es erlauben, mittels einer Software einen entsprechenden Gerüstkörper zu konstruieren [Seelbach P 2010]. Dieser Gerüstkörper wird in einer Fräsmaschine aus einem industriell vorgefertigten Rohling aus Oxidkeramik herausgefräst und anschließend weiterverarbeitet [Mehl AG-Keramik] [Wöstmann B 2011] [Rudolph H 2003].

Bei der computergesteuerten Herstellung kann entweder vollanatomisch designed und anschliessend aus einem Block gefräst werden (manufactured) oder aber ein reduziertes Gerüst gefräst werden, welches dann verblendet werden kann (Cut-Back-Methode). Eine Glasur sollte zuletzt immer erfolgen. Das Ergebnis ist also entweder

ein vollanatomisches Gebilde oder ein Gerüst zur Verblendung.

Die industriell hergestellten Blöcke können entweder vorgesintert (als sog. Weißlinge) oder bereits im dichtgesinterten, gehipten Zustand (HIP- Hot isostatic postcompaction) vorliegen.

Bei der Verarbeitung des vorgesinterten Blockes als CAD/CAM Rohling handelt es sich um ein in diesem Zustand relativ weiches Material, welches im Gegensatz zu der gehipten Keramik verhältnismäßig einfach und verschleißarm, in geeigneten Fräsgeräten, unter Wasserkühlung, ausgeschliffen werden kann.

Die Grünbearbeitung findet direkt im Anschluss an die primäre Verdichtung des Oxidkeramik-Ausgangspulvers, die Weissbearbeitung an einem durch einen Brand vorverfestigten Pressrohlings statt.

Der weiss opake, vorgesinterte Weissling kann vor der Endsinterung eingefärbt werden. Bei der Endsinterung ist mit einem Volumenschwund von circa 20-25% zu rechnen [Mörmann et al. 2007]. Anschließend erfolgt die Verblendung und Individualisierung des gefrästen Werkstückes. Bei vollanatomischer Fräsung nur die Politur und Glasur.

## **2.2 Begriffserklärung Prüfverfahren für Vollkeramik**

Aus funktioneller Sicht stehen - neben den Anforderungen an die chemische Beständigkeit und die biologische Verträglichkeit- vor allem die mechanischen Festigkeitswerte des Werkstoffes im Vordergrund.

Von besonderem Interesse dabei ist das Verhalten bei maximaler Kaubelastung unter möglichst weitestgehender Simulation der tatsächlichen Belastungsmodalitäten (Dauerbelastung, Feuchtigkeitsmilieu, Achsrichtung der Belastung,...), insbesondere

die morphologischen Veränderungen im Sinne von Durchbiegungen (eher bei Metallen), Rissen, Abplatzungen oder Brüchen.

Zu beachten sind dabei die grundsätzlich verschiedenen werkstoffkundlichen Eigenschaften von Metallen, Keramiken und anderen Werkstoffen, so dass diese generell eigenständig betrachtet werden müssen.

Beispielsweise können die Festigkeitswerte für keramische Werkstoffe nicht wie bei den Metallen durch eine Gauss'sche Verteilungskurve beschrieben werden, da sie nicht denselben elastischen und plastischen Eigenschaften unterliegen. Die Festigkeitsverteilung keramischer Werkstoffe beginnt nahezu bei null, danach steigt sie langsam an, um in steilem Verlauf zu enden, während metallische Werkstoffe schon zu Beginn eine gewisse Festigkeit aufweisen, die sich im Verlauf der weiteren Festigkeitsuntersuchungen um einen Mittelwert herum gruppieren (Gauss'sche Glocke) [Fischer J 2009].

Ebenso kennen wir aufgrund der völlig andersartigen Struktur der vollkeramischen Werkstoffe keine 0,2% Dehnungseigenschaft.

Statt dessen ist durch die Sprödigkeit der keramischen Werkstoffe und deren Eigenschaft, je nach Vorliegen von beispielsweise oberflächlichen Defekten, vorzeitig zu versagen, ein Maß zur Abschätzung der Zuverlässigkeit bzw. Versagenswahrscheinlichkeit notwendig- diesen Anforderungen entspricht das sogenannte Weibull-Modul [Fischer J 2009].

### **2.2.1 Zug-/Biegefestigkeit**

Durch die Sprödigkeit der Keramik ist diese auf Druck zehnmal stärker belastbar als auf Zug- oder Biegebelastungen [Pospiech 2004]. Im statischen Bruchversuch wird ein genormter Prüfkörper mit einer bis zum Bruch ansteigenden Kraft belastet. Diese zum Bruch führende Kraft auf den Querschnitt des Prüfkörpers umgerechnet ergibt die Biegefestigkeit in MPa ( $\text{N/mm}^2$ ). Sie ist eine bei gleicher Materialstruktur von der

Materialdefektverteilung abhängige Materialkenngröße.

Die Biefestigkeit ergibt wertvolle Hinweise zum Verhalten keramischer Werkstoffe und kann mit dem Dreipunktbiegeversuch, dem Vierpunktbiegeversuch, sowie dem biaxialen Biegetest gemessen werden [DIN EN ISO 6872:2009][DIN EN ISO 843-1:2007]:

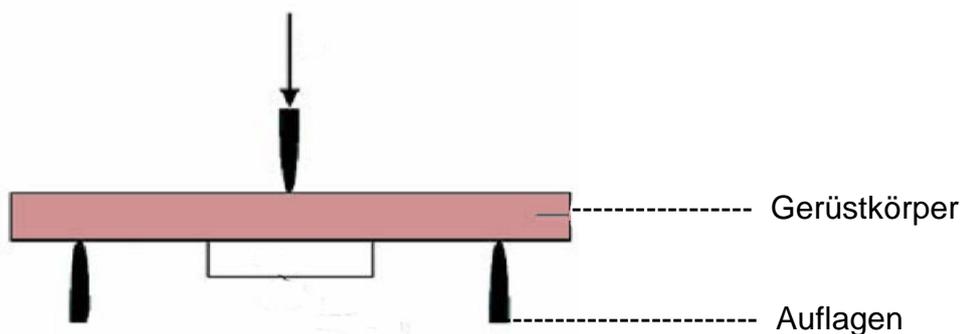


Abb. 5: Aufbau 3-Punkt Biegeversuch

Im Dreipunkt-Biegeversuch wird ein balkenförmiger Prüfkörper (Abmessungen:  $\geq 20$  mm x 4 mm  $\pm$  0,25 mm x 1,2  $\pm$  0,2 mm) bis zum Bruch belastet. Der Prüfkörper wird dabei mit der flachen Seite auf zwei 12 bis 16 Millimeter voneinander entfernt liegende, parallel zueinander ausgerichtete Auflagen mit einem Radius von 0,8 Millimeter platziert. Der Kraftstempel mit dem Durchmesser von 1,6 Millimetern belastet den Prüfkörper symmetrisch zwischen den Auflagen, so dass es unter diesem zu einem Maximum im Prüfkörper kommt und nicht zu einem homogenen Stressgebiet [Fischer et al. 2008].

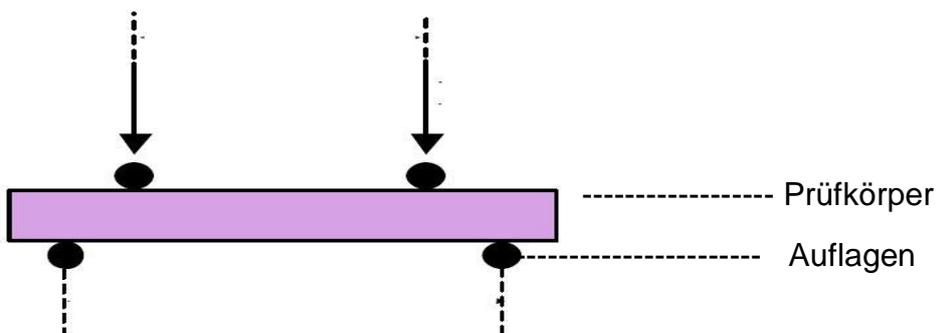


Abb. 6 : Schematische Darstellung des 4-Punkt- Biegeversuchs [Geis-Gerstorfer J 1992].

Im Vierpunkt-Biegeversuch wird ein balkenförmiger Prüfkörper (Abmessung:  $\geq 25$  mm x  $2,5 \pm 0,2$  mm x  $2 \pm 0,2$  mm) mit zwei Druckstempeln bis zum Bruch belastet. Die parallel zueinander, in einem Abstand von 20 Millimeter liegenden Auflagen haben einen Radius von 2,5 Millimeter. Die beiden 5 Millimeter im Durchmesser betragenden Druckstempel treffen symmetrisch zu den Auflagen und in einem Abstand von 10 Millimeter zueinander auf den Prüfkörper, so dass das Stressgebiet homogen zwischen den beiden Stempeln liegt [Fischer et al. 2008].

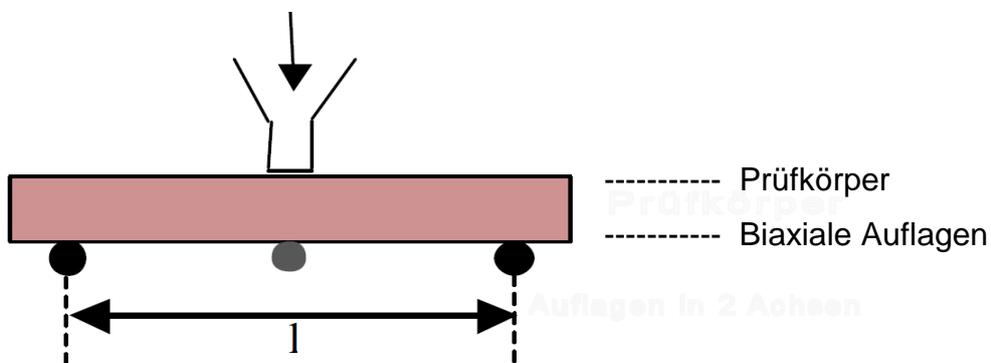


Abb. 7: Biaxialer Versuchsaufbau [Geis-Gerstorfer J, 1992]

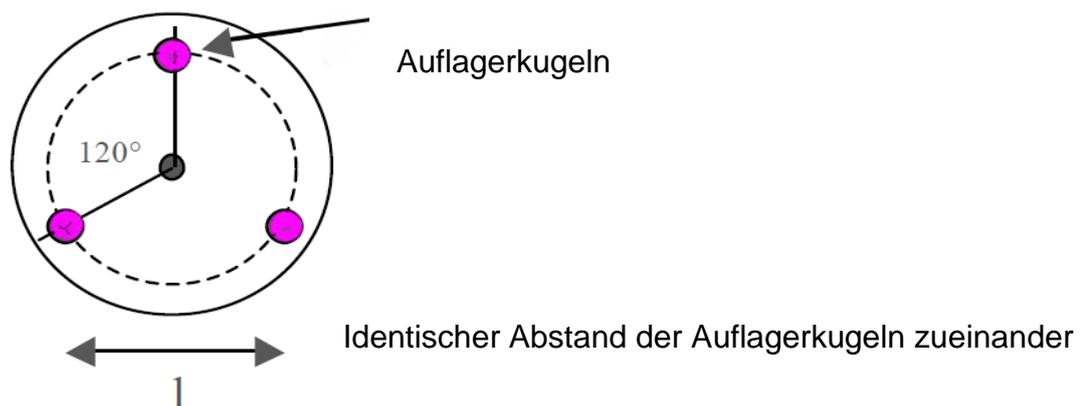


Abb. 8: Biaxialer Test Aufsicht

Im biaxialen Biegeversuch wird ein scheibenförmiger Prüfkörper (Durchmesser 12 bis 16 Millimeter, Dicke 1-2 Millimeter) mit einem Kraftstempel bis zum Bruch belastet. Dabei wird der Prüfkörper konzentrisch auf drei Stahlkugeln platziert, welche einen Durchmesser von 2,5 bis 6,5 Millimeter aufweisen und in einem Abstand von  $120^\circ$  zu

einander auf einem Kreis (Radius 5 bis 6 Millimeter) angeordnet sind. Der gerade, zylinderförmige Kraftstempel (Durchmesser  $1,4 \pm 0,2$  Millimeter) trifft in der Mitte des Probekörpers auf diesen. Durch die zentrale Belastung kann ein vorzeitiges Versagen des Prüfkörpers durch Kanteneffekte weitgehend ausgeschlossen werden [Geis-Gerstorfer et al.1993][Anusavice et al. 2007][Fischer et al. 2008].

### 2.2.2 Weibullstatistik

Die Weibull-Statistik besteht aus Weibullverteilung, Weibullmodul und Weibullfestigkeit.

Die Weibullverteilung ist bestimmend für die Biegefestigkeit; im Gegensatz zur Gaussschen Normalverteilung zeigt die Materialdefektverteilung hier eine asymmetrische Wahrscheinlichkeitsverteilung, die durch die Weibullstatistik beschrieben werden kann. Je homogener ein Prüfkörper hergestellt werden kann, desto gleichmäßiger sollte die Streuung der Defekte sein. Beim Weibull-Modul erhält man Auskunft darüber, wie groß die Streuung der Festigkeit einer Keramik ist; geringe Streuung bedeutet ein größeres Weibull- Modul [Tinschert et Götzen 2007].

Der Weibullmodul  $m$  ist ein Mass für die Streuung der Festigkeitswerte. Bei höherem Weibullmodul ist die Streuung geringer und damit gilt das Material als zuverlässiger.

Die Charakteristische Weibullfestigkeit  $\sigma_0$  entspricht einer Versagenswahrscheinlichkeit von 63,2 % für einen Prüfkörper und wird wie auch der Weibullmodul  $m$  aus den zuvor errechneten Biegefestigkeiten geschätzt, in dem man sich die Rangordnungsstatistik zu Nutze macht.

### 2.2.3 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul oder E-Modul (Einheit: GPa) beschreibt den Widerstand eines Werkstoffes gegenüber einer elastischen Verformung. Dieser Wert ist ein Maß für die Steifigkeit des Materials. Der E-Modul wird zumeist durch Erstellung eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms bei Zug- oder Biegeversuchen ermittelt. Dabei stellt der Elastizitätsmodul die Steigung im linearen Bereich der Spannungs-Dehnungs-Kurve dar [Kappert 2001] [Kappert 2003].

Der Elastizitätsmodul von Verblendkeramiken liegt bei circa 100 GPa. Dieser Wert wird auch von metallischen Werkstoffen erreicht, so dass das unterschiedliche Bruchverhalten nicht auf dem E-Modul basiert [Fischer 2009].

### 2.2.4 Unterkritische Belastung

(Kau-)Belastungen, welche geringer sind als die kritische Grenze der Materialfestigkeit, bei der die Kräfte zum Bruch führen würden, nennt man unterkritische Belastung. Diese führen zu oberflächlichen Rissen/Mikrorissen, welche sich im Zuge von Ermüdungserscheinungen weiter ausbreiten können und letztendlich durch vorzeitige Ermüdungsfrakturen die Lebensdauer der Restauration herabsetzen [Fairhurst 1993] [Lohbauer U 2008] [Wiederhorn 1967].

### **2.2.5 Spannungsrisskorrosion**

Beobachtet wurde das Eindringen von Feuchtigkeit in durch z.B. unterkritische Belastungen eröffnete Risse von Silikatwerkstoffen, die in Folge die Bindungen der Siliziumoxiddetraeder in der Risspitze spalten. Dieser Effekt ist auch in der Lage, bei geringeren Kräften eine keramische Restauration zu schädigen. Die Spannungsrisskorrosion erlangt bei Dauerprüfungen im feuchten (Mund-) Milieu Bedeutung und ist umso höher je größer der Glasanteil in der Keramik ist und je mehr Oberflächendefekte das Material aufweist [Pospiech 2004] [Wiederhorn 1967].

### **2.2.6 Bruchfestigkeit**

Hier werden bauteilnahe Konstruktionsteile bis zum Bruch belastet. Bestimmend ist dabei weniger der werkstofftypische Wert eines normierten Prüfkörpers einfacher geometrischer Form, sondern eher komplizierter aufgebaute Formen wie Brückenkonstruktionen oder Kronenverblockungen. Daher stellt diese Geometrie bei der Bruchfestigkeit, insbesondere bei den Konnektoren oder den verschiedenen Wandstärken den festigkeitsbegrenzenden Faktor dar.

### **2.2.7 Risszähigkeit**

Je langsamer ein Riss in einer Keramik fortschreitet, desto höher ist die Risszähigkeit einer Keramik. Der zur Ermittlung der Risszähigkeit mögliche Versuchsaufbau sieht einen definierten Riss in der Zugzone beim standardisierten Vierpunktversuch vor. Die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffs gegenüber der Rissausbreitung und damit gegenüber Sprödbrüchen wird als Bruchzähigkeit bezeichnet.

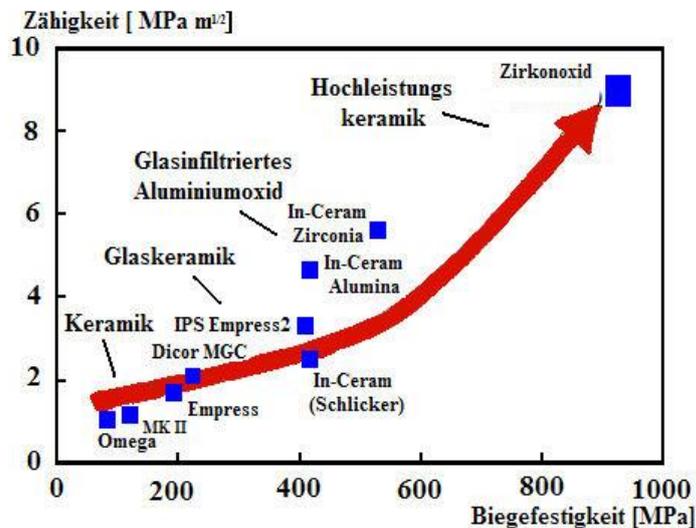


Abb. 9: Bruchzähigkeiten von Keramiken

[Filser 2001][ Filser 2002]

Gläser und Keramiken haben in der Regel eine geringe Bruchzähigkeit. Eine Ausnahme stellt die Y-TZP-Keramik dar, bei der eine sehr hohe Bruchzähigkeit vorhanden ist (s. Abb 5). Diese enorme Bruchzähigkeit wird durch die schon beschriebenen kristallinen Umwandlungsvorgänge begründet.

## 2.2.8 Wärmeausdehnungskoeffizient

Um die thermische Kompatibilität zwischen Zirkoniumdioxid- und Verblendkeramik einschätzen zu können, geben die Hersteller den linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten WAK (Kürzel:  $\alpha$ , Einheit:  $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) an. Er beschreibt den Grad der Längenänderung eines Prüfkörpers bei einer Temperaturänderung von einem Kelvin.

Die Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten von Dentalkeramiken erfolgt in der Regel durch dilatometrische Messungen an Keramikproben nach DIN EN ISO 6872 [DIN 2008]. Dabei soll der WAK der Keramik für einen Temperaturbereich zwischen 25-500 °C bzw. bis zur Glasübergangstemperatur angegeben werden. Der

WAK von Zirkoniumdioxid liegt bei  $10 - 10,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ . Analog zu den metallkeramischen Verbundsystemen wird von den meisten Herstellern ein um 5-10 % niedrigerer WAK für die Verblendkeramik angestrebt. Dabei soll durch die geringere Kontraktion der Verblendkeramik beim Abkühlen der Restauration eine Druckspannung in der Verblendung erzeugt werden. Das stabilere Gerüst wird dabei unter Zugspannung gesetzt. Diese Vorgehensweise soll zu einer Festigkeitssteigerung der gesamten Restauration führen [Tinschert 2007] [Kappert 2005] [Kappert 2001].

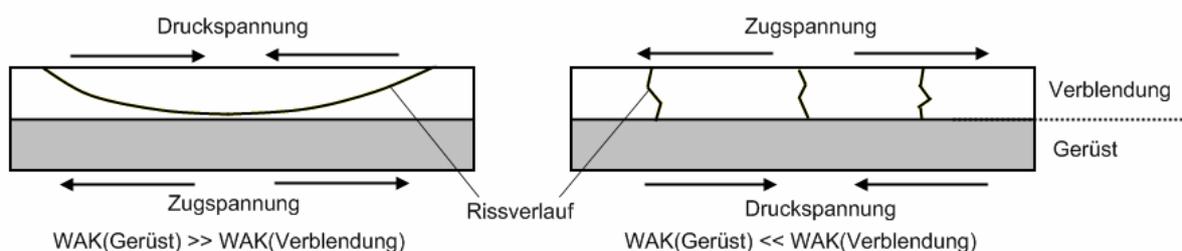


Abb. 10: Folgen einer unzureichenden Anpassung der WAK-Werte zwischen Gerüst- und Verblendkeramik, modifiziert nach [Gehre 2005]

### 2.2.9 t-Test

Der t-Test ist ein Begriff aus der mathematischen Statistik und beschreibt einen Signifikanztest. Man unterscheidet den Einstichproben-t-test und den Zweistichproben-t-test.

Der Zweistichproben-t-test prüft anhand der Mittelwerte zweier Stichproben, ob die Mittelwerte zweier Grundgesamtheiten einander gleich sind oder sich voneinander unterscheiden [Radke 2005].

Der Zweistichproben-t-test wird in 2 Typen unterteilt: den t-Test-Typ für zwei unabhängige Stichproben gleicher Varianz (homoskedastisch) und den t-test-Typ für zwei abhängige Stichproben ungleicher Varianz (heteroskedastisch).

Für den Unabhängigen t-test Typ müssen die Standardabweichungen der beiden Grundgesamtheiten einander gleich sein. Wenn diese sich unterscheiden, wird der Welch-Test eingesetzt.

In der Statistik bezeichnet man Messgrößen oder Variablen als signifikant, wenn sie eine geringe Wahrscheinlichkeit besitzen, zufällig zustande gekommen zu sein [Radke 2005].

### 3 Literaturübersicht

#### 3.1 Festigkeitsuntersuchungen Vollkeramik

Durch die Sprödigkeit der herkömmlichen Keramik [Quinn J B 2003] bei guter, aber nicht ausreichender Biegefestigkeit und Bruchzähigkeit [Guazzato 2004] oder aber wegen mangelnder Ästhetik bei isoliert angewandter, ausreichend stabiler, aber opaker Oxidkeramik, war Keramik lange Zeit auf die Unterstützung von Metall angewiesen, so dass das Metall Festigkeit und Langlebigkeit der Restauration gewährleistete, die Keramik dagegen das äußere Erscheinungsbild verbesserte. Mit der Entwicklung und Optimierung der Oxidkeramik und der Technologie von vollkeramischen Systemen aus Oxidkeramik und Silikatkeramik scheinen die Vorteile metallunterstützter Keramiken nach und nach von der Vollkeramik abgelöst und ausgebaut zu werden [Pröbster 2001] [Tinschert J. 1999] [Schmitter 2013] [Fischer 2007] [Lüthy 2005] [Sturzenegger 2001].

Bei der Beurteilung der Festigkeitsuntersuchungen ist es hilfreich, sich einige grundlegende Aspekte der keramischen Materialien vor Augen zu führen, z.B. dass die atomare Bindungsstruktur ein gänzlich anderes Verhalten von Keramiken im Verhältnis zu metallischen Werkstoffen bedingt [Eichner K, Kappert H 2000], eine plastische Verformung wird bei der kovalent-ionischen Bindung unmöglich, so dass beim Überschreiten der Elastizitätsgrenze die Keramikprobe spontan brechen wird (Spröbruchverhalten), während die mögliche plastische Verformbarkeit der Metalle durch Vergrößerung der Rissspitze die Spannung auf ein größeres Volumen zu verteilen in der Lage wäre [Marx 2001] [Geis-Gerstorfer 1999].

Festigkeitsuntersuchungen nehmen in der Zahnheilkunde seit jeher eine zentrale Rolle bei der Beurteilung der Verwendungsfähigkeit zahntechnischer Materialien ein [Schwickerath 1987] [Voß 1963].

Dies trifft insbesondere aufgrund der besonderen Eigenschaften auf die vollkeramischen Restaurationen zu [Bieniek K.W 1994] und [Bieniek KW, Spiekermann H 1993]. Als Maß für die spontane Belastbarkeit dient hierbei die sogenannte Biegefestigkeit, die angibt, bei welcher einmalig ansteigender Kraft die Keramik bricht [Kappert 2005].

Von Bedeutung dabei ist die maximal mögliche Kaubelastung, bei der eine vollkeramische Konstruktion Schäden erleidet.

[Kappert HP 1990] und [Schwickerath H- 1983] [Schwickerath und Coca 1987] fordern als Festigkeitswerte für die Bruchbelastung 400 N im Frontzahnbereich und 600 N im Seitenzahnbereich. Untersuchungen an größeren Spannweiten und Dauerbiegeuntersuchungen [Schwickerath 1994] weisen darauf hin, dass eine Belastungsfähigkeit von 300 N den physiologischen Verhältnissen bei parodontal und okklusal suffizienten Patienten eher entspricht.

Um Materialermüdungserscheinungen einfließen zu lassen, wurden als Anfangsfestigkeit höhere Werte von 1000 N gefordert [Campbell 1988] [Elmiger R 1989] [Schwickerath H 1988] und [Schwickerath H 1988], die allerdings nur von wenigen Vollkeramiken erfüllt werden konnten (Bruchlast Empress 2 bei 1000 N, In-ceram Zirconia um 1500 N, Y-TZP  $ZrO_2$  2000 N) [Hauptmann 2000] [Lüthy 1999].

Geeignete Prüfanordnungen zur Eruiierung der Biegefestigkeitswerte verschiedener Materialien stellen nach der DIN EN ISO 6872 der Dreipunktbiegeversuch, der Vierpunktbiegeversuch (beide mit Balkenproben) und besonders der biaxiale Test mit runden Plättchen dar, wobei die Hauptbelastung der Prüfkörper bei allen Verfahren in der Zugzone liegt.

Diese befindet sich während der Belastungsphase und der damit verbundenen Durchbiegung des Prüfkörpers auf der konvexen Seite.

Der Dreipunktbiegeversuch ist in seiner Durchführung am simpelsten, führt aber auch zu einer größeren Streuung der Messwerte, da sich zufällig auf der Zugseite (dem Druckstempel gegenüber) befindende Mikrorisse zu einem vorzeitigen Versagen

führen können. Dieser Nachteil wird beim Vierpunktbiegeversuch dadurch umgangen, dass der Druck durch zwei Stempel auf den balkenförmigen Prüfkörper wirkt und somit der Zug auf den gesamten Bereich zwischen den Stempeln übertragen wird. Beim biaxialen Test sind die Probekörper nicht wie bei den zuvor genannten balkenförmig, sondern besitzen eine runde Plättchenform, wodurch es nicht zu sog. Kanteneffekten (frühzeitiges Versagen des Prüfkörpers aufgrund von Fehlern in Bereich der Kanten) kommt: durch die zentrale Belastung wird der scheibenförmige Prüfkörper in seiner gesamten Materialeigenschaft geprüft, da die Spannungsspitze im Zentrum anstatt an den Kanten entsteht [Geis-Gerstorfer 1993] [Anusavice 2007] [Fischer 2009]. Damit liegt eine geringere Empfindlichkeit hinsichtlich Verarbeitungsfehler vor und man erhält verlässlichere Festigkeitsdaten [Geis-Gerstorfer J 1992].

Der Versuchsaufbau des Biaxialen Belastungstest hat aufgrund der Materialeigenschaften der Vollkeramik gegenüber dem 3-Punkt Belastungstest an Bedeutung gewonnen [Geis-Gerstorfer 1992].

[Dorsch und Pfeiffer 1996] haben gezeigt, dass bei diesen Versuchsanordnungen unter anderem die Oberflächengüte des Prüfkörpers mit entscheidend ist. Als weiteres Maß neben der Biegefestigkeit und dem Elastizitätsmodul ist die Risszähigkeit von Bedeutung, welche beschreibt, inwieweit ein Material dazu imstande ist, bereits entstandene Risse- oder Mikrorisse an ihrer Ausbreitung zu hindern [Geis-Gerstorfer 1993] [Hennicke und Klein 1996].

Untersuchungen von [Schmid et al. 1992], [Bieniek und Marx 1994] haben gezeigt, dass Leuzitkristalle die Risszähigkeit erhöhen können, allerdings nur, wenn sie sich homogen dispergiert im Gefüge befinden, das heißt möglichst isoliert liegen. Wenn sie dies nicht tun, unterscheidet sich ihre Risszähigkeit kaum von den rein amorphen Gläsern.

Risszähigkeitssteigernde Kristalle für vollkeramische Restaurationen sollten demnach durch geeignete Brandführung nur einige Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) klein sein und

möglichst homogen im Gefüge verteilt, damit durch diese sogenannte Dispersionsverstärkung Risszähigkeitswerte um die  $1,5 \text{ MPa m}^{1/2}$  bei hohem Glasanteil erreicht werden können [Pospiech 2004][Hajtó 2010].

Die Dichte sollte aus Sicht der Risszähigkeitssteigerung möglichst hoch sein, wobei mit steigendem Kristallanteil auch die Opazität zu Lasten der Ästhetik zunimmt und sich ebenfalls der WAK erhöht, welcher zur Vermeidung von inneren Spannungen in der Verbundzone an den WAK angepasst sein muss. Darüber hinaus sollte der Verbund der Glasphase (Matrix) zu den in ihr eingelagerten Leuzitkristallen möglichst fest sein, um das Prinzip der Partikelverstärkung zu unterstützen [Pospiech 2004].

Auch auf diesen Festigkeitswert haben Risse, unter anderem durch unsachgemäßes Beschleifen einen Einfluss, sodass das Material vorzeitig versagen kann [Stawarczyk et al. 2009][Belli R et al. 2011].

Sobald also die Gefahr der Rissausbreitung droht, kommt es auf die Risszähigkeit des Materials im Langzeitverhalten an, deren Ausbreitung zu stoppen und damit das Versagen des gesamten Materials .

Während unter den dentalkeramischen Massen die Risszähigkeit bei der Zirkoniumoxidkeramik (ohne Glasanteil) mit Werten bis zu  $10 \text{ MPa m}^{1/2}$  die höchste Dauerfestigkeit verspricht, wird bei den Verblendkeramiken noch an der Optimierung der Dispersionsverstärkung durch unter anderem Leuzitkristalle geforscht [Ernst 2009].

Auch die in dieser Arbeit untersuchten Materialien sollen im Vergleich zueinander Ergebnisse zu der Diskussion beitragen, inwiefern sich die Dispersion auf die Festigkeit auswirkt, denn während Zenoflex ein leuzitverstärktes Material darstellt, bei dem laut Hersteller die Mineralien, als sogenannte Anti-Stress-Mineralien, besonders fein und dispers im Gefüge vorliegen, soll Zirox durch eine leuzitfreie, besonders homogene HDAM-Mikrostruktur überzeugen, eine „High Density Advanced Microstructure“ [WIELAND 2010].

### 3.2 Klinische Untersuchungen der Vollkeramik

Tinschert wies in einer Studie [Tinschert 2007] bei einer fiktiv angenommenen Tragedauer von 10 Jahren eine Dauerfestigkeit mit Ausfallwahrscheinlichkeit von Kausimulationsverhältnisse 3-gliedriger Brücken bei einer Kaubelastung von 500 N hatte sich das Frakturrisiko kaum erhöht [Tinschert 2008] unter 1% bei seinen Proben für ZrO<sub>2</sub> nach. In Übertragung auf klinische Langzeituntersuchungen von 4-gliedrigen ZrO<sub>2</sub>-Gerüsten an den Universitäten Frankfurt, München und Tübingen zeigten ebenfalls keine signifikant höheren Gerüstfrakturen [Lauer 2006] [Pospiech 2006] [Grotten 2007], [Beuer et alii 2009] [Pospiech 2006] [Roediger 2010] im Vergleich zu metallunterstützten Konstruktionen.

Weitere Untersuchungen von Edelhoff, Schmitt, Lüthy und Sturzenegger [2008] [2011] [2005] und [2001] bestätigen die geringe Misserfolgsrate des Gerüstwerkstoffes ZrO<sub>2</sub>.

Demgegenüber weisen Verblendfrakturen bei vollkeramischen Restaurationen auf ZrO<sub>2</sub> eine wesentlich höhere Misserfolgsrate auf [Stawarczyk 2009]. In diversen Studien wurden Chippingraten von bis zu 25 % in nur kürzester Zeit beschrieben [Sailer 2007], [Tinschert et al. 2008 ] kamen auf 6,2 % nach nur 5 Jahren, Rödiger et al. auf 13 % nach 5 Jahren [Roediger 2010], Wolfart auf 13 % Misserfolg durch Chipping nach 4 Jahren [Wolfahrt 2009].

In einer weiteren Studie von Sailer et al. traten nach einer Tragezeit von drei Jahren 13,0% Verblendfrakturen auf [Sailer 2007], bei Zembic et al. nach 2 Jahren 10% Chipping [Zembic et al. 2003].

Raigrodski et al. ermittelten eine Abplatzungsrate von 25% nach 31 Monaten [Raigrodski 2006] und auch in einer Studie von Vult von Steyern et al. trat 15% Chipping auf [Vult von Steyern et al. 2005].

Als Grund für die hohen Frakturraten werden neben der schlechten Verbundfestigkeit [De Jager 2005] [Al-Shehri 1996] [Isgro 2003] auch zu starke innere Spannungen in der Verblendmasse, schlecht aufeinander abgestimmte Wärmeausdehnungskoeffizienten [Aboushelib 2005] [Aboushelib 2007] [Fischer, Stawarczyk 2009] [Fischer, Stawarczyk 2009] oder zu starke Vorkontakte genannt [Drummond 2000] [Fischer 2008].

Danzer [Danzer 2008] weist zudem darauf hin, dass die Wärmekapazität des  $ZrO_2$  deutlich höher als die des Metalles ist und daher kontrolliert langsam abgekühlt werden muss, um Spannungen innerhalb der Verblendung zu vermeiden.

Ernst [Ernst 2008] weist darauf hin, dass nicht die Gerüststruktur  $ZrO_2$ , sondern die Materialstruktur vieler Verblendmaterialien für  $ZrO_2$  aufgrund Fehlens leuzitverstärkter Strukturen zu anfällig ist und weist auf die stressabbauenden Eigenschaften einer mit Leuzit verstärkten Materialmatrix hin.

Er zeigt auf, dass ein leuzitfreies Material in einem Kausimulationstest 50% Ausfälle in der Verblendstruktur aufwies, während leuzithaltige Materialien eine Überlebensrate von 100% erreichten.

Güß [GÜß 2012] sieht den Grund für Verblendfrakturen in den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Gerüst - und Verblendwerkstoffen.

Gerstorff et al. [Gerstorff et al. 2010] bestätigen in einer klinischen Studie, dass wenig Erfolgsunterschied hinsichtlich der Festigkeit von Verblendstrukturen besteht, wenn der WAK bei einer keramischen Verblendmasse A für Zirkoniumdioxid bei  $8,5 (10^{-6}/^{\circ}C)$  und der WAK bei einer Verblendmasse B für Zirkoniumdioxid bei  $9,5 (10^{-6}/^{\circ}C)$  liegt. Bei beiden betrug die Misserfolgsrate etwa 6%.

Stawarczyk [Stawarczyk 2009] betont die im Gegensatz zu den Gerüstwerkstoffen nicht ausreichenden Festigkeitswerte der Verblendkeramiken, die immer wieder zu Chippings führen, meist im Sinne von Kohäsionsfrakturen, also innerhalb des Verblendmaterials.

