

**Einfluss der Oberflächenbearbeitung auf die
Biegefestigkeit der Aufbrennkeramik Triceram®**

Inaugural Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde

der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Weismann, Christina Kathrin Margarete Renate

2016

Dekan: Professor Dr. I.B. Autenrieth

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

2. Berichterstatter: Professor Dr. J. Setz

Meinen lieben Eltern und
meinem lieben Bruder

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	<i>Historischer Überblick</i>	3
2.2	<i>Keramik in der Zahnheilkunde</i>	7
2.2.1	Der Werkstoff Keramik.....	7
2.2.2	Einteilung der Dentalkeramik.....	8
2.2.3	Das Gerüstmaterial Zirkoniumdioxid.....	11
2.2.3.1	Überblick.....	11
2.2.3.2	Anwendung.....	11
2.2.3.3	Eigenschaften.....	11
2.2.3.4	Verarbeitung.....	13
2.3	<i>Metalle in der Zahnheilkunde</i>	14
2.3.1	Das Gerüstmaterial Titan.....	16
2.3.1.1	Überblick.....	16
2.3.1.2	Anwendung.....	16
2.3.1.3	Eigenschaften.....	16
2.3.1.4	Verarbeitung.....	17
2.4	<i>Aufbrennkeramiken</i>	18
2.4.1	Anforderungen	19
2.4.2	Problematik der Verblendung	20
2.5	<i>Aufbrennkeramiken für Titan- und Zirkonoxidgerüste</i>	21
2.5.1	Die Aufbrennkeramik Triceram®	22
2.5.1.1	Herstellerangaben	22
2.5.1.2	Literaturüberblick	23
2.6	<i>Werkstoffkundliche Eigenschaften einer Dentalkeramik</i>	26
2.6.1	Biegefestigkeit	26
2.6.2	Elastizitätsmodul	26
2.6.3	Sprödigkeit.....	27

2.7	<i>Oberflächenbearbeitung</i>	28
2.7.1	Beschleifen und Politur	29
2.7.2	Glanzbrand	29
2.8	<i>Prüfverfahren</i>	30
2.8.1	Normative Anforderungen	31
2.8.2	Biegefestigkeitsversuche	31
2.8.3	3-Punkt-Biegeversuch.....	32
2.8.4	4-Punkt-Biegeversuch.....	33
2.8.5	Biaxialer Biegeversuch.....	34
2.8.6	Dauerfestigkeitstest	34
3	Ziele der Studie	36
4	Material und Methodik	38
4.1	<i>Überblick</i>	38
4.1.1	Prüfkörpergruppen.....	38
4.1.1.1	Gruppe 1: As-fired.....	38
4.1.1.2	Gruppe 2: Beschiffen	38
4.1.1.3	Gruppe 3: Glanzbrand.....	39
4.1.1.4	Gruppe 4: Poliert.....	39
4.1.2	Einteilung der Prüfkörper	39
4.2	<i>Herstellung der Prüfkörper</i>	41
4.2.1	Das Pelletor-System®.....	41
4.2.2	Durchführung der Prüfkörperherstellung	43
4.2.3	Der Brennofen DEKEMA Austromat 654 press-i-dent.....	49
4.3	<i>Oberflächenbearbeitung</i>	54
4.3.1	Oberflächenzustand „as-fired“	54
4.3.2	Das Beschleifen der Prüfkörper.....	54
4.3.2.1	Aufbau des Schleif- und Poliergerätes.....	54
4.3.2.2	Der Beschleifvorgang.....	56
4.3.3	Oberflächenzustand „Glanzbrand“	58
4.3.4	Oberflächenzustand „Poliert“	60
4.4	<i>Vermessung der Prüfkörper</i>	62

4.5	Messung der Oberflächenrauheit.....	63
4.6	Materialprüfungen.....	64
4.6.1	Biaxialer Biegetest gemäß ISO Norm 6872.....	64
4.6.2	Ermüdungstests.....	66
4.6.2.1	Statischer Stufentest.....	66
4.6.3	Dynamischer Stufentest	67
4.7	Berechnung der Biegefestigkeit	69
4.8	Darstellung der Proben mittels Rasterelektronenmikroskop	70
4.8.1	Das Sputtergerät SCD 005 BAL-TEC.....	70
4.8.1.1	Aufbau des Sputtergerätes SCD 005 BAL-TEC	70
4.8.1.2	Sputtervorgang	71
4.8.2	Das Rasterelektronenmikroskop Zeiss LEO 1430	73
4.9	Statistische Methoden.....	73
4.9.1	Weibullstatistik.....	73
4.9.2	T-Test.....	74
5	Ergebnisse.....	75
5.1	Oberflächenrauheit	75
5.1.1	Titanbrand	75
5.1.2	Zirkoniumdioxidbrand	76
5.1.3	Oberflächenrauheit Vergleich Titan- und Zirkoniumdioxidbrand	77
5.2	Biaxiale Biegetest nach ISO Norm 6872	78
5.2.1	Titanbrand	78
5.2.2	Zirkoniumdioxidbrand	80
5.2.3	Biaxiale Biegefestigkeit Vergleich Titan- und Zirkoniumdioxidbrand.....	81
5.3	Weibull Statistik	82
5.3.1	Weibull-Modul m.....	82
5.3.1.1	Vergleich der einzelnen Brände.....	82
5.3.1.2	Vergleich der einzelnen Oberflächenzustände.....	84
5.3.2	Weibull-Festigkeit σ_0	87
5.3.3	Übersicht Weibull-Modul m und Weibull-Festigkeit σ_0	89

5.4	<i>Dauerfestigkeitstests</i>	89
5.4.1	Statischer Stufentest	89
5.4.1.1	Exemplarische Messkurven	89
5.4.2	Auswertung der Messkurven	93
5.4.3	Dynamischer Stufentest	99
5.4.3.1	Exemplarische Messkurven	99
5.4.3.2	Auswertung der Messkurven.....	102
5.5	<i>Vergleich Dauerfestigkeitstests</i>	104
5.5.1	Vergleich Biegefestigkeit Dauerfestigkeitstests	104
5.5.2	Vergleich Spannungs- und Kraftabfall der Dauerfestigkeitstests.....	105
5.6	<i>T-Test</i>	107
5.7	<i>Rasterelektronenmikroskopische Auswertung</i>	107
6	Diskussion	116
6.1	<i>Allgemein</i>	116
6.2	<i>Diskussion von Material und Methodik</i>	117
6.2.1	Herstellung der Prüfkörper.....	117
6.2.2	Materialprüfungen	120
6.2.3	Darstellung der Proben mittels Rasterelektronenmikroskop	121
6.2.4	Beurteilung der Versuchsmethodik.....	122
6.3	<i>Diskussion der Ergebnisse</i>	125
6.3.1	Rauhigkeitsmessung.....	125
6.3.2	Biegefestigkeit biaxialer Biegetest nach ISO Norm 6872	128
6.3.3	Biegefestigkeit Ermüdungstests	135
6.3.4	Beurteilung des Effektes der Oberflächenrauheit auf die Biegefestigkeit.....	138
6.4	<i>Schlussfolgerung und Ausblick</i>	139
7	Zusammenfassung	143
8	Literaturverzeichnis	144
9	Erklärung zum Eigenanteil der Dissertationsschrift	151

10	Anhang	152
10.1	<i>T-Test</i>	<i>152</i>
10.2	<i>Abbildungsverzeichnis.....</i>	<i>161</i>
10.3	<i>Tabellenverzeichnis.....</i>	<i>164</i>
10.4	<i>Geräte und Materialliste.....</i>	<i>165</i>
11	Danksagung.....	167
12	Curriculum vitae	168

Abkürzungsverzeichnis

Al_2O_3	Aluminiumoxid
B_2O_3	Borax
°C	Grad Celsius
CaO	Kalziumoxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
E-Modul	Elastizitätsmodul E
EN	Europäische Normung
HIP	Hot Isostatic Postcompaction
Hz	Hertz
ISO	International Organisation for Standardization
MgAl_2O_4	Spinell
MgO	Magnesiumoxid
MPa	Mega Pascal (N/mm^2)
MW	Mittelwert
N	Newton
REM	Rasterelektronenmikroskop
SD	Standardabweichung
Ti	Titan
TiO_2	Titanoxid
WAK	Wärmeausdehnungskoeffizient
Y_2O_3	Yttriumoxid
Y-TZP	Yttriumoxid-Tetragonal Zirconia Polycrystal
ZrO_2	Zirkoniumdioxid
%	Prozent

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

In einer Gesellschaft, in der Schönheitsidealen immer mehr Bedeutung beigemessen und erwartet werden, steigen die ästhetischen Ansprüche vieler Patienten an dentale Materialien. Die zu restaurierende Situation sollte deshalb so wirklichkeitsgetreu wie möglich wiederhergestellt oder sogar verbessert werden. Des Weiteren wird ein perfektes Gebiss heutzutage mit gutem Aussehen, sozialem Status und Anerkennung sowie Lebensqualität assoziiert, was wiederum das Selbstbewusstsein des Patienten stärkt. Nicht nur die Ansprüche an Ästhetik sind gestiegen, sondern auch an Qualität und Langlebigkeit der Restauration. Entsprechend hoch sind somit die Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe und deren Verarbeitung. Durch jahrzehntelange Forschung im werkstoffkundlichen Bereich ist es heutzutage gelungen eine Vielzahl an dentalen Werkstoffen mit verschiedensten Eigenschaften anzubieten. Diese reichen zum Beispiel von Metallen über Kunststoffe bis hin zu Keramiken und werden je nach Indikationsbereich eingesetzt.

In den letzten zwei Jahrzehnten gewinnt die Dentalkeramik in der Zahnheilkunde immer mehr an Bedeutung, da sie sowohl funktionell als auch ästhetisch sehr viele Kriterien erfüllt und den Ansprüchen der Patienten, des Zahnarztes und Zahntechnikers gerecht wird. Vor allem die Verblendkeramik ist wichtig für die Ästhetik und ist direkt den mechanischen Belastungen des Kauvorgangs und den chemischen Angriffen des Milieus im Mund ausgeliefert. Die Metallkeramik war seit dem Durchbruch von *Weinstein* und *Katz* im Jahr 1962 über viele Jahre hinweg das Standardsystem [89]. Allerdings gab es Probleme bezüglich der Biokompatibilität von Metallen als Gerüstmaterial. Lange Zeit konnte kein anderes Material an die Festigkeit von Metallen als Gerüstmaterial heranreichen. Bis *Ron Garvie* 1975 Zirkoniumdioxid in der Zahnheilkunde einsetzte [24]. Hierdurch und durch die Einführung der Fräs- und Schleifsysteme begann in den 80er Jahren die Ära der Vollkeramiksysteme.

Die Universalverblendkeramik Triceram® bietet die Wahlmöglichkeit zwischen einem Keramikgerüst aus Zirkoniumdioxid oder einem Metallgerüst aus Titan zu wählen. Dies verschafft dem Zahntechniker praktische Vorteile.

In der Literatur wird oft beschrieben, dass die Aufbrennkeramik die Schwachstelle einer Restauration ist. Zu nennen sind die Frakturanfälligkeit und das sogenannte „chipping“, das Abplatzen der Verblendung vom Gerüst, als häufigste Probleme [27]. Die Festigkeit der Aufbrennkeramik ist ein wesentlicher Faktor, der die gesamte Stabilität der Restauration bestimmt. Nicht nur Fehler bei der Herstellung der Verblendung, wie ein schlecht adaptierter Wärmeausdehnungskoeffizient, Verunreinigungen in der Keramikmasse oder eine schlechter Verbund zwischen Verblendung und Gerüst können zum Versagen der Restauration führen, auch das weitere Bearbeiten der fertigen Restauration kann die innere Spannung der Verblendung erhöhen. Dazu kommt, dass die Restauration im Mund des Patienten einer Dauerbelastung durch ständiges Einwirken der Kaukräfte ausgesetzt ist und hierdurch weitere Spannungen entstehen. Durch das Zusammenspiel aller negativen Faktoren kann es nach Langzeitbeanspruchung zum plötzlichen Versagen der Aufbrennkeramik im Mund des Patienten kommen. Deswegen ist es wichtig die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes in Bezug auf dessen Verarbeitung und Bearbeitung zu erforschen, damit diese verbessert werden und ein Versagen des Werkstoffes vermieden werden kann.

Um dem Patienten eine zufriedenstellendes Ergebnis liefern zu können, sollten die Grenzen der Belastbarkeit eines Materials und dessen optimale Ver- und Bearbeitung bekannt sein. Deswegen wurde in dieser Arbeit der Einfluss der Oberflächenbearbeitung auf die biaxiale Biegefestigkeit und das Ermüdungsverhalten der Aufbrennkeramik Triceram® getestet.

2 Grundlagen

2.1 Historischer Überblick

Die ersten Funde von keramischen Bestandteilen gehen bis auf einige tausend Jahre vor Christus zurück und basieren auf der Erkenntnis, dass sich manche Erden formen und durch Hitze erhärten lassen.

Zum ersten Mal wurde das heutige Porzellan 700 nach Christus in China entdeckt und kam im Jahr 1709 durch die Portugiesen nach Europa. Seitdem strebten die Europäer nach der Herstellung von Porzellan. In demselben Jahr gelang es Johann Friedrich Böttcher am Königshof zu Sachsen Porzellan zu brennen. Daraufhin wurde 1710 die Meißner Porzellanmanufaktur in Meißen gegründet. Auch in anderen großen Städten wie Paris, Berlin und Wien entstanden Porzellanfabriken. Zu dieser Zeit bestand der Ersatz von Zähnen noch aus Elfenbein, Knochen und natürlichen Zähnen, die schlechte hygienische Eigenschaften hatten [19,62].

Im Jahr 1728 wurde durch *Fauchard* zum ersten Mal versucht ästhetischen Zahnersatz herzustellen. Er brannte mit Hilfe von Metalloxiden gefärbte glasartige Emaille auf Kupfer- und Goldplatten auf. Somit wird er als wissenschaftlicher Begründer der Zahnheilkunde angesehen. Die ersten Versuche, Porzellan als Zahnersatz zu nutzen, erfolgten in Frankreich. Der französische Apotheker *Alexis Duchâteau* ließ im Jahr 1774 eine Vollprothese aus Porzellan herstellen. Der Zahnarzt *Dubois de Chemant* entwickelte dies im Jahr 1802 fort, indem er einen Stiftzahn mit Porzellankrone einsetzte [19,62].

Die Fabrikherstellung künstlicher Mineralzähne begann Mitte des 19. Jahrhunderts. Vorreiter war in Italien *Fonzi* im Jahr 1808. Dieser ließ die ersten Porzellanzähne herstellen. Aufgrund ihrer schlechten mechanischen Eigenschaften setzten diese sich nicht durch. In den USA arbeitete *S. S. White* 1844 an der Herstellung künstlicher Mineralzähne. Im Jahr 1850 gründete er zusammen mit seinem Onkel *Samuel Stockton* die erste Zahnfabrik in

Philadelphia, USA. Durch den Zahnarzt *Friedrich August Wieland* entstand die erste Porzellanzahnfabrikation in Deutschland (Pforzheim). Bis zur Einführung des Vulkanisierens des Kautschuks durch *Goodyear* im Jahr 1842 wurden die Porzellanzähne noch mit Draht auf der Prothesenbasis befestigt [19,84].

Charles Henry Land aus Detroit setzte den Meilenstein für die Entwicklung der Jacketkrone (Porzellanmantelkrone, Vollkeramikkrone) im Jahr 1887, indem er eine Platinfolie als Brennträger für den Keramikbrand einsetzte. Das erste vollkeramische System war entwickelt. Dieses Verfahren wird in einer etwas abgeänderten Form noch heute angewendet. Der Indikationsbereich der Jacketkrone liegt aufgrund der mechanischen Eigenschaften bei Einzelkronen im Frontzahnbereich. Zu diesem Zeitpunkt zeigte die Metallkeramik mehr Vorteile durch eine bessere Ästhetik und höhere Biegefestigkeitswerte [19,62,89].

Daneben wurde an der Technik der Vollkeramik geforscht und an der Problematik der niedrigen Scher- und Bruchfestigkeit gearbeitet. Im Jahr 1965 hatten *McLean* und *Hughes* die Idee, Feldspatkeramik mit Aluminiumoxidkristallen zu verstärken, die sogenannte Dispersionsverfestigung der Infiltrationskeramiken. Das bekannteste System ist die Vollkeramik Vitadur (Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Deutschland). Dieses wurde 1989 weiter entwickelt zu dem System In-Ceram ALUMINA (Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Deutschland). Hierbei wurde eine Steigerung der Festigkeit erzielt durch einen höheren Aluminiumoxidgehalt [46,62,84].

Die Vollkeramik findet auch Anwendung im IPS-Empress-System (Ivoclar Vivadent, Ellwangen, Deutschland), das Ende der 80er Jahre auf den Markt kam. Dieses erreicht die Verstärkung durch Anreicherung mit Leuzitkristallen in der Glasphase. Die Indikation dieser Vollkeramik liegt bei Einzelkronen, Veneers und Inlays [46,62,84].

Die heutzutage weit verbreitete und durch eine außerordentliche Festigkeit gekennzeichnete Zirkoniumdioxidkeramik wurde im Jahr 1969 zum ersten Mal im biomedizinischen Bereich eingesetzt. *Christel et al.* setzte diesen Werkstoff für die Herstellung der Kugel von künstlichen Hüftgelenken ein. In der Zahnheilkunde tauchte Zirkoniumdioxid modifiziert durch *Ron Garvie* im Jahr 1975 als teilstabilisiertes Zirkoniumdioxid auf. Dieses Material zeigt aufgrund eines Verstärkungsmechanismus sehr hohe Biege- und Scherfestigkeiten und wurde deshalb auch von ihrem Erfinder als „ceramic steel“ bezeichnet. Die Ära der Vollkeramiksysteme begann in den 80er und 90er Jahren durch die Einführung von Fräs- und Schleifsystemen. Mit diesen Systemen ist es gelungen, das wegen der Festigkeit schwer zu bearbeitende Material Zirkoniumdioxid als Zahnersatz zu verwenden. Diese Hochleistungskeramik erweiterte die Indikation auf mehrgliedrigen vollkeramischen Brücken im Seitenzahnggebiet [24,41,84,91].

In der Sparte Metallkeramik wurde seit *Fauchard* ebenfalls viel geforscht. Erst *Weinstein und Katz* gelang 1962 der Durchbruch der Metallkeramik in den USA mit einer Goldlegierung, auf die man durch eine geeignete Bindung Porzellan aufbrennen konnte. Dies ermöglichte auch im Seitenzahnbereich ästhetisch anspruchsvolle und belastbare Restaurationen. Im Laufe der Zeit wurde das Angebot von reinen Metallen durch den Einsatz von Dentallegierungen erweitert, die bessere Eigenschaften zeigen [89].

In den letzten Jahren setzte sich immer mehr der Werkstoff Titan, nicht nur in der Zahnheilkunde durch. 1795 hatte der deutsche Chemiker *Martin H. Klaproth* das Element Titan entdeckt, indem er dieses Metall aus dem Mineral Rutil isolierte. *Klaproth* gab diesem Element den Namen nach dem Ahnengeschlecht des Zeus aus der griechischen Mythologie. Anhand der Reduktion mit Natrium stellte *Hunter* im Jahr 1910 bis zu 99% reines Titan her. Durch die hohe Affinität des Metalls an Sauerstoff gelang es zu dieser Zeit noch nicht 100% reines Titan zu gewinnen. Erst im Jahr 1938 durch *Kroll* konnte reines Titan industriell

hergestellt werden. Dieser erfand die sogenannte metallurgische Technologie [14,54].

Der Vorteil des Titans besteht in der Möglichkeit niederschmelzende Aufbrennkeramiken einsetzen zu können, welche bessere mechanischen Eigenschaften aufweisen. Anfang der 90er Jahre wurden diese Aufbrennkeramiken speziell für den Werkstoff Titan entwickelt [19,40,62,90].

Im Jahr 1962 ist es den Firmen Vita Zahnfabrik (Bad Säckingen, Deutschland) und Degussa (heute DeguDent, Hanau, Deutschland) gelungen, die bekannte VMK® (Vita-Metall Keramik) zu entwickeln. Die Firma Vita Zahnfabrik produzierte die keramische Verblendmasse und die Firma Degussa das Metallgerüst. Dies stellte das erste Metall-Keramik-System in Europa dar [41,85].

Seitdem sind durch Forschung und Entwicklung im dentalkeramischen Bereich immer bessere Aufbrennkeramiken auf den Markt gekommen. Diese wurden in vielen Eigenschaften, wie ästhetische Ansprüche und Antagonistenverträglichkeit verbessert. Heutzutage wird eine Vielzahl an Systemen angeboten, für keramische als auch metallische Gerüstmaterialien.

2.2 Keramik in der Zahnheilkunde

2.2.1 Der Werkstoff Keramik

Der Name der Keramik stammt aus dem griechischen „*keramos*“, was „*Erden*“ bedeutet (Töpfererde, Ziegel und Tongefäß). Der Begriff umfasst die Produkte welche aus ton- oder kaolinhaltigen Modelliermassen gebrannt sind [40,62].

Bei allen keramischen Massen ist der Prozess der Herstellung gleich. Vorhanden ist ein pulverförmiges Material, welches mit einer Flüssigkeit vermischt wird. Die so entstandene Masse kann geformt werden und wird bei einer Temperatur von 700 bis zu 2000°C gebrannt. Hierbei reagieren die Pulverpartikel zu einem Festkörper [31,40,52,62]. Diesen Prozess der thermischen Verfestigung nennt man Sintern. Hierbei verdichten und schließen sich die Zwischenräume der keramischen Masse, somit wird die Oberfläche kleiner und die Partikel verschweißen [19,31,40,62].

Die Dentalkeramik besteht aus einer transparenten, amorphen Glasphase, in welche Kristalle dispers eingelagert sind. Diese kristallinen Partikel erfüllen wichtige Eigenschaften der Dentalkeramik, wie z.B. ästhetische Aspekte, indem diese durch Lichtbrechung, -streuung und Transparenz die Keramik an die natürliche Farbe der Nachbarzähne anpassen. Ebenfalls sind diese wichtig für die Festigkeit und den Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) der Keramik. Wichtig ist zu bedenken, dass je höher der Anteil und je fester der Verbund der Kristalle ist, desto stabiler ist die keramische Masse. Dies steigert die Opazität des Werkstoffes und geht allerdings auf Kosten der Transluzenz und somit des ästhetischen Erscheinungsbildes des Zahnersatzes [37].

Der wesentliche Unterschied zwischen einer Dentalkeramik und Porzellan besteht darin, dass in der Keramik die für Porzellan typischen Multikristalle fehlen. Aus Tabelle 1 wird ersichtlich, wie sich die Zusammensetzung von Porzellan und einer Dentalkeramik prozentual unterscheiden. Die Hauptbestandteile der Keramik sind Feldspat (Kalifeldspat) und Quarz. Kaolin

hingegen ist die wichtigste Komponente des Porzellans und kommt in der Dentalkeramik gar nicht oder zu sehr geringen Anteilen vor. Wie die Keramik zählt auch Glas zu den Silikatwerkstoffen. Die Keramik kann allerdings auch nicht zu den Gläsern gezählt werden, da sie noch kristalline Anteile beinhaltet. Gläser sind amorph. Trotzdem ähnelt die Dentalkeramik bezüglich ihrer Eigenschaften mehr den Gläsern als dem Porzellan [19,31,40].

Tabelle 1: Vergleich Zusammensetzung Porzellan und Dentalkeramik (modifiziert nach [31])

	Porzellan	Dentalkeramik
Feldspat	20-30%	60-80%
Quarz	20-25%	15-25%
Kaolin	40-60%	0-5%

Neben den in Tabelle 1 aufgeführten Grundbestandteilen enthält die Keramik weitere Zusätze in geringen Mengen, welche die Formfestigkeit, die Brenntemperatur und den thermischen Ausdehnungskoeffizienten positiv beeinflussen. Zu nennen sind Flussmittel, die die Erweichungstemperatur erniedrigen sollen, wie z.B. Natriumkarbonat, Kaliumphosphat, Borax, Kaliumoxid und Bleioxid. Des Weiteren sind Haftoxide, expansive Zusätze und Bindemittel hinzugefügt. Metalloxide und -salze werden als Farbstoffe benutzt. Wichtig für die Biegefestigkeit sind feste, hochschmelzende Oxide aus Aluminium, Magnesium, Silizium und Zirkonium [31,40].

Die Keramik lässt sich je nach Anwendungsgebiet in Fein- und Grobkeramik unterscheiden. Zu der Grobkeramik zählen Baukeramiken, feuerfeste Baustoffe und Grobsteinzeug. Feinkeramiken werden meistens mit einer Glasur überzogen. Zu den Feinkeramischen Materialien zählen Tonwaren (z.B. Töpferwaren), Steingut (z.B. Geschirr), Porzellan und dentalkeramische Massen [40].

2.2.2 Einteilung der Dentalkeramik

Die Einteilung der Dentalkeramik kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen. Zum einen nach ihrem Anwendungsgebiet (Fein- und Grobkeramik, siehe

Kapitel 2.2.1) und zum anderen nach ihrer Herstellungsart (Gießen, Pressen, Sintern). Des Weiteren kann man die Dentalkeramik nach ihrem chemischen Aufbau einteilen. Chemisch gesehen ist eine Keramik ein anorganisches, nicht-metallisches Material, welches durch kovalente und/oder Ionen- Bindungen zusammen gehalten wird. Die chemische Unterteilung wird im folgenden Abschnitt erklärt.

In der dentalen Werkstoffkunde gibt es zwei große Gruppen an Dentalkeramiken, welche in Abbildung 1 dargestellt sind.

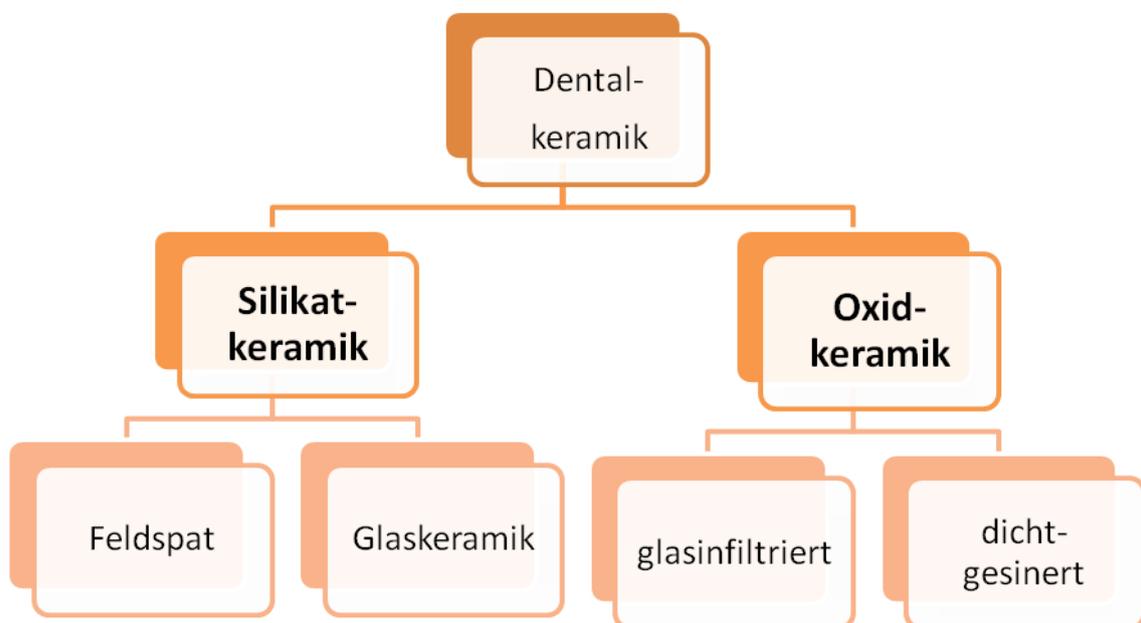


Abbildung 1: Einteilung Dentalkeramik

Silikatkeramiken werden hauptsächlich aus Quarz, Kaolin und Feldspat hergestellt. Durch den Vorgang der Kristallisation verfestigt sich die Keramik und bildet Leuzit- und Feldspatkristalle aus. Die Leuzitkristalle sind für die Standfestigkeit während des Brandes der Keramik und die mechanische Festigkeit verantwortlich. Die Biegefestigkeiten der Silikatkeramiken werden in der Literatur zwischen 100 bis 140 MPa beschrieben. Die Silikatkeramik hat einen hohen Glasanteil. Hierdurch erhält die Keramik gute ästhetische Eigenschaften, wie Transparenz, Transluzenz und eine gute Lichtbrechung.

Aufgrund dieser Eigenschaften besitzt die Silikatkeramik einen „Chamäleon-Effekt“. Dies bedeutet, dass sich der Werkstoff der Farbe der Nachbarzähne angleicht. Wegen ihrer guten ästhetischen Eigenschaften wird diese Keramik für Verblendungen von Brücken oder Kronen und zur Herstellung von vollkeramischen Inlays und Veneers verwendet [31,41,53].

Oxidkeramiken sind einphasige Materialien, welche aus Metalloxiden bestehen. Die Oxide weisen eine hohe Stabilität auf, da diese aus unedlen Metallen mit einem hohen Oxidationspotenzial gebildet werden. Aufgrund des geringen Glasanteils der Oxidkeramik, besitzen diese eine geringe Transluzenz und sind somit sehr opak. Dies birgt Nachteile in der Ästhetik. Deshalb werden Oxidkeramiken mit einer Verblendung versehen und aufgrund ihrer guten mechanischen Eigenschaften als Gerüstmaterial von Einzelkronen und Brücken verwendet. Zu den wichtigsten und häufigsten Vertretern der Oxidkeramiken zählen Aluminiumoxid- (Al_2O_3) und Zirkonoxidkeramiken (ZrO_2). Seltener treten Magnesiumoxid- (MgO), Spinell- (MgAl_2O_4) und Titanoxidkeramiken (TiO_2) auf. Je nach Zusammensetzung der Oxidkeramik können Festigkeitswerte zwischen 500 und 1000 MPa erreicht werden [31,84].