Auch Fischer weist darauf hin, dass die Festigkeit der Verblendkeramiken den Hauptfaktor darstellt, welcher für die Festigkeit der Gesamt-Vollkeramik-Restaurationen bestimmend ist [Fischer 2008] [Sailer 2006, 2007] [Vult von Steyern 2005]. Vor allem bei Pospiech zählt auch die mechanische Bearbeitung der Verblendkeramik zu den möglichen Faktoren, die bei den zirkongestützten Konstruktionen zum Chipping der Verblendung führen können.

Insgesamt empfehlen einige Autoren [Kern, Bauer, Kimmisch 2010] zur Minimierung von Verblendfrakturen insbesondere:

- die Vermeidung verschiedener WAK zwischen der Gerüst- und der darauf verwendeten Verblendkeramik,
- die Vermeidung von Materialien verschiedener Hersteller (in der vorliegenden Arbeit werden daher Zenoflex und Zirox , beide Fa. Wieland verglichen),
- Vermeidung zu dünner Wandstärken des Gerüsts,
- Vermeidung zu dicker und ungleichmäßiger Verblendschichten (1-2mm),
- Anatomische Gestaltung des Gerüsts zur Erzielung einer gleichmäßigen Verblendschicht,
- Vermeidung ausgedehnter Gerüstbeschleifungsmaßnahmen [Chang-JU H 2010],
- Optimale Sinter-/ Brandführung nach Angabe der Hersteller,
- Vermeidung intraoralen Einschleifens, insbesondere ohne Wasserkühlung,
- Endpolitur und Glanzbrand.

So sollte bei der Vollkeramik zunächst auf die Indikation geachtet werden. Bruxismus, Parafunktionen, fehlende Fronteckzahnführung, Deck- bzw. Tiefbiss oder gelockerte Zähne sollten in die Materialauswahl einbezogen werden.

Keramikgerechte Präparationsrichtlinien müssen eingehalten werden. So dürfen zum einen keine scharfen Kanten vorhanden sein, um die Keramik nicht unter Zugbelastungen zu setzen, auf welche sie weniger belastbar ist als auf Druck, zum anderen sind die Mindestmaterialstärken zu gewährleisten. Als Präparationsrand sind eine ausgeprägte Hohlkehle oder eine abgerundete Stufenpräparation zu empfehlen.

Die Wärmeausdehnungskoeffizienten der keramischen Bestandteile, das heißt der der Verblendung aus Silikatkeramik und der WAK des Oxidkeramikgerüsts müssen aufeinander abgestimmt sein. Der WAK der Verblendung sollte um ca.10% unter dem WAK des Gerüsts liegen, um die Keramik beim Aufsintern bzw. beim Abkühlen unter Druck zu setzen anstatt unter Zug (Optimierung der Druckspannungen)[Stawarczyk et al. 2009].

Brennprogramme müssen materialspezifisch eingehalten werden, sowie das Abkühlverhalten auf die Werkstoffe abgestimmt sein, um sich ungünstig auswirkende Phasenumwandlungen im Material zu unterbinden [Tholey et al. 2007][Pospiech 2010].

Die Verblendung sollte überall möglichst gleichmäßig dick sein und überall vom Gerüst unterstützt [Pospiech et al. 2010][Kern et al. 2012].

Extensives Schleifen des Gerüsts insbesondere mit grobkörnigen Schleifinstrumenten ohne Wasserkühlung oder mit Druck sollte vermieden werden, ebenso das Abstrahlen der Außenflächen vor dem Verblenden, da dies zu Umwandlungen im Kristallgefüge führt und sich somit negativ auf die Festigkeit der Gesamtkonstruktion auswirkt [Kern et al. 2012], zudem zu einer Herabsetzung des Verbundes zwischen dem Zirkoniumdioxid und der Verblendkeramik führen kann [Wehnert et al. 2010].

### 3.3 Verbund Zirkoniumdioxid-Aufbrennkeramik

Für die Verbundfestigkeit zwischen der Verblendkeramik und dem Zirkoniumdioxidgerüst sind verschiedene Faktoren zu beachten, dabei spielt neben dem chemischen auch der mechanische Verbund eine Rolle. Defekte oder Verunreinigungen in der Kontaktzone haben ebenfalls Einfluss auf die Verbundfestigkeit, sowie auch Spannungen - entweder in den Materialien selbst oder bedingt durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten direkt in der Verbundzone [Beuer F et al. 2006] [Fischer J et al. 2008] [Tholey MJ et al. 2007] [Wehnert L et al. 2010]. Für den Verbund von großer Bedeutung sind Kontraktionskräfte. Der WAK der Verblendmasse ist geringer als der des Gerüstmaterials, um Zugbelastungen auf diese zu vermeiden und sie beim Abkühlen unter Druck zu setzen. Dies wirkt sich positiv auf den retentiven Verbund aus, solange die thermischen Dehnungsverhalten nicht zu weit voneinander divergieren. Van der Waals'sche Kräfte, Dipolbeziehungen ungeladener Teilchen, werden ebenfalls auftreten, sind jedoch aufgrund der geringen Stärke eher zu vernachlässigen [Tholey et al. 2007].

Einen chemischen Verbund konnte man bis jetzt noch nicht nachweisen, wird in vielen Studien aber diskutiert und angenommen [Tholey et al. 2007] [Fischer et al. 2008] [Aboushelib et al. 2006] [Wehnert 2010] sowie nach Tunnel-Rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen von Suttor [Suttor D 2007].

Bei den Oxidkeramiken, insbesondere der Zirkonoxidkeramik, handelt es sich um Metalloxide. Demzufolge könnten Sauerstoffbrücken zwischen dem Zirkoniumdioxid und der silikatischen Keramik möglich sein und sich ein Zirkoniumsilikat ausbilden.

Eine Rissbildung kann sich bei der Zirkondioxid-Verblendung bei einem guten Verbund bis in das Gerüst fortpflanzen und zu einem Bruch der gesamten

Konstruktion führen, während bei Metallunterbauten eher ein Abplatzen auftritt als eine Totalfraktur.

Einige Studien haben sich damit befasst, inwieweit sich die Oberflächenbearbeitung von  $ZrO_2$  auf den Verbund auswirkt. So haben Studien [Wehnert 2011] [Fokas-Tsentzeratos 2010] gezeigt, dass der Verbund ohne jegliche Bearbeitung am höchsten ist, durch Bearbeitung wie oberflächliches Beschleifen oder wie für das Metall zur Erhöhung der Verbundfestigkeit übliches Abstrahlen mit  $Al_2O_3$  haben sich dagegen negativ auf die Verbundfestigkeit ausgewirkt. Großen Einfluss auf den Verbund soll auch der Liner haben [Wehnert 2010]. Der Liner hat unter anderem Einfluss auf den Benetzungswinkel, und damit auch auf die Benetzung der Verblendmasse zum Gerüst, welche eine der wichtigsten Grundvoraussetzungen für den Haftverbund darstellt [Tholey MJ, Stephan M 2007].

Aboushelib untersuchte die Verbundfestigkeit dreier Systeme durch verschiedene Oberflächenbearbeitungsmodalitäten. Er weist darauf hin, dass die Stärke der Verblendung die Festigkeit der Restauration erhöht und dass nach Sandstrahlen mit einem Keramikpulver eine Diffusion von Aluminium, Silizium und Kalium bis  $10\mu m$  tief in die Oberfläche des Zirkondioxides nachzuweisen ist [Aboushelib MN, Cornelis 2005] [Aboushelib MN, Cornelis 2005]. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass durch oberflächliche Bearbeitung die Phasenumwandlung von tetragonal in monoklin erfolgen kann, durch welche Spannungen induziert werden, die sich ebenfalls negativ auf den Verbund auswirken.

Die klin. Bewährung des Verbundes zwischen silikatischer Aufbrennkeramik und dem Zirkoniumdioxid ist durch verschiedene Studien bewiesen worden [Sailer et Feher 2007] [Sailer et Pjetursson 2007] [Lee JJ et al. 2008].

In den Ergebnissen der Studien von Wehnert et al. 2010 haben die Verbundfestigkeiten die von langfristig klinisch bewährten VMK-Edelmetallkonstruktionen sogar übertroffen.

Dieses Ergebnis bestätigen Tholey und Stephan 2007 [Tholey MJ, Stephan M 2007], in dem sie die Verbundfestigkeit von Vollkeramiksystemen testen und herausfinden, dass die Verbundfestigkeit stärker ist als die Eigenfestigkeit der Verblendkeramik. Somit traten Risse ausschliesslich innerhalb der Verblendung auf.

### **3.4 Oberflächenbearbeitung und deren Auswirkung**

Beschleifende Korrekturen können im Praxisalltag nicht gänzlich umgangen werden, da es zur Vermeidung der Überbelastung einzelner Areale zwingend notwendig ist, dass die Okklusionskontakte möglichst gleichmäßig auf der Kaufläche verteilt sind [Kim B 2007] [Kim JW 2008] [Kim JW 2007].

Zu starke Okklusionskontakte, sogenannte Vorkontakte, die entweder nicht ausreichend überprüft oder nicht hinreichend durch Einschleifmaßnahmen korrigiert werden, können sich aufgrund fehlender Duktilität bei den keramischen Werkstoffen nicht während der Gebrauchsperiode von alleine einstellen, so dass es dann infolge Hertz'scher Pressung zu Spannungsüberhöhungen kommt, welches ebenfalls in einem möglichen Chipping resultiert [Kim B 2007] [Kim JW 2008] [Kim JW 2007][Pospiech 2010].

Oberflächenbearbeitungen sind bei der Verbundkeramik zum einen vor der Verblendung möglich, wobei dann das  $ZrO_2$ -Gerüst modifiziert würde, zum anderen im fertigen Verbundstück, zum Beispiel zur Korrektur der Okklusion oder der ästhetischen Anpassung, folglich an der Verblendkeramik.

Mechanische Bearbeitung führt dabei immer zu einer Aufrauhung der Oberfläche, was eine erhöhte Abrasion der Antagonisten zur Folge hat [Kern et al. 2012].

Darüber hinaus haben Einschleifmaßnahmen an einzugliedernden Keramikwerkstücken Einfluss auf die Plaqueakkumulation und möglicherweise auf die Festigkeitswerte der Konstruktionen [Strub et al. 2005][Pospiech 2010][Kontos 2013].

Der Einfluss der Oberflächenbearbeitung des  $ZrO_2$ -Gerüsts auf die Festigkeitseigenschaften dieser wurde in diversen Studien nachgewiesen [Hessert R 1998]. So haben Kosmac et al. [Kosmac et al. 2007] die Auswirkungen von Schleifen und Sandstrahlen auf die Biegefestigkeit bei YTZP-Zirkonoxid-Gerüsten untersucht. Abstrahlen erzeugte die im Vergleich harmloseren lateralen Risse, wobei eine grobe Körnung auf Grund des Erzeugens einer größeren effektiven Risslänge vermieden werden sollte; die Festigkeit ist abhängig von der Oberflächenspannung, den mechanisch induzierten Rissen und von der kritischen Defektgröße. Schleifen fördert eine Rissbildung durch die auftretenden hohen Temperaturen und induzierten Spannungen. Die Festigkeitswerte sinken außerdem durch die Entfernung der oberflächlichen Druckschicht [Kosmac 2007].

Während Guazzato, Kosmac, Lange und Garvie durch ihre Untersuchungen aufzeigen, dass es zu einer Biegefestigkeitserhöhung nach Sandstrahlen kommt [Guazzato 2005] [Kosmac 2007] [Lange 1986] [Garvie 1975], kommt Zhang hingegen mit seinen Untersuchungen zu dem Schluss, dass die Oberflächenbearbeitung durch Sandstrahlen die Festigkeit auf Dauer schädigt. Es wird dabei festgestellt, dass durch Impaktieren der Korundbestandteile und der damit induzierten Rissbildung eine vorweggenommenen  $t \rightarrow m$ -Umwandlung (s. 2.1.1.2.1) stattfindet und hierdurch neben der zuvor erwähnten Auswirkung auf den Verbund zur Verblendung auch ein späterer „Heilungsprozess“ nicht mehr stattfinden kann [Zhang 2004].

Kappert zeigt auf, dass durch das Beschleifen nach dem Sinterbrand die Bruchanfälligkeit steigt [Kappert 2007].

Viele Studien, z.B. Ashby oder Pospiech stellten fest, dass jedes oberflächliche Beschleifen zu unkontrollierten Gefügeveränderungen führt [Ashby 2006][Pospiech 2010] und beim Zirkoniumdioxid die Umwandlung von der tetragonalen in die monokline Phase induzieren kann.

Wehnert et al. fanden heraus, dass die mechanische Oberflächenbearbeitung von  $ZrO_2$  erkennbare Defekte wie Bruchkanten und Mikorisse verursachen [Wehnert et al. 2011].

Al-Dohan weist in seinen Untersuchungen nach, dass ein Schertest zur Prüfung der Festigkeitswerte des oberflächenbearbeiteten Materiales nicht klinisch anwendbar sei. [Al-Dohan 2004]. In vielen Untersuchungen finden wir zur Bestimmung der Festigkeitswerte den biaxialen Test [Fischer et al. 2008][Isgro et al.2003][Stawarczyk et al. 2009].

Neben der Bearbeitung des Gerüstes steht vor allem die Bearbeitung der Verblendkeramik im Vordergrund, da an dieser - auf Grund der angrenzenden Lage zum Antagonisten und den Nachbarzähnen hin - die Nachkorrekturen, ob aus ästhetischer oder funktioneller Sicht, ausgeführt werden.

Dies kann neben der Aufrauung der Oberfläche durch Überhitzung oder falsches Ansetzen der Schleifkörper zu Sprüngen oder Abplatzungen der Keramik führen.

Durch mechanisches Polieren oder nochmaliges Sintern kann die Oberfläche wieder verdichtet werden [Strub 2005][Kern M 2012].

Die mechanische Glättung findet im wesentlichen durch das Abtragen von Oberflächengraten statt. Für diese Bearbeitung benötigt man kleinste, spitze und scharfkantige Partikel, die härter sind als der zu bearbeitende Werkstoff, zudem müssen Schleif- und Poliermittel spröde sein, um bei Überlastung des Partikels durch Sprödbruch eine neue Schneide entstehen zu lassen [Marxkors 2001]. Zum Glätten muss zunehmend feinkörniges Schleifgut aufeinanderfolgen, die Schleifrichtung ist dabei zu ändern.

Die Politur ist ein Schleifen mit feineren Mitteln und hat eine glänzende Oberfläche zum Ziel, welche bei zunehmender Glättung entsteht. Sie sollte in mehreren Schritten unter Verwendung zunehmend feiner Partikel erfolgen. Hochglanz ist bei einer Rauhtiefe unter  $0,25\ \mu\text{m}$  erreicht [Marxkors 2001].

Bei rotierenden Schleifkörpern sind die Partikel in einem weicheren Material als Bindemittel eingebettet.

Speziell bei der Politur von Dentalkeramiken sind Schleifkörper allerfeinster Struktur und Bindung gefordert, um die Oberflächentiefe, -rauigkeit zu minimieren [Hoffmann A 2009].

Die gebräuchlichsten Schleif- und Poliermittel sind

- . aluminiumoxidbeschichteten Scheiben (Soflex)
- . diamantkorn-gefüllte Silikonpolierer
- . spezielle auf Diamantpulver basierende Polierpasten auf Filzträgern [Kern M 2012]

Strub et. al. empfehlen für die funktionelle Bearbeitung zunächst die Konturierung mit diamantierten Schleifkörpern, dann eine Vorpolitur mit Silikongummipolierern (Brasseler, D-Lemgo) und abschliessend die Hochglanzpolitur mit einem Hochglanzpoliergummierer bei niedriger Tourenzahl und geringem Druck [Strub et al. 2005]. Besonders für die Hochglanzpolitur von Okklusalkontakten eignet sich ein Hochglanzpoliergummi hervorragend, bei okklusalen Schleifkorrekturen ist es wichtig, dass sich die Form und Größe des diamantierten Bohrers nach der einzuschleifenden Fläche richtet. Die zwei gebräuchlichen Oberflächenverdichtungen stellen das Auftragen einer Glasurmasse und alternativ die mechanische Bearbeitung durch Vorpolitur mit anschliessender Anwendung eines Hochglanzpoliergummis dar [Strub 2005].

Einfluss auf die Feinheit der Politur haben die optimale Verteilung der Diamantpartikel mit unterschiedlicher Körnung Vor-/Haupt-/Feinpolitur, sowie die Härte und die Standfestigkeit der Silikonmischung (Bindemittel, Trägersubstanz).

Kursoglu verglich die Polierergebnisse unter Verwendung eines Abrasivsteines und einer Polierbürste, einer Polierpaste mit einer Körnung von 1,0– 0,5 µm, eines Abrasivsteines und Silikon-/Carbidpolierers sowie Polierpaste auf Polierscheiben [Kursoglu P 2014]. Sethi S verwandte das Shofu-Polierset und Silikonpolierer mit Diamantpolierpaste, sowie Polierrod mit Bimsstein [Sethi S 2013].

Kursoglu und Sethi fanden keinen signifikanten Rauigkeitsunterschied zwischen Poliersystemen und der Nachglasur.

Haralur SB verwandte die Polishing Kits von Shofu, DFS und Eve und verglich diese mit den Rauhtiefen beschliffener und glasierter Keramikoberflächen. Er forderte eine Glasur nach Einschleifmaßnahmen. Die Rauigkeitwerte lagen dabei bei 2,88  $\mu\text{m}$  für die beschliffenen Oberflächen, bei 0,6250  $\mu\text{m}$  bis 0,9017  $\mu\text{m}$  für die Bearbeitung mit Poliersystemen und 0,3450  $\mu\text{m}$  für die glasierten Oberflächen [Haralur SB 2012].

Wright fand Rauigkeitwerte von 0,586  $\mu\text{m}$ , 0,306  $\mu\text{m}$  und 0,277  $\mu\text{m}$  für die Poliersysteme Axis Dental, Jelenko und Brasseler [Wright MD 2004].

Finger WJ verwandte Diamantfinierer mit unterschiedlicher Feinheit zur Oberflächenbehandlung von 10, 25 und 45  $\mu\text{m}$  [Finger WJ 2000].

Sasahara verglich Gummiräder, Gummiräder plus Diamantpolierpaste, Sandpapierscheiben, und Sandpapierscheiben mit Polierpaste. Die Verbindung mit Polierpaste erbrachte eine geringere Rautiefe [Sasahara RM 2006].

Tholt de Vasconcellos erreichte unter Politurmaßnahmen mit dem EVE-System, Identoflexsystem und dem Shofu-Kit ähnliche Oberflächenrauigkeitwerte wie bei der Glasur [Tholt de Vasconcellos B 2006].

Camacho kombinierte in seinen vergleichenden Rauigkeitsuntersuchungen 2 Polierpasten mit verschiedenen Polierkörpern wie Gummikelch, Bürste, Räder und buff discs. Die Pasten unterschieden sich nicht in ihren Poliereigenschaften, bei den Polierkörpern erbrachten die Kelche etwas schlechtere Ergebnisse [Camacho GB 2006].

Nakamura Y verglich die Polierergebnisse 2er verschiedener Diamantpolierer. Die polykristallinen Diamantpolierer (PCD) wiesen bessere Polierwerte auf als die monokristallinen Diamantpolierer (MCD) [Nakamura Y 2010].

Aber auch verschiedene Keramikwerkstoffe reagieren auf gleiche Poliermaßnahmen mit unterschiedlicher Reduktion der Rauigkeitwerte wie Odatsu T unter Verwendung von Karborund-, Silikonpolierkörpern und Diamantpolierpasten herausfand. Feldspatkeramik behielt hierbei im Vergleich zu Zirkoniumdioxid und Lithiumdisilikat

die höheren Rauigkeitwerte [Odatsu T 2013].

Die beste Polierwirkung erzielte Martinez-Gomis J unter Verwendung von Soflexscheiben und anschließender Yeti-Diamantpolierpaste im Verhältnis zu Silikonpolierer weiss/Gummipolierer schwarz, Shofu-Polierkit, Diamantpolierern [Martinez-Gomis J 2003]. Oliveira verwandte bei seinen Untersuchungen zur Oberflächenbearbeitung durch Politur Silikonpolierer. Im Ergebnis empfiehlt er eine abschließende Glasur [Oliveira Junior OB 2013].

Keinen signifikanten Unterschied der Oberflächenvergütung fand Schneider unter den drei geprüften Gruppen: Gummiräder und Diamant (0,66  $\mu\text{m}$ ), Silikon-Carbidrädern (0,60  $\mu\text{m}$ ) und glasiert (0,67  $\mu\text{m}$ ).

Bei der Politur von Lithiumdisilicat mit Prophylaxepasten verursachten die grobkörnigeren Polierpasten (z.B. Nupro coarse) die größeren Raugkeitswerte [Schneider J 2013].

In seinen Untersuchungen fand Aravind heraus, dass die Bearbeitung der Oberfläche mit dem Soflex-System eine glattere Oberfläche hinterlässt als die Glasur. Unter Verwendung von Dia Finish, Kalinoor, Dia Glace, Kenda, Shofu, Knor und Opal wiesen die Poliersysteme von Kalinoor und Dia Finish teilweise bessere Werte auf als die Glasur [Aravind P 2013].

Xue fand positive Ergebnisse hinsichtlich der Verringerung der Rauigkeit unter Verwendung von Diamantpolierpaste und der Glasur [Xue L 2012], Kontos bei Verwendung des Eve Systemes [Kontos L 2013].

Die Untersuchungen von Kontos zeigen, dass die Glasur eine glattere Oberfläche erreicht als mechanische Poliersysteme. Zur Politur verwandte er in Gruppe I abrasive Gummis (Edenta), in Gruppe II abrasive Gummis (Shofu), in Gruppe III Aluminiumoxidscheiben (Soflex, 3M-Espe), alle in Kombination mit Scheiben und Polierpaste [Kontos L 2013].

Hajtó stellt in seinem Beitrag heraus, dass mit Diamantinstrumenten, selbst Feinstkorndiamanten, keine ausreichend glatte Oberfläche erzielt werden kann, das Endergebnis immer auch stark von einer ausreichenden und abgestimmten Vor-

beeinflusst wird, er beschreibt den positiven Einsatz von Soflex Scheiben [Hajtó J 2010].

Im Vergleich von Gummipoliersystemen zeigen zweifach und dreifach abgestufte Diamantkornpoliersysteme dann gleich gute Ergebnisse, wenn bei den Zweistufenpoliersystemen noch mit Diamantpaste nachpoliert wird [Neumann R 2014].

Einschleifprozesse werden für ein frühes Versagen der Verblendkeramik verantwortlich gemacht [Pospiech 2010] [Belli R et al. 2011]. So wird beschrieben, dass durch das Beschleifen die oberflächliche, sehr dünne und unter Druckspannungen stehende Zone entfernt wird, welche die darunter liegenden schwächeren, unter Zugspannungen stehenden Bereiche schützt. Dies führt zu einer Schwächung der Keramik innerhalb weniger Minuten des intraoralen Einschleifens [Belli et al. 2011].

Die rotierende Bearbeitung verringert die Widerstandsfähigkeit der Keramik, die oberflächliche Aufrauhung führt zu neuen Riskeimen, die sich ausbreiten und Frakturen initiieren können [Lohbauer U et al. 2008].

Frankenberger et al. bestätigen, dass das initiale Beschleifen zum frühen Versagen der Verblendung durch Fraktur führt [Frankenberger et al. 2008].

Stawarczyk et al. wiesen nach, dass Frakturen der Verblendkeramik von den oberflächlich bearbeiteten Stellen ausgehen, gut polierte Oberflächen verringerten die Frakturanfälligkeit im Vergleich zu den ungenügend auspolierten Stellen. Dabei weisen sie auf den negativen Einfluss eines erneuten Glanzbrandes auf die Ästhetik hin und empfehlen Gummipolierer der Firma Edenta. Mit einem dreistufigen Poliersystem zunehmender Feinheit ist nach 5 Minuten keine Schleifspur mehr erkennbar [Stawarczyk et al. 2009].

Goldammer stellte in seinen Untersuchungen fest, dass sich das Schleifen und das Polieren der auf  $ZrO_2$  aufgesinterten Verblendkeramik negativ auf deren Festigkeit auswirkt, ein Glanzbrand konnte sich meist positiv auf die Festigkeit auswirken [Goldammer 2012].

Insgesamt sollten notwendige Nachkorrekturen immer unter Wasserkühlung und mit feinkörnigem Diamanten durchgeführt werden. Bei der Verblendung wird die Nachpolitur der beschliffenen Areale, bei noch nicht eingesetzten Arbeiten ein erneuter Glanzbrand zur Festigkeitssteigerung diskutiert [Luthart RG 2002] [Kern et al. 2010] [ Rosentritt et al. 2011]. Gupta et al. konnten keine signifikante Festigkeitssteigerung durch eine Glasur nach dem Beschleifen von Metallkeramischer Verblendkeramik feststellen [Gupta et al. 2014].

Diese Hypothese wird auch in dieser Arbeit thematisiert und soll zu genaueren Auswirkungen des Beschleifens gerade der frakturanfälligen Verblendung auf deren Festigkeit hin Aufschluss geben.

Im Rahmen dieser Untersuchung ist von Interesse, welchen Einfluss die Verwendung aufeinander abgestimmter Polierkörper auf die Rauigkeits- und Festigkeitswerte im Vergleich zu unpolierter bzw. glasierter Keramik hat.

## 4 Ziel der Untersuchung

Gegenstand dieser Untersuchung ist das Verhalten der -in ihrem Brennverhalten auf die Gegebenheiten der Zirkoniumdioxid-Keramik abgestimmten- Verblendstruktur aus Silikatkeramik nach verschiedenen Oberflächenbehandlungen, insbesondere, inwieweit die oberflächliche Bearbeitung von zwei verschiedenen konzipierten Verblendmaterialien für Zirkoniumdioxid deren Festigkeitswerte beeinflusst.

Dabei sollen sowohl Erkenntnisse über die unterschiedlichen Festigkeiten bezüglich der Materialstruktur gewonnen werden, als auch über den Einfluss der in praxi angewandten oberflächlichen Bearbeitungen, deren Auswirkungen essentiell sind, um die Misserfolge der Verblendfrakturen weiter zu minimieren und damit den Erfolg der Gesamtkonstruktion zu optimieren.

Vor dem Hintergrund, dass sich diverse Studien mit der Eigenfestigkeit von verschiedenen Verblendmaterialien, welche speziell für die Verblendungen von Zirkoniumdioxid konzipiert wurden, beschäftigt haben und Sie den Festigkeitswerten für die bewährte Metallkeramik gleichgestellt oder sogar als stärker bewertet haben, ist es notwendig, der Frage nachzugehen, inwieweit sich letztendlich die weitere Bearbeitung -gerade bei dem Einsetzen der Restauration in den Mund- meist durch den Zahnarzt, auf die Festigkeit auswirkt. Hier sind zum korrekten Einstellen der Okklusion meist Einschleifkorrekturen unumgänglich, deren Auswirkungen auf die Festigkeit bislang aber kaum untersucht wurden; dabei weisen klinische Beobachtungen daraufhin, dass Frakturen der Verblendkeramik von okklusalen Frühkontakten bzw. von ungenügend glasierten oder polierten Oberflächen ausgehen können.

Diese in dieser Studie simulierten Bearbeitungsmodifikationen entsprechen den in der Praxis stattfindenden Prozessen und wurden bislang nicht ausreichend in ihrer Auswirkung auf die Festigkeitsbeeinflussung hin überprüft.

Zudem bestehen in der Literatur unterschiedliche Auffassungen über den Einfluss der verschiedenen Bearbeitungen die Festigkeit betreffend, während ein Zusammenhang oft diskutiert wird. Vor allem Empfehlungen bezüglich Politur und

Glanzbrand weisen Kontroversen auf, so dass einige die Bearbeitung betreffend eine alleinige Politur für ausreichend erachten, andere den Glanzbrand als entscheidend.

Unterschieden werden sollen alternativ mögliche Abläufe, vom alleinigen Einschleifen ohne weiteren Vergütungsprozess (z.B. aus ökonomischen Gründen), über das lediglich angeschlossene Polieren oder Vergüten der Restauration durch eine Glasur oder auch durch eine Kombination von zunächst Politur und anschließender Glasur, wie es zunächst als Empfehlenswertesten erscheinen sollte, da beides oberflächenoptimierende Bearbeitungen darstellen.

Es soll demnach schwerpunktmäßig untersucht werden, welchen Einfluss die Oberflächenbearbeitung auf die Festigkeit der Verblendstruktur im biaxialen Festigkeitstest gemäß ISO 6872:2009 ausübt. Der biaxiale Belastungstest hat sich unter der Annahme physiologischer Gegebenheiten bei parodontal suffizientem Zahnbestand ohne Lockerung der Zähne als Referenzuntersuchung bewährt [Geis-Gerstorfer 1992].

Aufgrund der Annahme einiger Autoren, dass ein signifikanter Einfluss besteht, ob Verblendwerkstoffe leuzithaltig oder leuzitfrei sind, wie z.B. Ernst, der 2008 publizierte, dass Leuzit als stressabbauendes Mineral in der Verblendkeramik für den Erfolg entscheidend sei, werden hier zwei Materialien diesen Kriterien entsprechend verglichen, wobei Rückschlüsse auf die risshemmende Wirkung der Leuzitkristalle gewonnen werden könnten [Ernst 2008].

In dieser Studie wird Zenoflex Dimension, eine leuzithaltige Verblendmasse mit laut Hersteller besonders feinen und dispers im Gefüge verteilten „Anti-Stress-Mineralien“ (Leuzitkristalle) zum „Abbau unerwünschter Zugspannungen“ mit Zirox verglichen, einer leuzitfreien Verblendmasse, welche der Hersteller (jeweils Fa. Wieland, Pforzheim) mit einer „HDAM“ (High Density Advanced Microstructure) Mikrostruktur als besonders homogen beschreibt, so dass laut Gebrauchsanweisung nicht einmal eine Glasur notwendig sei [WIELAND 2010].

Prüfkörperherstellung	Oberflächenbearbeitung	Messungen	Auswertung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Zenoflex</b> (150 Stück)</li>   <li>• <b>Zirox</b> (150 Stück)</li>   <li>• <b>Einteilung</b> in je fünf Gruppen pro Material mit 30 Prüfkörpern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Gruppe 1:</b> Beschleifen</li>   <li>• <b>Gruppe 2:</b> Beschleifen und Polieren</li>   <li>• <b>Gruppe 3:</b> Beschleifen und Glasieren</li>   <li>• <b>Gruppe 4:</b> Beschleifen und Polieren und Glasieren</li>   <li>• <b>Gruppe 5:</b> Ohne Bearbeitung (as fired)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Vermessen aller Proben</b></li>   <li>• <b>Rauhigkeits- messungen</b></li>   <li>• <b>Biaxiale Festigkeit</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Weibull-Statistik</b></li>   <li>• <b>t-Test (Signifikanz)</b></li>   <li>• <b>REM- Aufnahmen</b></li>   <li>• <b>Fotodokumen- tation</b></li> </ul>

---

Schema 2: Versuchsdesign

## **5 Material und Methode**

### **5.1 Materialgruppen - Verblendkeramiken**

Als Materialien dienten der Durchführung der Experimente zwei verschieden konzipierte Verblendkeramiken für Zirkoniumdioxid-Gerüste.

Die erste Verblendkeramik ist Zirop, eine leuzitfreie und somit vom Hersteller Wieland (Wieland Dental + Technik GmbH & Co. KG Pforzheim, Germany) als „homogen“ bezeichnete Keramikmasse, die zweite Vergleichsgruppe stellt das Material Zenoflex dar, eine leuzithaltige Keramikmasse desselben Herstellers.

Bei beiden Materialgruppen wurden jeweils die Dentinmassen in der Farbe A3 zur Prüfkörperherstellung verwendet.

### **5.2 Prüfkörpergruppen**

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte mit Hilfe des Pelletorsystems (s. 5.4.1.1), eines neuartig entwickelten Systems des ZTM Gerald Wölz aus Tübingen.

Zur Durchführung der Studie wurden von jedem Material 5 Gruppen mit entsprechend zu bearbeitenden Prüfkörpern angefertigt. Jede Gruppe besteht aus 30 Keramikprüfkörpern.

Die Bearbeitung der Proben orientierte sich an den im klinischen Alltag gebräuchlichen Arbeitsschritten sowie an möglichen Kombinationen von aufeinander folgenden Verarbeitungen (z.B. Politur, Glanzbrand etc.), so dass bei den erfolgten Simulationen der klinischen Situationen ausschliesslich Materialien verwendet wurden, wie sie auch im klinischen Alltag Anwendung finden (z.B. Winkelstück, Diamant, zahnärztliche Keramikpolierer etc.).

Im einzelnen wurden die Gruppen wie folgt eingeteilt und bearbeitet:

### **5.2.1 Gruppe 1**

Gruppe 1 simulierte das Einschleifen von Okklusionskorrekturen in der zahnärztlichen Praxis.

Auf weitere Bearbeitungen wie beispielsweise eine Politur wurde zur Veranschaulichung der Festigkeitsdifferenz bei dieser Gruppe verzichtet.

### **5.2.2 Gruppe 2**

Gruppe 2 wurde ebenfalls (nach identischen Gesichtspunkten wie Gruppe 1 zuvor) zur Simulation der klinischen Korrektur von Okklusionsdifferenzen beschliffen.

Anschliessend erfolgte hierbei zusätzlich eine Politur der durch das Beschleifen angerauhten Prüfkörperoberflächen der Verblendkeramiken mit entsprechenden klinisch zu verwendenden Keramikpolierern zunehmender Feinheit („Drei Polierstufen System“).

### 5.2.3 Gruppe 3

Bei den 30 Prüfkörpern von Gruppe 3, die wie die Gruppen zuvor ebenfalls zunächst der Einschleifsimulation entsprechend geschliffen wurden, wurde zur Veranschaulichung der Auswirkung auf eine Politur nach dem Einschleifen verzichtet. Stattdessen wurden diese geschliffenen Verblendkeramikplättchen mit einem Glanzbrand versehen.

Diese Gruppe repräsentiert eine zum Teil im Praxisalltag vor allem im Hinblick auf ökonomische Interessen angewandte und diskutierte Arbeitsweise und soll nun mögliche Auswirkungen auf die Festigkeitsdifferenz zu anderen Bearbeitungszuständen (insbesondere im Vergleich zur Polituranwendung) ergeben bzw. prüfen.

### 5.2.4 Gruppe 4

Gruppe 4 stellte mit der Kombination von sowohl Politur als auch einem anschließenden Glanzbrand nach dem Beschleifen der Verblendkeramikprüfkörper die in Richtlinien empfohlene Standardmethode dar, wobei manche Hersteller von Keramikpolierern nach der Politur keinen Glanzbrand mehr für zwingend notwendig halten.

Die möglichen Differenzen dieser divergierenden Empfehlungen und Vorgehen auf die biaxiale Festigkeit wurden nun untersucht.

### 5.2.5 Gruppe 5

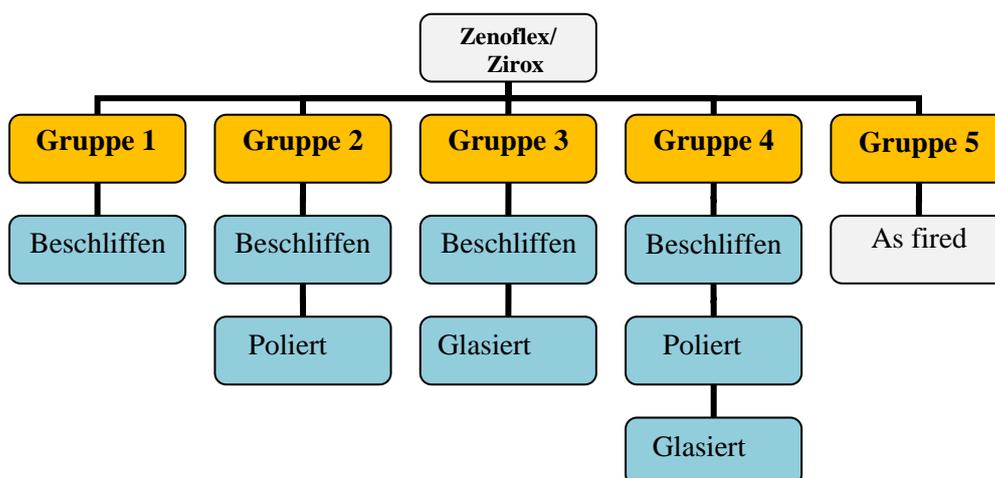
Gruppe 5 bestand aus 30 Prüfkörpern wie sie nach der Herstellung derselben aus dem Sinterofen entnommen wurden. Sie wurden keiner Oberflächenbearbeitung unterzogen, sondern dienten im Vergleich zu den anderen oberflächenbearbeiteten Prüfkörpern als Referenzproben. Sie werden im Folgenden als Referenzproben „as fired“ bzw. Gruppe 5 benannt.