Die Infiltrationskeramik beinhaltet Aluminiumoxidkristalle. Bei der Herstellung wird das Aluminiumoxidgerüst mit flüssigem Lanthanglas infiltriert. Hierdurch werden die Poren geschlossen und die ästhetischen Eigenschaften verbessert, sodass die Keramik im Frontzahnggebiet als Gerüstmaterial einsetzen werden kann. Auch die Festigkeit der Keramik wird durch den Porenschluss und die Riss ableitende Wirkung der Aluminiumoxide enorm gesteigert [31,36,84].

Dicht gesinterte Oxidkeramiken haben keine Glasphase. Diese bestehen ausschließlich aus den oben beschriebenen Metalloxiden. Ein Beispiel der polykristallinen Oxidkeramik ist die Zirkoniumdioxid-Keramik, welche zu den Hochleistungskeramiken zählt [31].

2.2.3 Das Gerüstmaterial Zirkoniumdioxid

2.2.3.1 Überblick

Zirkoniumdioxid (ZrO_2) zählt zu den polykristallinen Oxidkeramiken. Es wird auch Zirkonoxid bezeichnet und ist das Oxid des metallischen Elements Zirkonium. In der vorliegenden Arbeit wird zur Vereinfachung hauptsächlich der Begriff Zirkonoxid verwendet.

Zirkonium (Zr) ist ein biegsames, relativ weiches und silbrig glänzendes Metall. Im Periodensystem der Elemente befindet es sich in der vierten Nebengruppe, in der sogenannten Titangruppe und trägt die Ordnungszahl 40. Zirkonium kann entweder als Zirkoniumsilikat ($ZrSiO_4$, Zirkon) oder als Baddeleyit (ZrO_2) vorkommen.

Das Mineral Zirkoniumsilikat stellt das Ausgangsprodukt des Zirkoniumdioxids dar. Dieser Silikatsand wird durch verschiedene Reinigungs- und Waschvorgänge von Verunreinigungen befreit bis es zu Zirkoniumdioxid überführt wird. Zirkoniumdioxid kommt als zweithäufigste Verbindung des Zirkoniums nach Zirkon in der Natur vor [11,84].

2.2.3.2 Anwendung

Aufgrund der Eigenschaften des Zirkoniumdioxids findet der Werkstoff nicht nur Anwendung in der Zahnheilkunde als Trübungsmittel für Opakermassen. Es dient der Steigerung der mechanischen Festigkeit und der Lichtbrechung von Keramikmaterialien oder als Gerüst- und Implantatmaterial. Ferner findet es Anwendung bei der Herstellung von Feuerfestmaterialien, wie Schmelztiegel und Einbettmassen, sowie bei Schneidewerkzeugen und Schleifscheiben. Von großem Nutzen sind die hohe Festigkeit und der niedrige Verschleiß dieses Materials. In anderen medizinischen Gebieten findet Zirkoniumdioxid Anwendung als Gelenkprothese [84,86].

2.2.3.3 Eigenschaften

Reines Zirkoniumdioxid kann temperaturabhängig in drei verschiedenen Phasen vorkommen. Diese drei Phasen beschreiben die Grundsymmetrie des

Kristallgitters, aus dem eine Keramik aufgebaut ist (siehe Abbildung 2). Von einem Temperaturintervall zwischen Raumtemperatur und 1172°C liegt es in der monoklinen Phase vor. Die tetragonale Phase ist bei Temperaturen von 1173°C bis 2370°C stabil. Bei sehr hohen Temperaturen über 2370°C liegt die kubische Phase vor. Der Schmelzpunkt liegt bei 2690°C, ab dieser Temperatur liegt Zirkoniumdioxid als Schmelze vor [55,84].

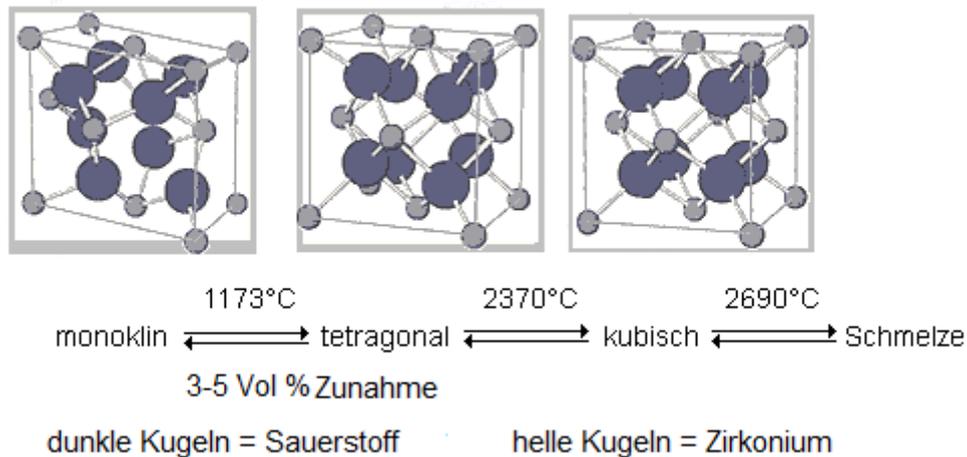


Abbildung 2: Phasenumwandlungen des Zirkoniumdioxids (modifiziert nach [8])

Wie aus Abbildung 2 ersichtlich ist, liegt bei der Phasenumwandlung von tetragonal zu monoklin eine 3-5%ige Volumenzunahme während des Abkühlens vor. Durch diese Volumenzunahme werden Spannungen und somit Rissbildungen in der Keramik induziert. Durch Zugabe von Kalziumoxid (CaO), Magnesiumoxid (MgO) oder Yttriumoxid (Y_2O_3) kann diese Volumenzunahme vermieden werden. [55,60,84,91]

Das polykristalline tetragonale Yttrium-stabilisierte Zirkoniumoxid (engl.: Yttrium stabilized tetragonal zirconia polycrystal ceramic, Y-TZP) zeichnet sich durch ein sehr feines Gefüge mit kleinen Kristallen von 0,5 μm aus. Diese Kristalle befinden sich bei Raumtemperatur in einer metastabilen tetragonalen Phase durch Zugabe von 2 bis 3 mol% Yttriumoxid. Kommt es zu einer Belastung der Keramik und dadurch zur Rissbildung, wandeln sich die Kristalle von der tetragonalen in die monokline Phase um. Hierbei stellt sich eine Volumenzunahme ein und es kommt gleichzeitig zu Druckspannungen

innerhalb des Gefüges. Dadurch kann die Ausbreitung des Risses gestoppt und somit der Bruch des Materials verhindert werden. Das Ergebnis ist eine größere Zähigkeit, Festigkeit und Zuverlässigkeit des Werkstoffes. Dieser Vorgang wird spannungsinduzierte (martensitische) Umwandlungsverstärkung oder auch Transformationsfestigung genannt. In der Literatur wird die Biegefestigkeit von Y-TZP zwischen 1200 und 1500 MPa angegeben [55,60,84,91].

Viele Studien belegen, dass sich durch den Einsatz von Zirkoniumdioxidgerüsten der Indikationsbereich der Vollkeramik stark erweitert hat. Die Eigenschaften der Biegefestigkeit und Bruchzähigkeit dieser Keramik übertrifft alle Keramiken die bisher auf dem Markt erschienen sind. Nach einer Untersuchung aus dem Jahr 1999 zeigte die Dauerfestigkeit von Zirkonoxid Werte, welche glasinfiltrierte Keramiken um das Dreifache übersteigen [29,43].

Des Weiteren besitzt das Material eine sehr gute Biokompatibilität, eine hohe Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit und eine niedrige Wärmeleitfähigkeit. Auch hat es aufgrund der weißen Grundfarbe Vorteile gegenüber einem Metallgerüst.

2.2.3.4 Verarbeitung

Aufgrund der großen Festigkeit des Zirkoniumdioxids ist es erschwert dieses zu bearbeiten. Deshalb werden zur Bearbeitung Schleif- und Frässysteme verwendet. Diese Systeme sind Computer gesteuert, sogenannte CAD/CAM-Systeme (CAD = Computer Aided Design; CAM = Computer Aided Manufacturing). Bei diesen Systemen wird anhand eines Scanners die dreidimensionale Form des präparierten Zahnstumpfes aufgezeichnet und mittels einer Software die Restauration konstruiert. Mit einer Fräs- oder Schleifmaschine wird aus einem Zirkoniumdioxid-Rohling die gewünschte Restauration hergestellt.

Bei der CAD/CAM-Verarbeitung von Zirkoniumdioxid werden zwei Sinterungszustände unterschieden: Zum einen den Zustand des

dichtgesinterten, „gehipten“ (HIP = Hot Isostatic Postcompaction) Materials. Hierbei wird das Zirkonoxid mit viel Zeitaufwand geschliffen (bis zu vier Stunden). Und zum anderen das vorgesinterte Zirkonoxid, dessen Dichte um die Hälfte weniger ist als des Dichtgesinterten. Das Vorgesinterte lässt sich sehr schnell und mit wenig Zeitaufwand beschleifen. Allerdings erfolgt nach dem Schleifvorgang ein Sinterbrand von sechs bis acht Stunden bei 1500°C. Dieser Sinterbrand soll die Keramik verfestigen. Während des Brandes erfährt das Werkstück eine Dimensionsveränderung, die schon beim Schleifvorgang berücksichtigt werden muss [60,84,91].

Durch die dichte Sinterung des Zirkoniumdioxids weist das Material eine hohe Opazität auf. Auch deren Grundfarbe ist schneeweiß. Deswegen muss es meistens aus ästhetischen Gründen mit einer Aufbrennkeramik versehen werden. Wichtig ist bei der Herstellung zu beachten, dass der Wärmeausdehnungskoeffizient der Aufbrennkeramik unter dem Wert des Zirkonoxides ist, damit die Verblendung leicht unter Druckspannung gesetzt wird. Der WAK von Zirkonoxid liegt bei $10,5 \frac{\mu m}{m} K$ [72,84,91].

2.3 Metalle in der Zahnheilkunde

Metalle bzw. Metalllegierungen werden in der Zahnheilkunde vielseitig eingesetzt. Zum Beispiel für Füllungen (Amalgam-, Goldhämmerfüllungen), Wurzelstifte, Teil- oder Hybridprothesen, Implantate, in der Kieferorthopädie (für Drähte und Bänder) oder für Kronen und Brücken. Aufgrund dieser vielseitigen Einsatzgebiete ist eine Vielzahl von metallischen Werkstoffen auf dem Markt, deren Eigenschaften die verschiedenen Indikationen erfüllen.

Wichtig für die Mundbeständigkeit der metallischen Werkstoffe ist, dass diese korrosionsbeständig (lat. *corrodere*: zersetzen) sind. Das heißt, dass diese nicht durch den Einfluss des Speichels angegriffen werden und sich zersetzen und verändern. Außerdem darf das Metall nicht verfärben oder anlaufen. Diese Punkte sind wichtige Voraussetzungen für den zahntechnischen Einsatz.

Da die Eigenschaften reiner Metalle die Anforderungen in der Zahnmedizin oft nicht erfüllen, werden sehr oft Legierungen eingesetzt. Legierungen sind metallische Werkstoffe, welche aus mindestens zwei metallischen Elementen oder einem Metall und einem Nichtmetall bestehen. Diese können zum einen in einphasige Legierungen (homogene Gefüge), die sich komplett Durchmischen und ein einheitliches Kristallgitter bilden, und zum anderen in zweiphasige Legierungen (heterogene Gefüge), bei denen sich beide Komponenten nicht komplett durchmischen, unterschieden werden. Die Eigenschaften von Legierungen ergeben sich aus den prozentualen Anteilen der Materialien, aus denen die Legierung besteht. In der nachfolgenden Tabelle 2 ist die Einteilung der Dentallegierungen dargestellt [18,40,84].

Tabelle 2: Einteilung Dentallegierungen (modifizierte nach [83])

Edelmetall-Legierungen	Nichtedelmetall-/ Edelmetallfreie-Legierungen
1. Gold und Gold-Legierungen (hochgoldhaltig, goldreduziert, Rein-Gold) – Gold-Platin-Legierungen – Gold-Palladium-Legierungen – Gold-Silber-Legierungen – Gold-Kupfer-Legierungen	1. Cobalt-Legierungen – Cobalt-Chrom-Molybdän-Legierung
2. Palladium-Legierungen – Palladium-Silber-Legierungen – Palladium-Kupfer-Legierungen – Palladium-Gold-Legierungen	2. Nickel-Legierungen (hoher Sensibilisierungsgrad) – Nickel-Chrom-Legierung – Nickel-Titan-Legierung
3. Quecksilber-Legierungen (Amalgame)	3. Eisen-Legierungen – Eisen-Chrom-Nickel-Legierung (V ₂ A-Stahl) – Eisen-Nickel-Chrom-Legierung
	4. Titan und Titan-Legierungen (Rein-Titan, Titan-Legierungen)

2.3.1 Das Gerüstmaterial Titan

In diesem Kapitel wird aufgrund der Thematik dieser Arbeit auf das Metall Titan als Gerüstwerkstoff für eine Keramik verblendete Restauration eingegangen. Diese Kombination nutzt die positiven Eigenschaften des Metalls, wie gute Passgenauigkeit, hohe Elastizität und Zugfestigkeit, sowie die Eigenschaften der Keramik, Ästhetik und gute Mundbeständigkeit, sodass die Metallkeramik ein universell einsetzbares System darstellt.

2.3.1.1 Überblick

Titan (Ti) ist ein unedles chemisches Element, gehört zu den Übergangsmetallen, steht im Periodensystem der Elemente in der vierten Nebengruppe und trägt die Ordnungszahl 22. Das Element ist in der Erdkruste sehr weit verbreitet. Es kommt in nahezu allen Gesteinen und Mineralien mit einem geringen Anteil vor. Zu den bedeutungsvollsten Titanmineralien zählen Anatas (TiO_2), Rutil (TiO_2) und Ilminit (Titaneisenerz, FeTiO_3), die bei der von *Kroll* erfundenen Methode Rein-Titan zu gewinnen eine große Rolle spielen [14,54].

2.3.1.2 Anwendung

Der Werkstoff Titan findet nicht nur in der Zahnheilkunde Anwendung, als Implantatmaterial oder als Gerüstwerkstoff von Kronen und Brücken. Als andere Einsatzgebiete ist die chemische Industrie, die Luft- und Raumfahrttechnik, Automobilindustrie, die Lebensmittelchemie und die Herstellung von Sportgeräten zu nennen. Auch in der Medizin findet Titan Anwendung in der Herstellung von Prothesen, Herzschrittmachern und Osteosynthesen (Plattensysteme) [39,54].

Laut *Rüdinger et al.* (1983) und *Roberts et al.* (1996) wurde im Jahr 1985 150000 Tonnen Titan weltweit verarbeitet [54].

2.3.1.3 Eigenschaften

Der Werkstoff Titan ist weiß glänzend, weist eine hohe Festigkeit und ein geringes Gewicht auf, ist temperatur- und korrosionsbeständig.

Es ist ein sehr unedles Metall und besitzt eine hohe chemische Reaktivität. Titan hat eine große Affinität zu Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenstoff und Wasserstoff. Das Metall bildet auch im wässrigen Milieu mit Sauerstoff spontan eine oxidische Schutzschicht, die aus als Passivschicht bezeichnet wird. Durch diese Eigenschaft wird das Metall sehr biokompatibel und korrosionsbeständig. Durch diese hohe chemische Reaktivität kann es bei der Herstellung und Verarbeitung von Titan zur Aufnahme von unerwünschten Fremdmaterialien kommen. Sogar gegen fast alle Laugen und Säuren, außer Flusssäure, ist Titan beständig [14,31,54].