### 5.3 Oberflächenbearbeitung Übersicht

Nach der Herstellung der Prüfkörper wurden diese den vorgesehenen Bearbeitungszuständen der Gruppen 1 bis 4 entsprechend präpariert (Schema 3).

Nach anschließender Säuberung und Beschriftung wurden die einzelnen Prüfkörper vermessen und von jeder Gruppe je zehn Proben mit dem Perthometer profilometrisch untersucht und die Rauigkeiten der einzelnen Oberflächen bestimmt.

Schema 3: Darstellung der jeweiligen Zustände von Zirox bzw. Zenoflex Bearbeitungen der Gruppen 1-4 sowie Referenz



## 5.4 Prüfverfahren

Mit allen Proben wurde der biaxiale Test nach DIN EN ISO 6872 durchgeführt.

### 5.4.1 Die Herstellung der Prüfkörper

#### 5.4.1.1 Das Pelletor-System®

Die Herstellung sämtlicher für die Studie verwendeten Prüfkörper erfolgte mit Hilfe des Pelletor-Systems® nach ZTM Gerald Wölz aus Tübingen, welches speziell dafür entwickelt wurde, standardisierte Prüfkörper aus einer pulverförmigen Keramik herzustellen [Spintzyk 2012].

Dieses Pelletor-System® besteht aus einer teilbaren Stahlform, einer speziellen Stanze, einem speziell auf die Stahlform geeichten Verdichtungsstamper mit enthaltenem konstantem Gewicht, einem Stahlschieber, einem Acrylatklopfer, einem zweiendigen Spatel, Pinsel,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Pulver, Platinfolien, sowie einer Isolierungslösung (s. Beschreibung unten).

Die teilbare Stahlform ermöglicht es gleichmäßige, möglichst identische Prüfkörper herzustellen, das Pelletor-System® beinhaltet hierbei Stahlformen für Prüfkörper mit dem Durchmesser von 16 Millimetern sowie für Prüfkörper mit einem Durchmesser von durchschnittlich 12 Millimetern.

Die Stahlform kann durch eine Drehbewegung geöffnet werden, so dass der darin friktiv eingebrachte Stempel entnommen werden kann, um diesen z.B. mit der zum Pelletor-System® gehörenden Isolierung zu benetzen.

Des Weiteren ist die Form so konzipiert, dass genau zwei Lagen Vlies-Papier, um die überschüssige Anmischflüssigkeit aufzunehmen, auf die Rohmasse eingebracht

werden können, damit die Form passgenau mit nur leichtem Widerstand geschlossen werden kann.

Auch für den Stahlschieber hat die Form eine exakt geeichte Führungsrille, so dass die Rohlingsprobe leichter entnommen werden kann.

Die Pelletor®-Stanze ermöglicht ein leichtes, standardisiertes Portionieren von bestimmten Massenvolumina aus einem Behältnis wie z.B. dem Materialgefäß selbst. Hierbei kann die Stanze einhändig in die aufzunehmende Masse gedrückt werden und mit leichtem Druck die aufgenommene Masse komprimiert werden.

Ein in die Stanze integrierter Anschlag verhindert sicher ein Überportionieren und kann nach Füllen des Stanzeninnenlumens durch leichtes Drehen arretiert werden.

Bei der Entnahme der gefüllten Stanze werden dann die Überschüsse entfernt, so dass das Material an dem Stanzenende plan abschließt und so bei jeder erneuten Aufnahme die gleichen Volumina entnommen werden.

Das Entleeren der Stanze geschieht durch rückläufige Drehung des zuvor arretierten Geschiebes.

Nach jeder erneuten Ingebrauchnahme ist die Stanze sowie ihr Innenraum zu reinigen und zu trocknen.

Der Verdichtungsturm enthält in einem Abstand von ungefähr zehn Zentimetern ein temporär arretiertes Gewicht, welches durch seitliches Bewegen aus der Arretierung gelöst werden kann, so dass sich das Gewicht im freien Fall geradlinig bis zum Boden des Verdichtungsturms fortbewegt.

An diesem Ende kann passgenau die zuvor gefüllte teilbare Stahlform so eingebracht werden, dass das Gewicht des Turmes auf den Stempel der Stahlform trifft, welcher dann die Rohmasse gegen die zwei Vliesschichten auf der anderen Seite der Rohmasse vom Stempel aus gesehen drückt.

Hierbei wird nicht nur ein standardisierter Verdichtungsprozess durchlaufen, sondern auch gleichzeitig die überschüssige Flüssigkeit von den Vlieslagen aufgenommen.

Der Schieber dient schließlich dem Entnehmen des Rohlings von der Oberfläche der Stahlform, auf welche der Rohling zuvor durch Herausdrücken des Stempels der Stahlform selbst gebracht werden kann.

Die Stahlform verfügt über eine für den Schieber passgenaue Aussparung, so dass eine reproduzierbare Führung des Schiebers ermöglicht wird.

Die dem Rohling zugewandte Seite ist genau dem Durchmesser sowie der Krümmung des Prüfkörpers angepasst, so dass Verformungen beim Herabschieben des Rohlings minimiert werden.

Die weiteren Zubehörgegenstände des Pelletor-Systems werden noch im Folgenden bei der Beschreibung der Prüfkörperherstellung beschrieben, so dass auf diese nun nicht genauer eingegangen werden soll.

#### **5.4.1.2 Ablauf der Prüfkörperherstellung**

Zur Herstellung der Prüfkörper wurde- wie oben beschrieben- das Pelletor-System® nach ZTM Gerald Wölz, Tübingen, genutzt (s. 5.4.1.1.). Die Materialien hierzu befanden sich alle in einem Kofferset und wurden vor Beginn auf Sauberkeit und Trockenheit hin geprüft.

Die Herstellung selbst begann mit der Präparation der Gebrauchsgegenstände. Zunächst wurde der in der Hohlform friktiv eingebrachte Stempel mit dem zum System gehörenden Isolating Fluid Carat (Hager&Werken GmbH&Co.KG Duisburg)

isoliert (s.Abb. 11). Hierbei reichte eine Pinselspitze des Isolating Fluid, welche dann über die Oberfläche des Stempels verteilt wurde. Auch die Form wurde isoliert (s.Abb.12).



Abb. 11: Isolierung des Stempels



Abb. 12: Isolierung der Form

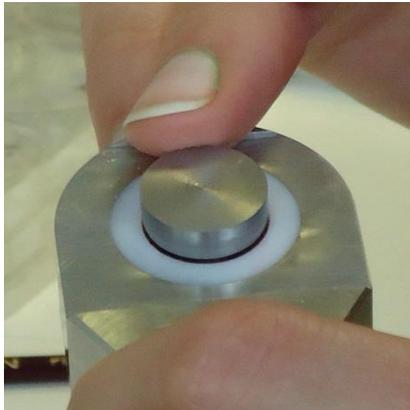


Abb.13: Der Stempel wird in die Stahlform zurückgeschoben

Der isolierte Stempel wurde dann zurück in die Stahlform gedrückt (s.Abb.13). Wichtig hierbei war, dass der Stempel bis zum Anschlag in der Stahlform versenkt wurde, um keinen Einfluss auf den späteren Stärkegrad der Probe zu nehmen. Für die Prüfkörperherstellung der folgenden Studie wurde die Stahlform für die 12 Millimeter Durchmesser betragenden Proben verwendet.

Anschließend wurden mit der Stanze zweimal die Massen von ca. 0,2 Gramm Pulver aufgenommen und in die Form portioniert (s. Abb.14).



Abb. 14: Stanze mit aufgenommenem Pulver.

Die insgesamt etwa 0,4 Gramm Pulver, welche sich nun in nahezu zylinderförmigen Volumina in dem Lumen der Hohlform befanden (s.Abb.14), wurden mit dem Spatel gleichmäßig in der Form verteilt und aufgelockert, so dass sich die folgende Zugabe der Flüssigkeit leichter mit den Keramikpartikeln vermischen konnte.



Abb. 15: Zwei Stanzen Pulver portioniert

Nacheinander wurden 7 Tropfen Anmischflüssigkeit hinzugegeben (s.Abb.16). Mit dem zum Pellektor®-System gehörenden Acrylatklopfer konnte durch leichtes Klopfen auf die Stahlform von außen das Benetzen aller Partikel durch die Flüssigkeit gefördert werden.

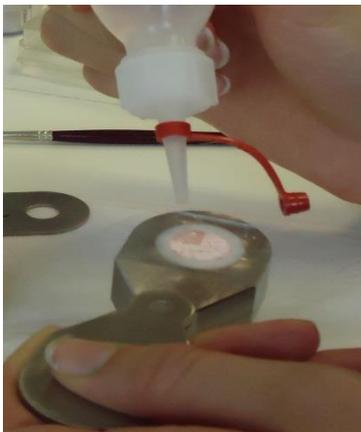


Abb. 16: Hinzugabe der Anmischflüssigkeit

Die Menge wurde mit Hilfe des Spatels ohne Einrühren von Luftbläschen homogen und gleichmäßig durchmengt bis kein von der nun rosafarbenen Grundfarbe des Pulvers abweichender Farbschleier mehr sichtbar war (s.Abb. 17).

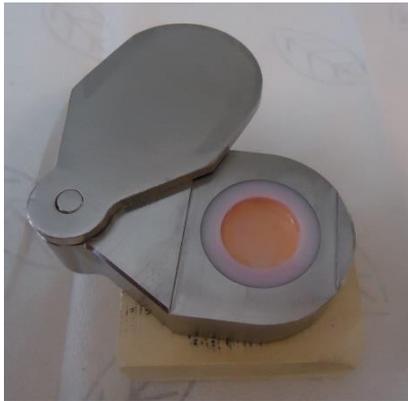


Abb. 17: Homogene und blasenfreie Durchmischung

Dann wurden durch erneutes leichtes Beklopfen mit dem Acrylatlöffel mögliche enthaltene Luftblasen zur Oberfläche gebracht und mit dem Spatel entfernt.

Es folgte das Schließen der Hohlform nach vorigem Auflegen einer doppelten Vliessschicht, welche die überschüssige Flüssigkeit aufnehmen sollte (s.Abb. 18 und Abb. 19).



Abb. 18: Einbringen einer doppelagigen Vliessschicht



Abb. 19: ...in die dafür vorgesehene Aussparung der Form

Anschließend wurde die geschlossene Hohlform um  $180^\circ$  gedreht, so dass der Stempel in der Hohlform nach unten zeigte, und in dieser Ausrichtung in den Verdichtungsturm des Pelletor-Systems® eingeschoben werden konnte (s.Abb. 20), in welcher sich in ungefähr zehn Zentimetern Höhe das beschriebene Gewicht befand (s .5.1.1).



Abb. 20: Einschieben der gedrehten Form in den Verdichtungsturm

Dieses Gewicht wurde pro Herstellungsprozess sechs mal manuell aus seiner Arretierung gelöst, in dem man den Griff des Gewichtes manuell zur Seite schob bis

es die senkrechte Führungsschiene erreichte, von wo es dann nach geradlinigem freiem Fall auf den Stempel der Prüfkörperform traf und die enthaltene Keramikrohmasse gleichmäßig verdichtete und gegen die doppelte Vliesschicht komprimierte (s. Abb. 21).



Abb. 21: Verdichten des Keramikrohlings

Anschließend wurde das Gewicht wieder in der Höhe arretiert und die geschlossene Prüfkörperform dem Geschiebe des Verdichtungsturms entnommen.

Nun wurde die Form wieder geöffnet und die doppelten Vlieslagen vorsichtig entfernt. Sollte beim Abheben der Vlieslagen etwas von der Keramikmasse am Vlies verblieben sein, war nicht nur das Vlies, sondern damit auch der Prüfkörperrohling zu verwerfen.

Nur wenn der Prüfkörper keine oberflächlichen Strukturdefizite zeigte wie z.B. auffällige Poren, wurde der Stempel vorsichtig manuell soweit herausgedrückt, dass das hergestellte Keramikpellet zum Vorschein kam und die Stempeloberfläche möglichst ein Plateau mit der restlichen Stahlform bildete (s. Abb. 22).



Abb. 22: Keramikrohling fertig zur Entnahme

Mit dem Pelletor®-Schieber, der genau den Durchmesser der Probe aufwies, konnte nun mit Hilfe der in der Hohlform vorhandenen Führungsrille das Pellet entnommen und auf einer mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Pulver beschichteten Platinfolie mittig positioniert werden. Bei Bedarf wurde die Probe kurz auf einer weichen Unterlage (z.B. Serviette) abgelegt (s.Abb. 23).

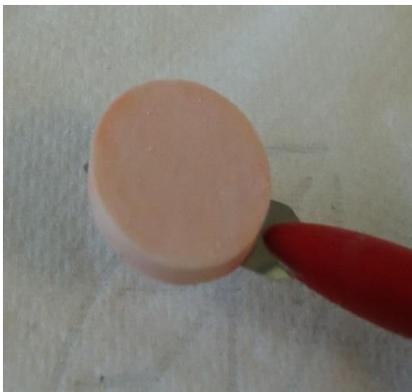


Abb. 23: Der fertige Keramikrohling

#### 5.4.1.3 Brennvorgang Prüfkörper

Während sich die Herstellungsabläufe für die Prüfkörper von Zirox sowie von Zenoflex nicht unterschieden, mussten die Sinterparameter auf das jeweilige Material genau abgestimmt und eingehalten werden.

Zum Sintern der Keramik wurde der Dentalkeramik-Ofen Austromat 654 press-i-dent (DEKEMA GmbH, Freilassing) verwendet (s.Abb. 24).

Die Sinterdaten wurden nach Herstellerangaben einprogrammiert. Es wurde jeweils das laut Herstellerangaben „Allgemeine Brennprogramm“ für das jeweilige Material im „Dentinbrand 1“ eingegeben sowie angewendet.

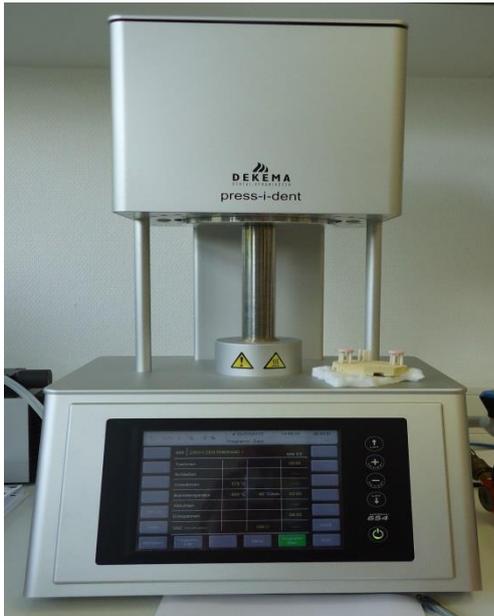


Abb. 24: Austromat 654 press-i-dent

Für Zenoflex betrug die Brenntemperatur 900 °C, die Vorwärmtemperatur wurde auf 575 °C (45 °C/min 2:00), VAC 100% (50hPa) festgelegt. Die Trocknungszeit wurde mit 9 Minuten eingehalten, so dass die gesamte Dauer des Sinterprogrammes in etwa 23 Minuten in Anspruch nahm (s.Tab. 2).

Tab. 2: Brennprogramm Zenoflex

Trocknen	9:00 min
Vorwärmen	575°C
Brennen	900°C    45°C/min    2:00
Entspannen	4:00 min.
VAC	100%

Bei Zirox zeigte das Programm ähnliche Werte, die Brenntemperatur für den „Dentinbrand 1“ betrug bei identischer Vorwärmtemperatur (575 °C, VAC 100%) ebenfalls 900 °C, die Trocknungszeit ebenfalls 9 Minuten und die Entspannungszeit 4 Minuten. Die gesamte Brenndauer dieses Programms dauerte ca. 35 Minuten (s.Tab. 3).

Tab. 3: Brennprogramm Zirox

Trocknen	9:00 min
Vorwärmen	575°C
Brennen	900°C
Entspannen	4:00 min.
VAC	100%

Vor dem Starten der Brennvorgänge wurden die Keramikrohlinge auf den mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Pulver bestäubten dünnen Platinfolien platziert, welche sich wiederum auf den Brennstäben befanden (s. Abb. 24).

Diese Keramikbrennstäbe (Renfert GmbH, Hilzingen) waren randständig in dem Brennträger fixiert.

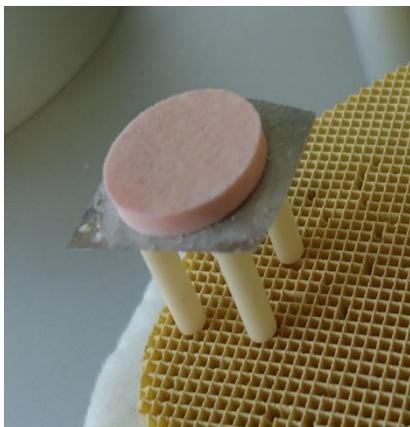


Abb. 25: Platzierung des Pellets auf den Brennstäben

Pro Brennträger wurden also in ca. 60° Abstand zueinander insgesamt 3 Keramikrohkörper auf den Brennstäben bzw. auf den mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Pulver dünn bestäubten, glatten circa 15 Millimeter Seitenlänge großen, quadratischen Platinfolien platziert (s.Abb. 26-28).

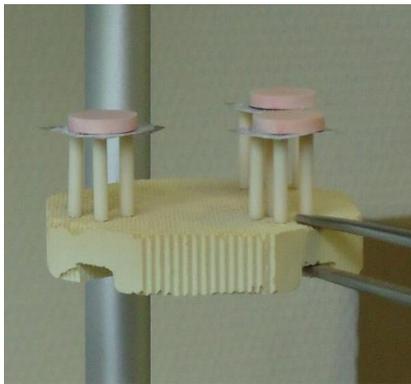


Abb. 26: Fertig für die Sinterung im Brennofen

Es wurde darauf geachtet, dass immer dieselbe Seite, auf der sich beim Verdichten das Vlies befunden hat, nach oben wies.



Abb. 27 und Abb. 28: Platzierung der Prüfkörperrohlinge auf dem Brennträger

Nach Beenden des Sinterprogrammes kühlten die Keramikpellets auf einer Brennwatte weiterhin langsam ab.

Insgesamt wurden für die Studie 150 Pellets von Zirox sowie 150 Prüfkörperpellets des Materials Zenoflex benötigt (je 5 Gruppen a 30 Prüfkörper).

Die hergestellten Prüfkörperpellets wiesen im Durchschnitt einen Durchmesser von etwa 12 Millimetern auf und waren in etwa 2 Millimeter dick.

Dies entspricht der unter anderem vom Hersteller für diese Materialien empfohlenen optimalen inzisalen Verblendstärke, welche später durch Simulation der Einschleifkorrekturen und Politurvorgänge noch minimal reduziert wurde.

#### **5.4.2 Bearbeitung der Oberfläche**

An die Prüfkörperherstellung schloss sich nun die Bearbeitung der jeweiligen Gruppen an.

Da die Gruppe 5 sowohl für Zirox als auch für die Materialgruppe Zenoflex als Referenzgruppe „as fired“ herangezogen wurde, wurde diese in ihrem jetzigen Zustand belassen und nicht weiter bearbeitet. Die jeweils 30 Prüfkörper der Gruppen 1-4 wurden zunächst standardisiert beschliffen, anschließend wurden die Gruppen 2 und 4 einheitlich poliert und abschließend bekamen die Proben der Gruppen 3 und 4 beider Materialien ihren jeweiligen materialspezifischen Glanzbrand aufgesintert (s.Tab. 2).

Die detaillierten Vorgehensweisen werden im Folgenden in den jeweils entsprechenden Unterpunkten beschrieben (s.u.).

<b>Gruppe 1</b> Zirox/Zenoflex	30 Stück	1. Beschleifen
<b>Gruppe 2</b> Zirox/Zenoflex	30 Stück	1. Beschleifen 2. Polieren
<b>Gruppe 3</b> Zirox/Zenoflex	30 Stück	1. Beschleifen 2. Glasieren
<b>Gruppe 4</b> Zirox/Zenoflex	30 Stück	1. Beschleifen 2. Polieren 3. Glasieren
<b>Gruppe 5</b> Zirox/Zenoflex	30 Stück	Ohne Bearbeitung

Tab. 4: Chronologische Darstellung der Arbeitsabläufe nach Gruppen

#### 5.4.2.1. Beschleifen der Prüfkörper

Das oberflächliche Beschleifen der Prüfkörper sollte die klinische Situation simulieren, bei der die fertig verblendete vollkeramische Arbeit zur Korrektur von Okklusionsdifferenzen ( z.B. beim Vorliegen von Vorkontakten, Balancen/ Hyperbalancen, scharfen Kanten etc.) eingeschliffen wird.

Dementsprechend wurde ein zahnärztliches rotes Winkelstück (INTRAcompact Winkelstück 25 LHC, Firma Kaltenbach & Voigt, Biberach) verwendet sowie ein für Intraorale Korrekturmaßnahmen empfohlener feinkörniger Rotring-diamant ( REF 8882L 314.014, ISO 806 314 143514 014, LOT 766 125, Komet® Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Germany).

Das 12 Millimeter lange Arbeitsteil des Rotringdiamanten mit der Körnung von ungefähr 50  $\mu\text{m}$  und der Form eines Rundkopfzylinders wurde speziell auf den Durchmesser der Probenoberfläche angepasst, so dass der Diamant den gesamten Durchmesser der Keramikpellets beim Beschleifen erfassen konnte und das Risiko unkontrollierter, das Ergebnis beeinflussender Unebenheiten gerade in der Prüfkörpermitte minimiert werden konnte.

Um den Beschleifprozess möglichst für alle Proben gleich zu gestalten war es nicht nur wichtig, dass der Diamant der Oberfläche des Prüfkörpers gleichmäßig auflag bzw. diese ganzflächig beschliff, sondern auch Druck und Wasserkühlung entsprechend angepasst wurden.

Zu diesem Zweck wurde das Gerät „Proxxon“ verwendet (s. Abb. 29)[Fokas-Tsentzeratos 2010].

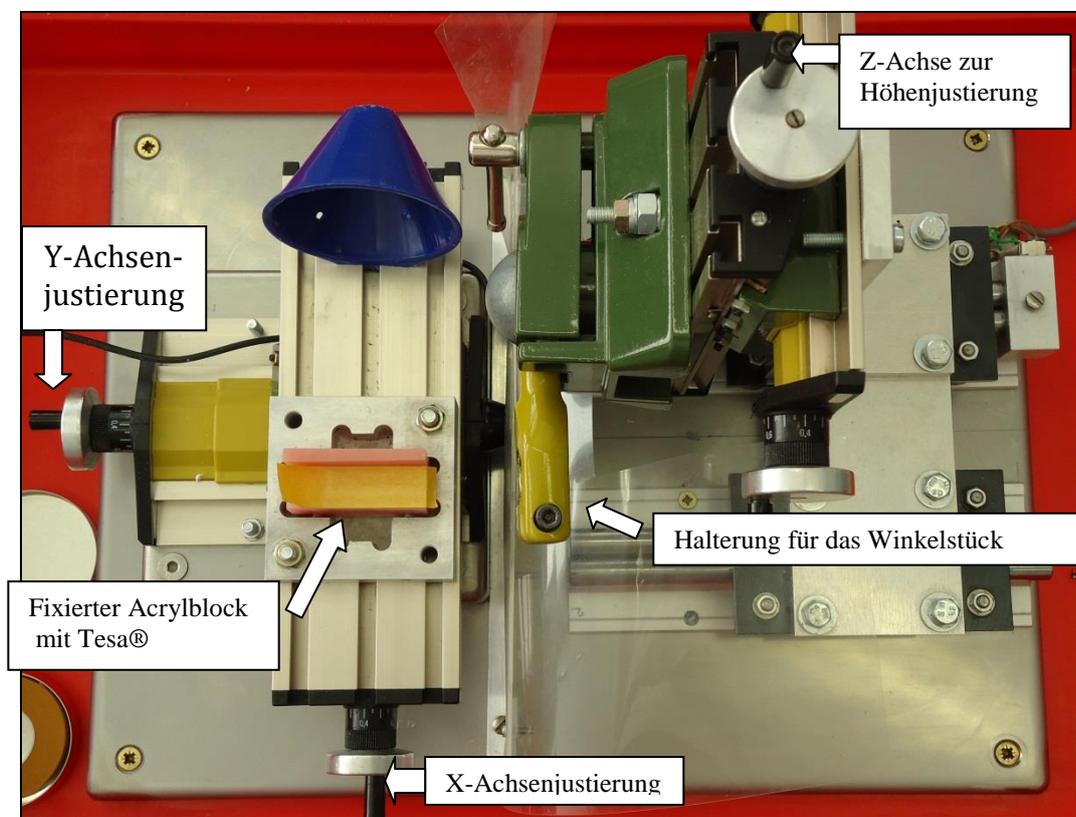


Abb. 29: Das Gerät „Proxxon“ mit dreidimensionaler Justierungsmöglichkeit

Dieses speziell von der Sektion für Medizinische Werkstoffkunde und Technologie der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik des Universitätsklinikums Tübingen konzipierte und angefertigte Gerät ermöglichte eine Justierung vieler Parameter, so dass die Variablen im Schleifprozess nahezu konstant gehalten werden konnten. Hierbei wurde das Winkelstück mit dem zuvor eingespannten Diamanten in einen Halter an der Schleifvorrichtung eingespannt, der vorerst noch beweglich war.

Die zu beschleifenden Proben wurden mittels eines doppelseitig klebenden Tesa®-Filmstreifens (tesa AG, Hamburg) mit 15 Millimetern Breite an einem Acrylblock befestigt.

Der Acrylblock wurde in dem Gerät „Proxxon“ festgeschraubt und konnte mittels Drehrädchen manuell sowohl in X-Achse als auch in Y-Achse bewegt werden. (s. Abb. 29)

Hierbei befand sich die Oberfläche der Verblendkeramikprüfkörper immer oben, also zum Winkelstück/zum rotierenden Diamanten hin (s. Abb. 30).

Die Halterung für das Winkelstück beinhaltete ein Kugelgelenk, welches eine nahezu freie Beweglichkeit ermöglichte, so dass nun das Arbeitsteil in dem eingespannten Winkelstück so positioniert und fixiert werden konnte, dass es zu der Probenoberfläche parallel stand.

Die Höhe des Winkelstückes konnte mit einem separaten Drehrädchen für die Z-Achse noch nach Fixierung geändert werden, ohne die zuvor fixierte Einstellung der angenäherten Parallelität des Arbeitsteils zur Probenoberfläche zu verändern.

Feinkorrekturen wurden mit den X- und Y-Rädchen durchgeführt und bei jeder Probe neu justiert.

Eine Überprüfung der Justierung wurde stets durch Benetzen des Diamanten mit Wasser durchgeführt, der zunächst ohne Rotation über die fixierten Proben geführt wurde. War anschließend die gesamte Oberfläche der Probe befeuchtet, konnte die Justierung beibehalten werden und der Schleifprozess wurde initiiert.

Während des Schleifprozesses war die Probenkörperoberfläche ständig mit Wasser benetzt, um einem Erhitzen der Keramik vorzubeugen. Durch die Feuchtigkeit war der fixierende Tesa®-Klebestreifen nach jeder Probe zu erneuern.

Der Diamant wurde jeweils nach 8 Keramikpellets erneuert, um eine gleichbleibende Schleifleistung zu optimieren bzw. zu gewährleisten.

Die Umdrehungszahl war auf das vom Hersteller des Diamanten (Komet Brasseler, Lemgo) beschriebene Optimum von 20.000 Umdrehungen pro Minute konstant eingestellt.

Die Einschleifsimulation wurde pro Probe jeweils dann beendet, sobald der Glanz der Prüfkörper auf der gesamten Prüfkörperoberfläche matt wurde.

Dies war durchschnittlich in etwa bei einer Dickenreduktion von ungefähr 0,1 mm erreicht.

Beschliffen wurden alle 30 Prüfkörper der Gruppen 1 bis 4 beider Materialien, also entsprechend 240 Proben insgesamt.

Nach dem Beschleifen wurden die Prüfkörperpellets gereinigt und getrocknet.

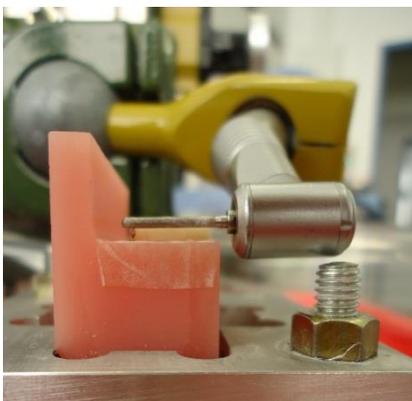


Abb. 30: Positionierung und Überprüfung des Diamanten

### 5.4.2.2 Politur der Prüfkörper

Der Schleifsimulation anschließend erfolgte die Politur der Prüfkörper der Gruppen 2 sowie der Gruppen 4 beider Materialien (Zirox und Zenoflex).

Für die Politur wurden die kelchförmigen Polierköpfe absteigender Korngröße aus dem EVE Diapol Keramik-Poliersatz RA 105 (Art.Nr 19955) verwendet (s. Abb. 31).

Diese waren nach ihren Körnungsgraden von grob über mittel nach fein farblich voneinander zu unterscheiden.

Der blaue (gröbere) Polierkelch soll die Oberfläche der Keramik laut Herstellerbeschreibung (EVE ErnstVetter GmbH, D-75179 Pforzheim) „Abtragen und Verschleifen“, der mittelgrobe, rosafarbene Diamantpolierer „Vorpolieren“ und der feine (gräulich eingefärbte) Polierkelch wird für die „Hochglanzpolitur von Keramik“ angewandt.

Alle diese Polieraufsätze lassen sich in ein grünes Winkelstück einspannen und werden u.a. in der Tübinger Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kiefererkrankungen zur Keramikpolitur z.B. nach Einschleifmaßnahmen angewandt.



Abb. 31 und 32: Diamantpolierer verschiedener Polierstufen fürs Grünringwinkelstück

In der vorliegenden Studie wurde zunächst wieder mit dem Gerät Proxxon gearbeitet. Um dennoch verschiedene notwendige Polierrichtungen zu erreichen, wurde jede zu polierende Probe erst gegen die im ersten Bearbeitungsschritt entstandene Schleifrichtung poliert, dann um 90° gedreht und wieder überlappend poliert, dann um 45° gedreht und anschließend noch einmal um 90° gedreht. Alle Polierrichtungen wurden jeweils für 2 Minuten beibehalten.

Da dieses Vorgehen jedoch einen unzureichenden Polierzustand zum Ergebnis hatte, wurde die geradlinige Politurrichtung zugunsten der manuellen, kreisförmigen Politur verlassen und alle Prüfkörper mit allen drei Polierkelchstufen wiederholt poliert bis das zuvor entstandene Schleifmuster verschwand und der keramische Glanz wieder auf die Oberfläche zurückkehrte.

Die Politur wurde mit dem Grünring-Winkelstück ( INTRA matic LUX 2, 7LN, KaVo, Germany) unter ständiger Wasserkühlung aus drei in jeweils circa 60° um den rotierenden Polierkelch angeordneten Wasserdüsen durchgeführt, die Umdrehungszahl wurde konstant auf 9000 Umdrehungen pro Minute eingestellt.

Der Hersteller EVE gibt für die gewählten Polierkelche als optimale Umdrehungszahl ein Intervall von 7000-12.000 Umdrehungen pro Minute an, so dass hierbei ein mittlerer Wert gewählt wurde.

Insgesamt dauerte die manuelle Politur pro Prüfkörper in allen drei Polierstufen zusammengefasst ungefähr fünf bis sechs Minuten, wobei die erste Polierstufe mit den „abtragenden Eigenschaften“ sowie die mittlere „Vorpolitur“ 2 Minuten, die Hochglanzpolitur etwa 1 Minute über die gesamte Oberfläche in Anspruch nahm.

Die Politur beider Materialien wurde zeitlich aufeinander abgestimmt, was bedeutet, dass auch die Materialgruppen Gruppe 2 und Gruppe 4 von Zenoflex entsprechend 5 Minuten nach identischem Schema poliert wurden. Nach der Politur von jeweils 15 Prüfkörpern einer Politurstärke wurden die Polierkelche erneuert.

Nach der Politur wurden die Prüfkörper gereinigt und getrocknet, die insgesamt 60 Prüfkörper der Gruppen 2 wurden nun vermessen und beschriftet, die Gruppen 4 wurden als nächstes glasiert.

Tab. 5: Poliervorgang für die Gruppen 2 und die Gruppe 4 beider Materialgruppen

Polierkelch <b>grob</b> (blau)	<b>2 Minuten</b>	<b>Kreisförmige Politur</b> <b>9.000 Umdreh./Min.</b> 1 Polierkelch/ 15 Proben
Polierkelch <b>mittel</b> (rosa)	<b>2 Minuten</b>	
Polierkelch <b>fein</b> (grau)	<b>1 Minute</b>	

### 5.4.2.3. Der Glanzbrand der Prüfkörper

Die Gruppen 3 und 4 beider Materialgruppen wurden zusätzlich glasiert, wobei die Prüfkörper der Gruppen zuvor lediglich beschliffen, die jeweils 30 Prüfkörper der Gruppen 4 von Zirox und Zenoflex nach dem Beschleifen bereits zuvor poliert worden waren (s. 5.2.).

Die Glasuren waren den Materialien Zirox bzw. Zenoflex entsprechend zugeordnet und daher unterschiedlich.

Für die Verblendkeramik Zirox wurde die Glasurmasse „Zirox Glaze“ verwendet, für die leuzithaltige Verblendkeramik Zenoflex wurde die Glasurmasse „Glaze RZ“ (beide entsprechend den zu glasierenden Verblendkeramiken von der Fa. Wieland Dental, Pforzheim, Germany) aufgesintert.

Als Anmischflüssigkeit diente das entsprechende „Stain Liquid“ (Fa.Wieland) und wurde tropfenweise dem Pulver beigemischt, welches zuvor in ein spezielles Porzellanmischgefäß appliziert wurde.

Die zuvor gereinigten und getrockneten Keramikpellets wurden nun in einer Pinzette mit der freien Oberfläche nach oben waagrecht gehalten, die angemischte Glasurmasse mit einem Pinsel dünn aufgetragen und mit einem Riffelinstrument an der das Keramikpellet haltenden Pinzette entlang geriffelt, so dass sich der Glasurfilm gleichmäßig verteilte und eventuell vorhandene Luftbläschen entweichen konnten.

Nach dem Auftragen der Glasur wurde das Keramikpellet vorsichtig auf die den schon beim Dentinbrand verwendeten Brennträger gelegt.

Identisch zum Dentinbrand befanden sich Fächerpins mit aufgelegter Platinfolie randständig in dem wabenförmigen Brennträger.

Die Platinfolie ist wie beim Dentinbrand zuvor zusätzlich mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Pulver dünn bestäubt worden.