Des Weiteren besitzt Titan eine geringe Wärmeleitfähigkeit und ist gut durchlässig für Röntgenstrahlen. Es ist nicht wie manch andere Metalle magnetisch [14,34].

Die Dichte von Titan ist sehr gering und beträgt $4,5 \text{ g/cm}^3$. Bedingt durch diese geringe Dichte ist das Gewicht sehr niedrig und die Festigkeit sehr hoch im Vergleich zu anderen Metallen. Es hat zum Beispiel ein Viertel des Gewichts von Gold. Somit weist der Werkstoff ein gutes Verhältnis zwischen Festigkeit und Masse auf. Titan ist ein sehr weiches Metall und fast doppelt so elastisch wie Stahl [54].

2.3.1.4 Verarbeitung

Werkstücke aus Titan werden gegossen. Der Titanguß ist wegen der Eigenschaften des Werkstoffes sehr aufwendig und sehr teuer. Aufgrund der hohen Reaktionsfreudigkeit der Titanschmelze müssen spezielle reaktionsarme Einbettmassen und Gussanlagen eingesetzt werden. Ebenfalls muss unter Schutzgas oder Hochvakuum gegossen werden. Die sogenannte Grenzflächenreaktion stellt ein Problem bei der Gussherstellung von Titangerüsten dar. Hierbei entsteht während des Gießens eine Gusshaut, auch α -case genannt, zwischen der Titanschmelze und der Einbettmasse. Diese Gusshaut stellt einen Ausgangspunkt für Risse dar und muss durch Oberflächenbearbeitung entfernt werden. Der erforderliche Oberflächenabtrag

muss bei der Fertigung berücksichtigt werden. Trotzdem kann es zu Ungenauigkeiten bei der Passung der Restauration kommen [31,52].

Die CAD/CAM-Technologie bietet einen Weg, bei dem die gusstechnischen Mängel minimalisiert werden. Des Weiteren können Titanrestaurationen anhand von Funkenerosion bearbeitet und hergestellt werden [34].

Aus ästhetischen Gründen benötigt Titan eine Verblendung. Diese kann entweder aus Keramik oder aus Kunststoff bestehen.

Für die Verblendung mit einer Keramik wurden spezielle auf den Werkstoff Titan abgestimmte niedrig schmelzende Aufbrennkeramiken entwickelt. Niedrig schmelzend bedeutet, dass die Keramik bei einer relativ niedrigen Temperatur aufgebrannt wird [31,34,90].

Es ist wichtig zu beachten, dass bei der Verblendung die Verblendkeramik nicht nur einen optimalen Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweist, sondern auch eine Brenntemperatur von maximal 800°C hat. Dies beruht auf der Reaktionsfreudigkeit von Titan mit Sauerstoff, die oberhalb von 800°C stark ansteigt. Bei dieser Reaktion wird, wie im vorangegangenen Text beschrieben, eine Oxidschicht auf dem Metall gebildet, welche die Haftung der Verblendung erschwert. Deshalb wird für Aufbrennkeramiken auf Titan ein Bonder eingesetzt, welcher die Bildung der Oxidschicht hemmt. Ferner ist es wichtig darauf zu achten, dass die Brenntemperatur unter 800°C liegt, da ab 880°C eine Umwandlung des Titangitters von einer dichten, hexagonalen α -Phase in eine kubische raumzentrierte β -Phase erfolgt. Diese Umwandlung geht mit einer Volumenzunahme von 17% einher [14,39,42,90].

2.4 Aufbrennkeramiken

Aufgrund des schlechten ästhetischen Erscheinungsbildes des Gerüstmaterials einer Kronen- oder Brückenrestauration muss das Gerüst mit einer Aufbrennkeramik, auch Verblendkeramik genannt, versehen werden. Bei einer Aufbrennkeramik stehen die ästhetischen Anforderungen im Vordergrund; d. h., diese soll den natürlichen Zahn möglichst der Realität getreu nachbilden. Sehr wichtig hierfür ist eine gute Transluzenz und Lichtstreuung, sodass das Material

an Tiefenwirkung und Lebendigkeit gewinnt. Die Stabilität der Restauration muss von dem Gerüst gewährleistet werden. Des Weiteren sollte vom Hersteller eine breite Farbpalette der Verblendkeramik zur Verfügung gestellt werden, damit der Zahntechniker die Möglichkeit hat, den Zahn farblich zu gestalten.

Wegen ihrer guten ästhetischen Eigenschaften werden ausschließlich Silikatkeramiken als Aufbrennkeramiken verwendet. Was allen Aufbrennkeramiken gemein ist, dass diese eine niedrigere Brenntemperatur haben als Gerüstkeramiken. Auch das Prinzip der Herstellung der Verblendung ist für Metall-, als auch Keramikgerüste gleich [91].

Heutzutage ist eine Vielfalt an Aufbrennkeramiken auf dem Markt. Diese unterscheiden sich vor allem in ihrer Brenntemperatur, ihrem Expansionsverhalten und ihrem Wärmeausdehnungskoeffizienten.

Die Einteilung der Verblendkeramiken erfolgt nach ihren Brenntemperaturen. Es gibt niedrig schmelzende Aufbrennkeramiken, welche bei Temperaturen $<800^{\circ}\text{C}$ gebrannt werden. Durch den Zusatz von Borax (B_2O_3) ist es möglich diese Keramikgruppe bei niedrigen Temperaturen zu brennen. Das Problem bei den niedrig schmelzenden Keramiken war, dass einige metallische Gerüstwerkstoffe einen Soliduspunkt von ungefähr 890°C aufweisen. Diese relativ kleine Differenz zur Brenntemperatur der Keramik brachte Probleme mit der Festigkeit des Metalls. Deshalb wurden hoch schmelzende Verblendkeramiken entwickelt, die aber einer Temperatur von $>800^{\circ}\text{C}$ gebrannt werden [31,84,88].

2.4.1 Anforderungen

Bei der Auswahl der Verblendkeramik ist es wichtig, sowohl für ein Titan-, als auch ein Zirkoniumdioxidgerüst, dass die Wärmeausdehnung der Verblendkeramik an die des Gerüstmaterials angeglichen ist. Dies ist ebenso bedeutend für den Verbund zwischen Verblendung und Gerüst, wie auch für die Stabilität und Festigkeit damit die Rissbildung der Verblendung verhindert wird.

Während des Abkühlens nach dem Brand der Restauration kommt es zu einer Schrumpfung. Hierdurch entstehen innere Spannungen im Werkstück. Da Keramiken spröde Werkstoffe sind und Druckbelastung besser tolerieren als Zugbelastung, muss die Spannung möglichst gering gehalten werden. Deshalb sollte der Wärmeausdehnungskoeffizient (WAK) der Materialien aufeinander abgestimmt sein. Der WAK muss so gewählt werden, dass die Aufbrennkeramik nach dem Brand leicht unter Druck steht. Dieser kann durch die Zusammensetzung der Aufbrennkeramik gesteuert werden, indem bei der Herstellung die Keramik Leuzitkristalle oder Aluminiumoxid angereichert wird. Durch eine hohe Zufuhr von Leuzit kann der WAK erhöht werden [27,42,84,88].

Der WAK zwischen der Verblendung und der des Metalls darf keine große Differenz aufzeigen. Im Idealfall ist bei einer Metallverblendung der WAK der Keramik gleich dem des Metalls oder kleiner. Besteht jedoch eine größere Differenz im WAK der beiden Materialien wird nach dem Brand eine längere Abkühlphase empfohlen [20,42].

Bei einer Vollkeramik sollte der WAK der Aufbrennkeramik etwas niedriger gewählt werden, als der des Keramikgerüsts [27].

Somit schrumpft das Gerüstmaterial bei der Voll- als auch bei der Metallkeramik mehr und die Verblendung wird leicht unter Druck gesetzt.

2.4.2 Problematik der Verblendung

Ein großes Problem der verblendeten Arbeiten stellt das sogenannte „Chipping“ dar. Dies ist das Abplatzen der Verblendung vom Gerüst. Hierbei kommt es zu einem Verlust der Verbundfestigkeit. Ursachen des „Chippings“ können die mangelnde Festigkeit der Verblendkeramik oder nicht abgestimmte Werte des Wärmeausdehnungskoeffizienten sein, sodass die Verblendung unter Spannung steht. In vielen Studien wurde der Verbund untersucht. *Sailer et. al* gibt an, dass 13% der Keramikverblendungen eines Y-TZP-Gerüsts nach drei Jahren und 15,2% nach fünf Jahren Tragezeit abplatzen [71].

Die Reparatur ist aufwendig und teuer, da meist die komplette Restauration entfernt werden muss.

Bei Metallkeramiken gibt es das Problem der Oxide, die sich nach dem Brand auf dem Metall, wie z.B. Titan, bilden. Diese Oxide haben eine Eigenfarbe, die abhängig vom Metallmaterial variieren und von der Aufbrennkeramik abgedeckt werden muss. Deshalb wird als Basisbrand ein sogenannter Opaker, eine deckende Keramikmasse, auf das Gerüst aufgetragen. Dieser enthält viele farbige Zusätze und Oxide, die die Lichtbrechung fördern [10,84].

2.5 Aufbrennkeramiken für Titan- und Zirkonoxidgerüste

Heutzutage ist eine große Bandbreite an Verblendkeramiken auf dem Markt. Um einen Materialüberblick zu erlangen erscheint jährlich ein aktualisierter Katalog. Darin können sich Zahnärzte und Zahntechniker über Produkte informieren, vergleichen und auswählen.

Da die Werte der Wärmeausdehnungskoeffizienten von Zirkoniumdioxid ($10,5 \frac{\mu m}{m} K$) und Titan ($9 \frac{\mu m}{m} K$) relativ nahe beieinander liegen, wurden universelle Aufbrennkeramiken für beide Werkstoffe entwickelt. Dies hat nicht nur zeitliche und wirtschaftliche Vorteile, sondern bietet durch die Reduktion der Materialvielfalt dem Zahntechniker und dem Zahnarzt die Möglichkeit sich mit weniger Keramikprodukten auseinanderzusetzen und das Wissen auf wenige Produkte zu spezifizieren.

Die Firma Dentaurum (Pforzheim, Deutschland) brachte eine solche universelle Keramik mit der Aufbrennkeramik Triceram® auf den Markt, welche in dieser Studie untersucht wurde.

Des Weiteren bieten die Firma Schütz Dental GmbH (Rosbach, Deutschland) mit dem Verblendsystem Tizian® und die Firma Heimerle + Meule GmbH (Wien, Österreich) mit dem System Inspiration® universelle Aufbrennkeramiken für Zirkoniumdioxid- und Titangerüste an.

Das ceraMotion®-System der Firma Dentaurum baut auf den Erfahrungswerten von Triceram® auf. Dieses System besteht aus sechs Linien. Jede Linie stellt eine Verblendkeramik für einen anderen Gerüstwerkstoff dar (z.B. Titan-, Zirkoniumdioxidgerüste, Gerüste aus edelmetallfreien Legierungen und Gerüste aus Legierungen mit hohen WAK-Werten).

2.5.1 Die Aufbrennkeramik Triceram®

Die Keramik Triceram® kam im Jahr 1999 auf dem Markt. Da sie zu der Gruppe der niedrig schmelzenden Aufbrennkeramiken gehört und die Brenntemperatur maximal 795°C beträgt, wurde sie primär für Titangerüste entwickelt. In dieser Zeit kam die CAD/CAM-Technologie mit dem Werkstoff Zirkoniumdioxid als Gerüstmaterialien auf. Bei Versuchen Triceram® als Verblendkeramik auch für Zirkoniumdioxid anzuwenden, bestätigte sich, aufgrund der guten Eigenschaften dieser Keramik, die Indikation für beide Gerüstmaterialien [15].

2.5.1.1 Herstellerangaben

Laut Herstellerangaben übertrifft die Biege- und Scherfestigkeit der Keramik die geforderten Werte in den Normen ISO 6872 und ISO 9693 [16,16].

Aufgrund der guten Eigenschaften von Triceram® wird die Verbundfestigkeit mit 42 MPa angegeben. In der ISO 9693 Norm werden 25 MPa gefordert. Somit übertrifft auch die Verbundfestigkeit die Angaben dieser Norm [13,16].

Die Werte der Wärmeausdehnungskoeffizienten der einzelnen Triceram® Keramikmassen für das Titan- und Zirkoniumdioxidgerüst sind in Abbildung 3 zu sehen. Gut zu erkennen ist, dass die Werte relativ nahe beieinander liegen. Auch bei mehrmaligem brennen bleibt der WAK-Wert konstant [13,63].

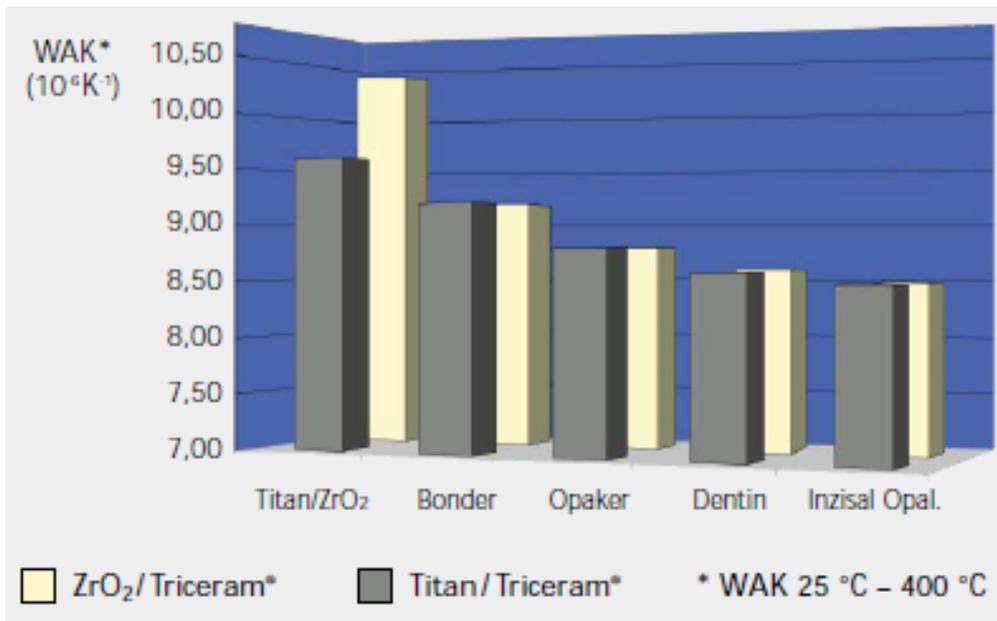


Abbildung 3: WAK-Werte Triceram® [13]

Für die Oberflächenbearbeitung der Verblendkeramik Triceram® empfiehlt die Firma Dentauro (Ispringen, Deutschland) superfeine Sinterdiamanten bzw. gesinterte Diamantscheiben. Ebenfalls sollte vor dem Glanzbrand die Bearbeitung und die Politur mittels diadurit-imprägnierten Spezialfaserpolierern und mikrofeinen diamant-imprägnierten Filzpolierern durchgeführt werden [16].