Pro Brennträger und Glanzbrand wurden wie zuvor drei Keramikpellets gleichzeitig dem Ofen zugeführt. Die drei Proben befanden sich hierbei in größtmöglichem Abstand voneinander in einem circa  $120^\circ$  großen Winkel zueinander, randständig des wabenförmigen Brennträgers, auf jeweils vier im Quadrat angeordneten Fächerpins.

Der Brenngutträger selbst wurde zentral im Ofen platziert, so dass die Keramikpellets während des Brennvorganges gleichmäßig randständig positioniert bzw. zu den Heizelementen hin orientiert waren.

Für die Glanzbrände wurden die vom Hersteller gegebenen Brennvorgaben im Ofen eingespeichert und programmiert.

Der Glanzbrand für Zirox wurde bei  $880^\circ\text{C}$  im Dental-Keramikofen Austromat 564 press-i-dent (DEKEMA, Freilassing) durchgeführt. Die Vorwärmtemperatur betrug  $575^\circ\text{C}$ , als Trocknungszeit wurden fünf Minuten einprogrammiert, eine Entspannung

von vier Minuten war im Programm vorgesehen. Sobald das Programm beendet war, kühlten die Proben weiterhin auf einer Brennwatte gebettet vollständig langsam ab.

Tab. 6: Glanzbrandprogramm Zirot

Trocknen	5:00 min
Vorwärmen	575°C
Brennen	880°C    45°C/min    1:00
Entspannen	4:00 min.
VAC	-----

Der Glanzbrand für Zenoflex wurde bei gleicher Temperatur (880 °C) sowie identischer Vorwärmtemperatur (575 °C) gesintert, die Trocknungszeit betrug ebenfalls fünf Minuten, lediglich die Entspannungszeit war mit sechs Minuten etwas höher angesetzt. Auch diese Proben kühlten nach dem Brand langsam ab. In Tab. 6 und 7 sind die jeweiligen Brennparameter zusammengefasst.

Tab. 7: Glanzbrandprogramm Zenoflex

Trocknen	5:00 min
Vorwärmen	575°C
Brennen	880°C    45°C/min    1:00
Entspannen	6:00 min.
VAC	-----

Nach dem Glasieren der insgesamt 120 Proben wurden diese von Rückständen befreit und getrocknet. Anschließend wurden auch diese Proben beschriftet, vermessen sowie der Rauheitsmessung zugeführt.

## 5.5. Prüfungen und Messungen

### 5.5.1 Rauigkeitsmessungen

Für die Differenzierung der Oberflächenrauigkeiten innerhalb der Gruppe, zwischen den jeweils identisch bearbeiteten Gruppen der Materialien Zenoflex und Zirox untereinander sowie den direkten Vergleich der Rauigkeiten der einzelnen oberflächlich verschieden bearbeiteten Gruppen wurden die Oberflächentopographien von 10 Proben pro Gruppe erhoben.

Dazu wurde das Perthometer (Perthometer R6P, MAHR GmbH, Göttingen, Germany) verwendet, welches die gemessenen Daten direkt über den Computer verarbeitet hat. Um die Messungen durchzuführen, wurden die Proben auf einem Objektträger fixiert, so dass diese möglichst waagrecht ausgerichtet waren bzw. parallel zur Bewegungsrichtung der Messnadel des Perthometers hin.

Bei den beschliffenen Proben der Gruppen 2 wurden die Proben entsprechend orthogonal ihrer sichtbaren Schleifrichtung unter den die Oberflächenstruktur abtastenden Perthometersensor gelegt. Auch bei den Proben der Gruppen 3 war dies trotz oberflächlicher Glasur möglich, da die durch die aufgesinterte Glasurmasse bedeckte Schleifrichtung durch die Transparenz des Glanzbrandes sichtbar war.

Sobald die Probe unter der Perthometernadel platziert und ausgerichtet worden war, wurde der Objektträger auf dem Perthometertisch mittels Silikonmasse fixiert, um einem Verrutschen sowie Bewegungen der Probe insgesamt während der Messung vorzubeugen.

Wenn die Ausrichtung abgeschlossen war, konnte die Nadel auf die Probe abgesenkt werden. Bei der Feinjustierung wurde eine Kontaktstärke von knapp unter  $-10\mu\text{m}$  bis  $-3\mu\text{m}$  angestrebt und eingestellt.

Pro Gruppe wurden jeweils 10 Prüfkörper profilometrisch aufgezeichnet und ausgewertet (s. 6 Ergebnisse).

Der Sensor des Perthometers maß hierbei mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,50 Millimetern pro Sekunde und einer Auflösung im Wert von 250  $\mu\text{m}$  (+/-) entlang der linearen Bewegrichtung in der X-Achse. Der Punkteabstand betrug jeweils 0,50  $\mu\text{m}$ .

Bei jeder Probe wurden insgesamt 121 Profile über eine Fläche von drei mal drei Millimetern topographisch erfasst.

Dieses repräsentative Areal wurde jeweils in der Probenmitte gewählt.

Für die Auswertung wurden von jeder Probe der Parameter  $R_a$  übertragen und die Mittelwerte aus 121 Profilen berechnet sowie der Mittelwert von  $R_a$  aus allen 10 Proben bestimmt.

Jedes einzelne Profil wurde hierbei während der Messung noch einmal in jeweils fünf gleich große Sequenzen eingeteilt, aus deren Mittelwerten dann die Rauheitswerte  $R_a$  in  $\mu\text{m}$  berechnet wurden (s. Ergebnisse).

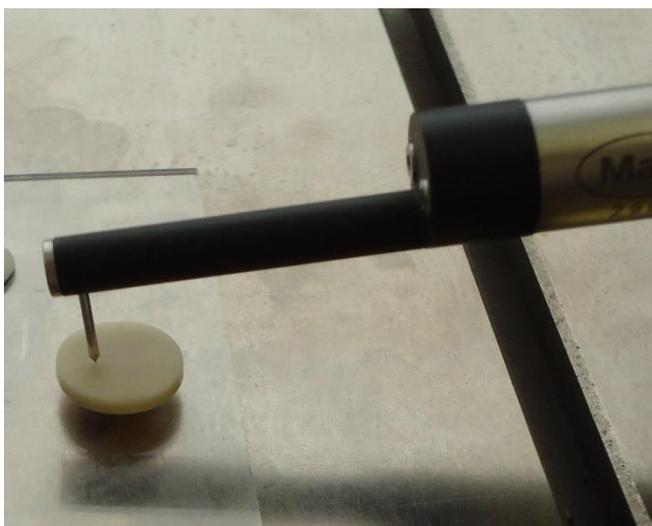


Abb. 33: Perthometernadel auf der Probenkörperoberfläche

## 5.5.2 Biaxialer Test

Der Biaxiale Test wurde entsprechend der Deutschen Norm DIN EN ISO 6872 für Keramische Werkstoffe 2009 durchgeführt (s. Abb. 7 und 8).

### 5.5.2.1 Testprinzip des Biaxialen Testes

Um die Biegefestigkeiten und deren Differenzen zwischen den oberflächlich verschieden bearbeiteten Gruppen biaxial zu testen und darzustellen, wurde jeder Probekörper mit der Oberfläche nach unten auf den drei Auflagerkugeln des Prüfgerätes platziert.

Diese Auflagerkugeln waren so angeordnet, dass sie einen Winkel von  $120^\circ$  zueinander bildeten, somit auf einem Unterstützungskreis (durch die Eckpunkte des gedachten gleichseitigen Dreieckes) mit einem Durchmesser von 10 mm, entsprechend einem Radius von 5 mm lagen.

In der Mitte der Testmaschine befand sich ein Kraftstempel mit einem Durchmesser von 1,5 mm, welcher sich während des Tests vertikal auf die oben liegende Prüfkörperunterfläche absenkte und sowohl zentral der Probe als auch zentral des von den Auflagerkugeln gebildeten Unterstützungskreises orthogonal zu der Probenoberfläche Kraft ausübte.

Während der Belastung wurde die untere Seite, entsprechend der Prüfkörperoberfläche, unter Zugspannung gesetzt und die Kraft, die bei jeder einzelnen Probe zum Bruch führte wurde als  $F_{\max}$ -Wert registriert.

Als Prüfgerät wurde die Universalprüfmaschine (Zwick, Z010, Ulm, Germany) verwendet (s.Abb. 34). Die Vorschubgeschwindigkeit betrug 1mm/min, zur Aufzeichnung der Versuchparameter wurde die Computersoftware testXpert® 12.0 von Zwick genutzt.

Darüberhinaus wurde für jede Probe die Anzahl der entstandenen Bruchstücke notiert.



Abb. 34: Zwick-Universalprüfmaschine

### 5.5.2.3 Berechnung der Biaxialen Festigkeit

Mit den jeweils beim Bruch gemessenen Kräften ( $F_{\max}$  in N) wurden anschliessend die Biegefestigkeiten ( $\sigma$  in MPa) beim biaxialen Test (die maximale Zugspannung in der Mitte der Probe) berechnet.

Als Parameter für die Berechnung dienten neben den beim Bruch gemessenen Gesamtkräften ( $F_{\max}$  in N) entsprechend der Formel zur Berechnung der Festigkeit nach DIN EN ISO 6872 zum einen der Radius des Unterstützungskreisen (5 mm) und der Radius des belasteten Bereiches (0,75 mm), zum anderen der Radius und die Dicke des Probekörpers (bei jeder Probe an drei Stellen mit einem digitalen Messschieber vermessen und mittelwertig in Millimetern bestimmt), sowie die Poisson'sche Querkontraktionszahl  $\nu$ , für welche der konstante Wert 0,25 in die Rechnung mit einfluss.

Die Formel zur Berechnung der Festigkeit lautet:  $\sigma = -0,2387 \cdot P (X-Y)/b^2$

Dabei ist

$\sigma$  die maximale Zugspannung in der Mitte (Biaxiale Festigkeit in MPa)

$P$  die beim Bruch gemessene Gesamtkraft ( $F_{\max}$  in Newton)

$$X = (1+\nu)\ln(r_2/r_3)^2 + [(1-\nu)/2](r_2/r_3)^2$$

$$Y = (1+\nu)[1+\ln(r_1/r_3)^2] + (1-\nu)(r_1/r_3)^2$$

$b$  die Dicke des Probekörpers am Bruchsprung (in Millimeter)

Dabei ist

$\nu$  die Poisson'sche Querkontraktionszahl

$r_1$  der Radius der Unterstützungskreises (in Millimeter)

$r_2$  der Radius des belasteten Bereichs (in Millimeter)

$r_3$  der Radius des Probekörpers (in Millimeter)

### 5.5.3 Weibull Statistik

Die Biegefestigkeitswerte wurden mit Hilfe der Weibullstatistik analysiert und die jeweiligen charakteristischen Weibullfestigkeiten und Module berechnet.

Dabei wurden zunächst die Biegefestigkeiten jeder Gruppe nach aufsteigenden Werten hin sortiert und jedem Prüfkörper somit aufsteigend ein Rang von 1 bis 30 zugeordnet. Anhand dieses Ranges wurde jedem Prüfkörper entsprechend eine Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  zugeordnet und diese Versagenswahrscheinlichkeit anschließend gegen die Biegefestigkeit in einem Punktediagramm veranschaulicht. Hierzu wurden die Biegefestigkeiten in den Natürlichen Logarithmus  $\ln \sigma$  (MPa) transformiert und auf der Abszisse abgebildet, die kumulativen Versagenswahrscheinlichkeiten in den Natürlichen Doppellogarithmus  $\ln \ln(1/(1-P_f))$  auf der Ordinaten-Achse.

Mit Hilfe der Trendlinie, welche eine lineare Funktion ( $y = mx+b$ ) beschreibt, wurde dann die Steigung dieser berechnet, welche sogleich auch den Wert des Weibull-Moduls ergab.

Um die Charakteristische Weibullfestigkeit zu errechnen, wurde die Gleichung gleich null gesetzt und der x-Wert für  $y=0$  bestimmt. Dieser x-Wert ist dann gleich dem Natürlichen Logarithmus von der Charakteristischen Weibullfestigkeit ( $x = \ln \sigma_0$ ).

### 5.5.4 t-Test

Zusätzlich wurde der unabhängige t-Test angewandt, um die Signifikanz der Ergebnisse zu beurteilen. Hierbei wurden innerhalb der Materialien alle Gruppen miteinander verglichen, sowie unter den Materialien Zirox und Zenoflex jeweils die analog bearbeiteten Gruppen (1-1, 2-2,...usw.).

Signifikanz beurteilt die Zufälligkeit des Zustandekommens der Ergebnisse. Der Zweistichproben t-Test ist ein Signifikanztest, der anhand der Mittelwerte zweier Stichproben prüft, ob die Mittelwerte zweier Grundgesamtheiten einander gleich sind (s. 2.2.9).

Es wurde der t-Test, zweiseitig (d.h. mit zwei Endflächen) sowie von Typ 1 (d.h. gepaart) angewendet. Als Signifikanzebene wurde  $p = 0,05$  gewählt.

Die Signifikanzen wurden computerunterstützt errechnet und zur Auswertung herangezogen (Programm Origin 6.0 G Professional).

### **5.5.5 REM-Analyse**

Um die verschiedenen Oberflächenbeschaffenheiten zu veranschaulichen wurden REM-Aufnahmen erstellt.

Dazu wurden einzelne Proben jeder Gruppe zunächst vorbereitet (u..a. gesputtert) und danach analysiert.

Da die Betrachtung nach dem Biaxialen Test durchgeführt wurde, wurden einzelne Bruchstücke zur Demonstration herangezogen und betrachtet.

Die Präparation der einzelnen Segmente erfolgte hierbei durch Auftragen einer Silberlösung in Xylol, welche in flüssigem Zustand auf die Oberflächen der zu betrachtenden Proben aufgetragen wurde.

Nach Verdunsten des Xylols wurden die an einem Halter befestigten Proben unter einer Gold-Palladiumelektrode gesputtert (Sputtergerät SCD 005, BAL-Tec AG, Liechtenstein).

Die Sputterzeit betrug hierbei 60 Sekunden, der Arbeitsdruck 0,05 Millibar und der Arbeitsabstand wurde auf 35 Millimeter festgelegt. Als Betriebsgas des Sputtergerätes wurde Argon verwendet.

Anschließend wurden die gesputterten Proben unter dem Rasterelektronenmikroskop LEO 1430 (Zeiss, Jena/Germany) betrachtet und in den Vergrößerungen 35-fach, 500-fach sowie 1000-fach betrachtet und nebeneinander gestellt.

### **5.5.6 Fotos der bearbeiteten Oberflächen**

Da zuvor entstandene digitale Photographien zur Verdeutlichung der verschiedenen Oberflächenstrukturen selbst durch mikroskopische 3D-Darstellungen keine aussagekräftigen Bilder ergaben, wurden die Oberflächen nach dem Sputtervorgang wiederholt in Nahaufnahmen fotografiert, so dass man vor allem bei Gruppe 1 die beschliffenen Oberflächen durch die stärkere Lichtbrechung der nun metallischen Oberflächen gut erkennen konnte (s.Ergebnisse).

## 6. Ergebnisse

### 6.1 Rauigkeiten

#### 6.1.1 Zirox

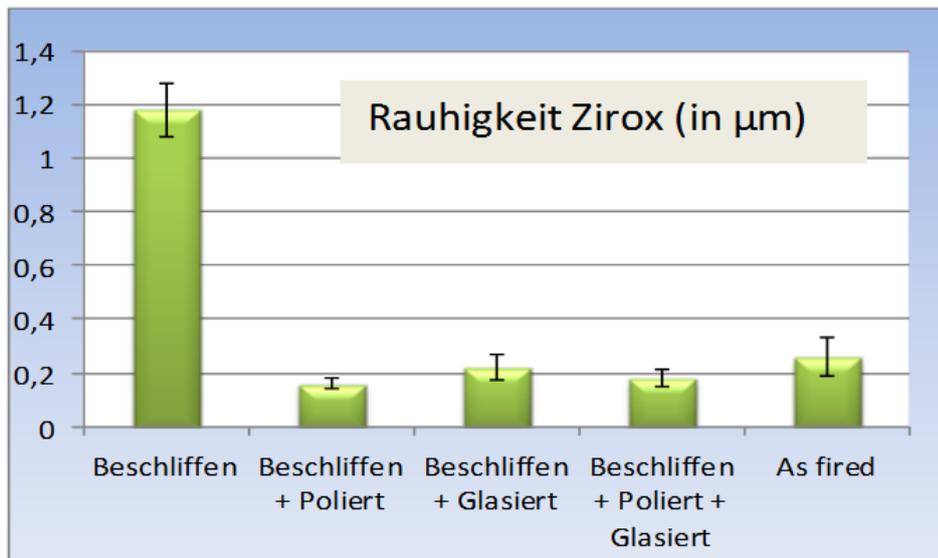
Die mit dem Perthometer gemessenen durchschnittlichen Mittenrauhwerte Ra zeigen deutliche Unterschiede vor allem von Gruppe 1 („Beschliffen“) zu den anderen Gruppen (s.Tab. 8 und Abb. 35).

Auffällig ist, dass die Referenzgruppe „As fired“ (5) einen grösseren durchschnittlichen Rauwert aufweist ( $0,26\ \mu\text{m}$ ) als die polierten und/oder glasierten Prüfkörper der Gruppen 2 bis 4, welche Rauigkeiten von im Mittel  $0,16\ \mu\text{m}$  bis  $0,22\ \mu\text{m}$  aufweisen.

Der Mittenrauhwert von Zirox Gruppe 1, welche lediglich mit einem Rotringdiamanten beschliffen wurde, beträgt im Durchschnitt  $1,18\ \mu\text{m}$ , ist also fast fünf mal so gross wie der Ausgangwert der unbearbeiteten Prüfkörperoberflächen.

Tab. 8: Mittenrauhwerte Ra von Zirox (in  $\mu\text{m}$ )

<b>Zirox</b>	Rauhigkeit	StAbwN
Rauhigkeitswerte	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )
Beschliffen (1)	1,18	0,1
Beschliffen + Poliert (2)	0,16	0,02
Beschliffen + Glasiert (3)	0,22	0,05
Beschliffen + Poliert + Glasiert (4)	0,18	0,03
As fired (5)	0,26	0,07

Abb. 35: Mittenrauhwert (Ra in  $\mu\text{m}$ ) von Zirox

### 6.1.2 Zenoflex

Bei Zenoflex ist wie auch bei Zirotax der Mittenrauhwert  $R_a$  von Gruppe 1 („Beschliffen“), mit einem Betrag von  $1,13 \mu\text{m}$ , der mit Abstand höchste Wert.

Hier folgt anders als bei Zirotax die Gruppe 2 („Beschliffen und poliert“), danach erst die unbearbeitete Oberfläche der Referenzgruppe (Gruppe 5 „As fired“).

Tab. 9: Mittenrauhwerte  $R_a$  von Zenoflex (in  $\mu\text{m}$ )

Zenoflex	Rauhigkeit	StAbwN
Rauhigkeitswerte	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
Beschliffen (1)	1,13	0,09
Beschliffen + Poliert (2)	0,26	0,03
Beschliffen + Glasiert (3)	0,09	0,02
Beschliffen + Poliert + Glasiert (4)	0,1	0,02
As fired (5)	0,15	0,04

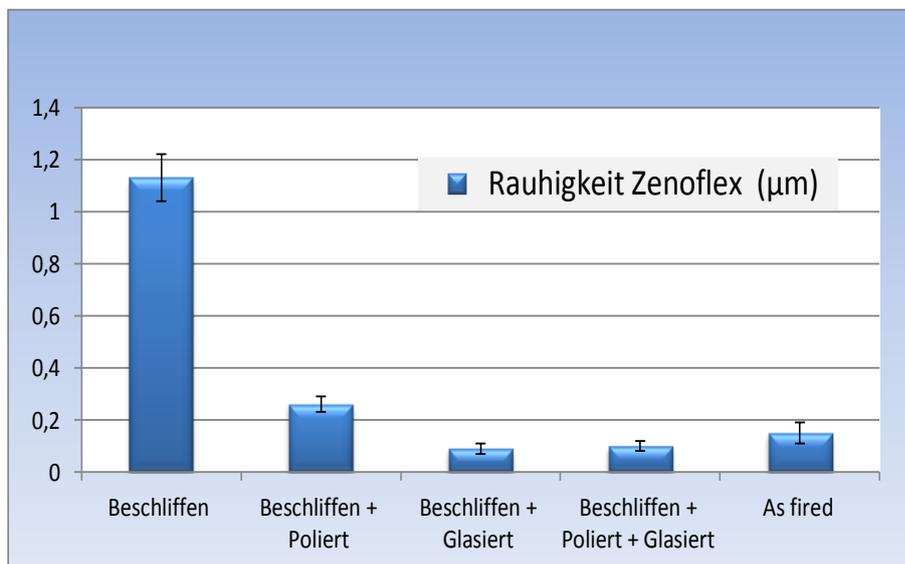


Abb. 36: Mittenrauhwerte  $R_a$  (in  $\mu\text{m}$ ) von Zenoflex sowie deren Standardabweichung

Die Standardabweichungen innerhalb der Gruppen liegen zwischen  $0,02\ \mu\text{m}$ - $0,04\ \mu\text{m}$  für die Gruppen 2 bis 4 sowie  $0,09\ \mu\text{m}$  für die Gruppe 1 (s.Tab. 9 und Abb. 36).

### 6.1.3 Zirox und Zenoflex im Vergleich

Im Vergleich der Mittenrauhwerte  $R_a$  zwischen den Gruppen von jeweils Zirox und Zenoflex (Abb. 35) wird deutlich, dass die beschliffenen Oberflächen der Gruppen 1 beider Materialien in ihrem Mittenrauhwert sehr nahe liegen, während die Glasuren der jeweiligen Keramiken dahingehend unterschiedlich zu sein scheinen, dass die Glasur von Zirox etwas höhere Rauhwerte aufweist als bei Zenoflex.

Der Unterschied zwischen den Gruppen 3 und 4 von Zenoflex ist gering, die Rauigkeit wird hier lediglich von der oberflächlichen Glasur bestimmt.

Ein Unterschied zur alleinigen Politur ist deutlich sichtbar, die Rauigkeitswerte haben sich nach der Glasur vor allem bei Zenoflex im Vergleich zu dieser mehr als halbiert, während Zirox besser polierbar erscheint als Zenoflex und durch einen Glanzbrand eher an Rauigkeit zu gewinnen scheint (Abb. 36).

Insgesamt wird ein deutlicher Unterschied der Rauhwerte von lediglich feinkörnig beschliffenen Oberflächen zu zusätzlich polierten und/oder glasierten Oberflächen für beide Materialien deutlich.

Vor allem die Glasuren scheinen auch im Vergleich zu unbearbeiteten Oberflächen nach dem Brand zu glatteren Oberflächen zu führen.

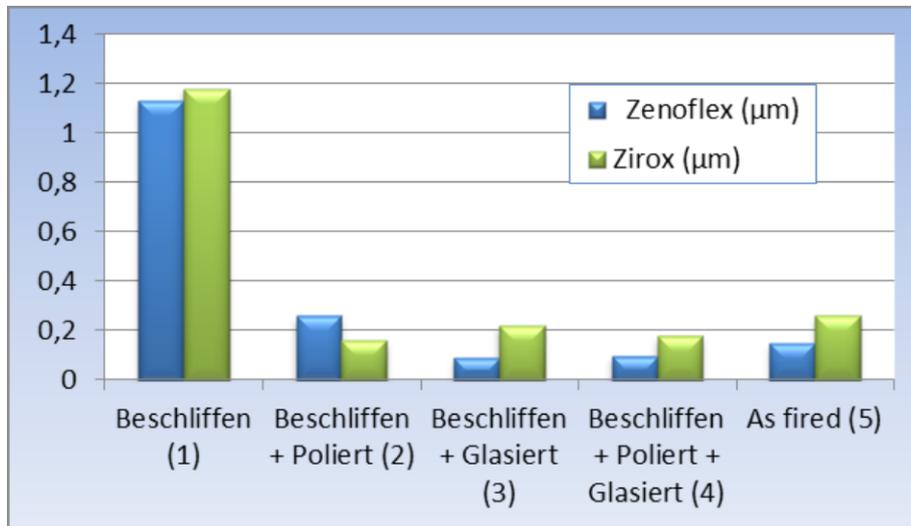


Abb. 37: Rauhwerte Ra (in μm) von Zirox und Zenoflex

## 6.2 Biegefestigkeiten- biaxialer Test

### 6.2.1 Zirox

Die biaxiale Festigkeit von Zirox beträgt für die Referenzgruppe „As fired“ (Gruppe 5) mittelwertig 136,49 MPa.

Die ersten zwei oberflächlich bearbeiteten Gruppen von Zirox („Beschliffen“ sowie „Beschliffen + Poliert“) liegen mit durchschnittlichen Werten von 83,05 MPa bzw. 113,99 MPa weit unter dem Referenzwert, die Gruppen 3 und 4 („Beschliffen + Glasiert“ sowie „Beschliffen + Poliert + Glasiert“) weisen mit durchschnittlich 197,97 MPa bzw. 191,34 MPa deutliche Festigkeitssteigerungen auf.

Insgesamt ist ein deutlicher Anstieg der Festigkeiten zu den Prüfkörpern mit glasierten Oberflächen hin zu beobachten. Die Prüfkörper mit den beschliffenen Oberflächen (Gruppe 1) haben die geringsten und im Vergleich zu Gruppe 4 (Beschliffen + Poliert + Glasiert) weniger als halb so hohen Festigkeitswerte (57 % geringer). Auch im Vergleich mit den unbearbeiteten Referenzproben (Gruppe 5) weisen die Werte der oberflächlich beschliffenen Proben eine um 40 % verminderte Festigkeit auf (s.Tab. 10, Abb. 38).

Tab. 10: Biaxiale Festigkeit  $\sigma$  (MPa) von Zirox mit Standardabweichung

<b>Zirox®</b>	<b>Biegefestigkeit</b>	<b>StAbwN</b>
<b>Biegefestigkeit</b>	$\sigma$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)
Beschliffen (1)	83,05	10,51
Beschliffen + Poliert (2)	113,99	21,85
Beschliffen + Glasiert (3)	197,97	27,84
Beschliffen + Poliert + Glasiert (4)	191,34	33,48
As fired (5)	136,49	26,62

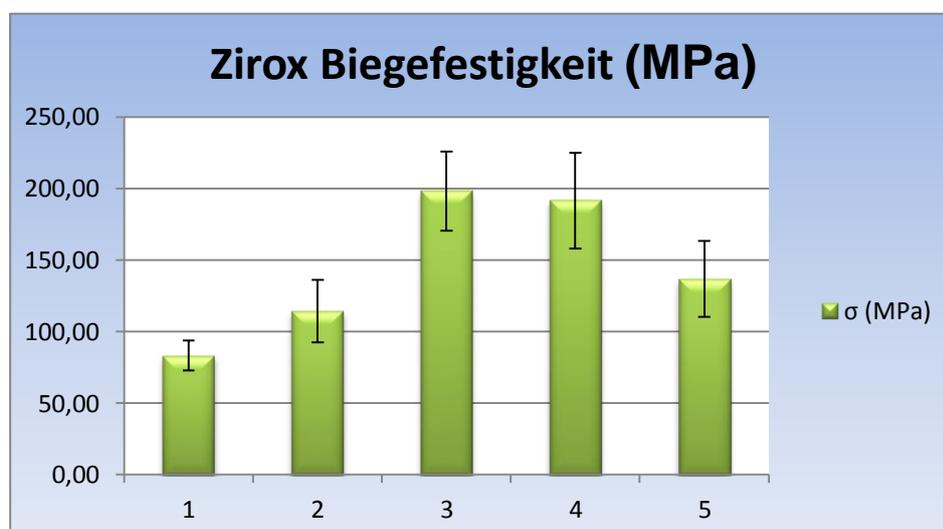


Abb. 38: Biaxiale Festigkeit  $\sigma$  (in MPa) der Gruppen 1 bis 5 von Zirox

## 6.2.2 Zenoflex

Bei den biaxialen Festigkeitswerten von Zenoflex ist ein deutlicher Festigkeitsanstieg von der Gruppen 1 bis hin zur Gruppe 4 zu erkennen (s.Abb. 39).

Die biaxiale Festigkeit von Zenoflex liegt für die Referenzgruppe (Gruppe 5 „As fired“) bei durchschnittlich 128,40 MPa.

Auch bei Zenoflex führen die glasierten Oberflächen bei den Gruppen 3 und 4 zu deutlich höheren Festigkeitswerten, die Kombination von Politur und Glanzbrand nach dem Beschleifen (Gruppe 4) zeigt mit mittelwertig 163,98 MPa die grösste Biegefestigkeit im Vergleich mit den anderen Gruppen.

Hier konnte die Festigkeit durch die Bearbeitung, im Vergleich zur Festigkeit ohne Bearbeitung (Gruppe 5) um fast 30% gesteigert werden, besonders festigkeitssteigernd scheint auch hier die Glasur zu sein (s.Tab. 11).

Tab. 11: Biaxiale Festigkeit  $\sigma$  (in MPa) von Zenoflex mit Standardabweichung

<b>Zenoflex</b>	<b>Biegefestigkeit</b>	<b>StAbwN</b>
<b>Biegefestigkeit</b>	$\sigma$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)
Beschliffen (1)	82,21	13,33
Beschliffen + Poliert (2)	105,16	16,99
Beschliffen + Glasiert (3)	135,73	24,96
Beschliffen + Poliert + Glasiert (4)	163,98	32,29
As fired (5)	128,40	23,04

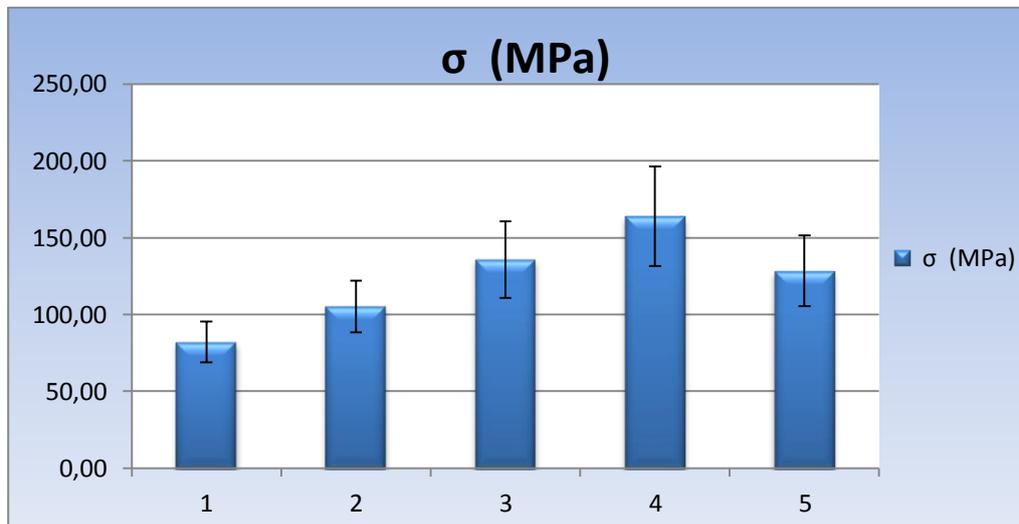


Abb. 39: Biaxiale Festigkeit  $\sigma$  (in MPa) von Zenoflex

### 6.2.3 Zirox und Zenoflex im Vergleich

Der Vergleich der Biegefestigkeiten der Gruppen Zirox und Zenoflex verdeutlicht den analogen Festigkeitsanstieg bei den bearbeiteten Gruppen (Gruppen 1-4) (s.Abb. 40).

Insgesamt sind die biaxialen Festigkeiten von den Zirox-Prüfkörpern im direkten Vergleich zu den jeweils identisch bearbeiteten Prüfkörpern von Zenoflex im Durchschnitt höher.

Auffällig ist der besonders ausgeprägte Festigkeitserfolg bei Zirox der Gruppe 3 und 4, welche oberflächlich jeweils glasiert wurden. Dieser Anstieg scheint bei Zenoflex (s. Abb. 40), wo eine andere Glasurmasse Anwendung fand als die zu Zirox gehörende Glasurmasse, gleichmäßiger zu sein.

Allgemein weisen die Werte auf einen Festigkeitsgewinn durch eine anschließende Glasur der Oberflächen hin, der allein durch eine Politur nicht zu erreichen zu sein scheint.

Die Festigkeit bei Zenoflex wurde durch die Kombination von Politur und Glasur weiter gesteigert, wobei bei Zirox die Glasur den ausschlaggebenden Festigkeitsgewinn auszumachen scheint.