2.5.1.2 Literaturüberblick

Im Jahr 2005 testete *Sailer et al.* die Keramik Triceram® auf ihre ästhetischen Eigenschaften im Vergleich zu zwei anderen Zirkonoxid Verblendkeramiken. Hierbei wurden die technische Verarbeitung und die Farbstabilität der Aufbrennkeramiken getestet. Mit einem Schichtprotokoll wurde während des Schichtens die Verarbeitungsfreundlichkeit beurteilt. Farbstabilität und Ästhetik wurden von insgesamt 11 Zahntechnikern, Zahnärzten und Dentalassistenten im Mund des Patienten bewertet. Triceram® wurde zur farblich besten Verblendkeramik gewählt. Diese zeigte sich zudem sehr standfest beim Schichten und hatte im Vergleich zu den anderen Keramiken kaum Formveränderung beim Brennen [72].

Stawarczyk et al. prüfte die Abhängigkeit des Versagens einer Restauration von der Formgebung des Gerüstmaterials aus Zirkoniumdioxid. Hierbei wurde die Bruchlast von vollkeramischen Kronenrestorationen mit anatomischem und nicht anatomischem geformtem Gerüst getestet. Diese Gerüste wurden jeweils mittels vier verschiedenen Aufbrennkeramiken verblendet. Die verblendeten Restaurationen wurden auf einen Metallstumpf zementiert und in einer Prüfvorrichtung im 45°-Winkel belastet, bis eine Fraktur eintrat. Triceram® zeigte im Vergleich zu anderen Verblendkeramiken die höchsten Bruchlastwerte im Mittel. Allerdings lagen alle Werte sehr nahe beieinander. Für Triceram® wurden Bruchlastwerte auf einem anatomisch geformten Gerüst von $1061,9 \pm 224,4$ N und auf einem nicht anatomischen Gerüst $841,7 \pm 219,3$ N ermittelt. Es zeigte sich, dass eine anatomische Gerüstform die Bruchlast einer Restauration steigert und besser geeignet ist als eine nicht anatomische Form [81].

Eine weitere Untersuchung von *Fischer* stellte die Frakturanfälligkeit der Verblendkeramik in den Vordergrund. Hierfür wurde die Biegefestigkeit von zehn verschiedenen Verblendkeramiken, darunter auch Triceram®, für Zirkoniumdioxidgerüste geprüft. Die Biegefestigkeit wurde anhand des 3-Punkt-Biegeversuchs, des 4-Punkt-Biegeversuchs und des biaxialen Biegetests untersucht. Die Resultate für den 3-Punkt-Biegeversuch waren höher als für den 4-Punkt-Biegeversuch. Die Ergebnisse des biaxialen Tests lagen bei allen Keramiken immer dazwischen. Der Wert der Biegefestigkeit von Triceram® lag beim biaxialen Test etwas über 100 MPa. Die Festigkeitswerte aller Verblendkeramiken lagen im gleichen Bereich [27].

Eine Untersuchung aus dem Jahr 2008 von *Stawarczyk* und *Fischer* beschäftigte sich mit der Bruchlast von Einzelkronenrestorationen aus verschiedenen Gerüstmaterialien, die mit passenden Verblendkeramiken versehen wurden. Die Gerüstmaterialien waren Titan und Zirkonoxid. Beide Werkstoffe wurden mit Triceram® verblendet. Die Kronen wurden auf Metallstümpfe zementiert und in der Prüfmaschine Zwick (Ulm, Deutschland)

nach dem Versuchsaufbau von Voss in einem 45° Winkel eingespannt. Triceram® zeigte auf einem Zirkoniumdioxidgerüst den Zweitgrößten Bruchlastwert im Mittel von $930,5 \pm 145,8$ N. Und auf einem Titangerüst den größten Wert von $898,6 \pm 105,7$ N im Mittel. Da beide Bruchlastwerte fast identisch sind zeigte diese Studie, dass Triceram® für beide Gerüstmaterialien geeignet ist [25,82].

Niedrigschmelzende Aufbrennkeramiken besitzen eine geringe Abrasionsfestigkeit, was die Antagonisten schont. Anhand einer Untersuchung in der man die Verschleißfestigkeit niederschmelzender Keramiken (auch Triceram®) mit der Zwei-Medien-Abrasion untersucht hatte, kam jedoch heraus, dass diese nicht weniger verschleißfest sind als hochschmelzende Keramiken [51].

In einer Studie von *Gürtler et al.* wurde Triceram® mit einer weiteren Titankeramik vergleichend auf deren Bruchverhalten erforscht. Hierfür wurde das gegossene Titangerüst mit den zwei Aufbrennkeramiken verblendet und mit einem Glanzbrand versehen. Die Ablöse/Rissbeginnfestigkeit wurde mittels 3-Punkt-Biegeversuch nach *Schwickerath* durchgeführt. Anschließend erfolgte eine thermozyklische Alterung mit Temperaturenwechsel zwischen 5 bis 55°C. Das Ergebnis der Triceram® verblendeten Prüfkörpern lag bei $34,6 \pm 2,5$ MPa. Diese zeigten höhere Festigkeiten als die andere Verblendkeramik. Durch die thermozyklische Alterung sank die Verbundfestigkeit aller Proben, wobei Triceram® auch hier die besten Ergebnisse zeigte [34].

Die 2001 veröffentlichte Testreihe von *Kappert*, zeigte die Bruchbelastung von Triceram® auf einem Zirkoniumdioxidgerüst im Vergleich zu einer anderen Zirkoniumdioxidaufbrennkeramik. Die Bruchlastwerte des Triceram®-Systems lagen über den Werten des anderen Systems. Auch im Vergleich zu früheren Studien von *Kappert* zeigten die Vollkeramiken bessere Ergebnisse als die Metallkeramiken [45].

Haddad schreibt in einem Artikel über seine Erfahrungswerte mit Triceram®. Hierin schildert er Triceram® als eine Dentalkeramik die sehr einfach zu verarbeiten ist. Die gewünschte Form ist mit dieser Keramik einfach zu erzielen und aufgrund der guten Transluzenz lassen sich natürliche Effekte sehr gut nachbilden. Auch die Verarbeitungszeit von Triceram® ist kurz, da die einzelnen Brennzeiten nicht viel Zeit in Anspruch nehmen und die Verblendkeramik keine Abkühlzeit benötigt [35].

Dieser Literaturüberblick zeigt, dass Triceram® bei allen Untersuchungen sehr gute Ergebnisse aufweist, die geforderten Bruchlastwerte der Normen übersteigt und im Vergleich zu anderen Aufbrennkeramiken besser abschneidet.

2.6 Werkstoffkundliche Eigenschaften einer Dentalkeramik

2.6.1 Biegefestigkeit

Die Biegefestigkeit [N/mm^2 oder MPa] ist einer der wichtigsten Parameter zur Beschreibung der Festigkeit eines Werkstoffes. Sie ist definiert als die Festigkeit, bei welcher ein Bruch durch Rissbildung veranlasst wird. Die Biegefestigkeit stellt die Grenze der elastischen Belastbarkeit dar. Wird diese Elastizitätsgrenze überschritten, kommt es zum Bruch der Keramik. Eine hohe Biegefestigkeit bedeutet, dass die Keramik eine gute Widerstandsfähigkeit gegen einen Bruch besitzt. Da Keramiken sehr druckfest sind und sich ein Riss unter Druck verdichtet, geht ein Bruch immer von der Zugseite aus. Diese liegt bei einer Brückenrestauration nicht an der okklusalen, sondern an der basalen Seite [6].

2.6.2 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul, auch E-Modul genannt, beschreibt den Widerstand gegen elastische Verformung eines Werkstoffes durch Belastung, der bei Entlastung wieder aufgehoben wird. Neben der Biegefestigkeit ist der E-Modul eine der wichtigsten Größen für Dentalkeramiken [6].

Der Elastizitätsmodul E errechnet sich aus dem Quotienten der Spannung σ und der relativen Dehnung ε :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}.$$

2.6.3 Sprödigkeit

Gebrannte Keramiken zeigen Eigenschaften wie große Härte und Druckfestigkeit, was ihren Einsatz in der Dentaltechnik begünstigt. Allerdings sind sie sehr spröde Materialien, was sich an niedrigen Zug-, Biege- und Scherfestigkeitswerten zeigt. Daraus resultiert ein Sprödbbruchverhalten, welches Druckspannungen gut standhält, aber Zug- und Scherspannung nicht [31].

Die Sprödigkeit der Keramiken beruht auf ihrer Gitterstruktur. Sie besteht aus kovalenten-ionischen Bindungen, die keine Versetzung der Gitterebenen zulässt und somit nicht plastisch verformbar ist. Metalle hingegen besitzen ungerichtete Elektronenbindungen, die Versetzungen und somit eine plastische Verformung ermöglichen. [59]

Druckspannungen, Sprödigkeit und ein hohes E-Modul können einem Rissfortschritt entgegen wirken, allerdings Scher- und Zugspannung wirken Riss fördernd. Somit wird die Eigenschaft der hohen Festigkeit einer Keramik herabgesetzt, wenn der Werkstoff von Defekten negativ beeinflusst wird [18,30,59].

Für dentalkeramische Werkstoffe besteht ein Zusammenhang zwischen der Riss öffnenden Zugspannung und der Risstiefe. Das heißt, je größer die Spannung ist, die auf einen Werkstoff wirkt, desto größer wird auch die Risstiefe. Wird eine Keramik unter Zugspannung gesetzt, kommt es an Gefügefehlern zu einer Spannungskonzentration. Wird an dieser Stelle die Zerreißfestigkeit überschritten, so kommt es zu einem Bruch der Keramik und die Risstiefe wird vergrößert. Zudem wird die Zugspannung im verkleinerten Querschnitt der Probe erhöht, welche sich aus der Zugkraft pro Fläche

zusammensetzt, und der Riss breitet sich weiter aus. Diesen Vorgang nennt man auch „crack propagation theory“. Ein Abbau der mechanischen Spannung ist nicht möglich [28,31].

Die Belastbarkeit nimmt mit größer werdender Risstiefe überproportional ab. Der Grund hierfür ist, dass der Hebelarm, der am Rissgrund angreift, mit der Defektgröße länger wird und sich somit die Belastbarkeit verringert [58].

2.7 Oberflächenbearbeitung

Die Oberflächenbearbeitung einer Aufbrennkeramik mittels eines rotierenden Instruments stellt einen wesentlichen Schritt in der Herstellung einer prothetischen Restauration dar. Diese können „chairside“, d.h. während einer Behandlung am Stuhl des Patienten, bei allen Anproben oder bei der Fertigstellung der Arbeit durch den behandelnden Zahnarzt erfolgen, oder im Labor durch den Zahntechniker durchgeführt werden. Die Korrektur der Oberfläche der Verblendung dient meistens der Herstellung einer optimalen Okklusion mit dem Antagonisten und der Vermeidung von Fehlkontakten.

Die häufigsten Fehler während der Oberflächenbearbeitung, wie Risse oder das Abplatzen der Verblendung, entstehen durch die falsche Umdrehungszahl, Kühlung oder das falsche Ansetzen des rotierenden Instrumentes. Auch die richtige Wahl der Instrumente ist entscheidend. Hierbei sind die Herstellerangaben zu beachten.

Wichtig für eine Reduzierung der Plaqueanlagerung an der Restauration ist, dass nach der Aufrauung der Oberfläche, diese wieder geglättet wird, durch ein erneutes Sintern oder Polieren [84].

Die Oberflächenbearbeitung bzw. der Oberflächenzustand ist entscheidend für die Biegefestigkeit der Keramik. Deshalb wird in der Literatur gefordert, dass die Restauration immer poliert eingesetzt wird [68].

2.7.1 Beschleifen und Politur

Schleifen ist ein spanabhebendes Fertigungsverfahren. Der Vorteil liegt darin, dass feste Materialien gut bearbeitet werden können und eine Formgenauigkeit erzielt werden kann. Zum Schleifen werden spitze, kleine Partikel, welche eine größere Härte aufweisen müssen als der zu bearbeitende Werkstoff, verwendet. Das Problem dieser Bearbeitungstechnik besteht darin, dass keine Glättung erzielt wird, sondern viele neue Riefen entstehen und somit die Rautiefe erhöht wird. Hierdurch entstehen Mikrorisse, die die Biegefestigkeit der Keramik herabsetzen. Es kann zum Versagen des Werkstoffes im Mund des Patienten kommen. Oft dauert die Materialermüdung mehrere Jahre, da ein subkritisches Risswachstum zu beobachten ist. Somit kann die Aufbrennkeramik ganz plötzlich während einer normalen Belastung zerbrechen [6,31,58].

Eine Glättung (Politur) kann nur erzielt werden, wenn durch mehrmalige Bearbeitung mit immer feinkörnigeren Instrumenten die Rautiefe herabgesetzt wird. Somit ist die Rautiefe eines Werkstoffes von der Korngröße des Instruments abhängig, mit dem es zuletzt bearbeitet wurde. Im Idealfall sollte die eingeschliffene Stelle poliert werden [31].

2.7.2 Glanzbrand

Der Glanzbrand einer keramischen Restauration ist der letzte Schritt bei der Herstellung. Dieser soll die Oberfläche der Keramik ebnen und glätten, indem dieser Brand Poren und Risse schließt. Hierdurch kann auch die Entstehung von Sollbruchstellen beseitigt werden. Auch die Plaqueanlagerung wird vermindert. Des Weiteren erhöht der Glanzbrand die Festigkeit der Keramik, indem dieser während des Abkühlens nach dem Brennvorgang einen Druck auf der Oberfläche der Verblendung ausübt. Nach dem Glanzbrand sollte auf eine weitere Bearbeitung der Oberfläche, wie das Beschleifen, verzichtet werden, da hierdurch wieder die Oberfläche beschädigt und angeraut wird. Die Glanzbrandmasse enthält ein farbloses Puder und soll der Keramikoberfläche nur ein glänzendes Aussehen verleihen. Somit kann die Glasur die Belastung der Keramik im Mund des Patienten verringern [61,83,94].

Bei vielen Untersuchungen wird auf einen Glanzbrand verzichtet, da nach der Glasur die Oberfläche der Verblendkeramik nicht mehr planparallel ist [51].

2.8 Prüfverfahren

Werkstoffkundliche Prüfverfahren sind heutzutage in der Zahnheilkunde nicht mehr wegzudenken. Mit diesen Prüfverfahren wird die Brauchbarkeit und Verträglichkeit von dentalen Materialien festgestellt und getestet. Es ist wichtig, dass genormte Anforderungen an die Materialien gestellt werden und dass diese erfüllt werden. Ist das Verhalten eines Werkstoffes gegenüber angreifenden Kräften, Feuchtigkeit, Temperaturdifferenzen, Biokompatibilität, chemisch und elektrochemischen Einflüssen getestet, kann auf das Verhalten im klinischen Alltag geschlossen werden.

Zahnärztlichen Restaurationen sind im täglichen Gebrauch vielen verschiedenen mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt, da diese in das orofaziale System eingegliedert sind. Diese Beanspruchungen treten im Mund durch das Zusammenspiel der Muskulatur auf und äußern sich in vielen verschiedenen Bewegungen des Unterkiefers, wie beim Sprechen, Schlucken, Kauen, Parafunktionen und Leermastikation. Hierbei können 60-120 Kauzyklen pro Minute entstehen und mechanischen Wechselwirkungen und Belastungen auf die Restauration ausüben. *Schwickerath* gibt Kräfte im Seitenzahnggebiet von bis zu 392 N und im Frontzahnggebiet von 147 N an. Bei diesen Angaben wurden keine Parafunktionen wie Bruxismus beachtet. Dabei kann es zu einer erheblich größeren Kraftausübung von bis zu 880 N kommen. Deshalb fordert er in Bezug auf die möglichen Kaukräfte Biegefestigkeitswerte für Seitenzahnrestorationen von mindestens 600 N und Frontzahnrestorationen von mindestens 400 N. Dauerfestigkeitswerte für den Seitenzahnbereich gibt *Schwickerath* von mindestens 400 N an und *Körber und Ludwig* fordern 300 N [32,48,49,50,70,77].

2.8.1 Normative Anforderungen

Das Deutsche Institut für Normung e.V. (DIN) legt Normen und Standards für die Gesellschaft, Wirtschaft und den Staat fest, um mögliche Gesundheitsgefährdungen zu vermeiden und eine reproduzierbare Mindestqualität zu gewährleisten. Die DIN Normen können national, europäisch oder international sein. Welchen Einflussbereich die Normen haben legen die Abkürzungen DIN für national, EN für europäisch und ISO für internationale Normen fest [17].

In der deutschen ISO Norm 6872 aus dem Jahr 2015 werden Anforderungen und Prüfverfahren für Dentalkeramiken zur Anwendung bei vollkeramischen und metallkeramischen Zahnersatz beschrieben. Diese Norm gibt für Verblendkeramiken eine geforderte Biegefestigkeit von mindestens 50 MPa und für Gerüstkeramiken mindestens 100 MPa vor [17].

2.8.2 Biegefestigkeitsversuche

Die Biegefestigkeit eines keramischen Werkstoffes wird zumeist anhand von Biegeversuchen bestimmt. Hierbei wird eine Probe bis zum Versagen belastet.

Alle Biegeversuche haben insofern die gleichen Eigenschaften, als dass ein definierter Probekörper auf ein Widerlager gelegt wird und in der Mitte dieses Widerlagers eine Kraft F ausgeübt wird. Hierbei misst man die Durchbiegung y in Abhängigkeit von der einwirkenden Kraft F . Die Biegung des Werkstückes ist abhängig vom Abstand der Widerlager, der Höhe und der Breite des Probekörpers und vom E-Modul. Die Sprödigkeit einer Keramik zeigt eine geringe Zugfestigkeit und eine hohe Druckfestigkeit. Vorteile eines Biegetests liegen in der gleichzeitigen Ermittlung der Zug- und Druckspannung. An der Unterseite des Prüfkörpers kann man eine reine Zugspannung erzeugen, welche verantwortlich ist für die Rissentstehung. Der obere Teil der Probe erfährt eine Druckspannung und wird gestaucht. Dies geschieht dadurch, dass die Kraft F auf den Körper einwirkt und an den Widerlagern ein gleich großes, entgegengesetztes Drehmoment entsteht. An der Grenzfläche zwischen Druck- und Zugbereich entsteht eine neutrale Faser. Die Dehnung bzw. die Stauchung

in dem Probekörper wächst mit zunehmendem Abstand von der neutralen Faser. Von der unteren Seite, die unter Zugspannung steht, geht die Zerstörung der Probe aus, wenn die Zerreißfestigkeit erreicht ist. Durch die Zugspannung erfährt der Werkstoff Spannung und Dehnung, was sich in einem Spannungs-Dehnungsdiagramm festhalten lässt [30,31].

Die aufgebrachte Kraft zum Zeitpunkt des Bruches kann auf den Querschnitt der Probe umgerechnet werden. Somit erhält man die Biegefestigkeit. Hierbei spielen die Dicke und der Durchmesser der Proben eine große Rolle. Folglich variiert die Biegefestigkeit in Form, Groe, Oberfläche und Gefügestruktur in Abhängigkeit zum Prüfkörper.

Bei der Messung der Biegefestigkeit von Dentalkeramiken gibt es verschiedene Methoden. Es wird der 3-Punkt-, der 4-Punkt-Biegetest und der biaxialen Test unterschieden.

2.8.3 3-Punkt-Biegeversuch

Bei dem 3-Punkt-Biegeversuch werden die rechteckigen Proben auf zwei Auflagerollen (Wiederlager) gelegt und eine Belastungsrolle übt Druck auf den Prüfkörper aus. Diese beiden Widerlager sind parallel zueinander angeordnet und frei drehbar um ihre Längsachse. Der Vorteil dieses Versuches ist, dass dieser einfach durchzuführen ist. Es ist von Nachteil, dass direkt unterhalb der Belastungsrolle in der Zugzone es zu einer Ausbildung von Rissen kommt und somit die Streuung der Messwerte groer werden kann [26,29].

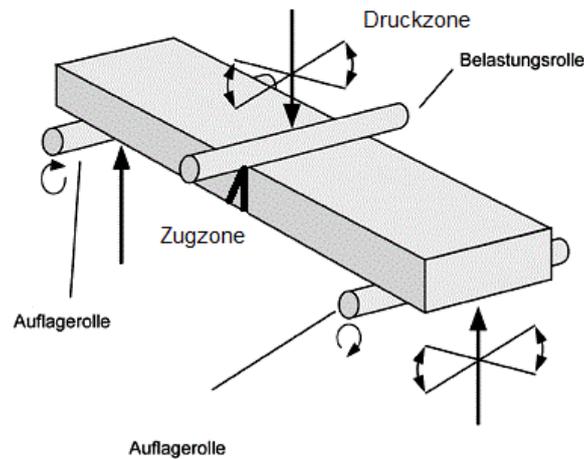


Abbildung 4: Versuchsaufbau 3-Punkt-Biegetest (modifiziert nach [8])

2.8.4 4-Punkt-Biegeversuch

Der 4-Punkt-Biegeversuch ist in Abbildung 5 dargestellt. Der Unterschied zum 3-Punkt-Versuch besteht darin, dass zwei Belastungsrollen Kraft auf den Prüfkörper ausüben. Somit wird die Fläche der Zugzone vergrößert. Auch die Streuung der Messwerte, die bei dem 3-Punkt-Test als nachteilig betrachtet wird, wird hier vermieden. Allerdings werden beim 4-Punkt-Versuch ebenfalls rechteckige Proben verwendet bei denen Kantendefekte die Messergebnisse beeinflussen können [26].

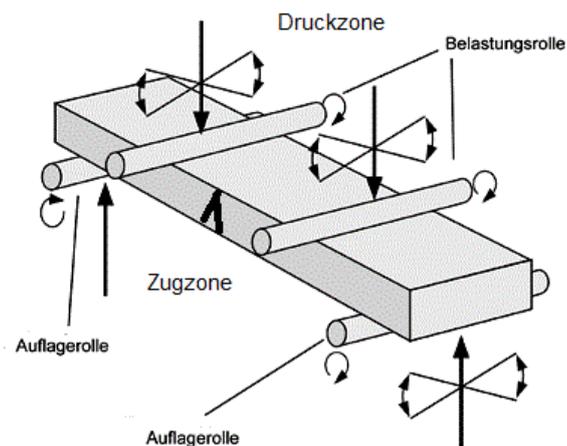


Abbildung 5: Versuchsaufbau 4-Punkt-Biegetest (modifiziert nach[8])

2.8.5 Biaxialer Biegeversuch

Biaxiale Biegeversuche haben den Vorteil, dass sie vom Zustand der Probekante unabhängige Ergebnisse liefern, weil die Probekörper rund und scheibenförmig sind und sich somit Kantenbrüche vermeiden lassen. Nach ISO 6872 werden die Proben auf drei Kugeln gelagert. Diese Kugeln sind kreisförmig auf einem Radius von 5 mm und konzentrisch in einem Winkel von 120° angeordnet. Im Zentrum des Prüfkörpers wird eine Kraft durch einen zylinderförmigen Stempel ausgelöst. Direkt unter diesem Stempel entsteht die Spannungsspitze und nicht an den Kanten. In der ISO 6872 Norm sind die Parameter zur Bestimmung der biaxialen Biegefestigkeit dokumentiert [26,27,30].

In der nachfolgenden Abbildung 6 ist schematisch der Versuchsaufbau dargestellt.

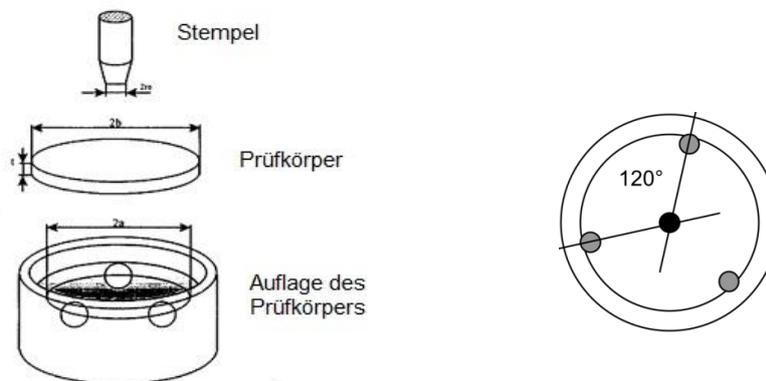


Abbildung 6: Versuchsaufbau biaxialer Biegeversuch (modifiziert nach [21])

2.8.6 Dauerfestigkeitstest

Die Dauerfestigkeit ist die Belastungsgrenze, welche ein dynamisch belasteter Werkstoff ohne bemerkenswerte Ermüdungserscheinungen ertragen kann. Ist der Spannungswert der Dauerfestigkeit überschritten, kommt es zu einem Bruch. Somit ist es wichtig, auch die Dauerfestigkeit einer Dentalkeramik zu untersuchen, um ein praktisch vollständiges Bild von deren Verhalten in der Mundhöhle zu bekommen.

Eine Restauration in der Mundhöhle ist dynamischen, sich ständig wiederholenden Wechsellasten durch Kontakte zwischen Ober- und Unterkiefer ausgesetzt. Dies ist eine Dauerschwellenbeanspruchung. Durch die Summation der Wechselbelastung kommt es zur Ermüdung des Materials im atomaren Bereich und letztendlich zum Bruch des Werkstoffs. Dies ist ein sogenannter Ermüdungsbruch. Hierbei spielt weniger die Lastwechselzahl eine Rolle, sondern die Amplitude der Wechselbelastung. Das heißt, wenn mehrere Belastungen oberhalb der Dauerfestigkeit auftreten, kommt es zu deutlichen Ermüdungserscheinungen des Werkstoffes und es wird nur eine bestimmte Anzahl von Lastwechseln bis zum Bruch ertragen [52,76].

Die Dauerfestigkeit sollte der halben statischen Festigkeit entsprechen und ist umso höher, je höher die Bruchzähigkeit eines Materials ist [58].

Anhand statischer und dynamischer Ermüdungstests kann die Dauerfestigkeit getestet werden. Die Festigkeitsprüfung kann statisch erfolgen, d.h. die einwirkende Kraft ist konstant und kann nach einem vorgeschriebenen Zeitraum bis zum Bruch erhöht werden. Die Belastung kann auch dynamisch durchgeführt werden; d.h., diese wechselt zum Beispiel sinusförmig zwischen Kraftmaxima und -minima bei einer bestimmten Frequenz. Diese dynamische Belastung ähnelt der Kaubewegung in der Mundhöhle. In beiden Ermüdungstests wird die Abnahme der Festigkeit unter konstanter Lasteinwirkung bzw. Frequenz bei einer zunehmenden Zeit bis zum Eintritt des Versagens getestet. Bei Eintritt des Bruchs werden die bruchauslösende Kraft und die Lastwechselzahl automatisiert aufgezeichnet. Die statischen und dynamischen Stufentests/Ermüdungstests sind nicht zu verwechseln mit den zyklischen Ermüdungsversuchen [26,33].

3 Ziele der Studie

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war, die Biegefestigkeit und das Ermüdungsverhalten der Universalverblendkeramik Triceram® unter dem Einfluss verschiedener Oberflächenbearbeitungen zu untersuchen und zu vergleichen. Die Herstellung der Proben und der Versuchsaufbau richtete sich nach ISO Norm 6872.

Da die Dentalkeramik in der Praxis mechanischen und chemischen Belastungen in der Mundhöhle ausgesetzt ist, ist es wichtig deren Belastungsgrenzen zu kennen und diese möglicherweise zu verbessern, um dem Patienten eine optimale, langlebige Versorgung zu gewährleisten. Anhand Hypothese 1 dieser Arbeit sollte gezeigt werden, dass die Biegefestigkeit der Keramik Triceram® die geforderten Festigkeitswerte der ISO Norm 6872 erfüllt.

Auch während des Herstellungsprozesses unterliegt die Keramik durch die Schritte der Oberflächenbearbeitung einer gewissen Beanspruchung. Diese Bearbeitungsschritte sind vor allem bei der Fertigstellung einer Keramikrestauration unumgänglich. Als Beispiel zu nennen ist das Beschleifen des Werkstoffes durch den Zahnarzt in der Praxis, um eine gleichmäßige Okklusion im Mund des Patienten herzustellen. Deshalb wurden die einzelnen Bearbeitungsschritte, wie Beschleifen, Polieren und Glanzbrand ausgewählt und möglichst praxisnah nachgeahmt, um herauszufinden durch welchen Schritt die Biegefestigkeit von Triceram® gesteigert bzw. herabgesetzt werden kann. Somit können anhand dieser Untersuchung Empfehlungen über die Oberflächenbearbeitung der Keramik Triceram® für den Praxisalltag ausgesprochen werden. Hypothese 2 ist, dass die Biegefestigkeit durch das Beschleifen der Keramik herabgesetzt wird und durch Glanzbrand und Polieren wieder gesteigert werden kann. Hypothese 3 sollte beweisen, dass durch den Glanzbrand die Festigkeit mehr steigt, als durch das Polieren der Keramik, da hierdurch eine weitere Schicht auf die Keramik aufgetragen wird.

Da Triceram® zur Verblendung von Titan- und Zirkoniumdioxidgerüsten verwendet werden kann, sollte der Titanbrand- mit dem Zirkoniumdioxidbrand gegenüber gestellt werden. Und anhand Hypothese 4 gezeigt werden, dass die Biegefestigkeitswerte der beiden Brände sich nicht unterscheiden.

Mittels der Messung der Oberflächenrauigkeit anhand des Perthometers S6P wurden die Unterschiede der Rautiefen der verschiedenen Oberflächenzustände untersucht. Anhand Hypothese 5 sollte bewiesen werden, dass der beschliffene Zustand eine größere Rauheit aufweist, als der Zustand des Polierens und des Glanzbrandes. Ebenfalls sollte die Abhängigkeit der Biegefestigkeit in Bezug auf die Rauigkeitstiefe in Betracht gezogen werden. Hieraus erschloss sich Hypothese 6, dass je größer die Rauigkeit ist, desto geringe ist die Biegefestigkeit der Dentalkeramik.