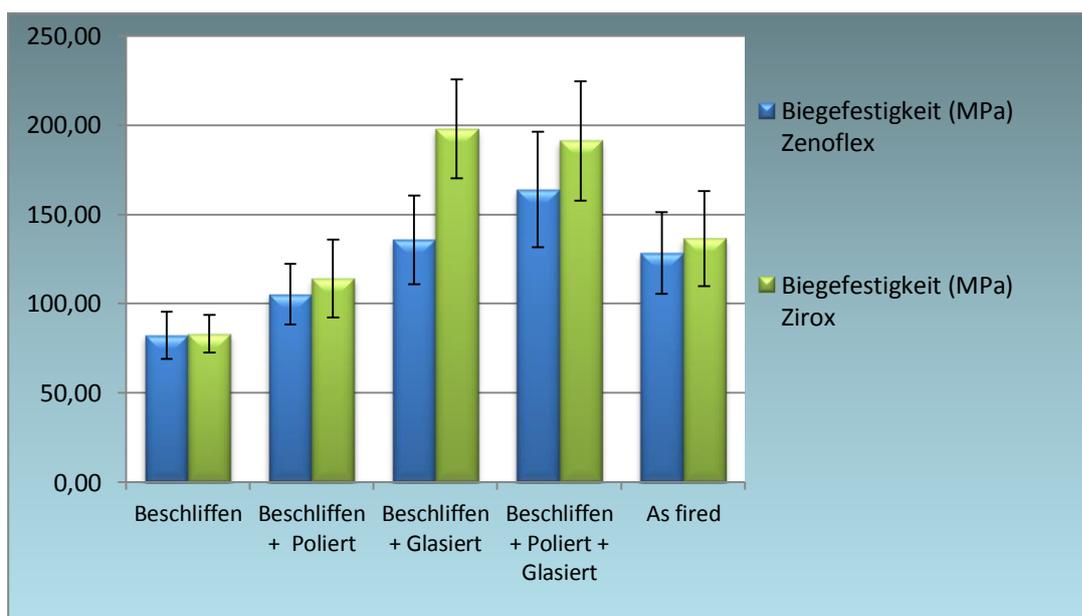


Abb. 40: Biegefestigkeiten von Zenoflex und Zirox (in MPa) mit Fehlerindikator

### 6.3 Weibull-Statistik

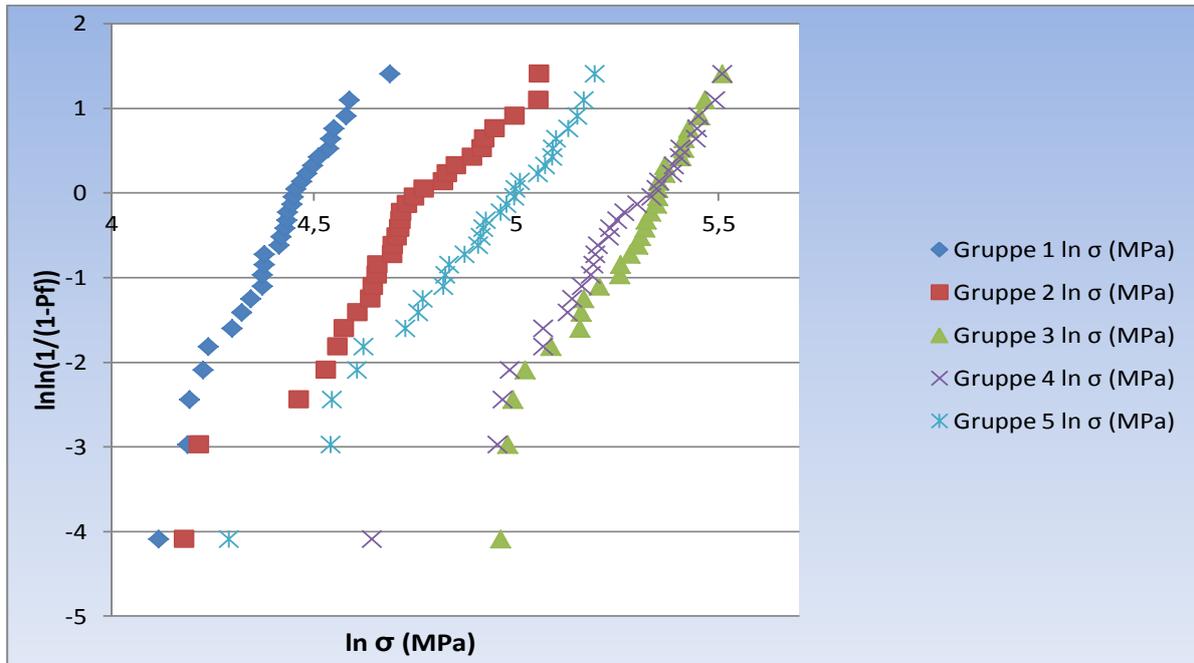


Abb. 41: Weibull-Verteilung Zirox

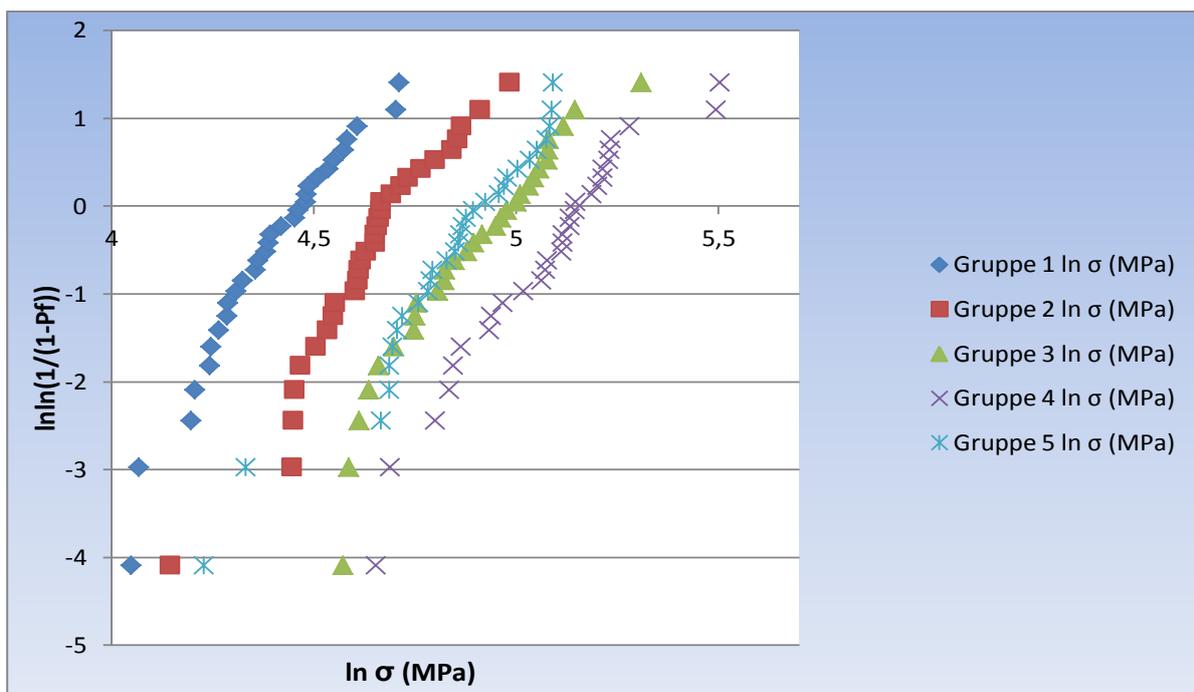


Abb. 42: Weibull-Verteilungen für Zenoflex

Tab. 12: Weibull-Module

Weibullmodule (m)	Zirox	Zenoflex
Beschliffen (1)	9,4	7,3
Beschliffen + Poliert (2)	5,9	7,2
Beschliffen + Glasiert (3)	8,1	6,4
Beschliffen + Poliert + Glasiert (4)	6,4	6
As fired (5)	5,7	6

Tab. 13: Charakteristische Weibullfestigkeit  $\sigma_0$ 

Charakteristische Weibullfestigkeit $\sigma_0$	Zirox (MPa)	Zenoflex (MPa)
Beschliffen (1)	87,5	93,3
Beschliffen + Poliert(2)	122,92	119,52
Beschliffen + Glasiert (3)	210,06	145,76
Beschliffen + Poliert + Glasiert (4)	205,42	176,66
As fired (5)	147,41	147,47

## 6.4 Bruchstückanalyse

### 6.4.1 Zirox

Bei der Analyse der Bruchstückanzahl von Zirox wird deutlich, dass mit ansteigender Krafteinwirkung auch die Anzahl der resultierenden Bruchstücke wächst.

Während Gruppe 1 nur kleinen Kraftwerten standhält und eine Anzahl von 6 Bruchstücken nicht übersteigt, beginnen die glasierten Gruppen erst bei 5 Bruchstücken (Gruppe 4). (s.Abb. 43 und 44)

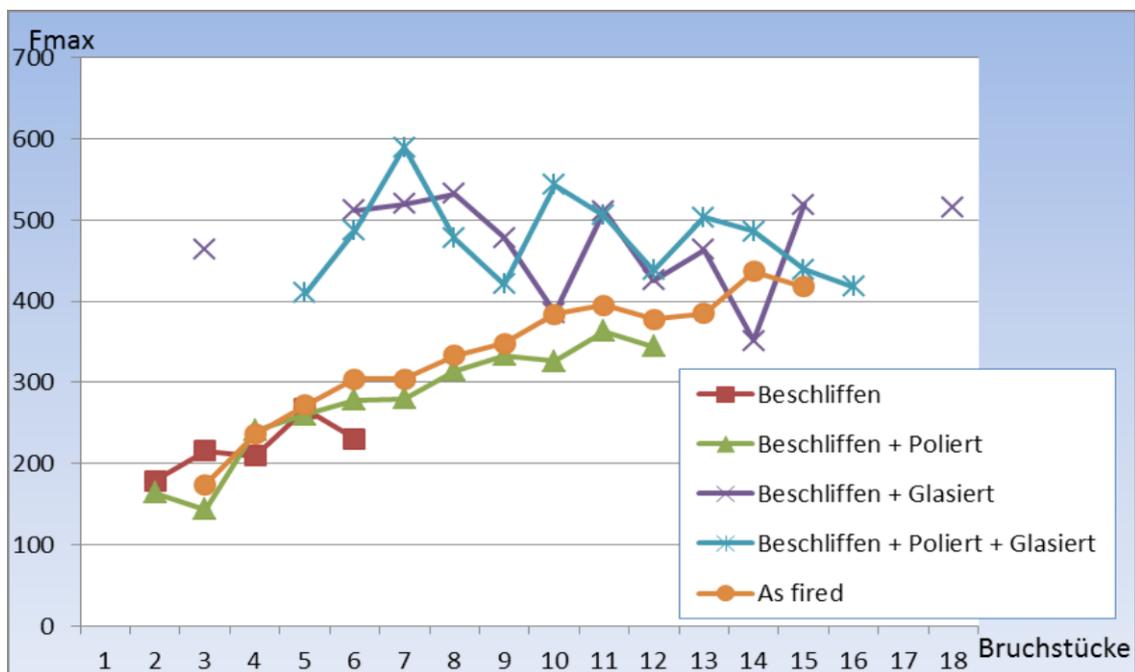


Abb. 43: Bruchstückanzahl Zirox bei zum Bruch führender Kraft [  $F_{max}$  (N)]

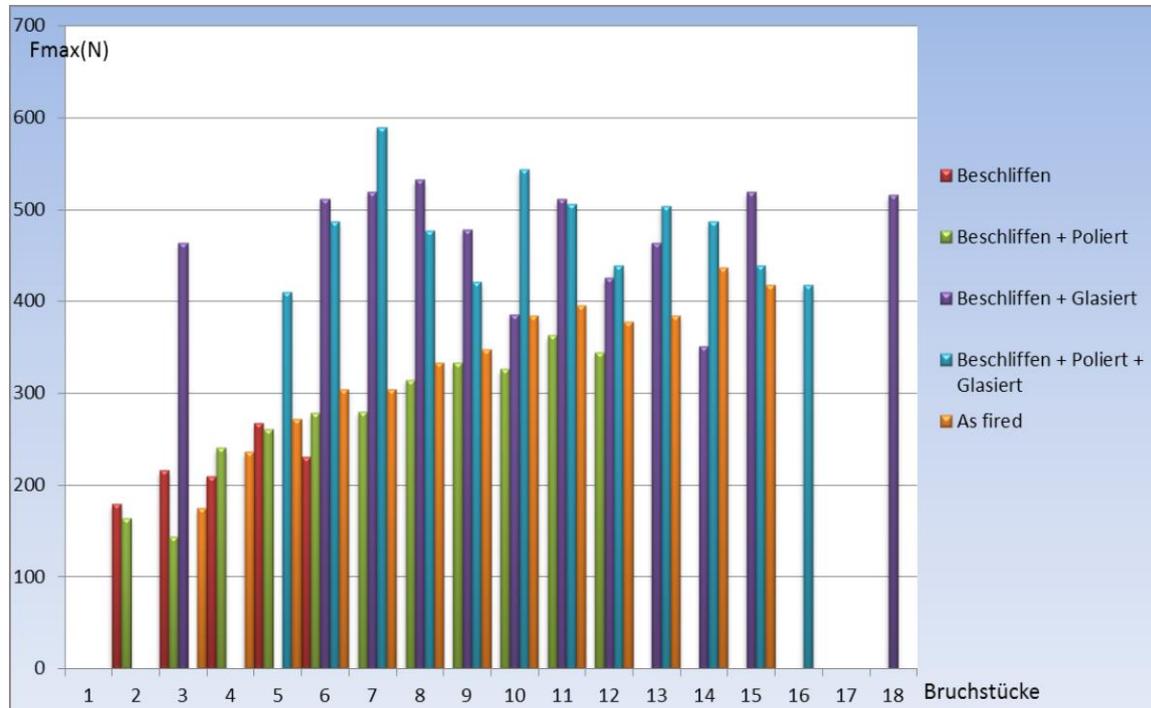


Abb. 44: Bruchstückanzahl Zirox bei zum Bruch führender Kraft [Fmax (N)]

### 6.4.2 Zenoflex

Auch bei Zenoflex wird der proportionale Zusammenhang von einwirkender Kraft  $F_{max}$  (N) zur resultierenden Bruchstückanzahl deutlich (s.Abb.43 und 44).

Auch hier sind bei Gruppe 1 nur kleine Kraftwerte mit wenigen Bruchstücken erreicht, während wieder vor allem die Gruppen mit den glasierten Probenoberflächen hohe Werte auf beiden Seiten repräsentieren (bis zu 15 Bruchstücke bei Gruppe 4).

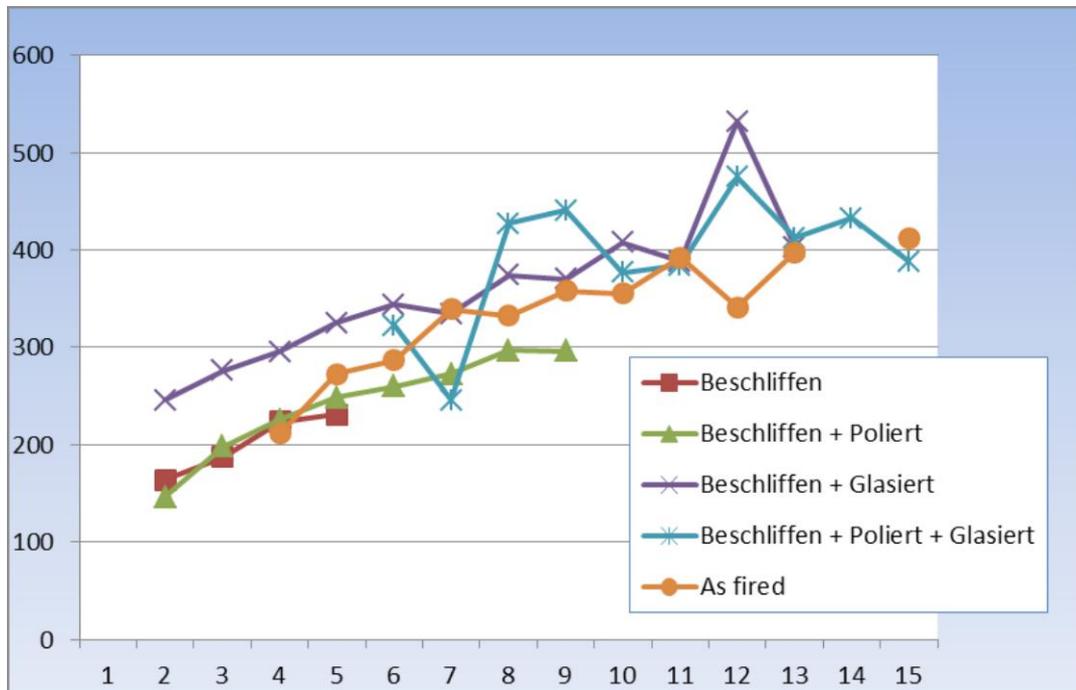


Abb. 45: Anstieg der Bruchstücke (x-Achse) bei grösseren Kraftwerten ( $F_{max}$  in N) Zenoflex

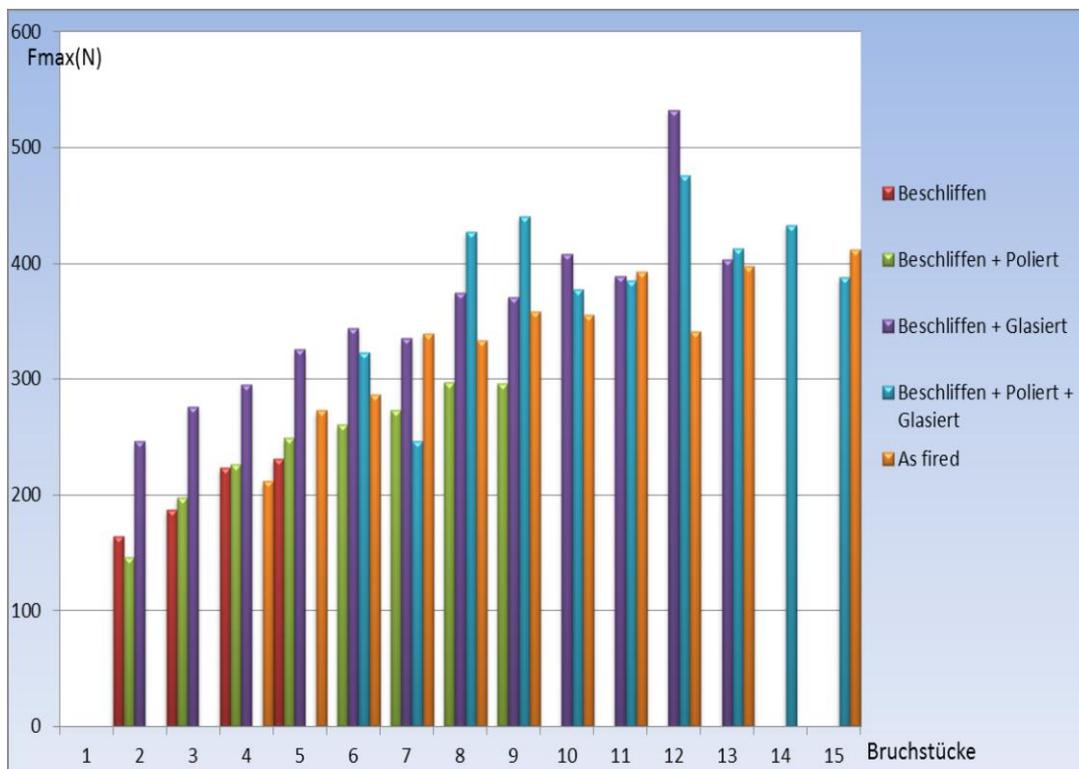


Abb. 46: Bruchstücke von Zenoflex bei Kräfteinwirkung  $F_{max}$  (N)

## 6.5 t-Test/Signifikanz der Biegefestigkeiten

### Signifikanz Zenoflex-Gruppen zueinander:

- (1) mit (2) → (+) Signifikant
- (1) mit (3) → (+) Signifikant
- (1) mit (4) → (+) Signifikant
- (1) mit (5) → (+) Signifikant
- (2) mit (3) → (+) Signifikant
- (2) mit (4) → (+) Signifikant
- (2) mit (5) → (+) Signifikant
- (3) mit (4) → (+) Signifikant
- (3) mit (5) → (-) Nicht signifikant
- (4) mit (5) → (+) Signifikant

Die Werte sind bis auf Gruppe drei zur Referenzgruppe alle signifikant. Politur und Glanzbrand zeigen einen signifikanten Unterschied (Tab.13, s.Anhang).

### Signifikanz Zirox-Gruppen zueinander:

- (1) mit (2) → (+) Signifikant
- (1) mit (3) → (+) Signifikant
- (1) mit (4) → (+) Signifikant
- (1) mit (5) → (+) Signifikant
- (2) mit (3) → (+) Signifikant
- (2) mit (4) → (+) Signifikant
- (2) mit (5) → (+) Signifikant
- (3) mit (4) → (-) Nicht signifikant
- (3) mit (5) → (+) Signifikant
- (4) mit (5) → (+) Signifikant

Die Unterschiede in den Biegefestigkeiten der einzelnen oberflächlich verschieden bearbeiteten Gruppen sind fast ausnahmslos signifikant. Lediglich Gruppe drei zu Gruppe vier ist nicht signifikant. Das bedeutet, es macht keinen signifikanten Unterschied, ob die beschliffene Oberfläche vor dem Glanzbrand (3) zusätzlich noch poliert wurde (4) (Tab. 14, s. Anhang).

#### **Signifikanz analoger Gruppen von Zenoflex und Zirox zueinander:**

- (1) mit (1) → (-) Nicht signifikant
- (2) mit (2) → (-) Nicht Signifikant
- (3) mit (3) → (+) Signifikant
- (4) mit (4) → (+) Signifikant
- (5) mit (5) → (-) Nicht Signifikant

Die Glasierten Gruppen von Zirox und Zenoflex unterscheiden sich signifikant voneinander (Tab. 16, s. Anhang).

## 6.6 REM-Aufnahmen

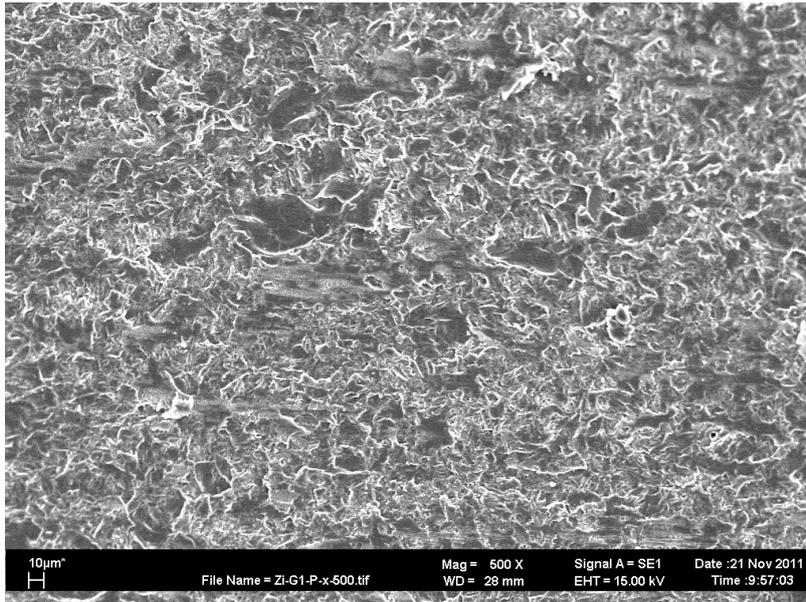


Abb. 47: Zirox „Beschliffen“ 500-fach vergrößert

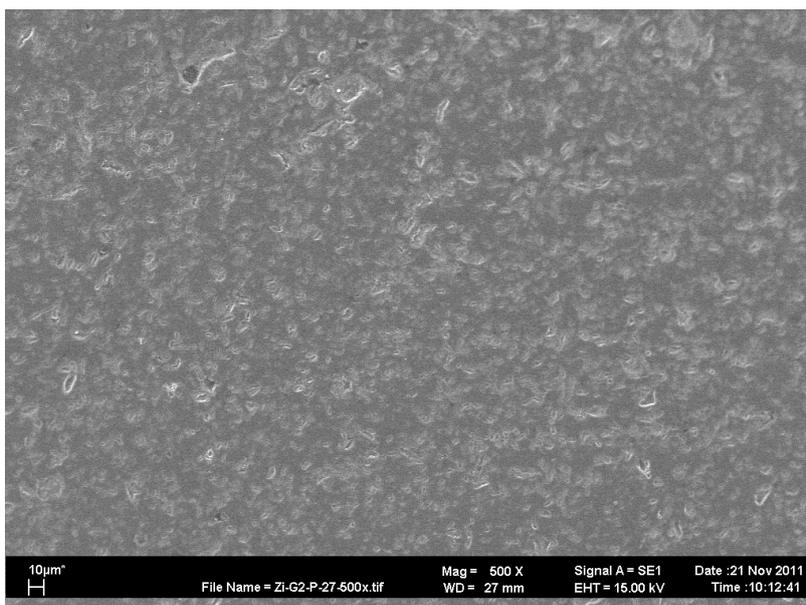


Abb. 48: Zirox „Beschliffen + Poliert“ 500-fach vergrößert

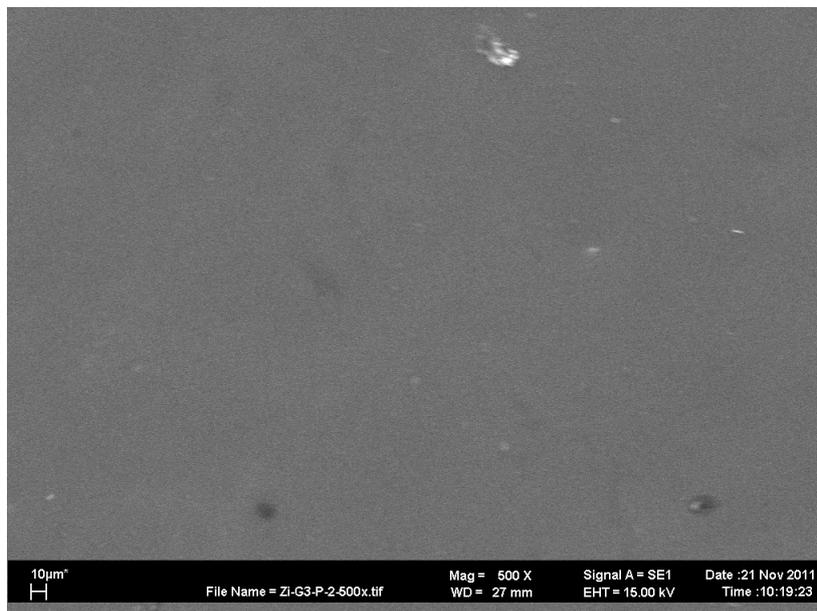


Abb. 49: Zirox „Beschliffen + Glasiert“ 500-fach vergrößert



Abb. 50: Zirox „Beschliffen + Poliert + Glasiert“ 500-fach vergrößert

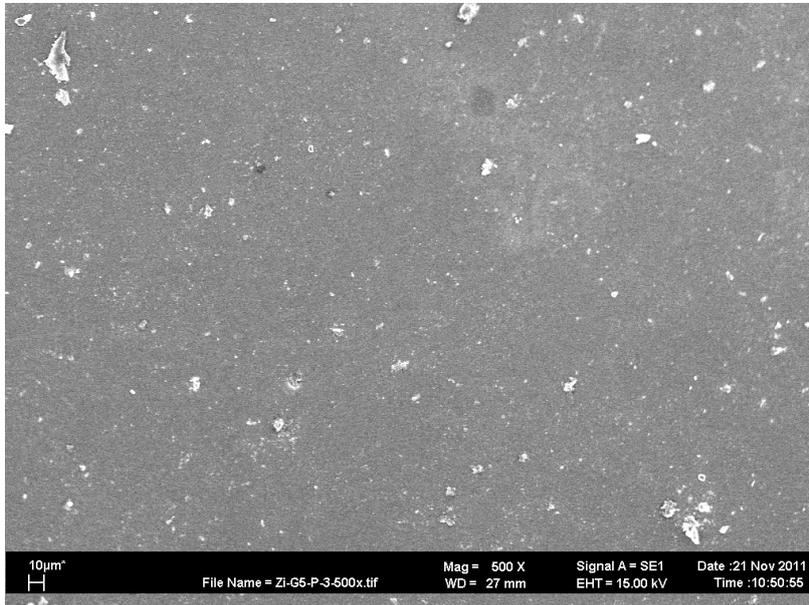


Abb. 51: Zirox „As fired“ 500-fach vergrößert (mit Verunreinigung)

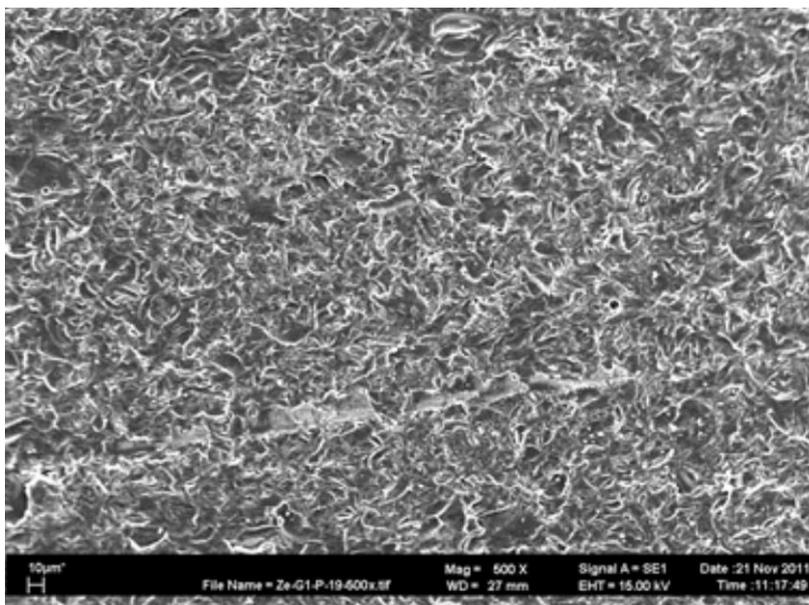


Abb. 52: Zenoflex „Beschliffen“ in 500-facher Vergrößerung...

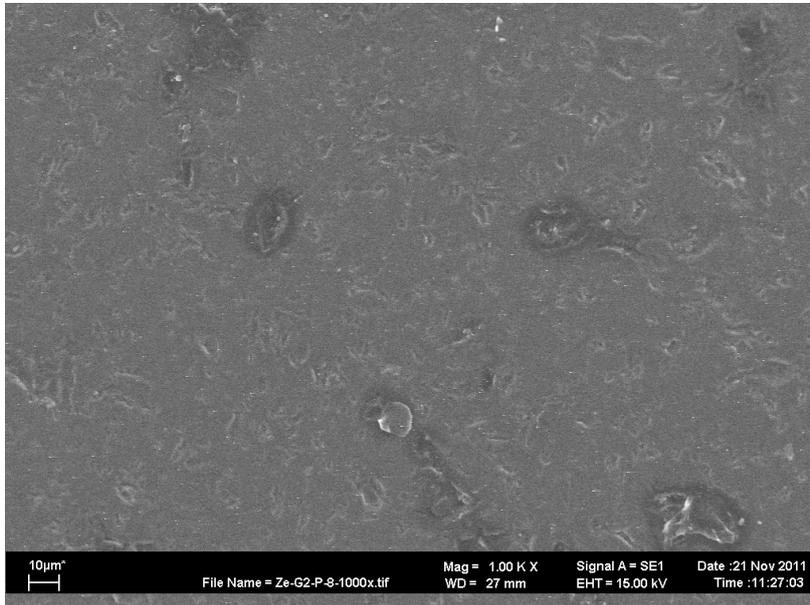


Abb. 53: Zenoflex „Beschliffen + Poliert“ 500-fach vergrößert

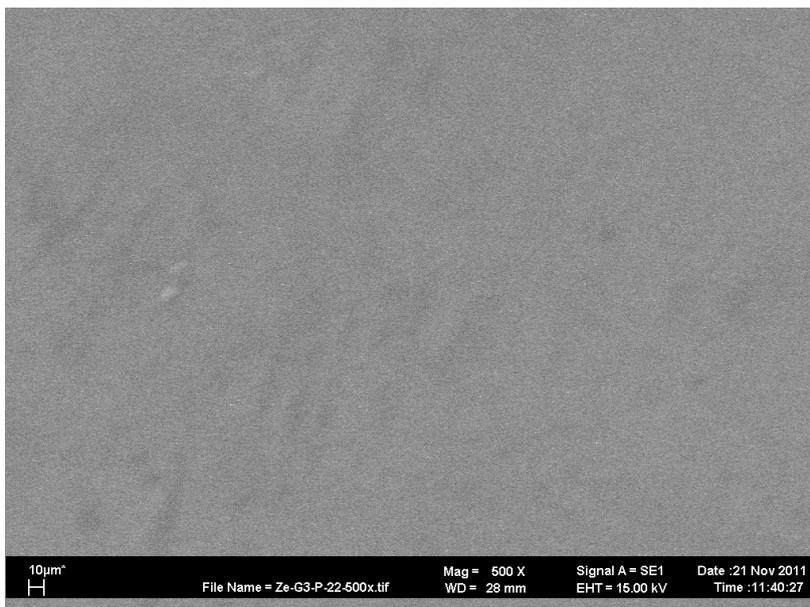


Abb. 54: Zenoflex „Beschliffen + Glasiert“ 500-fach vergrößert

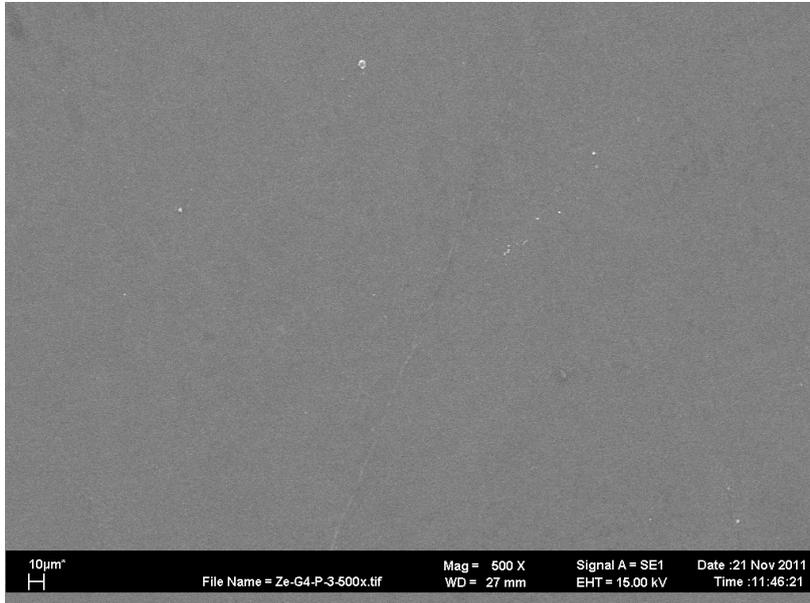


Abb. 55: Zenoflex Beschliffen + Poliert + Glasiert, 500-fach vergrößert

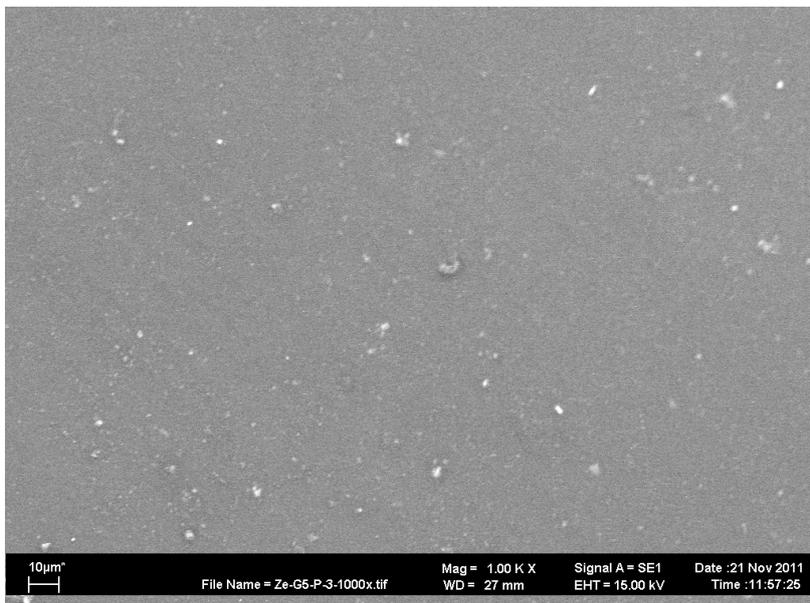


Abb. 56: Zenoflex „As fired“ 500-fach vergrößert (mit Verunreinigung)

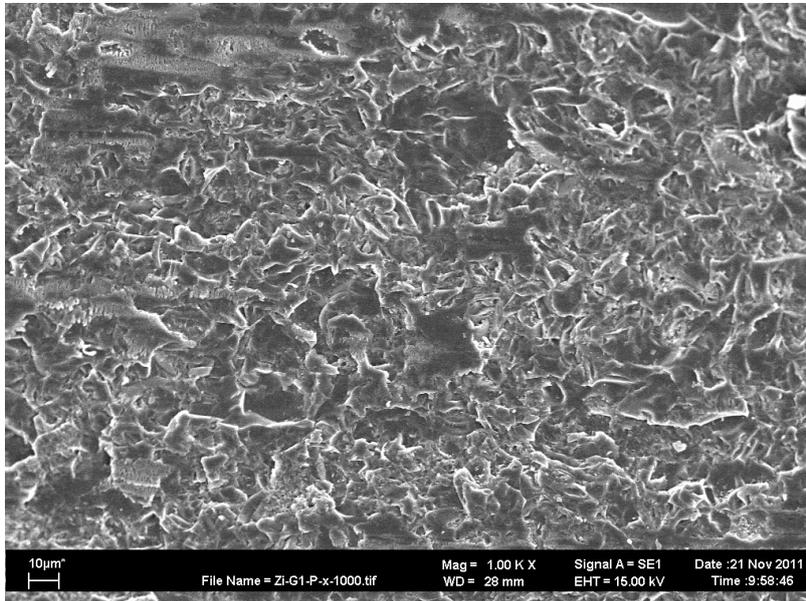


Abb. 57: Zi-ox 1000fache Vergrößerung (Gruppe1)