Die Materialstruktur der Oberfläche von Triceram® wurde durch das Rasterelektronenmikroskop Zeiss LEO 1430 bildlich dargestellt. Die verschiedenen Strukturen der einzelnen Oberflächenzustände wurden miteinander verglichen. Hierbei sollte durch Hypothese 7 gezeigt werden, dass die Oberfläche des Zustandes Beschliffen sehr viel inhomogener abgebildet wird, als die der polierten Proben.

4 Material und Methodik

4.1 Überblick

Insgesamt wurden 400 Prüfkörper aus der Verblendkeramik Triceram® mit dem Pelletor System® nach der DIN EN ISO 6872 Norm hergestellt. Die 400 Prüfkörper wurden im Brennofen für Dentalkeramiken Austromat 654 pres-i-dent der Firma DEKEMA Dental-Keramiköfen GmbH (Freilassing, Deutschland) mit zwei verschiedenen Brennprogrammen hergestellt. Die erste Hälfte der 400 Prüfkörper wurde mit einem Programm für ein Titangerüst gebrannt, die zweite Hälfte mit einem für ein Zirkoniumdioxidgerüst.

Alle Prüfkörper wurden aus dem Dentinpulver (Farbe A3) Triceram® der Firma Dentaurum GmbH & Co. KG (Ispringen, Deutschland) erzeugt.

4.1.1 Prüfkörpergruppen

Um die verschiedenen Herstellungs- und Bearbeitungsschritte einer Verblendkeramik in der alltäglichen Praxis möglichst praxisnah zu testen und zu vergleichen, wurden die Oberflächen der Prüfkörper bearbeitet. Hierbei wurde der einzelne Bearbeitungsschritt einer Verblendkeramik, wie Beschleifen und polieren/Glanzbrand nachgeahmt. Auch die arbeitsalltäglichen Instrumente, wie Winkelstück, Diamantschleifkörper und Polierer fanden Anwendung.

Die gebrannten Prüfkörper wurden in die vier nachfolgend beschriebenen Untergruppen gegliedert, die sich durch unterschiedliche Oberflächenzustände auszeichneten. Je Gruppe wurden 100 Prüfkörper verwendet.

4.1.1.1 Gruppe 1: As-fired

Die Oberflächen der Prüfkörper der Gruppe „as-fired“ (1) wurden nach dem Brand nicht mehr bearbeitet und waren somit as-fired. Diese stellten die Referenzgruppe dar.

4.1.1.2 Gruppe 2: Beschliffen

Gruppe „beschliffen“ (2) wurde mit Hilfe eines diamantierten Schleifkörpers, welcher in ein Rot-Ring Winkelstück eingespannt war, normiert beschliffen. Dies sollte in der alltäglichen Praxis dem Einschleifen der Okklusion einer mit

Keramik verblendeten Restauration entsprechen und diese Situation simulieren. Allerdings stellte dies nicht den letzten Bearbeitungsschritt einer Restauration in der Praxis vor dem Eingliedern dar. Um die Biegefestigkeit dieses Zustandes mit der Endsituation (Glanzbrand) einer Restauration vergleichen zu können, wurde auf die Weiterbearbeitung bei Gruppe 2 verzichtet.

4.1.1.3 Gruppe 3: Glanzbrand

Die Prüfkörper der Gruppe „Glanzbrand“ (3) wurden gemäß Gruppe 2 beschliffen und zusätzlich im Brennofen der Firma DEKEMA Keramiköfen GmbH (Freilassing, Germany) mit einem Glanzbrand versehen. Dies entsprach dem letzten Schritt nach dem Einschleifen einer mit Keramik verblendeten Restauration im Praxisalltag vor dem definitiven Einsetzen.

4.1.1.4 Gruppe 4: Poliert

Gruppe „Poliert“ (4) wurde gemäß Gruppe 2 und 3 beschliffen und mit in einem Grün-Ring Winkelstück eingespannten Diamantpolierer poliert. Der Verzicht auf einen Glanzbrand bei dieser Gruppe, sollte den Unterschied in der Biegefestigkeit zu den polierten und mit Glanzbrand versehenen Verblendkeramiken testen.

4.1.2 Einteilung der Prüfkörper

Die 400 Proben wurden den 3 Testverfahren zugeteilt.

Der biaxiale Biegetest gemäß ISO 6872 Norm wurde mit insgesamt 240 Prüfkörpern durchgeführt. Diese wurden in Gruppe A (120 Proben), welche mit dem Titan Programm gebrannt wurden, und in Gruppe B (120 Proben), die mit dem Zirkoniumdioxid Programm hergestellt wurden, unterteilt. Gruppe A und Gruppe B gliederten sich jeweils in die vier Untergruppen mit je 30 Proben. Diese vier Untergruppen unterschieden sich, wie zuvor dargestellt, durch ihre Oberflächenbearbeitungen.

Um die Dauerfestigkeit der Verblendkeramik zu testen, wurde die statische und dynamische Biegefestigkeit mittels Stufentests geprüft. Der statische Stufentest wurde in eine Gruppe C (40 Proben), die mit dem Titan Programm hergestellt wurden und in eine Gruppe D (40 Proben), welche mit dem Zirkoniumdioxid

Brennprogramm gebrannt wurden, unterteilt. Die jeweils 40 Körper wurden ebenfalls in die vier Untergruppen mit je 10 Prüfkörpern gegliedert, welche sich durch die vier verschiedenen Oberflächenbearbeitungen unterschieden.

Der dynamische Stufentest wurde wie der statische Stufentest in eine Gruppe E (40 Proben, Titangerüstbrand) und eine Gruppe F (40 Proben, Zirkonoxidgerüstbrand) eingeteilt. Die Gruppen E und F gliederten sich, wie bei den anderen zwei Testverfahren, in die vier Untergruppen.

In dem folgenden Organigramm (Abbildung 1) ist die genaue Einteilung der Prüfkörper dargestellt.



Abbildung 7: Einteilung der Prüfkörper

4.2 Herstellung der Prüfkörper

Die Prüfkörper bestanden aus der Dentinmasse der Verblendkeramik Triceram® und wurden nach der deutschen DIN EN ISO 6872 Norm angefertigt. Die Norm fordert mindestens zehn Proben einer Prüfgruppe, mit einem Durchmesser von 12 bis 16 mm und einer Dicke von $1,2 \pm 0,2$ mm. Durch die Herstellung mit dem Pelletor-System® nach Zahntechnikermeister *Gerald Wölz* (Tübingen, Deutschland) wurden diese Anforderungen der Norm gewährleistet. Die einheitliche Größe der Prüfkörper war entscheidend, um die getesteten Eigenschaften miteinander zu vergleichen. Bei der Herstellung der Prüfkörper musste darauf geachtet werden, dass alle benutzten Materialien, welche zur Probeherstellung verwendet wurden, sauber waren und beim Anmischen keine Luftblasen eingearbeitet wurden, da diese das Testergebnis verfälschen konnten. Ebenfalls forderte die Norm, dass die Proben in einem Ofen gesintert wurden. Dabei wurde darauf geachtet, dass sie auf einer Oberfläche gebrannt wurden, an der sie nicht verunreinigt wurden. Die verschiedenen Herstellungsschritte sollten der alltäglichen Praxis entsprechen.

4.2.1 Das Pelletor-System®

Das Pelletor-System® nach Zahntechnikermeister *Gerald Wölz* (Tübingen, Deutschland) wurde entwickelt, um genormte zylinderförmige Körper aus einer Dentalkeramik herzustellen. Diese können für Prüfverfahren nach ISO Normen und zum Qualitätsmanagement verwendet werden.

Die nachfolgende Abbildung 2 stellt das beschriebene Pelletor-System® dar. Das System bestand aus einem Aluminiumgehäuse mit einem Schlagbolzen. Der Schlagbolzen diente der Verdichtung des Grünlings. In das Aluminiumgehäuse konnte eine Edelstahlkartusche eingeführt werden. Diese bestand aus einem Hohlraum, welcher mit Kunststoff ausgekleidet war. In diesen Hohlraum konnte ein Kolben eingesetzt werden. Der so entstandene Raum stellte die definitive Form des Prüfkörpers dar. Eine Nut an der Oberseite der Kartusche, diente als Einlagestelle für Filtervliespapier. Mittels Schwenkriegel konnte die Edelstahlkartusche verschlossen werden. Um eine

festen Position der Edelstahlkartusche mit eingeführtem Kolben zu gewährleisten, wurde diese mit Hilfe eines Kartuschenständers positioniert. Zur Entnahme der fertig gestellten Grünlinge, wurde die Kartusche geöffnet, der Kolben nach oben, aus der Hohlform heraus gedrückt und mittels eines Schiebers auf einer gewünschten Unterlage positioniert. Für die reproduzierbare Führung des Schiebers, passte dieser exakt in die Nut der Kartusche.

Ein Keramikportionierer diente dazu, das Keramikpulver in genormte Mengen einzuteilen. Dieser Portionierer bestand aus einem Stempel, welcher sich in einer Hülse befand. An der Hülse war eine gefräste Führung für einen Stift, mit welchem man die Stellung des Stempels bestimmen konnte. Je nachdem wie der Stift positioniert wurde, bildete sich ein Hohlraum am Ende des Portionierers, in dem das Pulver gefasst wurde. Zur Abgabe des Pulvers musste die Position des Stiftes verändert werden.

Zum Anrühren der Keramikmasse waren ein roter Anrührspatel, ein Plastikspatel, zwei Pinsel und ein Porzellanschälchen dem System beigelegt.



Abbildung 8: Das Pelletor-System ®

4.2.2 Durchführung der Prüfkörperherstellung

Zur Prüfkörperherstellung wurde ausschließlich das oben beschriebene (Kapitel 4.2.1) Pelletor System® genutzt.

Den ersten Schritt bei der Keramikgrünlingherstellung, stellte die Isolierung des Kolbens und des Hohlraums der Edelstahlkartusche dar. Hierfür wurde die Keramikisolierflüssigkeit Carat (Firma Hager&Werken GmbH & Co. KG, Duisburg, Deutschland) verwendet. Am Deckel der Flasche mit der Flüssigkeit, war ein Pinsel angebracht. Hiermit wurden zwei Tropfen des Isoliermittels auf den Kolben abgegeben. Ein Tropfen wurde auf die Oberseite und einer auf die Seitenfläche gesetzt. Die übrige Flüssigkeit am Pinsel wurde zur Isolierung des Hohlraums der Kartusche verwendet. Anschließend wurde der isolierte Kolben in die Edelstahlkartusche eingeführt und das System im Kartuschenständer positioniert. Hierbei wurde auf die richtige Position des Kolbens geachtet, um eine Formreduktion des Grünlings zu vermeiden.

Zum Anmischen der Keramik wurde der Keramikportionierer sieben bis acht Mal in das Dentin Triceram® Pulver gedrückt und am Dosenrand abgestrichen, um eine homogene Oberfläche und eine einheitliche Portion zu gewährleisten. Falls dies nicht der Fall war, wurde der Portionierer erneut in das Pulver gedrückt. Der Portionierer fasste 0,2 g Pulver und verlieh der Keramikmasse eine zylinderförmige Form. Die aufgenommene Pulvermenge wurde in das Porzellanschälchen abgeben. Dieser Vorgang wurde zweimal wiederholt, sodass 0,4 g Pulver im Porzellanschälchen waren. Mit Hilfe der spitzen Arbeitsseite des roten Spatels wurde die zylinderförmige Form des Pulvers aufgehoben und homogen im Schälchen verteilt. Hierdurch wurde das Keramikpulver für die Aufnahme der Anmischflüssigkeit (Stains Universal Modellierflüssigkeit, Dentaurum GmbH & Co. KG, Ispringen) vorbereitet.

In der folgenden Abbildung 9 ist dieser Schritt dargestellt.



isolierte Edelstahlkartusche

Porzellanschälchen mit Keramikpulver

Abbildung 9: Keramikpulver portioniert

Anschließend wurden sieben bis acht Tropfen der Modellierflüssigkeit dem Keramikpulver Triceram® hinzugegeben und mit einem Plastikspatel homogen verrührt (siehe Abbildung 10).



angerührte Keramikmasse

Abbildung 10: Keramikmasse angerührt

Die Keramikmasse wurde dann mit einem Pinsel in den Hohlraum der Edelstahlkartusche gefüllt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Masse gleichmäßig, glatt, ohne Bläschen und Überschüsse verteilt war. Um die Masse homogen zu portionieren, wurde diese mit der spitzen Seite des roten Anrührspatels glatt gestrichen.



Abbildung 11: Keramikmasse in Kartusche

Zwei übereinander liegende Vliespapierchen wurden in der Nut der Kartusche platziert. Diese hatten die Funktion, während des Verdichtens des Gründlings im Aluminiumgehäuse, die entstandene überflüssige Anmischflüssigkeit, aufzusaugen (siehe Abbildung 12).



Abbildung 12: positionierte Vliespapierchen

Im nächsten Schritt wurde die Edelstahlkartusche mit dem Schwenkdeckel verschlossen, um 180° gedreht und in das Aluminiumgehäuse eingebracht. Zum Verdichten der Masse wurde der Schlagbolzen manuell aus seiner arretierten Position gebracht und zehn bis zwölf Mal auf gerader Linie fallen gelassen, bis ein dumpfes Geräusch hörbar war (siehe Abbildung 13).



Abbildung 13: Kartusche im Aluminiumgehäuse

Danach wurde die Kartusche aus dem Gehäuse genommen, geöffnet und im Kartuschenständer positioniert. Das Vliespapier hatte während des Verdichtungs Vorganges die Anmischflüssigkeit aufgenommen (siehe Abbildung

14). Das Vlies wurde vorsichtig mit dem roten Spatel von dem verdichteten Grünling abgehoben und entsorgt. Hierbei bestand die Gefahr, dass durch den Verdichtungsprozess sich Keramikmasse an dem Papierchen festsetzte und durch das Abheben die Oberfläche des Grünlings nicht mehr homogen war und ein Teil fehlte. War der Grünling dadurch unvollständig, wurde dieser verworfen.



Abbildung 14: Kartusche mit Vliespapierchen nach Verdichtung



Abbildung 15: fertiger Grünling in Kartusche ohne Vliespapierchen

Der Kolben wurde manuell soweit nach oben gedrückt (siehe Abbildung 16) bis dieser eine Ebene mit der Kartusche bildete, um den Grünling mit Hilfe des Schiebers vorsichtig auf ein Papiertuch zu platzieren können. Hierbei wurde der

Schieber innerhalb der vorgegebenen Nut auf der Kartusche bewegt und darauf geachtet, dass sich der instabile Keramikgrünling nicht deformierte.



Abbildung 16: Fertiger Grünling auf dem Stempel des Pelletor-Systems®



Abbildung 17: Fertiggestellter Grünling auf einem Papiertuch

Nach jedem Vorgang wurden die zum Anrühren der Keramikmasse verwendeten Instrumente (roter Spatel, Plastikspatel und Pinsel) mit destilliertem Wasser gereinigt und mit Papiertüchern getrocknet. Das Porzellanschälchen, der Portionierer und die Edelstahlkartusche mit Kolben wurden unter fließendem Wasser und ebenfalls mit Papiertüchern gesäubert. Auf Entfernung aller Pulverrückstände wurde penibel geachtet.