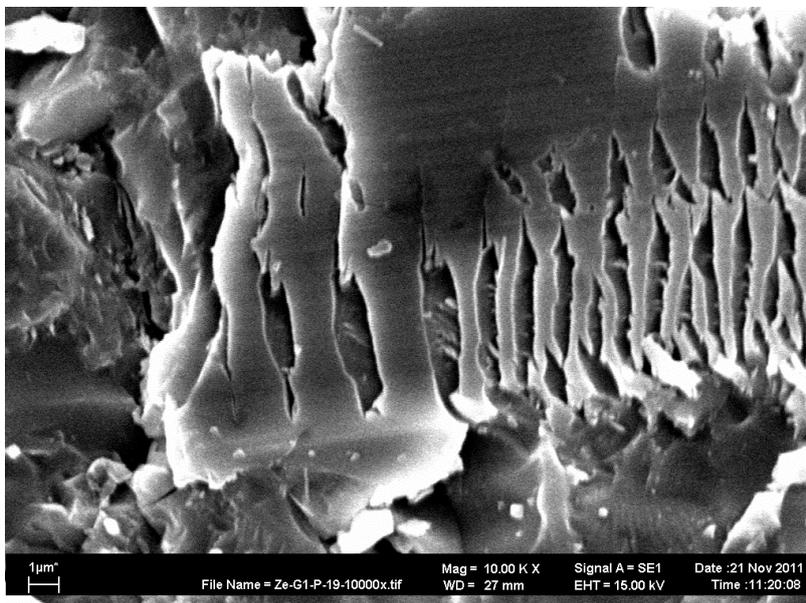


Abb. 58: Zenoflex „Beschliffen“ 10.000fach vergrößert

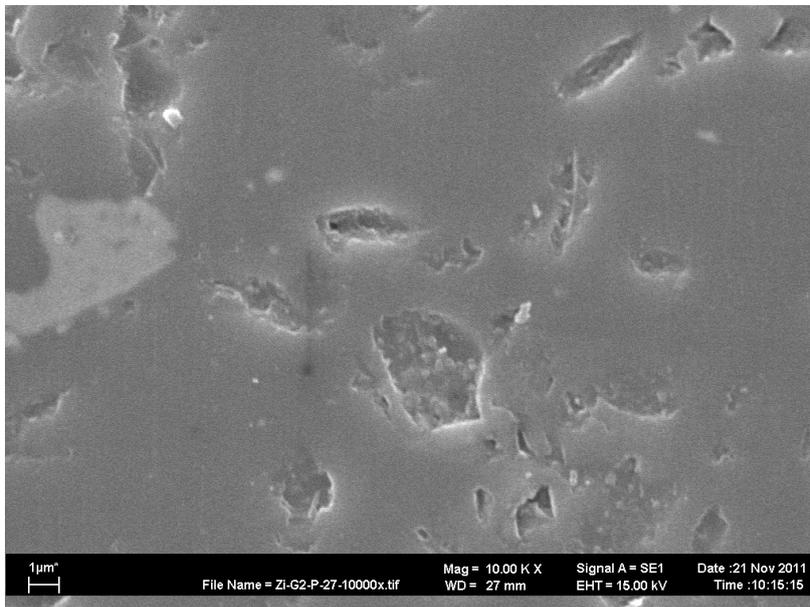


Abb. 59: Zirox „Beschliffen + Poliert“ 10.000-fache Vergrößerung

## 6.7 Fotodokumentation

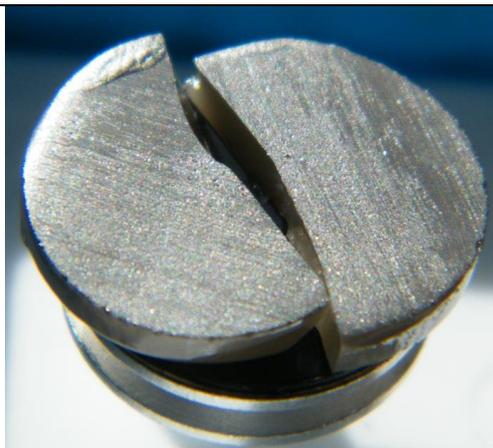


Abb. 60: Oberfläche beschliffen



Abb. 61: Oberfläche beschliffen + poliert

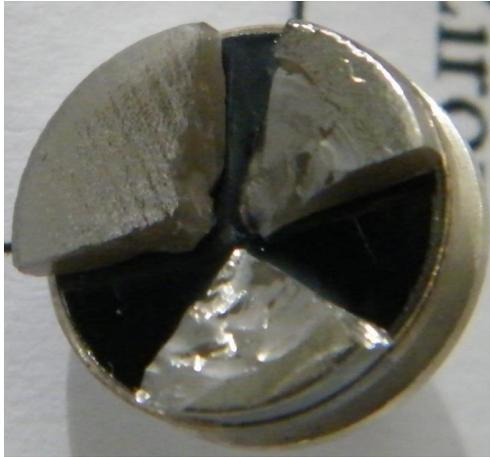


Abb. 62: Oberfläche beschliffen +  
glasiert



Abb. 63: Oberfläche beschliffen +  
poliert+ glasiert

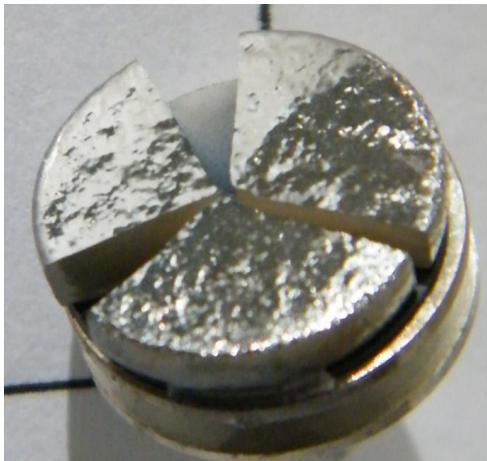


Abb. 64: Oberfläche unbearbeitet „As  
fired“

Die Bilder 60 – 64 repräsentieren je einen typischen Prüfkörper  
der Prüfgruppen 1-5.

## 7. Diskussion

Dem steigenden Wunsch der Patienten nach vollkeramischem Zahnersatz stehen die in vielen Studien beobachteten Misserfolge entgegen, obwohl sich der Einsatz von Zirkoniumdioxid als Gerüstwerkstoff längst bewährt hat. Die Verblendkeramiken und ihre Eigenfestigkeiten sind bislang die Schwachstelle der Vollkeramiken, so dass sich der Misserfolg der gesamten vollkeramischen Restauration meist in einer Kohäsionsfraktur, also einer Fraktur innerhalb der Verblendkeramik begründet-einem sogenannten Chipping.

Festigkeitsuntersuchungen belegen, dass die Festigkeiten von diversen, speziell für den Gerüstwerkstoff  $ZrO_2$  entwickelten Verblendkeramiken, denjenigen von Metallkeramiken äquivalent sind [Fischer 2008], der Einfluss der Bearbeitung die Festigkeit betreffend wurde bislang nicht ausreichend evaluiert.

In dieser Arbeit wurde untersucht, welchen Einfluss die Oberflächenbearbeitung auf die Festigkeit der Verblendstruktur im biaxialen Festigkeitstest gemäß ISO 6872:2009 ausübt. Der biaxiale Belastungstest hat sich unter der Annahme physiologischer Gegebenheiten bei parodontal suffizientem Zahnbestand ohne Lockerung der Zähne als Referenzuntersuchung bewährt.

Aufgrund der Annahme einiger Autoren, dass ein signifikanter Einfluss besteht, ob Verblendwerkstoffe leuzithaltig oder leuzitfrei sind [Eichner 2008], wurden Materialien mit verschiedenem Leuzitgehalt gewählt, wobei Rückschlüsse auf die risshemmende Wirkung der Leuzitkristalle gewonnen wurden.

Zenoflex dimension soll eine veränderte Mikrostruktur mit „ASM (Anti-stress-Mineralien)“ aufweisen, die neben der Annäherung an den WAK der  $ZrO_2$ -Keramik, vor allem den Abbau unerwünschter Zugspannungen bewirken sollen; der Vergleich der Festigkeitswerte mit Zirox (ohne „ASM“) des gleichen Herstellers gab Auskunft über etwaige positive Eigenschaftsverbesserungen.

## 7.1 Diskussion der Methodik

Während die Misserfolge der Gerüstteile stetig abgenommen haben, erscheint die Festigkeit der Verblendkeramik begrenzend für den Erfolg der gesamten vollkeramischen Arbeit zu sein.

Die Versagensrate der Verblendkeramiken liegt nach den jüngsten Untersuchungen von Sailer nach einem 5-Jahrestest bei 15% bis 25% [Sailer 2007].

Gründe für diese Misserfolge liegen vor allem innerhalb der Silikatverblendungen. Es kommt meist zu kohäsiven Frakturen (Chippings) [Stawarczyk 2009] [Pospiech 2010]. Die Festigkeit der Verblendkeramik selbst ist also anscheinend für den Misserfolg verantwortlich.

Dabei wurden diverse Verblendmaterialien, welche speziell für die Verblendungen von Zirkoniumdioxid konzipiert wurden, laut Studien denen für die bewährte Metallkeramik als gleichwertig beschrieben. Gerade vor diesem Hintergrund ist es notwendig, diejenigen festigkeitsherabsetzenden Faktoren zu eruieren und zu umgehen.

Die Praxistauglichkeit von Vollkeramikrestorationen hinsichtlich der Biegefestigkeit des Verbundsystemes wird in zahlreichen Untersuchungen nachgewiesen und in der Größenordnung der metallunterstützten Konstruktionen eingeordnet [Pröbster 2001] [Tinschert J 1999] [Schmitter 2013].

Untersuchungen zur Festigkeit der Vollkeramikgerüste, deren Oberflächenbearbeitungsverhalten und des Verbundes liegen zahlreich vor. Die hierzu getroffenen Aussagen werden in der Einleitung und den Grundlagen dargelegt. Weniger Untersuchungen liegen zum Verhalten der Verblendmassen für Vollkeramikgerüste vor. Die Untersuchungen der Vollkeramikgerüste haben unter anderem eine hohe Festigkeitsbeeinflussung der Oberflächenbehandlung ergeben [Hessert R 1998] [Kosmac 2007] [Fokas-Tzenzeratos 2010], lassen sich aber, aufgrund der verschiedenen Werkstoffeigenschaften wie fehlende Phasenumwandlung bei unterkritischer Rissbildung und anderer Festigkeitswerte-

wie in den Grundlagen dargelegt - nicht ohne weiteres auf die Verhältnisse der Silikatverblendungen übertragen.

Weiterhin ist zu beachten, dass es sich beim Ausgangsmaterial für die Gerüste zumeist um industriell vorgefertigte Halbprodukte des  $ZrO_2$  handelt (als Grünling oder Weißling) oder im gehipten Zustand, jeweils mit sehr hohen Festigkeitswerten nach der (End-)Sinterung, während Silikatverblendmaterialien in handwerklich individueller Arbeitsweise in Schlickertechnik mit hoher Variabilität hergestellt werden.

Versuche analog den Sandstrahluntersuchungen der Gerüste aus  $ZrO_2$  wie sie von Kosmac 2007, Guazzato 2005, Garvie 1975, Lange 1986 und Zhang 2004 vorgenommen wurden, sind wegen fehlenden Praxisbezuges bei der Oberflächenbehandlung der Verblendkeramik obsolet.

Daher wurde in der vorliegenden Arbeit die Bruchfestigkeit von jeweils 5 Gruppen x 30 Prüfkörpern je Verblendmassenart (Zirox und Zenoflex) durch die Belastung in einem biaxialen Biegetest unter besonderer Berücksichtigung verschiedener Oberflächenstrukturen/-modalitäten bestimmt. Inwieweit der Gehalt an Leuzit (s. Abb.1) die Festigkeit der verschiedenen Verblendmaterialien zu beeinflussen in der Lage ist - wie Ernst 2008 untersucht hat - wurde durch vergleichende Untersuchungen nachgewiesen. Er zeigte auf, dass ein leuzitfreies Material in einem Kausimulationstest 50% Ausfälle in der Verblendstruktur aufwies, während leuzithaltige Materialien eine Überlebensrate von 100% erreichten.

Der Einfluss der Gerüstgestaltung und des Verbundes sollte dabei nicht untersucht werden, wird aber in Kapitel 2 Grundlagen dargelegt. Hier wird auf den Einfluss der Phasenumwandlung des  $ZrO_2$ , falsche Gerüstgestaltungen und -verarbeitungen, die Problematik zu großer WAK-Unterschiede, falscher Oberflächenbearbeitung der Gerüste, falsche Brandführung eingegangen.

Um diese Zusammenhänge auszublenden wurde alleinig der Prüfkörper Verblendkeramik getestet, damit z.B. der WAK durch Induzierung innerer Spannungen bei verschiedenen WAK wie bei Verbundsystemen möglich

ausgeschlossen werden kann [Gehre 2005].

Wenn laut Fischer 2008 und zahlreichen anderen Autoren davon ausgegangen werden kann, dass die Festigkeitswerte der Verblendkeramik Hauptausgangspunkt für die Gesamtfestigkeit der Gesamtkonstruktion sind, erscheint die vorliegende Untersuchung zu bestätigen, dass Politur und Glasur einen positiven Einfluss auf die Festigkeit der Proben hatte und damit positiv auf die Gesamtkonstruktion einwirken sollte.

Es erschien dabei sinnvoll, klinische Verhältnisse nachzuahmen. Da das Beschleifen der Oberfläche bei Okklusions- oder/und Okklusionsdifferenzen in praxi notwendig sein kann, abrasive Kautätigkeit die Oberfläche verändert, werden verschiedene Oberflächenbearbeitungen verglichen, um Ratschläge für die Praxis zu erarbeiten.

Zum Beschleifen wurde ein rotcodierter Feinkorndiamant (50 µm) verwendet, der in der Literatur als geeignet erachtet wird, zur Politur ein speziell für die keramische Oberflächenoptimierung entwickeltes Drei-Stufen-Politursystem. Bei der Auswahl des Diamanten wurde darauf geachtet, dass die Länge des Arbeitsteiles dem Durchmesser der Prüfkörper entspricht, damit diese in der gesamten Oberfläche gleichmässig und gleichzeitig bearbeitet werden und die Oberflächen einheitlich sind.

Um optimale Ergebnisse zu erzielen, wurde Wert auf eine gute Verdichtung der Keramikmassen mit vergleichbarer Struktur und Brandführung geachtet. Bei der in Schlickertechnik aufgetragenen Masse in der täglichen zahntechnischen Herstellung muss eine große Variabilität der Massen hinsichtlich Lufteinschlüssen, Verdichtung und Gleichmässigkeit der Keramikmasse vermutet werden.

Laut Marxkors/Meiners/Geis-Gerstorfer, Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde tragen neben dem Gehalt an kristallinen Partikeln auch ihre Homogenität und Dichte zur Festigkeit der Silikatverblendungen bei.

Daher wurde das Pelletorsystem zur Herstellung der Proben gewählt, um gleichmässige Ergebnisse zu erzielen [Spintzyk 2012].

Anschließend wurden die Bruchstücke unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht.

## 7.2 Diskussion des Versuchsaufbaues

Die klinische Eignung der Werkstoffe zum Ersatz von Zahnschmelz kann durch Festigkeitsuntersuchungen unter weitestgehender Simulation natürlicher Gegebenheiten simuliert werden. Dies trifft im besonderen Maße für Werkstoffe wie die Keramiken zu, die aufgrund ihrer Bruchsprödigkeit Schwierigkeiten für den klin. Einsatz erwarten lassen.

Untersuchungen zur Metallunterstützung zur Festigkeitssteigerung des Verbundsystemes liegen in ausreichender Anzahl vor. Die steigende Nachfrage nach vollkeramischen Versorgungsmöglichkeiten bedarf gezielter Untersuchungen der Praxisreife, um Grenzen der Vollkeramik zu eruieren. Dies muss bei der Planung des Versuchsaufbaues Berücksichtigung finden. Nur wenn diese Tests sehr praxisnah sind, können die Ergebnisse auf die klinische Situation übertragen werden. Trotzdem muss man beachten, dass alle Tests nur eine Annäherung an die wahren klinischen Gegebenheiten sind.

Es wurde folglich untersucht, welchen Einfluss die Oberflächenbearbeitung auf die Festigkeit der Verblendstruktur im biaxialen Festigkeitstest gemäß ISO 6872:2009-01 ausübt. Der biaxiale Belastungstest hat sich als Referenzuntersuchung bewährt.

Beim biaxialen Test sind die Probekörper nicht wie bei dem Dreipunktbiegeversuch oder dem Vierpunktbiegeversuch (s. 3.1 Literaturübersicht) balkenförmig, sondern besitzen eine runde Plättchenform, wodurch es nicht zu sog. Kanteneffekten (frühzeitiges Versagen des Prüfkörpers aufgrund von Fehlern in Bereich der Kanten) kommt: durch die zentrale Belastung wird der scheibenförmige Prüfkörper in seiner gesamten Materialeigenschaft geprüft, da die Spannungsspitze im Zentrum anstatt an den Kanten entsteht [Geis-Gerstorfer 1993] [Fischer 2009] [Anusavice 2007]. Damit liegt eine geringere Empfindlichkeit hinsichtlich Verarbeitungsfehlern vor und man erhält verlässlichere Festigkeitsdaten [Geis-Gerstorfer J 1992].

Der Versuchsaufbau des Biaxialen Belastungstest hat aufgrund der Materialeigenschaften der Vollkeramik gegenüber dem 3-Punkt Belastungstest an Bedeutung gewonnen [Geis-Gerstorfer 1992].

Die im Mund zu erwartenden Kräfte mit 300 N im Front und 600 N im Seitenzahnbereich mit initialen Spitzen von 1000 N (Einfluss von Materialermüdung) wurden in den Untersuchungen als Maßstab für die Praxistauglichkeit der Massen herangezogen (s. 3.1).

Die biaxiale Belastung entspricht im Munde der tripodisierten Belastung der Zahnhöcker im antagonistischen Okklusions- und Artikulationskonzept am ehesten, während der Biegeversuch nach Schwickerath [Schwickerath 1987] und Voß [Voß 1963] vor allem bei Untersuchungen der metallunterstützten Verbundsysteme Anwendung und Aussagekraft findet, da die Keramikprobe anders als bei Metallen beim Überschreiten der Elastizitätsgrenze spontan bricht (Sprödbruchverhalten).

Zugversuche nach Schulmeyer belasten die Konstruktionen vor allem auf Zug, was der klinischen Realität weniger entspricht.

Scheruntersuchungen sind bei Kunststoffuntersuchungen verbreitet anzutreffen, belasten den Prüfkörper mit Torsionsmomenten wie Al-Dohan 2004 in seinen Biegefestigkeits-Versuchen bei Oberflächenbearbeitungen darlegt [Al-Dohan 2004] [Marx R 1993].

Um Werte von Festigkeitsuntersuchungen vergleichen zu können, ist es sinnvoll, gleiche Untersuchungsverfahren anzuwenden. Die Wahl fiel auf den biaxialen Belastungstest, weil dieser zu den zuverlässigsten Ergebnissen führt [Geis-Gerstorfer 1992].

Während Zwickuniversalprüfmaschinen bei Schwickerath und Voß analoge Messdaten auswiesen, sind aktuelle Zwickuniversalgeräte mittlerweile in der Lage, die Kraft/Weg Verhältnisse elektronisch auszulesen; dies ist der Genauigkeit der Ergebnisse zuträglich; die verfügbaren „software“-Lösungen sind hilfreich.

Durch Einschleifmaßnahmen wird die Oberfläche der Verblendungen angeraut, um Okklusions- und Artikulationshindernisse zu beheben. In der vorliegenden Untersuchung wurde daher die Oberfläche in verschiedener Art behandelt, um Erkenntnisse über den Festigkeitseinfluss der Oberflächenbearbeitung zu gewinnen.

Zunächst wird die Oberfläche in der ersten Gruppe entsprechend durch Beschleifen modifiziert, die zweite Gruppe wurde beschliffen und danach poliert, wie es im Munde auch nach Befestigung der Restauration möglich wäre, die dritte Gruppe wurde beschliffen und glasiert.

Diese Möglichkeit bestünde vor Einsetzen der Konstruktion, der Glanzbrand erfordert allerdings eine Zeitspanne von mind. 2 Stunden, so dass in der Regel eine weitere Sitzung erforderlich würde, ein eventuelles Provisorium erneut befestigt werden müsste.

Da viele Praxen intern nicht über den für einen erneuten Glasurbrand nötigen Brennofen verfügen, geschweige denn die geeigneten Glasurmassen/Programme anwenden, ist ein Laborversand obligat.

Die vierte Gruppe wird wie die Gruppen zuvor ebenfalls zunächst beschliffen, danach poliert, um eine glatte Oberfläche mit möglichst geringer Rauhtiefe zu erhalten und abschließend zusätzlich glasiert. Da ohnehin eine weitere Sitzung wie bei Prüfkörpern der Gruppe 3 notwendig wird, ist der erforderliche Mehraufwand als gering einzustufen.

Zum Vergleich wird in der 5. Gruppe die Oberfläche nicht bearbeitet. Diese Gruppe stellt die gebrannte Verblendkeramik als unbearbeitete Referenzgruppe dar.

Auch beim Beschleifen der Keramikoberflächen muss auf praxisnahe Prüfbedingungen geachtet werden; daher wurde das Beschleifen mit einem, für die Bearbeitung von Keramik empfohlenen, feinkörnigen, rotcodierten (50 µm) Diamanten mittels Rotring-Winkelstück unter Wasserkühlung beschliffen, der in seiner Arbeitslänge dem Durchmesser der Proben angepasst ist, so dass eine flächige Bearbeitung der gesamten Probekörperoberfläche ermöglicht ist und ein Probe für Probe reproduzierbares Schleifergebnis erfolgen konnte.

Eine Bearbeitung mit einer Fräse im Handstück oder grobem Diamanten hätte die Ergebnisse verfälscht und wäre zudem schwierig mit der notwendigen Wasserkühlung realisierbar gewesen. Genauso festigkeitsbeeinflussend ist der gleichmäßige Anpressdruck des Instrumentes und der gleichmäßige Abtrag in

vergleichbarer Größenordnung; hier ergibt sich eine gewisse Varianzmöglichkeit der Prüfdaten.

Der Versuchsaufbau sieht daher eine Standardisierung durch Verwendung der „Proxxon“ Beschleif-Einrichtung vor.

Auch bei der Politur wurden praxisgerechte Polierkörper benutzt. Es wird eine mehrstufige Politur absteigender Poliergrade empfohlen und in dieser Versuchsreihe ein klinisch bewährtes Dreistufen-Poliersystem verwendet, welches speziell zur Politur von Keramikoberflächen entwickelt wurde.

Zur Standardisierung tragen sowohl das Erneuern der Diamanten nach 8 Proben wie auch die systematische Politurabfolge der entsprechenden Prüfkörper mit ansteigender, definierter Feinheit der Polierinstrumente und bei definierter geeigneter Umdrehungszahl der Bearbeitungskörper und exakt definiertem Polierrichtungswechsel im rechten Winkel, sowie gleichem Zeitmanagement bei.

Abweichend davon mussten verschiedene Glanzbrandmassen für Zirox und Zenoflex verwandt werden; inwieweit dies Einfluss auf die Festigkeitswerte bei gleicher Benetzbarkeit und Auftrag haben könnte, wäre Gegenstand einer weiteren Untersuchung verschiedener Verblendmassen und damit verschiedener Glasurmassen auch anderer Hersteller.

Die Prüfkörper weisen eine Dicke von knapp unter 2 Millimeter auf und liegen damit in den klinisch zu erwartenden und vom Hersteller Wieland empfohlenen Größenordnungen von 1 bis 2 Millimeter (v.a. im inzisalen Bereich), ebenso wie die Durchmesser von 12 Millimeter für eine zu erwartende Verblendfläche. Kleinere sowie größere Ausmaße hätten die Werte hinsichtlich der klinischen Relevanz verfälscht, da stärkere Prüfkörper in der Regel größere Belastungen aufzunehmen in der Lage sind und den Herstellerangaben nicht entsprechen würden.

Um Erkenntnisse bezüglich eines möglichen Zusammenhangs der Rauigkeit einer Oberfläche mit der jeweiligen Festigkeitsänderung zu erhalten, wurden von jeder Gruppe die Mittenrauhwerte  $R_a$  bestimmt. Hierzu wurden je 10 Prüfkörper einer Gruppe mithilfe des Perthometers (Perthometer R6P, MAHR GmbH, Göttingen, Germany) profilometrisch vermessen, indem sie jeweils annähernd waagrecht ausgerichtet und fixiert wurden, so dass die Feinjustierung der Perthometernadel stattfinden konnte. Diese wurde soweit abgesenkt, dass die Kontaktstärke zur jeweiligen Probenoberfläche zwischen minus 10  $\mu\text{m}$  und minus 3  $\mu\text{m}$  konstant eingestellt werden konnte.

Der Sensor des Perthometers erfasste durch topographisches einscannen von jeweils 121 Profilen mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,5 Millimetern pro Sekunde und einer Auflösung von 250  $\mu\text{m}$  (+/-) entlang der linearen Bewegungsrichtung ein repräsentatives Areal von jeweils drei mal drei Millimetern in Regio der Prüfkörpermitten, aus deren Mittelwerten anschliessend die Rauigkeitswerte  $R_a$  jeder einzelnen Gruppe errechnet und dargestellt wurde.

Diese Bestimmung ist in der vorliegenden Arbeit wichtig, da die Oberflächenrauheit durch Arbeitsschritte wie Polieren, Schleifen oder Glasieren beeinflusst wird, ein Zusammenhang zwischen der Oberflächeneigenschaft und der Festigkeit aber vermutet wurde.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Rauheit einer Oberfläche zu bestimmen. Um den arithmetischen Mittenrauhwert  $R_a$  zu bestimmen wird der durchschnittliche Betrag des Rauheitsprofils innerhalb einer Messstrecke bestimmt und danach die mittlere Abweichung der Werte von diesem bestimmt [Pelka M et al. 1993][Paulus M 1990], d.h. er unterscheidet nicht zwischen Riefen oder Spitzen und streut somit nur gering, was zu einer guten Reproduzierbarkeit führt.

Es gibt taktil (profilbasiert) und optisch (flächenbasiert) messende Geräte, wobei die optischen berührungslos messen, die Taktilen dagegen die Oberflächen mit einer Diamantspitze abfahren, wie das Perthometer. Darüber hinaus unterscheidet man die manuelle Methode wie den sogenannten Rugotest, welcher aber eher subjektiven Kriterien unterliegt und somit nicht für klassifizierte Oberflächen geeignet ist.

Zum genauen Ausmessen ist ein Tastschnittgerät wie das Perthometer geeignet, wobei die Form der Tastspitze massgebend für die Messungen sind, da sie nur bei graziler Gestaltung auch in möglicherweise feine Poren auf der Oberfläche eindringen und diese somit abtasten kann. Bei der hier durchgeführten Messung wurde eine sehr feine Diamantspitze gewählt.

### **7.3 Diskussion der Rauigkeitsmessung**

Durch die standardisierte Herstellung der Prüfkörper sollte gesichert werden, dass die Oberflächenbearbeitungsvarianten der verschiedenen Prüfgruppen als festigkeitsbestimmende Faktoren gemessen werden können und nicht etwa Fertigungstoleranzen.

Das Ablöschen überschüssiger Flüssigkeit aus der Keramikmasse durch ein Vliesmaterial schaffte seinerseits eine gewisse, wenngleich bei allen Proben gleiche Oberflächenwelligkeit.

Dies zeigen die Rauigkeitswerte der oberflächenseitig nicht bearbeiteten Referenzgruppe Gruppe 5 auf. In weiterführenden Untersuchungen könnte final eine Folie als Endverdichtung untergelegt werden, um die Oberfläche noch glatter gestalten zu können. Für den Praxisalltag haben diese Oberflächenwelligkeiten herstellungsbedingt bei der Schlickertechnik keine Bedeutung.

Die Rauigkeitswerte der untersuchten Verblendmaterialien Zirox und Zenoflex gemessen in  $\mu\text{m}$  zeigen deutlich, den Einfluss von Oberflächenbearbeitungen auf die Rauhtiefe.

Die mit dem Perthometer gemessenen durchschnittlichen Mittenrauhwerte  $R_a$  zeigen deutliche Unterschiede vor allem von Gruppe 1 („Beschliffen“) zu den anderen Gruppen (s.Tab. 8 und 9 und Abb. 37).

Bei Zirox ist auffällig, dass die Referenzgruppe „As fired“ (5) einen grösseren durchschnittlichen Rauhwert aufweist ( $0,26 \mu\text{m}$ ) als die polierten und/oder glasierten Prüfkörper der Gruppen 2 bis 4, welche Rauigkeiten von im Mittel  $0,16 \mu\text{m}$  bis  $0,22 \mu\text{m}$  aufweisen (Anmerkung s.o.).

Die beschliffenen Proben der Gruppe 1 zeigen erwartungsgemäß, obwohl lediglich mit einem Rotringdiamanten (fein) beschliffen, 5-10 fach höhere Rauwerte zu den Vergleichsproben der Gruppen 2 bis Gruppe 5.

Bei Zenoflex ist wie auch bei Zirox der Mittenrauhwert  $R_a$  von Gruppe 1 („Beschliffen“), mit einem Betrag von  $1,13 \mu\text{m}$ , der mit Abstand höchste Wert.

Hier folgt anders als bei Zirox die Gruppe 2 („Beschliffen und poliert“), danach erst die unbearbeitete Oberfläche der Referenzgruppe (Gruppe 5 „As fired“).

Die Standardabweichungen innerhalb der Gruppen liegen zwischen  $0,02 \mu\text{m}$  und  $0,04 \mu\text{m}$  für die Gruppen 2 bis 4 sowie  $0,09 \mu\text{m}$  für die Gruppe 1 (s.Tab. 9 und Abb. 35).

Im Vergleich der Mittenrauhwerte  $R_a$  zwischen den Gruppen von jeweils Zirox und Zenoflex (Abb. 37) wird deutlich, dass die beschliffenen Oberflächen der Gruppen 1 beider Materialien in ihrem Mittenrauhwert sehr nahe liegen, während die Glasuren

der jeweiligen Keramiken dahingehend unterschiedlich zu sein scheinen, dass die Glasur von Zirox etwas höhere Rauwerte aufweist als bei Zenoflex.

Der Unterschied zwischen den Gruppen 3 und 4 von Zenoflex ist gering, die Rauigkeit wird hier lediglich von der oberflächlichen Glasur bestimmt.

Ein Unterschied zur alleinigen Politur ist deutlich sichtbar, die Rauigkeitswerte haben sich nach der Glasur vor allem bei Zenoflex im Vergleich zu dieser mehr als halbiert, während Zirox besser polierbar erscheint als Zenoflex und durch einen Glanzbrand eher an Rauigkeit zu gewinnen scheint (Abb. 35).

Insgesamt wird ein deutlicher Unterschied der Rauwerte von lediglich feinkörnig beschliffenen Oberflächen zu zusätzlich polierten und/oder glasierten Oberflächen für beide Materialien deutlich.

Vor allem die Glasuren scheinen auch im Vergleich zu unbearbeiteten Oberflächen nach dem Brand zu glatteren Oberflächen zu führen [Haralur SB 2012][Xue L 2012] [Oliveira Junior OB 2013][Vieira AC 2013].

Zwischen beiden erweist sich der Einfluss des Leuzitgehaltes bei der beschliffenen Oberfläche auf die Rauhtiefenauswertung mit Werten von 1,18  $\mu\text{m}$  für Zirox und 1,13  $\mu\text{m}$  für Zenoflex als gering.

Die Ergebnisse der Gruppe 2 „geschliffen und poliert“ weisen die Politur als deutlich rauigkeitsmindernd aus. Hier finden wir Werte von 0,16  $\mu\text{m}$  für Zirox und 0,26 für den leuzitverstärkten Werkstoff Zenoflex. Der um ca. 60% höhere Wert für die Rauigkeit von Zenoflex könnte ein Hinweis auf einen höhere rauhtiefenfördernde Wirkung des Leuzits sein bzw. eine insgesamt bessere Polierbarkeit der leuzitfreien Masse Zirox.

Insgesamt im Vergleich zu den Dimensionen der beschliffenen Proben erweist sich die Politur als deutlich rauhtiefenmindernd und sollte demnach als Mindestanforderung nach dem Beschleifen von Silikatkeramik-Verblendmaterial, sowohl im Munde als auch im Labor empfohlen werden. Beachtung sollte dabei neben den Überlegungen zu den Festigkeitswerten, der Einfluss der Rauigkeiten auf die mikrobielle Flora im Munde, Plaqueanlagerung et cetera mit einfließen. Darüber hinaus ist es von klinischer Relevanz, dass rauhere Oberflächen auch die Abrasion des Antagonisten durch die Keramik erhöht .

Wie in der Einleitung dargelegt, zeichnet sich die Keramik bei entsprechender Gestaltung und Verarbeitung als überlegen gegenüber anderen Konstruktionen aus Kunststoff, Metall oder Metallkeramik aus.

Größenordnungsmäßig liegt eine Rauhtiefe von 1  $\mu\text{m}$  in der Größenordnung von Bakteriendurchmessern (*Staphylococcus aureus*), abgesehen von der höheren Auflagerungsfähigkeit durch Debridement.

Insgesamt bestätigt sich der positive Einfluss der Politur und der Glasur auf die Oberflächenrauigkeit eingeschliffener Restaurationen.

Ein Beschleifen der Restaurationen führt ohne darauf folgende - die angeschliffene Oberfläche verbessernde - Maßnahmen wie Politur oder Glasur zu signifikant höheren Rauigkeitswerten und höherer Plaqueakkumulation. Dies dürfte klin. zu geringeren Verweildauern der Rekonstruktionen führen. Ausserdem führen höhere Rauigkeiten zu neuen Risskeimern , die sich ausbreiten und zu Frakturen führen können [Lohbauer, Müller 2008] und zudem das korrosive Einwirken von Wasser unterstützen [Wiederhorn 1967].

Inwieweit dies Einfluss auf das Festigkeitsverhalten hat, wurde in den Festigkeitsprüfungen untersucht.

## 7.4 Diskussion der Biegefestigkeit

### Zirox

Die biaxiale Festigkeit von Zirox beträgt für die Referenzgruppe „As fired“ (Gruppe 5) mittelwertig 136,49 MPa. Die Festigkeitsangabe des Herstellers für dieses Material liegt bei 120 MPa. Stawarczyk et al. testeten 2009 vor dem Hintergrund, dass die Festigkeit der Verblendkeramik einer der Faktoren sei, der die Festigkeit der gesamten Restauration bestimme, mehrere Verblendkeramiken sowohl für Metall als auch für Zirkoniumdioxid auf ihre biaxiale Festigkeit. Zirox erreichte dort zwar nur Werte um die 95 MPa, lag damit aber im Bereich der bewährten Metallkeramiken. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Verblendkeramiken für Zirkoniumdioxidgerüste in ihrer Ausgangsfestigkeit denen für die Metallkeramik nicht unterlegen sind.

Bei den anderen Gruppen (1-4) wird der Einfluss der oberflächlichen Bearbeitung auf die Festigkeit deutlich.

Die ersten zwei oberflächlich bearbeiteten Gruppen von Zirox („Beschliffen“ sowie „Beschliffen + Poliert“) liegen mit durchschnittlichen Werten von 83,05 MPa bzw. 113,99 MPa weit unter dem Referenzwert, die Gruppen 3 und 4 („Beschliffen + Glasiert“ sowie „Beschliffen + Poliert + Glasiert“) weisen dagegen mit durchschnittlich 197,97 MPa bzw. 191,34 MPa sogar deutliche Festigkeitssteigerungen auf.

Vor allem das alleinige Beschleifen, wenn auch nur mit Feinkorndiamant (50 µm), setzt demnach die Festigkeit bei Zirox um über 40 % in Bezug zum unglasierten und unbearbeiteten Referenzwert herab.

Insgesamt ist ein deutlicher Anstieg der Festigkeiten zu den Prüfkörpern mit glasierten Oberflächen hin zu beobachten, wobei es bei dem leuzitfreien Zirox keinen signifikanten Unterschied macht, ob zuvor zusätzlich poliert wurde.

## Zenoflex

Bei den biaxialen Festigkeitswerten von Zenoflex ist ein deutlicher Festigkeitsanstieg von der Gruppe 1 bis hin zur Gruppe 4 zu erkennen (s. Abb. 37). Die biaxiale Festigkeit von Zenoflex liegt für die Referenzgruppe (Gruppe 5 „As fired“) bei durchschnittlich 128,40 MPa.

Auch bei Zenoflex führen die glasierten Oberflächen bei den Gruppen 4 und 5 zu deutlich höheren Festigkeitswerten, die Kombination von Politur und Glanzbrand nach dem Beschleifen zeigt im Vergleich mit einem Wert von mittelwertig 163,98 MPa die grösste Biegefestigkeit.

Hier konnte die Festigkeit durch die kombinierte Anwendung von Politur und Glasurbrand nach dem Beschleifen, im Vergleich zur Festigkeit ohne Bearbeitung (Gruppe 5) um fast 30% gesteigert werden, besonders festigkeitssteigernd scheint auch hier die Glasur zu sein, wobei hier der positive Effekt der Politur ebenfalls deutlich wird.

## Zirox und Zenoflex im Vergleich

Der Vergleich der Biegefestigkeiten der Gruppen Zirox und Zenoflex verdeutlicht den analogen Festigkeitseinfluss bei den identisch bearbeiteten Gruppen (Gruppen 1-4) (s. Abb. 40), die rapiden Festigkeitseinbußen durch die Einschleifsimulation zum einen und den Anstieg durch Politur und Glasur zum anderen.

Insgesamt sind die biaxialen Festigkeiten von den Zirox-Prüfkörpern im direkten Vergleich zu den jeweils identisch bearbeiteten Prüfkörpern von Zenoflex im Durchschnitt höher.

Auffällig ist der besonders ausgeprägte Festigkeitsgewinn bei den Ziroxgruppen 3 und 4, welche oberflächlich jeweils glasiert wurden.

Dieser Anstieg erscheint bei Zenoflex (s. Abb. 41), wo eine andere Glasurmasse Anwendung fand als die zu Zirox gehörende Glasurmasse, gleichmäßiger zu sein.

Allgemein weisen die Werte auf einen Festigkeitsgewinn durch eine anschließende Glasur der Oberflächen hin, der allein durch eine Politur nicht zu erreichen zu sein scheint.

Die Festigkeit bei Zenoflex wurde durch die Kombination von Politur und Glasur weiter gesteigert, wobei bei Zirox die Glasur den ausschlaggebenden Festigkeitsgewinn auszumachen scheint.

In einer über 12 Jahre andauernden prospektiven Studie konnte gezeigt werden, dass Abrasionsprozesse und gerade auch das initiale Einschleifen als Ursachen von Frakturen in Frage kommen [Frankenberger R 2008].

Dies bestätigen die hier gewonnenen Ergebnisse im statischen Bruchversuch der getesteten Verblendkeramiken. Die Biegefestigkeitswerte für die beschliffenen Gruppen 1 zeigen signifikante Einbußen gegenüber allen anderen Gruppen.

Den Referenzwert der Gruppe 5 as fired mit 136,49 MPa bei Zirox erreichen die Gruppen 1 und 2 als rein mechanisch bearbeitete Oberflächengruppen nicht.

Gruppe 2 (poliert) weist jedoch um circa 30% höhere Festigkeitswerte als die Gruppe 1 (beschliffen) auf. Die Politur soll daher als minimale Anforderung an die Oberflächenbearbeitungen nach Einschleifmaßnahmen angesehen werden, ist aber nicht ausreichend, um das Material zumindest wieder auf seine Ausgangsfestigkeit zu bringen.

Die glasierten Prüfkörper weisen signifikant höhere Festigkeitswerte im biaxialen Test auf. Sie sind auch in der Lage den Referenzwert der Gruppe 5 „as fired“ deutlich zu verbessern und liegen mit durchschnittlich bis zu 197 MPa für Zirox weit über den Prüfkörpern der Gruppen 1 und 2 mit bis zu unter 85 MPa.

Die Glasur verbessert die Festigkeit von Zirox stärker als die von Zenoflex, nach zusätzlicher Politur vor Glasur steigern sich auch die Festigkeitswerte von Zenoflex markant.

Bei dem leuzithaltigen Zenoflex ist die Politur in etwa so festigkeitssteigernd wie die Glasur, so dass die Kombination der festigkeitssteigernden Modifikationen von Politur und anschließender Glasur sich bei Zenoflex addieren und jeweils circa 25-30 MPa an Festigkeit bringen, obwohl der Rauheitswert - bei beiden nur durch die Glasur bestimmt - entsprechend gleich ist.

Dagegen ist bei dem besser polierbaren, leuzitfreien Material Zirox zwar die Rauigkeit nach Politur am Geringsten (0,16  $\mu\text{m}$ ) bzw. derjenigen der Glasur entsprechend (0,18  $\mu\text{m}$ ), festigkeitssteigernden Effekt zeigt hier vor allem die Glasur, die - unabhängig davon ob zusätzlich poliert - biaxiale Festigkeitswerte von annähernd 200 MPa (198 MPa) ermöglicht.

Durch die Glasur nach der Bearbeitung (197,97 MPa) wird die Festigkeit bei Zirox im Vergleich zum rein beschliffenen Zustand (83,05 MPa) um 140% gesteigert, aber auch im Vergleich zur Ursprungsfestigkeit um 45 % (von 136,49 MPa auf 197,97 MPa). Der Aussage des Herstellers, dass bei Zirox keine Glasur notwendig sei, können sich die Ergebnisse, die Festigkeit betreffend, nicht anschliessen. Die Glasur hat hier signifikante Erfolge.

Den Einfluss der Rauigkeiten auf die biaxiale Festigkeit analysierend, fällt insgesamt auf, dass gerade bei Zenoflex ein nahezu proportionales Verhältnis zu bestehen scheint: je glatter die Oberfläche einer Probe ist, desto höher ist deren Festigkeit.

Insgesamt drängt sich die Empfehlung zur Glasur angesichts der starken Erhöhung der Festigkeitswerte der Gruppen 3 (beschliffen + glasiert) und 4 (beschliffen + poliert + glasiert) auf, ebenso bei der oberflächenunbearbeiteten Referenzgruppe 5, so dass

die Ansicht einiger Autoren sowie des Herstellers, die einen Glanzbrand nach Politur für z. T. nicht notwendig erachten, hier nicht geteilt werden kann.

Auch Pospiech hat in seiner Auflistung der AG Keramik zur Vermeidung von Verblendfrakturen die Empfehlung der Keramikhersteller aufgelistet, laut welcher das Polieren nach Einschleifmaßnahmen sinnvoll sei, alternativ die Wiederholung des Glanzbrandes möglich [Goldammer 2012]. Nach den Ergebnissen dieser Studie ist gerade die Erneuerung des Glanzbrandes essentiell, um nicht nur ein Herabsetzen der Anfangsfestigkeit der Verblendkeramik zu minimieren, sondern um das Gegenteil zu bewirken, diese nämlich sogar zu erhöhen. Denn die Festigkeitswerte der glasierten Prüfkörper stellten sich signifikant höher dar als die der unglasierten Referenzproben, selbst wenn diese vor der Glasur zunächst beschliffen worden sind.

Ernst [Ernst 2008] beschrieb (getestet mittels Kausimulationstest) eine Verstärkung der Materialstruktur der sich auf dem Markt befindenden Verblendkeramiken für  $ZrO_2$  durch Leuzit, welches durch seine stressabbauenden Eigenschaften den Chippingraten von 25 % entgegenwirken könne.

Zenoflex dimension hat laut Hersteller Wieland eine veränderte Mikrostruktur mit „ASH (Anti-stress-Mineralien)“ als hohen Leuzitgehalt, die den Abbau unerwünschter Zugspannungen bewirken sollen; der Vergleich der Festigkeitswerte mit dem leuzitfreien Zirox ohne „ASH“ des gleichen Herstellers soll Auskunft über etwaige positive Eigenschaftsverbesserungen aufzeigen.

Die Biegefestigkeitsuntersuchungen bestätigen die festigkeitssteigernden Erwartungen an die leuzitangereicherte Verblendmasse Zenoflex nicht. Das leuzitfreie Zirox zeigt bei allen Werten der Gruppen eins bis fünf höhere Festigkeitswerte, wenn diese auch zum Teil im vergleichbaren Bereich liegen.

Da sich Leuzit durchaus als festigkeitssteigernde Komponente in der Silikatkeramik anbietet, scheint die Zusammensetzung bei Zenoflex zu evtl. noch kleineren kristallinen Partikeln hin untersuchungswürdig zu sein.

Auch wenn bei der Eigenfestigkeit nun zunächst kein positiver Effekt des Leuzitanteils in der Anfangsfestigkeit bestätigt werden konnte, soll dieser sich jedoch laut Literatur [Pospiech 2004] [Belli R 2011] [Swain 1989] im Hinblick auf die zyklischen Belastungen im Mund während der „Tragezeit“ – d.h. in der Dauerfestigkeit, welche den Einfluss von Belastung und Zeit mit einrechnet - bewähren.

Diskutiert wird dies in Bezug auf Ermüdungserscheinungen mit unterkritischem Risswachstum, welches neben dem Risiko des vorzeitigen Ermüdungsbruches auch die Spannungskorrosion fördert. Hier haben sich Kristallite aufgrund ihrer zähigkeitssteigernden Massnahmen (z.B. Rissablenkung) hervorgehoben [Swain 1989] und sich ein hoher Glasanteil als Schwäche erwiesen [Kappert HF 1991] [Schwickerath 1986] [Schwickerath 1994] [Kunzelmann 1999] [Wiederhorn 1968].

Neben der Herabsetzung der Eigenfestigkeit im statischen Bruchversuch durch vor allem Beschleifen, ist auch die Förderung der Spannungsrisskorrosion durch die Oberflächendefekte zu beachten. Rotierende Bearbeitung verringert demnach nicht nur die Widerstandskraft der Keramik, sondern ist direkt für die Entstehung neuer Riskeime verantwortlich (erhöhte Rauigkeit), die Auslöser von Frakturen sein können [Lohbauer 2008].

Da der Leuzitanteil nicht nur festigkeitssteigernd sein soll, was sich in dieser Studie nicht signifikant bestätigen konnte, sondern gerade auch den WAK der Verblendkeramik an denen des  $ZrO_2$  Gerüsts anpassen soll, um zu große innere Spannungen zu vermeiden, wäre zu erforschen ob zum einen noch kleinere, dispers verteilte Kristalle möglich sind, so dass das Material so homogen wie möglich gestaltet werden kann, zum anderen sollte besonderes Augenmerk auf die Glasuren gelegt werden. Diese liegen nicht direkt an der Spannungszone zum Gerüst,

kommen dafür aber als erstes mit den Antagonisten in Kontakt und scheinen erheblich zur Festigkeit beitragen zu können.

Die Glasur von Zirox hatte im Vergleich zu der Glasur von Zenoflex fast doppelt so hohe Rauheitswerte (0,2  $\mu\text{m}$  im Vergleich zu 0,1  $\mu\text{m}$ ), schien aber bei den Festigkeitswerten der Ausschlag gebende Faktor zu sein.

Die Anmischflüssigkeit der bei der Prüfkörperherstellung verwendeten Glasurmassen von Zirox und Zenoflex war dieselbe, während das Glasurpulver sich den Materialien entsprechend unterschied. Hier wären nähere Untersuchungen diesbezüglich interessant.

Insgesamt zeigen die Resultate dieser Studie, dass die verblendeten Vollkeramikrestorationen niemals nach dem Einschleifen einfach so belassen werden sollten. Dies erscheint zwar aus ökonomischer Sicht zunächst zeitsparend, bewirkt aber eine erhebliche Festigkeitsminderung (circa 40 %) in Referenz zur unglasierten Verblendkeramik, selbst bei Benützung eines rotcodierten Feinkorndiamanten. Im Vergleich zur polierten und glasierten Oberfläche würde die Festigkeitsminderung sogar bis zu 60 % betragen!

Eine dreistufige Politur (mit absteigender Korngröße) zeigt sich schon erheblich Risiko minimierend für Chippingfrakturen im Vergleich zum lediglich beschliffenen Zustand, dennoch sollte eine erneute Glasur nach jedem Beschleifen erfolgen, da diese den signifikanten Festigkeitsgewinn induziert.

In Praxi sollte also bei jeder Insertion einer vollkeramischen Restauration zunächst die Okklusion intraoral angepasst werden, um sie dann erneut zu polieren und ganz wichtig: die beschliffenen Areale erneut zu glasieren.

Gerade bei leuzithaltigen Verblendkeramiken sollte nach jeder oberflächlichen Bearbeitung zusätzlich zunächst poliert, dann anschliessend erneut glasiert werden.

## 7.5 Bruchflächenanalyse

Mit ansteigenden Kraftwerten zeigt die Analyse der Bruchstückanzahl eine erhöhte Anzahl an Frakturteilen.

Die beschliffenen Proben der Gruppe 1 halten nur geringen Krafteinwirkungen stand; die Bruchstückanzahl ist mit unter 6 als niedrig anzusehen. Dies korrespondiert mit den Festigkeitswerten der biaxialen Untersuchung.

Die glasierten Proben nehmen bis zum Bruch mehr Energie auf, um bei Fraktur mehr Bruchstücke aufzuweisen. Die höhere Krafteinwirkung zeigt sich an den Prüfkörpern auch optisch, wie die Fotodokumentation belegt.

## 7.6 Diskussion der REM Aufnahmen

Die REM - Aufnahmen unterstützen die in den Rauigkeitsuntersuchungen getroffenen Aussagen. Aufgrund der geringen Anzahl wäre deren Aussagekraft allerdings nicht evident. Die große Rauhtiefe der beschliffenen Gruppe 1 ist im Vergleich zu Aufnahmen mit entsprechender Vergrößerung neben dem die Festigkeit mindernden Einflusses als Retentionsstelle für mikrobiologische Besiedlungen zu sehen.

Ein Vergleich der REM Aufnahmen zwischen den Materialien Zirox und Zenoflex gerade der Gruppen 2 (poliert) in der 500x oder 1000x Vergrößerung (Abb. 48 und 53) deutet auf eine homogenere Struktur von Zirox hin. Hier scheinen kleinere, dichtere Strukturen vorzuliegen als bei der leuzithaltigen Zenoflexmasse, bei der einzelne, verteilte Areale herausstechen.

## 7.7 Zusammenfassende Ergebnisdiskussion - Praxisbezug

Da in der vorliegenden Untersuchung besonderer Wert auf Praxisrelevanz gelegt wurde, sollten die Ergebnisse abschließend dahingehend diskutiert werden.

Bei der Wahl der Verblendmaterialien konnte speziell auf für die Verblendung von Zirkonoxidgerüsten entwickelten Silikatkeramiken zurückgegriffen werden.

Die Festigkeitsuntersuchungen an diesen Werkstoffen zeigen auf, dass bei Anproben zahntechnischer Vollkeramikprodukte mit Verblendungen aus Silikatkeramiken sowohl nach dem Beschleifen als auch bei dem unglasierten Vorprodukt zumindest eine Politur, klinisch aber eine Glasur in Verbindung mit einer Politur zu fordern sind. Die Glasur erreichte in dem biaxialen Test die höchste Festigkeitssteigerung.

Bei festzementierten Arbeiten aus Vollkeramik mit verblendeter Oberfläche scheidet die Glasur ohne die Restauration wieder zu entfernen aus. Hier ist die Politur als Mindestmaßnahme entscheidend.

Inwieweit eine Dauerbelastung oder die Mundverhältnisse im feuchten Milieu die Untersuchungsergebnisse zu beeinflussen vermögen, ist in vivo schwer zu überprüfen, da Brücken „as fired“ selten eine klinische Verwendbarkeit hinsichtlich Okklusions- und Artikulationsverhältnissen aufweisen, eine beschliffene Rekonstruktion hygienischen Verhältnissen nicht entspricht und auch nicht definitiv befestigt werden sollte, geschweige denn eine relevante Prüfanzahl der verschiedenen Gruppen zur Untersuchung kommen würde.

Die Auswahl leuzitorientierter Verblendmassen erscheint zur Zeit nicht weiterführend zu sein.

Die Weiterentwicklung monolithischer Restaurationen könnte, die Chippingproblematik betreffend, zumindest für den Seitenzahnbereich ein Lösungsansatz sein.

## 8.1 Zusammenfassung

Der Wunsch nach Vollkeramik ist, begründet durch ihre ästhetische Überlegenheit, der sehr geringen Plaqueanlagerung und der sehr hohen biologischen Verträglichkeit bei hohen Festigkeitswerten, stetig gestiegen. Durch die Verwendung stabiler Oxidkeramiken in Verbindung mit Verblendkeramiken konnte die Indikation für die Vollkeramik auch auf den Seitenzahnbereich ausgedehnt werden.

Die Schwachstelle im keramischen Verbundsystem ist die Verblendkeramik, die laut Studien bis zu 25% kohäsive Frakturen (Chippings) nach kurzer Tragedauer (3 Jahre) aufweist, obwohl die Eigenfestigkeit derjenigen der Metallkeramiken äquivalent ist.

Ziel dieser Arbeit war es, durch biaxiale Festigkeitsuntersuchungen Hinweise zu erhalten, inwieweit die Oberflächenbearbeitung von zwei hinsichtlich Ihres Leuzitgehaltes verschiedenen konzipierten Verblendmaterialien für Zirkondioxid die Festigkeitswerte zu beeinflussen vermag.

Die Ergebnisse zeigen, dass das alleinige Beschleifen z.B. im Zuge von Okklusionskorrekturen, selbst bei Verwendung eines für diesen Zweck empfohlenen, rotcodierten Feinkorndiamanten (50 µm) und Wasserkühlung, zu signifikanten Festigkeitseinbußen führt, um bis zu 60 % bei Zirox, um 50 % bei Zenoflex.

Eine Politur (dreistufig, mit zunehmender Feinheit) beschliffener Oberflächen ist als minimale Nachbesserung zu sehen und kann bereits die Festigkeitseigenschaften der Silikat-Verblendmasse nach dem Schleifen signifikant verbessern. Insgesamt ist die alleinige Politur dem Glasieren nicht gleichwertig.

Der Glanzbrand erreicht jeweils die höchsten Festigkeitswerte und führte bei beiden Materialien zu einer signifikanten Steigerung der biaxialen Festigkeit, sowohl bei Zirox als auch bei Zenoflex, wobei die Glasur(-masse) von Zirox besonders hervorzuheben ist. Hier konnten die Festigkeiten allein durch die Glasur der beschliffenen Areale im Vergleich zu diesen um 150 % (!) gesteigert werden, im Vergleich zum Ausgangswert (as fired) ebenfalls um circa 45 % auf circa 198 MPa. Fest zementierte Vollkeramikkonstruktionen sollten als Mindestanforderung sehr gut poliert werden, vorzugsweise im dreistufigen Verfahren. Leuzitoptimierte Verblendwerkstoffe brachten in den Untersuchungen keine Festigkeitssteigerung.

## 8.2 Summary

The interest in all ceramic dental bridges and crowns increased during the recent years due to their considerably improved esthetics and high biocompatibility. The indication of all ceramic has been extended to the molar region by using high-strength ceramic materials such as Tetragonal Zirconia Polycrystals (Y-TZP) as structural framework in combination with a veneering porcelain.

As the weakest component in the ceramic compound system we have to suppose the veneering porcelain characterized by lower strength values in comparison with the core ceramic. In result the veneering porcelain cracks and fractures initially. This Chipping of veneering porcelain on zirconia is mentioned to be the most frequent failure reason of all ceramic systems.

The aim of this present study was to evaluate and to compare two different veneering porcelains (Zirox® and Zenoflex®, WIELAND) developed for the lamination of zirconia which were sintered according to the manufacturer's recommendations and to assess the effect of different surface treatments on the biaxial flexure strength. Furthermore it was aim of this study to gain conclusions referred to the effect of leucit by comparing between Zirox (leucit-free) and Zenoflex (leucit-based).

Both materials were divided into 5 groups of each 30 specimens with various surface treatment, in the first group ground, in the second group ground and afterwards polished, in the third group ground and glazed, in the fourth group polished and glazed in combination after ground and finally without surface treatment (as fired) as reference.

The conclusions are that grinding of the veneering materials results in a significantly reduced strength (up to 60 % for Zirox, up to 50 % for Zenoflex). In opposite the polished and especially the glazed surfaces increased the flexure strength significantly (in comparison with group one 150 %, compared with group five 45 %). The groups of the feldspathic veneering material Zenoflex (leucit-based) have not a significant higher reliability compared to the groups of Zirox.

The advice for practice use is at least to polish grinded veneerings but the best result is given by reglazing the surface of the materials.

## 9. Literaturverzeichnis

Abboud M, Stark H

Vollkeramische Restaurationen im Front- und Seitenzahnbereich.

Quintessenz 2003;54:1295-1302

Aboushelib MN, Cornelis JK, Feilzer AJ

Microtensile bond strength of different components of core veneered all-ceramic restorations Part II: Zirconia veneering ceramics.

Dent Mater 2006;22(9):857-863

Aboushelib MN, de Jager N, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ

Microtensile bond strength of different components of core veneered all-ceramic restorations.

Dent Mat 2005;21:984-991

Aboushelib MN, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ

Microtensile bond strength of different components of core veneered all-ceramic restorations Part II: Zirconia veneering ceramics

Dent Mater 2006;22:857-863

Aboushelib MN, de Jager N, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ

Effect of loading method on the fracture mechanics of two layered all-ceramic restorative systems

Dent Mater 2007;23:952-959

Al-Dohan HM, Yaman P, Dennison JB, Razzoog ME, Lang BR

Shear strength of cover-veneer interface in bi-layered ceramics.

J Prosthet Dent 2004;91:349-55.

Al-Shehri SA, Mohammed H, Wilson CA

Influence of lamination on the flexure strength of dental castable ceramic

J Prosthet Dent 1996;76:23-28

Anusavice KJ, Kakar K, Ferree N

Which mechanical and physical testing methods are relevant for predicting the clinical performance of ceramic-based dental prostheses?

Clin Oral Impl Res 2007;18:218-231

Aravind P, Razak PA, Francis PG, Isaac JK, Shanoi RP, Sasikumar TP  
Comparative evaluation of the efficiency of four ceramic finishing systems  
J Int Oral Health 2013;5(5):59-64

Ashby MF, Jones DRH  
Werkstoffe 1: Eigenschaften, Mechanismen, Anwendungen. 3. Aufl. Heidelberg:  
Spektrum Akademischer Verlag, 2006

Atsu SS, Kilicarslan MA, Kucukesmen HC, Aka PS  
Effect of zirconium-oxide ceramic surface treatments on the bond strength to  
adhesive resin  
J Prosthet Dent. 2006;95:430-436

Belli R, Coutinho J, Lohbauer U, Luiz NB  
Über die Sprödigkeit von Dentalkeramiken-Ursachen für Frakturverluste  
Quintessenz 2011;62(1):49-61

Beuer F, Pohl C, Erdelt KJ, Schweiger J, Eichberger M, Gernet W  
Die mechanische Belastbarkeit von Zirkoniumoxidgerüst-Kronen nach thermischer  
Belastung in Abhängigkeit vom Verblendmaterial  
Dtsch Zahnärztl Z 2006;61:546-550

Beuer P, Edelhoff D, Gernat W, Soerensen JA  
Three-year clinical prospective evaluation of zirconia-based posterior fixed dental  
protheses Clin Oral Investigation (2009);13(4):445-451

Beuer F, Schweiger J, Eichberger M, Kappert HF, Gernet W, Edelhoff D  
Highstrength CAD/CAM-fabricated veneering material sintered to zirconia copings -  
a new fabrication mode for all-ceramic restorations.  
Dent Mater 2009;25:121-128.

Bieniek KW, Marx R  
Die mechanische Belastbarkeit neuer vollkeramischer Kronen und  
Brückenmaterialien.  
Schweiz Monatsschr Zahnmed 1994;104(3):284-289

Bieniek KW, Spiekermann H  
Innovative vollkeramische Kronen- und Brückensysteme – Eine Kritische Bewertung.  
Quintessenz 1993;44:529-542;689-697

Boiko A

Untersuchungen zur Einflussnahme auf die  
Verbundfestigkeit von Zirkondioxid zur Verblendkeramik  
Diss. Medizinischen Fakultät Charité – Berlin 2009

Cales B, Stefani Y

Yttria-stabilized zirconia for improved orthopedic prostheses.  
In: Wise DL (ed). Encyclopedic Handbook of Biomaterials and Bioengineering. New  
York: Marcel Dekker, 1995:415-452

Camacho GB, Vinha D, Panzeri H, Nonaka T, Concalves M

Surface roughness of a dental ceramic after polishing with different vehicles and  
diamond pastes  
BRAZ Dent J 2006;17(3):191-194

Campbell SD, Sozio RB

Evaluation of the fit and strength of an all-ceramic fixed partial denture  
J Prosthet Dent 1988;59:301

Covacci V, Bruzzese N, Maccauro G, Andreassi C, Ricci GA, Piconi C et alii

In vitro evaluation of the mutagenic and carcinogenic power of high purity zirconia  
ceramic.  
Biomaterials 1999;20:371-376

Chang-JU H, Hsuan-Chih L, Wei-Hsing T

Effect of abrasive grinding on the strength of Y-TZP  
J of the European Cer Soc 2009;29:2665-2669

Christel PS

Biocompatibility of surgical-grade dense polycrystalline alumina.  
Clin Orthop Relat Res 1992;282:10-18

Danzer R, Lube T, Supancic P, Damani R

Fracture of ceramics  
Adv Eng Mater 2008;10:275-298

De Jager N, Kleverlaan CJ

Microtensile bond strength of different components of core veneered  
all-ceramic restorations  
Dent Mater 2005;21:984-991

De Jager N, Pallav P, Feilzer AJ  
The influence of design parameters on the FEA-determined stress distribution in CAD- CAM produced all-ceramic crowns  
Dent Mater 2005;21:242-251

DIN EN ISO 6872:2009-01  
Zahnheilkunde - Keramische Werkstoffe.  
Beuth Verlag, Berlin 2009

DIN EN ISO 843-1:2007  
Hochleistungskeramik- Mechanische Eigenschaften monolithischer Keramik bei Raumtemperatur-Teil 1: Bestimmung der Biegefestigkeit

Drummond JL, King TJ, Bapna MS, Koperski RD  
Mechanical property evaluation of pressable restorative ceramics  
Dent Mater 2000;16:226-233

Dubois de Chemant N  
Sur les avantages des nouvelles dents et rateliers artificiels, incorruptables et sans odeur  
London und Paris 1788

Edelhoff D, Weber V, Johnen C, Beuer F  
HIP-Zirconia fixed partial dentures – clinical results after 3 years of clinical service  
Quintessenz Int 2008;39:459-471

Edelhoff D, Fischer J, Kern M, Stawarczyk B, Tischert J, Weber W  
ZrO<sub>2</sub>- und die richtige Bezeichnung ist?  
Quintessenz Zahntechnik 2011,37(2):162-168

Eichner K, Kappert H  
Band 1 Grundlagen und ihre Verarbeitung. In:  
Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung, 7.Auflage, Thieme Verlag 2000

Eichner K, Kappert HF  
Zahnärztliche Werkstoffkunde und ihre Verarbeitung  
Georg Thieme Verlag 2005;11:326-372

Elmiger R, Hagmann A, Wohlwend A, Schärer P  
Vollkeramikbrücken  
Schweiz Zahntech Verein 1989;46:15

Ernst M  
Erfolgreicher Auftakt rund um die Prothetik.  
ZWL 2009;6:45

Eschbach E, Wohlfahrt S., Bohlsen F., Kern M.  
Clinical evaluation of all-ceramic posterior three-unit FDP's made  
zirconia  
Int J Prosthodont 2009;22:490-492

Fairhurst CW, Lockwood PE, Ringle RD, Twiggs SW  
Dynamic fatigue of feldspathic porcelain  
Dent Mater 1993;9:269-273

Filser F, Kocher P, Weibel F, Lüthy H, Schärer P, Gauckler LJ  
Zuverlässigkeit und Festigkeit vollkeramischen Zahnersatzes hergestellt im  
DCMVerfahren.  
Int J Comp Dent 2001;4:89-106

Finger WJ, Noack MD  
Postadjustment polishing of CAD-CAM ceramic with luminescence diamond gel.  
Am J Dent 2000 Feb 13;(1):8-12

Filser F, Lüthy H, Kocher P, Schärer P, Gauckler LJ  
Vollkeramischer Zahnersatz im Seitenzahnbereich.  
Quintessenz Zahntech 2002;28:48-60

Fischer J, Grohmann P, Stawarczyk B  
Effect of Zirconia Surface Treatments on the Shear Strength of Zirconia/Veneering  
Ceramic Composites  
Dent Mater J 2008;27:448-454

Fischer J  
Mechanische Eigenschaften metallischer und keramischer Werkstoffe  
Quintessenz Zahntech 2009;35(12):1540-1549

Fischer J, Stawarczyk B  
Compatibility of machined Ce-TZP/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanocomposite and a veneering ceramic  
Dental Mat 2007;23:1500-1505

Fischer J, Stawarczyk B, Trottmann A, Hämmerle CH  
Impact of thermal properties of veneering ceramics on the fracture load of layered  
Ce-TZP /A nanocomposite frameworks  
Dent Mater 2009;25:326-330

Fischer J, Stawarczyk B, Trottmann A, Hämmerle CH  
Impact of thermal misfit on shear strength of veneering ceramic/zirconia  
composites  
Dent Mater 2009;25:419-423

Fischer H, Marx R  
Festigkeit von Dentalkeramik  
ZWR 2000;5:240-244

Fischer J, Hämmerle CH  
Biegefestigkeit von Verblendkeramiken für Zirkoniumdioxid  
Quintessenz Zahntech 2008;9:1138-1145

Fokas-Tsentzeratos, Georgios  
Influence of the surface and heat treatment on the flexural strength and reliability of  
Y-TZP dental ceramic  
Tübingen: Med Diss 2010

Frankenberger R, Taschner M, Garcia-Godoy F, Petschelt A, Krämer N  
Leucite-reinforced glass ceramic inlays and onlays after 12 years  
J Adhes Dent 2008;10:393-398

Garvie RC, Urbani C, Kennedy, DR, McNeuer JC  
Biocompatibility of magnesia- partially stabilized zirconia (Mg-PSZ).  
J Mater Sci 1994;19:3224-3228

Garvie RC, Hannink RH, Pascoe RT  
Ceramic steel?  
Nature 1975;258:703-704

- Gehre G  
Keramische Werkstoffe. In: Eichner K, Kappert HF (Hrsg).  
Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung.  
Georg Thieme Verlag 2005;11:326-370
- Geis-Gerstorfer J, Kanjantra P  
Zum Einfluss der Prüfmethode auf die Biegefestigkeit von IPS-Empress und In-Ceram.  
Dtsch Zahnärztl Z 1992;47:618-621
- Geis-Gerstorfer J, Fässler P  
Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten der Dentalkeramiken Zirkonoxid-TZP und In-Ceram  
Dtsch Zahnärztl Z 1999;54:692-694
- Geis-Gerstorfer J, Kanjantra P, Pröbster P, Weber H  
Untersuchung der Bruchzähigkeit und des Risswachstums zweier vollkeramischer Kronen- und Brückensysteme  
Dtsch Zahnärztl Z 1993;48:685-691
- Geis-Gerstorfer J  
Titan und Titan-Legierungen.  
Zahnärztl Mitt 2003;93:68-72
- Gerstorff N, Huels A, Rinke S  
Prospective evaluation of zirconia posterior fixed partial dentures: four-year clinical results  
Int. J. Prosthodontics 2010-Mar-Apr,23(2);141-148
- Goldammer C  
Einfluss der Oberflächenbearbeitung auf die Biegefestigkeit von verblendetem Zirkoniumdioxid.  
Diss Tübingen 2012
- Gorski W  
Dilatometrie - Grundlagen und Meßverfahren. Braunschweig  
Physikalisch Technische Bundesanstalt 1996

Groten M, Pröbster L  
VITA Vollkeramik – VITA In-Ceram – Leitfaden für vollkeramische Restaurationen  
in der zahnärztlichen Praxis. 3. Auflage, VITA, Bad Säckingen 2006, S.9-10

Guazzato M, Quach L, Albakry M, Swain MV  
Influence of surface and heat treatments on the flexural strength of Y-TZP dental  
ceramic.  
J Dent 2005;33:9-18

Guazzato M, Albakry M, Ringer SP, Swain MV  
Strength, fracture toughness and microstructure of a selection of all-ceramic  
materials. Part I. Pressable and alumina glassinfiltrated ceramics.  
Dent Mater 2004;20:441-448

Guess PC, Kulis A, Witkowski S, Wolkewitz M, Zhang Y, Strub JR  
Shear bond strengths between different zirconia cores and veneering ceramics  
and their susceptibility to thermocycling.  
Dent Mater 2008;24:1556-1567

Gupta S, Awinashe V, Palekar U, Gupta AS  
Effects of Surface Abrasion on the Flexural Strength of Glazed and Re-glazed Metal  
Ceramics: An In Vitro Study.  
J Indian Prosthodont Soc. 2014 Mar;14(1):110-114

Hajtó J  
Die Bedeutung optimaler Oberflächen  
ZM 2010;100:1956-1959

Hajtó J  
Digitale Vollanatomie-Keine Chance für Chipping  
ZWP 2010;4:62-65

Haralur SB  
Evaluation of efficiency of manual polishing over autoglazed and overglazed  
porcelain and its effect on plaque accumulation  
J Adv Prosthodont 2012 Nov 4;(4):179-186

Hessert R

Bearbeitungseigenspannungen, Randschichtschädigungen und Festigkeiten geschliffener Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – und ZrO<sub>2</sub> – Keramiken.  
Diss 1998 Univ Karlsruhe

Hauptmann H, Suttor D, Frank S, Höscheler A

Material properties of all-ceramic zirconia prostheses  
J Dent Res 2000;79:507 (Abstract 2910)

Hoffmann A

Oberflächenbearbeitung von Zirkondioxid  
Quintessenz Zahntechnik 2009;12:17ff

Hohmann A, Hielscher W

Lehrbuch der Zahntechnik-Band 3: Universalien der Werkstoffkunde  
Quintessenz Verlag Berlin 1989

Isgro G, Pallav P, van der Zel JM, Feilzer AJ

The influence of the veneering porcelain and different surface treatments on the biaxial flexure strength of a heat-pressed ceramic  
J Prosthet Dent 2003;90:465-473

Kappert HF, Knode H, Schultheiss R

Festigkeitsverhalten der In-Ceram-Keramik bei mechanischer und thermischer Wechsellast im Kunstspeichel  
Dtsch Zahnärztl Z 1991;46:129

Kappert, HF, Knode H, Schultheiss R

I-ceram auf dem Prüfstand  
Quintessenz Zahntechnik 1990;16:980

Kappert HF

Keramik als zahnärztlicher Werkstoff  
Curriculum Prothetik Band 2, 3.Aufl. Quintessenz Verlag 2005;22:607-637

Kappert HF, Krahl M

Keramiken - eine Übersicht.  
Quintessenz Zahntech 2001;27:668-704

Kappert HF  
Zur Festigkeit von Dentalkeramiken  
ZM 2003;93:42-46

Kappert HF  
Verblendung von Oxidkeramiken. In: Tinschert J, Natt G  
Oxidkeramiken und CAD/CAM-Technologien  
Deutscher Zahnärzterverlag 2007:47-58

Kelly JR, Derrny I  
Stabalized zirconia as a structural ceramic: An overview.  
Dental Materials 2008;24:289-298

Kern M, Kern M  
So hält keramischer Stahl.  
Dental Magazin 2008;1:28-34

Kern M, Kohal RJ, Mehl A, Pospiech P, Frankenberger R, Reiss B, Wiedhahn K, Kunzelmann KH  
Vollkeramik auf einen Blick- Leitfaden zur Indikation, Werkstoffauswahl, Vorbereitung und Eingliederung von vollkeramischen Restaurationen  
Arbeitsgemeinschaft für Keramik in der Zahnheilkunde e.V. 2012

Kern , Bauer HG, Kimmisch H  
Das 1x1 der Zirkonoxid-Behandlung  
Zahntech Mag 2010;14:28-32

Kerschbaum T, Faber FJ, Noll FJ, Keiner M, Hürther W, Schumacher S, Keller E  
Komplikationen von Cercon-Restaurationen in den ersten fünf Jahren  
Deutsch Zahnärztl Z 2009;64:81-89

Kim B, Zhang Y, Pines M, Thompson VP  
Fracture of porcelain veneered structures in fatigue  
J Dent Res 2007;86:142-146

Kim JW, Kim JH, Janal MN, Zhang Y  
Damage maps of veneered zirconia under simulated mastication  
J Dent Res 2008;87:1127-1132

Kim JW, Kim JH, Thompson VP, Zhang Y  
Sliding contact fatigue damage in layered ceramic structures  
J Dent Res 2007;86:1046-1050

Klink A  
CAD/CAM-Restaurationen aus Zirkonoxid  
ZMK 2006;22:268-276

Kontos L, Schille C, Schweizer E, Geis-Gerstorfer J  
Influence of surface treatment on the wear of solid zirconia  
Acta Odontol Scand 2013;71(3-4):482-487

Kosmac T, Oblak C, Jevnikar P, Funduk N, Marion L  
Strength and reliability of surface treated Y-TZP dental ceramics.  
J Biomed Mater Res 2000;53:304-313

Kosmac T, Oblak C, Jevnikar P, Funduk N, Marion L  
The effect of surface grinding and sandblasting on flexural strength and reliability of Y-TZP zirconia ceramic.  
Dent Mat 1999;15:426-433

Kunzelmann KH, Chen HY, Manhart J, Hickel R  
Bruchfestigkeit und Ermüdungsverhalten von Cerec-Keramikkronen  
Dtsch Zahnärztl Z 1999;54:681

Kunzelmann KH, Pospiech P, Kern M  
Hat sich Vollkeramik bewährt? Eine Positionspfeilung in der Kons und Prothetik.  
ZWP spezial 2008,4:22

Kursoglu P, Karagoz Motro PF, Kazazoglu F  
Correlation of surface texture with the stainability of ceramics  
J Prostet Dent 2014 Jan 28;(13):371-375

Lange FF, Dunlop GL, Davis B  
Degradation during aging of transformation toughened  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$  materials at 250°C.  
J Am Ceram Soc 1986;69:237-240

Larsson C, Vult van Steyern P, Sunzel B, Nilner K  
All-ceramic two-to five-unit implant-supported reconstructions: A randomized, prospective clinical trial.  
Swed Dent J 2006;30:45-53

Lauer HC, Weigl P  
Heidemann D (Hrsg.).  
Vollkeramische Kronen und Brücken – Potential zur Routinetherapie?.  
Deutscher Zahnärztlicher Kalender 2005, Deutscher Zahnärzte Verlag, 2005

Lee JJ, Kwon JY, Bhowmick S, Lloyd IK, Rekow ED, Lawn BR  
Veneer vs core failure in adhesively bonded all-ceramic crown layers  
J Dent Res 2008;87:363-366

Lohbauer U, Krämer N, Petschelt A, Frankenberger R  
Correlation of in vitro fatigue data and in vivo clinical performance of a glassceramic material  
Dent Mater 2008;24:39-44

Lohbauer U, Müller FA, Petschelt A  
Influence of surface roughness on mechanical strength of resin composite versus glass ceramic materials  
Dent Mater 2008;24:250-256

Lohbauer U  
Zirkonoxid braucht Kenntnisse  
ZWR 4,2012;121(4)

Ludwig K (Hrsg.).  
Lexikon der Zahnmedizinischen Werkstoffkunde.  
1. Auflage; Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin, 2005, ISBN 3-87652-310-9

Lüthy H, Filser F, Gauckler L, Schärer P  
Reliability of DCM machined zirconia bridges; comparison for different interdental Connector areas  
J Dent Res 78, 205 (abstract 793) (1999)

Lüthy H, Filser F, Loeffel O, Schumacher M, Gauckler LJ, Hämmerle CH,  
Strength and reliability of four unit all-ceramic posterior bridges.  
Dent Mater 2005;21:930-937

Luthardt RG, Rudolph H, Sandkuhl O, Walter M  
Aktuelle CAD/CAM Systeme zur Herstellung von keramischen Zahnersatz - Teil 1:  
Systeme ohne zusätzliche Bearbeitung des keramischen Grundmaterials.  
ZWR 2001;11:747-754

Luthardt RG, Rudolph H, Sandkuhl O, Walter M  
Aktuelle CAD/CAM Systeme zur Herstellung von keramischen Zahnersatz - Teil 2:  
Systeme mit zusätzlicher Sinterung des keramischen Grundmaterials.  
ZWR 2001;12:797-802

Luthardt RG, Holzhüter M, Sandkuhl O, Herold V, Schnapp JD, Kuhlisch E  
Reliability and properties of ground Y-TZP-zirconia ceramics  
J Dent Res 2002;81:487-491

Maier HR  
Leitfaden Technische Keramik, Werkstoffkunde II, Keramik  
Selbstverlag Institut für keramische Komponenten im Maschinenbau, 3.Auflage  
Aachen 1995

Marx R  
Moderne keramische Werkstoffe für ästhetische Restaurationen-  
Verstärkung und Bruchzähigkeit.  
Dtsch Zahnärztl Z 1993;48:229-236

Marx R, Fischer H, Weber M, Jungwirth F  
Rissparameter und Weibullmodule: unterkritisches Risswachstum und  
Langzeitfestigkeit vollkeramischer Materialien  
Dtsch Zahnärztl Z 2001;56:90-98

Marxkors R, Meiners H, Geis-Gerstorfer J  
Taschenbuch der zahnärztlicher Werkstoffkunde  
Deutscher Zahnärzte Verlag 2001;6:166-181

Marxkors R, Meiners H, Geis-Gerstorfer J  
Taschenbuch der zahnärztlicher Werkstoffkunde  
Deutscher Zahnärzte Verlag 2001;11(5):299-301

- Manicone PF, Iommetti PR, Raffaelli L  
An overview of zirconia ceramics: Basic Properties and clinical applications.  
Journal of Dentistry 2007;35:819-826
- Martinez-Gomis J, Bizar J, Anglada JM, Samsó J, Peraire M  
Comparative evaluation of four finishing systems on one ceramic surface  
Int J Prosthodont 2003;16(1):74-77
- Mehl A  
Von den Anfängen bis heute  
ZWP 2001;4:10-11
- Mörmann WH, Ender A, Durm E, Michael J, Wolf D, Bindl A  
Zirkonoxidgerüste bei Kronen und Brücken: aktueller Stand.  
Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift 2007;62:141-148
- Munz D, Fett T  
Mechanisches Verhalten keramischer Werkstoffe.  
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg (1989)
- Nakamura Y, Sato H, Chitsuka M, Hojo S  
Polishing of dental porcelain by polycrystalline diamond  
Bio med Mater Eng 2010;20(5):283-293
- Neumann R  
Systematische Untersuchung des Einflusses der Andruckkraft beim Beschleifen auf  
die Rauheit von Feldspatkeramiken  
Charité - Universitätsmedizin Berlin, Diss 2014
- Nothdurft FP, Pospiech P  
Clinical evaluation of posterior bridges made from zirconia- Five years results  
J Dent Res 2006;85(Spec Iss C):312
- Odatsu T, Jinbo R, Wennerberg I, Sawase T  
Effect of polishing and finishing procedures on the surface integrity of restorative  
ceramics  
Am J Dent 2013;26(1):51-55

Oliveira Junior OB, Buso L, Fujiy FH, Lombardo GH, Campos F, Sarmiento HR, Sousa RO  
Influence of polishing procedures on the surface roughness of dental ceramics made by different techniques  
Genn Dent 2013;61(1):4-8

Paulus M  
Rechnergestützte Oberflächenabtastung für Verschleißuntersuchungen an zahnärztlichen Werkstoffen  
Diplomarbeit Informatik 1990, Universität Erlangen-Nürnberg

Pecanov-Schröder A  
Vollkeramik und CAD/CAM.  
Dent Magazin 2008;1:12-25

Pelka M, Krämer N, Kunzelmann KH  
Oberflächenveränderungen verschiedener Modellmaterialien durch mechanische Prolimetrie  
Deutsche Zahnärztl Z 1993;48:488-491

Pilathadka S, Vahalová D, Vosáhlo T  
The Zirconia: a new Dental Ceramic Material. An Overview.  
Prague Medical Report 2007;108:5-12

Pospiech P  
Vollkeramische Restaurationen:Werkstoffkundliche und klinische Aspekte.  
In: Gernet W, Biffar R, Schwenzer N, Ehrenfeld M (Hrsg.)  
Zahnärztliche Prothetik, 3.Aufl. Stuttgart: Thieme,2007:67-83

Pospiech PR  
DGZPW Tagungs-Abstract Referat Clinical long-term behaviour of Zirconia based bridge (LAVA) Five years result  
J Dent Res 2006;85:Spec les C 0312

Pospiech P, Tinschert J, Raigrodski A  
Keramik – Vollkeramik.  
Ein Kompendium für keramikgerechte Anwendung vollkeramischer Systeme in der Zahnmedizin  
3M ESPE, Ref. Type Catalog, 2004

Pospiech P

Chipping – systemimmanente oder verarbeitungsbedingte Probleme?

Quintessenz 2010;61(2):173-181

Pröbster L

Die Entwicklung der vollkeramischen Restauration –ein historischer Abriss (I).

Quintessenz 1997;48(7):939-947

Pröbster L

Sind vollkeramische Kronen und Brücken wissenschaftlich anerkannt?

Dtsch Zahnärztl Z 2001;56:575-576

Pospiech P

Chipping – systemimmanente oder verarbeitungsbedingte Probleme?

Quintessenz 2010;61(2):173-181

Quinn JB, Sundar V, Lloyd IK

Influence of microstructure and chemistry on the fracture toughness of dental ceramics.

Dent Mater 2003;19:503-611

Radke HD

Statistik mit Excel-Für Praktiker:Statistiken aufbereiten und präsentieren.

Markt + Technik Verlag 2005;4:150

Raigrodski AJ

Contemporary materials and technologies for all-ceramic fixed partial dentures:

A review of the literature.

J Prosthet Dent 2004;92:557-562

Raigrodski AJ, Chiche GJ, Potiket N, Mohamed SE, Hochstedler JL, Mercante DE, Billiot S

The Efficacy of Posterior There unit Zirconia based Bridges: A prospective pilot clinical study.

J Prosthet Dent 2006;96:237-244

Reckziegel A

Eigenschaften und Anwendung von Hochleistungskeramik aus Zirkoniumoxid.

FRIATEC AG Mannheim-Friedrichsfeld, 2004

- Reiber T, Gehre G, Reich S  
Vollkeramik – was ist reif für die Praxis?.  
ZBB (Zahnärzteblatt Brandenburg) 2008;3:16-20
- Reich S, Lohbauer U,  
Abplatzungen bei einer umfangreichen vollkeramischen Rehabilitation-  
Ursachendiskussion und Therapieoption  
Aesthet Zahnmed 2008;11:34-38
- Reich S, Wichmann M, Lohbauer U  
Vollkeramische Restaurationen – Eine Übersicht.  
ZAHN PRAX 2005;7,8:370-373
- Reuling N, Siebert GK  
Keramische Werkstoffe- Entwicklungsstand und Bedeutung  
Dent Lab 1989;37:67-71
- Roediger M, Gerstorff N, Huels A, Rinke S  
Prospective evaluation of zirconia posterior fixed partial dentures: four-year clinical  
results.  
Int J Prosthodont. 2010;23(2):141-148.
- Rosentritt M  
Bruchfestigkeit von adhäsiv befestigten gegenüber konventionell zementierten  
Zirkondioxidbrücken  
Quintessenz Zahntechnik 2011;10:1330-1334
- Rosentritt M  
Influence of substructure design and spacer settings on the in vitro of molar zirconia  
crowns  
J Dent 2009;37:9778-9783
- Rudolph H, Quaas S, Luthardt RG  
CAD/CAM – Neue Technologien und Entwicklungen in Zahnmedizin und Zahntechnik.  
Dtsch Zahnärztl Z 2003;58:559-569
- Sailer I, Fehér A, Filser F, Lüthy H, Gauckler LJ, Schärer P, Hämmerle CH  
Prospective clinical study of zirconia posterior fixed partial dentures: 3 year follow-up  
Quintessence Int 2006;37:685-693

Sailer I, Fehér A, Filser F, Gauckler LJ, Lüthy H, Hämmerle CH  
Five-year clinical results of zirconia frameworks for  
posterior fixed partial dentures.  
Int J Prosthodont. 2007 Jul-Aug;20(4):383-388

Sailer I, Pjetursson BE, Zwahlen M, Hämmerle CH  
A systematic review of the survival and complication rates of all-ceramic and metal-  
ceramic reconstructions after an observation period of at least 3 years. Part II: Fixed  
dental prostheses. Clin Oral Implants Res. 2007 Jun;18 Suppl 3:86-96

Sailer I, Gottnerb J, Kanelb S, Hämmerle CH  
Randomized controlled clinical trial of Zirconia-ceramic and metal-ceramic posterior  
fixed dental prosthesis: a 3 year follow-up  
Int J Prosthodont 2009;22:553-560

Sasahara RM, Ribeiro Fda C, Cesar PE, Yoshimura HN  
Influence of the finishing technique on surface roughness of dental porcelains with  
different microstructures  
Oper Dent 2006;(4):577-583

Schmidt A, Walter M, Bönning K  
CAD/CAM/CIM-Systeme in der restaurativen Zahnmedizin  
Quintessenz 1998;49:1111-1122

Schmitter M  
Langzeitbewährung mehr- und langspanniger Zirkonoxidkeramikbrücken  
Quintessenz Zahnmed 2013;64(3):303-312

Schneider J, Dias Frota BM, Passos VF, Santiago SL, Freitas Pontes KM  
Effects of 2 polishing techniques and reglazing on the surface roughness of dental  
porcelain  
Gen Dent 2013;61(7):6-9

Schüller KH, Hennicke HW  
Zur Systematik der keramischen Werkstoffe.  
Ceram Forum 1985;62:259-263

Schwebke K  
Untersuchungen zum Haftverbund dreier vollkeramischer Systeme  
Diss. Berlin 2002

Schweiger M  
Zirkoniumdioxid Hochfeste und bruchzähe Strukturkeramik  
Ästhetische Zahnmedizin 2004;5:248-257

Schweiger J, Beuer F, Eichberger M  
Sinterverbundkronen und -brücken: Neue Wege zur Herstellung von  
Computergefertigtem Zahnersatz  
Digital Dental News 2007;1:14-21

Schwickerath H  
Dauerfestigkeit von Keramik  
Dtsch Zahnärztl Z 1986;41:264

Schwickerath H  
Prüfung der Verbundfestigkeit Metall-Keramik.  
Dtsch Zahnärztl Z 1983;38:21-25

Schwickerath H, Coca I  
Einzelkronen aus Glaskeramik  
Philip. J.1987;6:336

Schwickerath H  
Vollkeramische Brücken – Gerüste aus Kern- oder Hartkernmassen  
Dent Lab 1988;36:1081

Schwickerath H  
Vollkeramische Brücken-Die Dicor Glaskeramik  
Dent Lab 1988;36:433

Schwickerath H  
Neue Keramiksysteme unter Dauerbelastung  
Quintessenz-Zahntech 1994;20:1495

Seelbach P  
Digitale Abformverfahren in der zahnärztlichen Praxis.  
ZMK 2010;26(10):580-584

Sethi S, Kakade D, Jambhekar S, Jain V  
An in vitro investigation to compare the surface roughness of auto glazed, reglazed and chair side polished surfaces of Ivoclar and Vita feldspathic porcelain  
J Indian Prosthodont Soc 2013;4:478-485

Spillner M  
Thermische Eigenschaften. In: Kollenberg W (Hrsg)  
Technische Keramik Grundlagen, Werkstoffe, Verfahrenstechnik. Essen:  
Vulkan-Verlag, 2004.

Spintzyk S, Wölz G, Geis-Gerstorfer J  
Ein System zur Herstellung reproduzierbarer Probekörper  
Quintessenz Zahntechnik 2012;38(5):542-549

Stawarczyk B  
ZrO<sub>2</sub> – und die richtige Bezeichnung ist?  
Quintessenz Zahntech 2011;37(2):167

Stawarczyk B, Sailer I, Zahno X, Fischer J, Hämmerle C  
Für den Erfolg entscheidend Teil 2  
Swiss Dental Comm 2.Jahrg 4/09 (2009)

Strietzel R  
Die Werkstoffkunde der Metall-Keramik-Systeme.  
Verlag Neuer Merkur 2004

Strub JR, Türp JC, Witkowski S, Hürzeler MB, Kern M  
Curriculum Prothetik, Band II ;  
Quintessenz Verlags-GmbH 2005,22:607-639

Strub JR, Türp JC, Witkowski S, Hürzeler MB, Kern M  
Curriculum Prothetik, Band II ;  
Quintessenz Verlags-GmbH 2005,28(10):771-778

Sturzenegger B, Feher A, Lüthy H, Schärer P, Gauckler LJ  
Reliability and strength of all-ceramic dental restorations fabricated by direct ceramic machining (DCM)  
Int J Comp Dent 2001;4:89-106

Suttor D, Hoescheler S, Hauptmann H, Hertlein G, Bunke K  
LAVA® - das neue System von 3M ESPE für vollkeramische ZrO<sub>2</sub>- Kronen- und  
Brückengerüste  
Quintessenz 2001;52:805-808

Suttor D  
Möglichkeiten und Grenzen der Volkeramik. Vortrag 11. Wilmersdorfer Symposium  
der Freunde und Förderer der Zahnmedizin an der Freien Universität Berlin 2007  
Berlin, 23.06.2007

Swain MV  
Toughening mechanisms for ceramics  
Mater Forum 1989;13:237-253

Swain MV  
Unstable cracking (chipping) of veneering porcelain on all-ceramic dental crowns and  
fixed partial dentures.  
Acta Biomater 2009;5:1668-1677

Tholey MJ, Stephan M  
Haftverbundmechanismen in dentalen Schichtsystemen  
Quintessenz Zahntech 2007;33:160-168

Tholt de Vasconcellos B, Miranda Junior WG, Prioli R, Thompson J, Oda M  
Surface roughness in ceramics different finishing techniques using atomic force  
microscope and profilimeter  
Oper Dent 2006;4:442-449

Tinschert J, Natt G  
Oxidkeramiken und CAD/CAM Technologien-Atlas für Klinik, Labortechnik und  
Werkstoffkunde  
Deutscher Zahnärzte Verlag 2007;2(1):5-42

Tinschert J  
ZrO<sub>2</sub> – und die richtige Bezeichnung ist?  
Quintessenz Zahntech 2011;37(2):167

Tinschert J, Natt G, Jorewitz A, Fischer H, Spiekermann H, Marx R  
Belastbarkeit vollkeramischer Seitenzahnbrücken aus neuen Hartkernkeramiken.  
Dtsch Zahnärztl Z 2000;55:610-616

Tinschert J, Natt G, On HS, Spiekermann H  
Vollkeramische Brücken – Ein aktueller Überblick zur klinischen Anwendung und  
Bewährung.  
Aesthetische Zahnmedizin 2006;9(3):32-41

Tinschert J, Natt G, Latzke P, Schulze KA, Heussen N, Spiekermann H  
Bewährung von vollkeramischen Brücken DC-Zirkon. 5-Jahresergebnisse  
ZWR 2007;116:58

Tinschert J, Natt G, Doose B, Fischer H, Marx R  
Seitenzahnbrücken aus hochfesten Strukturkeramik.  
Dtsch Zahnärztl Z 1999;54:545-550

Tinschert J, Götzen N, Natt G  
Oxidkeramiken und CAD/CAM-Technologien  
Deutscher Zahnärzterverlag 2007:5-46

Tinschert J, Natt G, Latzke P, Schulze KA, Heussen N, Spiekermann H  
Long time behavior of zirconia based fixed partial dentures made of DC-Zirkonia; 3-  
years result  
Int J Prosthodont 2008;21:217-222

Van der Zel JM  
CAD/CAM-Technologie forciert den Einsatz von Zirkondioxid in der restaurativen  
Zahnheilkunde.  
DIGITAL\_DENTALNEWS 04/2007;1:46-53

Voss R  
Festigkeit metallkeramischer Kronen.  
Dtsch Zahnärztl Z 1969;24:726-731

Vult von Steyern P, Carlson P, Nilner K  
All-ceramic fixed partial dentures designed according to the DC-Zirkon technique. A  
2-year clinical study  
J Oral Rehab 2005;32:180-187

Warnecke G, Rosenberger U, Wimmer J  
Mikrovorgänge bei Schleifen von Hochleistungskeramik.  
IDR 1993;27(4):247-252

Warashina H, Sakano S, Kitamura S, Yamauchi KI, Yamaguchi J  
Biological reaction to alumina, zirconia, titanium and polyethylene particles implanted  
onto murine calvaria.  
Biomaterials 2003;24:3655-3661

Wehnert L, Radlanski RJ, Freesmeyer WB  
Untersuchungen zum Verbund von Zirkonia-TZP zu ausgewählten  
Verblendkeramiken  
Quintessenz Zahntech 2010;36:36-47

Wiederhorn SM  
Influence of water vapor on crack propagation in soda-lime glass  
J Am Ceram Soc 1967;50:407-414

Wiederhorn SM  
Moisture assisted crack growth in ceramics  
Int J Frac Mech 1968;4:171

WIELAND Dental  
Gebrauchsanweisung Stand Dezember 2010  
WIELAND Dental+Technik GmbH & Co. KG Pforzheim

Wolfahrt S, Harder S, Eschbach S, Lehmann F, Kern M  
Four-year clinical result of fixed dental protheses with zirconia sustructures (Cercon):  
end abutments vs cantilever design.  
Eur J Oral 2009;117:741-749

Wöstmann B, Seelbach P  
Intraorale Scansysteme für die digitale Abformung.  
ZWR 120 2011;11:598-599

Wright MD, Masri R, Driscoll CF, Romberg E, Thompson GA, Runyan DA  
Comparison of three systems for the polishing of an ultra-low fusing dental porcelain  
J Prosthet Dent 2004;5:486-490

Xue L, Meng Y, Tang X  
The influence of glazing and polishing on ceramic surface roughness and bacterial  
adhesion  
Hua Xi Kou Qiang Yi Xue ZaZhi 2012;30(1):10-17

Zembic I, Lüthy H, Schumacher M, Schärer P, Hämmerle CH  
2- and 3-year results of zirconia posterior fixed partial dentures, made by direct  
ceramic machining (DCM)  
Eur Cell Mater 2002;3:38

Zhang Y, Lawn BR, Rekow ED, Thompson VP  
Effect of sandblasting on the longterm performance of dental ceramics.  
J Biomed Mater Res 2004;71B:381-386

## 10. Anhang

### 10.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Ternäres System Quarz Feldspat Kaolin .....	13
Abb. 2	Phasentransformation Zirkoniumdioxid.....	16
Abb. 3	Yttriumstabilisiertes Zirkoniumdioxid.....	17
Abb. 4	Spannungsinduzierte Umwandlung metastabiler ZrO <sub>2</sub> -teilchen.....	18
Abb. 5	Drei-Punkt-Biegeversuch .....	22
Abb. 6	Schem. Darstellung 4-Punkt-Biegeversuch.....	22
Abb. 7	Biaxialer Versuchsaufbau.....	23
Abb. 8	Biaxialer Versuchsaufbau Aufsicht.....	23
Abb. 9	Bruchzähigkeit von Keramiken .....	27
Abb. 10	Folgen unzureichender WAK-Anpassung.....	28
Abb. 11	Isolierung des Stempels.....	58
Abb. 12	Isolierung der Form.....	58
Abb. 13	Der Stempel wird in die Stahlform eingeschoben.....	59
Abb. 14	Stanze mit aufgenommenem Pulver.....	59
Abb. 15	Zwei Stanzen Pulver portioniert.....	60
Abb. 16	Hinzugabe der Anmischflüssigkeit.....	60
Abb. 17	Homogene und blasenfreie Durchmischung.....	61
Abb. 18	Einbringen einer doppellagigen Vliesschicht.....	61
Abb. 19	Einbringen in die dafür vorgesehene Aussparung.....	62
Abb. 20	Einschieben der gedrehten Form.....	62
Abb. 21	Verdichten des Keramikrohlings.....	63
Abb. 22	Keramikrohling fertig zur Entnahme.....	64
Abb. 23	Der fertige Keramikrohling.....	64
Abb. 24	Austromat 654 press-i-dent.....	65
Abb. 25	Platzierung des Pellets auf Brennstäben.....	66
Abb. 26	Fertig für die Sinterung im Brennofen.....	67
Abb. 27/28	Platzierung der Prüfkörperrohlinge auf dem Brennträger .....	67

Abb. 29	Gerät „Proxxon“ mit dreidimensionaler Justierungsmöglichkeit.....	70
Abb. 30	Positionierung und Überprüfung der Diamanten.....	72
Abb. 31/32	Diamantpolierer verschiedener Polierstufen fürs Winkelstück.....	73
Abb. 33	Perthometernadel auf der Probenkörperoberfläche.....	79
Abb. 34	Zwick Universalprüfmaschine.....	81
Abb. 35	Mittenrauhwert Ra (in $\mu\text{m}$ ) von Zirox.....	87
Abb. 36	Mittenrauhwert Ra (in $\mu\text{m}$ ) von Zenoflex.....	88
Abb. 37	Rauhwerte Ra ( in $\mu\text{m}$ ) von Zirox und Zenoflex.....	90
Abb. 38	Biaxiale Festigkeit der Gruppen 1-5 von Zirox.....	91
Abb. 39	Biaxiale Festigkeit von Zenoflex.....	93
Abb. 40	Biegefestigkeit von Zenoflex und Zirox mit Fehlerindikator....	95
Abb. 41	Weibull Verteilung Zirox.....	98
Abb. 42	Weibull Verteilung Zenoflex.....	95
Abb. 43	Bruchstückanzahl Zirox bei einwirkender Kraft $F_{\text{max}}(1)$ .....	97
Abb. 44	Bruchstückanzahl Zirox bei einwirkender Kraft $F_{\text{max}}(2)$ .....	98
Abb. 45	Anstieg der Bruchstücke (x-Achse) Zenoflex.....	99
Abb. 46	Bruchstücke Zenoflex.....	99
Abb. 47	REM – Zirox beschliffen 500x-fache Vergrößerung.....	102
Abb. 48	REM – Zirox beschliffen+poliert 500x-fache Vergrößerung..	102
Abb. 49	REM – Zirox beschliffen+glasiert 500x-fache Vergrößerung...	103
Abb. 50	REM – Zirox beschliffen+poliert+glasiert 500x-fache Vergrößerung.....	103
Abb. 51	REM – Zirox „as fired“ 500x-fache Vergrößerung .....	104
Abb. 52	REM – Zirox beschliffen 500x-fache Vergrößerung.....	104
Abb. 53	REM – Zenoflex beschliffen+poliert 500x-fache Vergrößerung.....	105
Abb. 54	REM – Zenoflex beschliffen+glasiert 500x-fache Vergrößerung.....	105
Abb. 55	REM – Zenoflex beschliffen+poliert+glasiert 500x-fache Vergrößerung.....	106
Abb. 56	REM – Zenoflex „as fired“ 500x-fache Vergrößerung.....	106
Abb. 57	REM – Zirox 1000x-fache Vergrößerung.....	107

Abb. 58	REM – Zenoflex beschliffen 10000x-fache Vergrößerung....	107
Abb. 59	REM – Zirox beschliffen+poliert 1000x-fache Vergrößerung..	108
Abb. 60	Frakturbild Oberfläche beschliffen.....	108
Abb. 61	Frakturbild Oberfläche beschliffen+poliert.....	108
Abb. 62	Frakturbild Oberfläche beschliffen+glasiert.....	109
Abb. 63	Frakturbild Oberfläche beschliffen+poliert+glasiert.....	109
Abb. 64	Frakturbild Oberfläche unbearbeitet „as fired“.....	109

## 10.2 Schemata

Schema 1	Einteilung der Vollkeramik.....	10
Schema 1	Versuchsdesign.....	50
Schema 2	Darstellung der jeweiligen Zustände von Zirox bzw. Zenoflex.....	54

## 10.3 Tabellenliste

Tab. 1	Kristallstruktur Zirkoniumdioxid.....	16
Tab. 2	Brennprogramm Zenoflex.....	65
Tab. 3	Brennprogramm Zirox.....	66
Tab. 4	Chronologische Darstellung der Arbeitsabläufe nach Gruppen..	69
Tab. 5	Poliervorgang für die Gruppen 2 und 4 beider Materialgruppen..	75
Tab. 6	Glanzbrandprogramm Zirox.....	77
Tab. 7	Glanzbrandprogramm Zenoflex.....	77
Tab. 8	Mittenrauhwerte Ra von Zirox.....	87
Tab. 9	Mittenrauhwerte Ra von Zenoflex.....	88
Tab. 10	Biaxiale Festigkeit von Zirox mit Standardabweichung.....	91
Tab. 11	Biaxiale Festigkeit von Zenoflex mit Standardabweichung.....	91
Tab. 12	Weibull Module.....	96
Tab. 13	Charakt. Weibullfestigkeit.....	96

**Tabellen 14-16: Tabellen zu t-test/Signifikanz der Biegefestigkeiten**

Tab.14: t-Test Zirox		Tab.15: t-Test Zenoflex	
t-test	Zirox	t-test	Zenoflex
(1) mit (2)	8,33479E-09	(1) mit (2)	1,46616E-06
(1) mit (3)	2,08167E-19	(1) mit (3)	1,91306E-10
(1) mit (4)	3,75264E-16	(1) mit (4)	7,78129E-12
(1) mit (5)	4,71713E-10	(1) mit (5)	2,33902E-10
(2) mit (3)	1,00783E-12	(2) mit (3)	6,45241E-06
(2) mit (4)	3,08907E-11	(2) mit (4)	1,11536E-08
(2) mit (5)	0,001137918	(2) mit (5)	0,000230869
(3) mit (4)	0,415805106	(3) mit (4)	0,000499932
(3) mit (5)	1,19934E-08	(3) mit (5)	0,31158173
(4) mit (5)	1,81118E-07	(4) mit (5)	0,000146726

Tab. 16: t-Test Zirox-Zenoflex

t-test Zirox-Zenoflex	
(1) mit (1)	0,732077376
(2) mit (2)	0,071285046
(3) mit (3)	5,80435E-10
(4) mit (4)	0,001612554
(5) mit (5)	0,244017581

**Signifikanz Zenoflex-Gruppen zueinander:**

- (2) mit (2) → (+) Signifikant
- (2) mit (3) → (+) Signifikant
- (2) mit (4) → (+) Signifikant
- (3) mit (5) → (+) Signifikant
- (4) mit (3) → (+) Signifikant
- (2) mit (4) → (+) Signifikant
- (2) mit (5) → (+) Signifikant
- (3) mit (4) → (+) Signifikant
- (3) mit (5) → (-) Nicht signifikant
- (4) mit (5) → (+) Signifikant

**Signifikanz Zirox-Gruppen zueinander:**

- (1) mit (2) → (+) Signifikant
- (1) mit (3) → (+) Signifikant
- (3) mit (4) → (+) Signifikant
- (1) mit (5) → (+) Signifikant
- (4) mit (3) → (+) Signifikant
- (2) mit (4) → (+) Signifikant
- (2) mit (5) → (+) Signifikant
- (3) mit (4) → (-) Nicht signifikant
- (3) mit (5) → (+) Signifikant
- (4) mit (5) → (+) Signifikant

**Signifikanz analoger Gruppen von Zenoflex und Zirox zueinander:**

- (1) mit (1) → (-) Nicht signifikant
- (2) mit (2) → (-) Nicht Signifikant
- (3) mit (3) → (+) Signifikant
- (4) mit (4) → (+) Signifikant
- (5) mit (5) → (-) Nicht Signifikant

**10.4 Geräte und Materialliste**

Austromat 654 press-i-dent

DEKEMA, D-83395 Freilassing

Diamantschleifkörper  
(REF 8882L 314.14)

Komet Gebr. Brasseler GmbH & Co.  
KG, D-32657 Lemgo

---

Diapol Keramik Poliersatz RA 105 (Art.-Nr.:19955)	EVE ErnstVetter GmbH, D-75179 Pforzheim
Glaze RZ	WIELAND Dental +Technik GmbH & Co. KG, D-75120 Pforzheim
INTRACompact Winkelstück 25 LHC	Kaltenbach & Voigt, D-88400 Biberach
INTRA matic LUX 2, 7LN	Kaltenbach & Voigt, D-88400 Biberach
Isolating Fluid Carat®	Hager & Werken GmbH & Co. KG, D-47269 Duisburg
Keramikbrennstäbe	Renfert GmbH, Hilzingen
Pelletor-System®	ZTM Gerald Wölz, D-72072 Tübingen
Perthometer R6P	MAHR GmbH, D-37073 Göttingen
PROXXON	Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde Tübingen Sektion für Medizinische Werkstoffkunde und Technologie, D-72076 Tübingen
Rasterelektronenmikroskop LEO 1430	Zeiss GmbH, 07745 Jena
Sputtergerät SCD 005	BAL-Tec GmbH, D-58454 Witten (BAL-Tec AG, Liechtenstein)
Stain Liquid	WIELAND Dental +Technik GmbH & Co. KG, D-75120 Pforzheim

---

testXpert® 12.0	Zwick, D-89079 Ulm
Universalprüfmaschine Zwick Zwick Z010	Zwick, D-89079 Ulm
Zenoflex	WIELAND Dental + Technik GmbH & Co. KG, D-75120 Pforzheim
Zirox	WIELAND Dental + Technik GmbH & Co. KG, D-75120 Pforzheim
Zirox Glaze	WIELAND Dental + Technik GmbH & Co. KG, D-75120 Pforzheim

## 11. Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. J. Geis-Gerstorfer für die Überlassung des sehr interessanten Themas und die intensive Betreuung.

Insbesondere möchte ich mich bei Frau Schille für ihr unermüdliches Engagement bedanken, sowie für ihre Hilfestellung bei allen technischen und inhaltlichen Fragen.

Dank an E. Schweizer für das Erstellen der REM-Bilder.

Dank an die Firmen WIELAND, Renfert und DEKEMA für die Bereitstellung des Materials bzw. des Ofens.

Außerdem möchte ich mich bei S. Spintzyk, L. Kontos, und C. Goldammer bedanken.

## 12. Curriculum vitae

### Persönliches:

Geburtsdatum: 15. September 1985  
Geburtsort: 59457 Werl

### Schulbildung:

1991 – 1995 Walburgis-Grundschule Werl  
1995 – 2004 Marien-Gymnasium Werl  
2004 Abitur

### Zahntechnische Ausbildung:

2004-2005 Zahntechnisches Labor Teschner/Unna

### Studium:

2005 – 2011 Eberhard Karls Universität Tübingen  
2011 Staatsexamen und Approbation

### Zahnärztliche Tätigkeit:

Seit 2011 Praxisgemeinschaft Dres. Eßer/ Werl