Nachdem vier Keramikrohlinge fertiggestellt waren, wurden diese mit dem roten Spatel auf den Brennträger gesetzt. Dieser war mit vier Platinfolien bestückt, welche mit Aluminiumoxid-Pulver zur Isolierung bestrichen waren. Es wurde darauf geachtet, dass die Ober- und Unterseite des Prüfkörpers nicht verwechselt und die Reihenfolge beachtet wurde (siehe Abbildung 18).

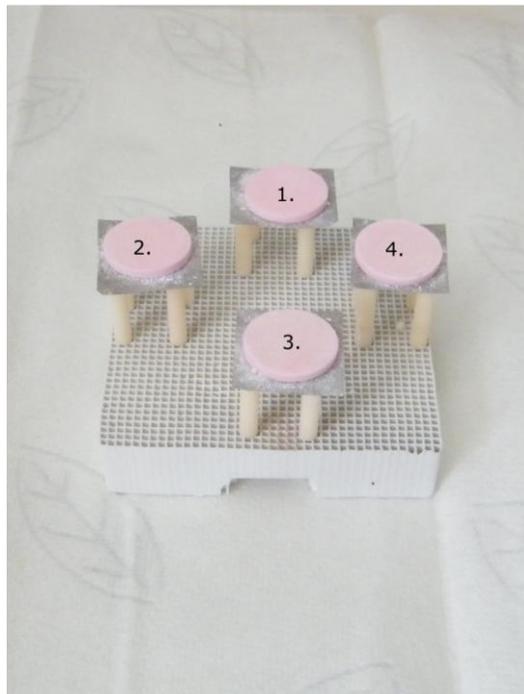


Abbildung 18: Brenngutträger mit Reihenfolge der Grünlinge

Anschließend wurde der bestückte Brenngutträger in den Brennofen Austromat 654 press-i-dent der Firma DEKEMA Dental-Keramiköfen GmbH (Freilassing, Deutschland) gestellt.

4.2.3 Der Brennofen DEKEMA Austromat 654 press-i-dent

Der Brennofen Austromat 654 press-i-dent der Firma DEKEMA Dental-Keramiköfen GmbH (Freilassing, Deutschland) ist ein Kombinationsofen zum Brennen und Pressen von Dentalkeramiken unter Vakuum.

Die Herstellung der Prüfkörper mittels Pelletor-System® war für alle 400 Stück identisch. Für den Brand wurden die Keramikrohlinge wie oben beschrieben

aufgeteilt. Die eine Hälfte (200 Stück) wurden mit einem Dentinbrand für eine Restauration mit Titangerüst gebrannt. Und die andere Hälfte (200 Stück) ebenfalls mit einem Dentinbrand, allerdings für eine vollkeramische Restauration mit Zirkoniumdioxidgerüst. Beide Sinterprogramme waren vom Hersteller der Verblendkeramik Triceram® vorgegeben und für das verwendete Dentin Keramikpulver der Rohlinge bestimmt. Die Brennprogramme wurden auf dem Brennofen Austromat 654 press-i-dent installiert. Das jeweilige Programm für Titan- oder Zirkoniumdioxidgerüst „Dentinbrand 1“ wurde für jeden Brand manuell am Brennofen gewählt. Das Sinterprogramm „Dentinbrand 1“ für die Dentinverblendung eines Titangerüsts hatte eine Vorwärmtemperatur von 500°C, ein Temperaturanstieg von 55°C/min bis auf 755°C Sintertemperatur unter 100% Vakuum (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Sinterprogramm Dentinbrand 1 für Titan

Dentinbrand 1 für Titangerüst	Basistemperatur	500°C
	Trockenzeit	6 min
	Haltezeit bei Basistemperatur	0 min
	Temperaturanstieg	55°C/min
	Vakuum Beginn	500°C
	Vakuum Ende	755°C
	Endtemperatur	755°C
	Haltezeit	1 min unter Vakuum
	Abkühlzeit	0 min

Das Brennprogramm für eine vollkeramische Restauration (Zirkoniumdioxidgerüst) hatte eine Vorwärmtemperatur von 500°C, einen Temperaturanstieg von 55°C/min bis zu einer Sintertemperatur von 760°C unter 100% Vakuum (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Sinterprogramm Dentinbrand 1 für Zirkoniumdioxid

Dentinbrand 1 für Zirkoniumdioxid- gerüst	Basistemperatur	500°C
	Trockenzeit	6 min
	Haltezeit bis Basistemperatur	0 min
	Temperaturanstieg	55°C/min
	Vakuum Beginn	500°C
	Vakuum Ende	760°C
	Endtemperatur	760°C
	Haltezeit	1,5 - 2 min
	Abkühlzeit	0 min

Vor Gebrauch wurde der Ofen eine halbe Stunde vorgeheizt. Sobald vier Keramikrohlinge fertiggestellt waren, wurden diese auf einen weißen Wabenbrenngutträger der Firma Megadental GmbH (Büdingen, Deutschland) positioniert. Der Brennträger bestand aus 16 Keramikbrennstiften der Firma Renfert GmbH (Hilzingen, Deutschland). Die Brennstifte waren randständig auf dem Brenngutträger, in gleichmäßigem Abstand voneinander positioniert. Jeweils 4 Brennstäbe haben eine quadratische Zinnfolie mit einem Prüfkörper getragen. Die Zinnfolie wurde für jeden Prüfkörper erneut mit etwas Aluminiumoxidpulver beschickt, als Isoliermittel. Für alle Prüfkörper wurden die gleichen Zinnfolien verwendet. (Siehe Abbildung 19).



Abbildung 19: Brenngutträger mit fertiggestellten Keramicrohlingen

Der bestückte Brenngutträger wurde mittels einer Zange in den Brennofen gestellt und das jeweils entsprechende Programm manuell ausgewählt.

Um Energie zu sparen, wurde während der Grünlingsherstellung der Ofen geschlossen. Der Brenngutträger wurde mit den fertig gebrannten Proben während des Abkühlens auf ein Wattepolster auf den Ofen gestellt. (Siehe Abbildung 20).



Abbildung 20: Brennofen ist geschlossen, Brenngutträger auf Watte platziert



Abbildung 21: Brennofen offen

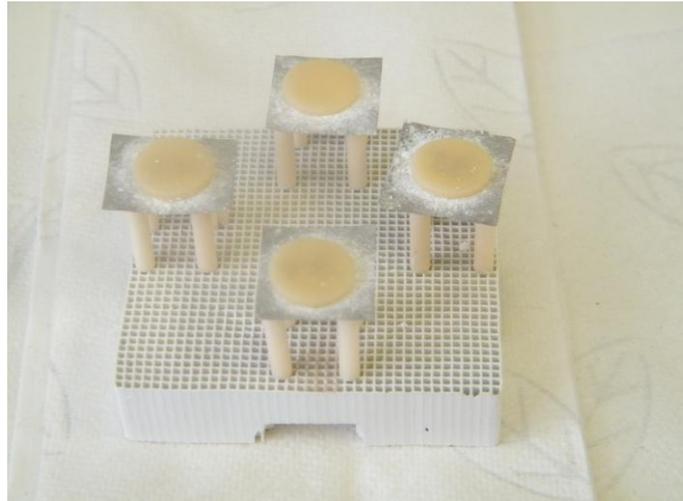


Abbildung 22: Prüfkörper nach dem Brand auf einem Papiertuch

Nach dem Abkühlen, wurden die Prüfkörper der Reihenfolge nach der jeweiligen Gruppe zugeordnet und an der Oberseite entsprechend beschriftet. Der abgekühlte Brenngutträger wurde erneut mit vier Grünlingen bestückt und in dem Ofen platziert.

4.3 Oberflächenbearbeitung

Nach der Prüfkörperherstellung wurden die 400 Proben den drei Testverfahren zugeteilt und je nach zugeteilter Untergruppe die Oberfläche der Proben bearbeitet (siehe Kap. 4.1.1). Nachfolgend werden die einzelnen Schritte der Oberflächenbearbeitung geschildert.

4.3.1 Oberflächenzustand „as-fired“

Die Oberflächen der Gruppe „as-fired“ (1) wurden nach der Herstellung im Brennofen nicht weiter bearbeitet. Diese Gruppe stellte die Referenzgruppe dar.

4.3.2 Das Beschleifen der Prüfkörper

4.3.2.1 Aufbau des Schleif- und Poliergerätes

Das Schleif- und Poliergerät wurde von der Sektion „Medizinische Werkstoffkunde und Technologie“ für das standardisierte Beschleifen und Polieren von Prüfkörpern entwickelt. Es bestand aus einem Rot-Ring Handstück

der Firma KaVo (INTRA Compact 25 LHC, KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, Deutschland). Das Handstück wurde an einem Halter aus Metall befestigt. Dieser Halter wurde an einem Kugelgelenk angebracht, welches sich in einem Aktionsradius, in Form einer Halbkugel bewegte und in einer gewünschten Position fixiert werden konnte. Mittels Kurbel 4 wurde der Halter mit dem Kugelgelenk auf einer Schiene in Richtung Z-Achse bewegt. In Richtung Y-Achse mit Kurbel 3. In einem Metallhalter wurde ein Acrylblock mit Schrauben fixiert. An diesem Acrylblock wurden die einzelnen Proben mittels Aluwachs befestigt. Der Metallhalter wurde auf einer Schiene in Richtung X-Achse durch Kurbel 1 bewegt. In Richtung Y-Achse mittels Kurbel 2. An allen vier Kurbeln war eine Skalierung in der Einheit mm eingezeichnet. Somit wurde eine fixierte und reproduzierbare Ausrichtung des Winkelstücks zur Probe erzielt. Die Apparatur des Winkelstücks konnte manuell auf den zwei Schienen in Richtung X-Achse bewegt werden. Um eine gleichmäßige Schleifoberfläche und Schleifbewegung zu gewährleisten, befand sich in Richtung X-Achse ein Widerlager, in Form eines 500 g Gewichts.

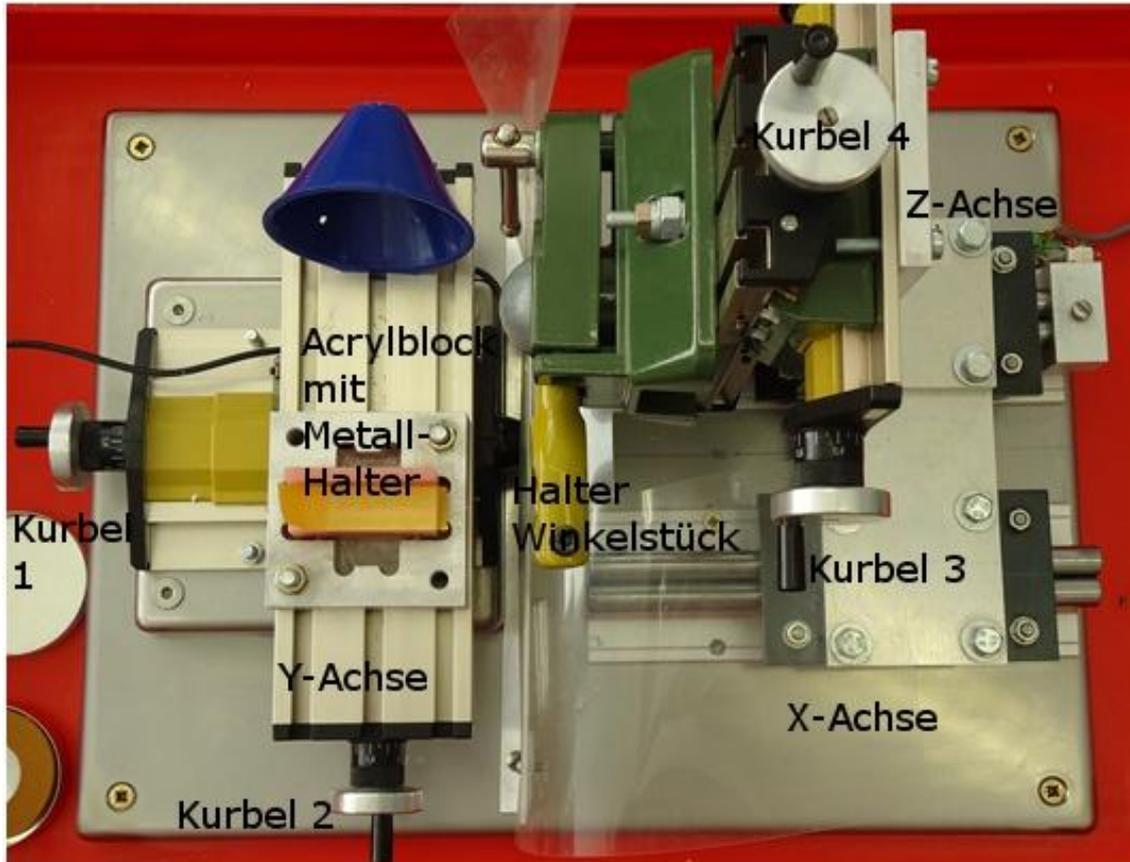


Abbildung 23: Aufbau des Schleif- und Poliergerätes (modifiziert nach [2])

4.3.2.2 Der Beschleifvorgang

Gruppe 2, 3 und 4 wurden in der Schleif- und Poliermaschine mit einem Rot-Ring Diamanten (ISO 806 314 143514 014, REF 88822 3140 14, LOT 06 56 28, Komet® Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland), beschliffen. Die Form des Diamanten war ein Rundkopfzylinder und die Korngröße betrug $30\ \mu\text{m}$. Die Länge des Schleifkörpers von 12 mm, war identisch mit dem Durchmesser des Probekörpers. Dies war entscheidend für einen gleichmäßigen Abtrag und Anpressdruck während des Schleifvorganges. Die Proben wurden zuerst mit einem Filzstift an der Oberseite geschwärzt. Wobei die Nummerierung nun an der Unterseite erfolgte. Mit der Unterseite wurden die Proben in die dafür eingeschliffene Einkerbung des Acrylblocks mit Aluwachs

befestigt. Das Winkelstück wurde im 90° Winkel zum Prüfkörper, in einer parallelen Fahrriichtung ausgerichtet. (Siehe Abbildung 24 und Abbildung 25).

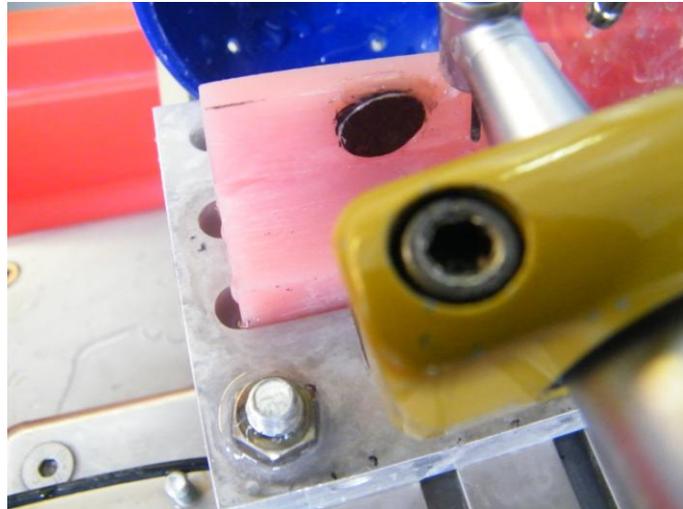


Abbildung 24: Geschwärtzter Prüfkörper an Acrylblock befestigt

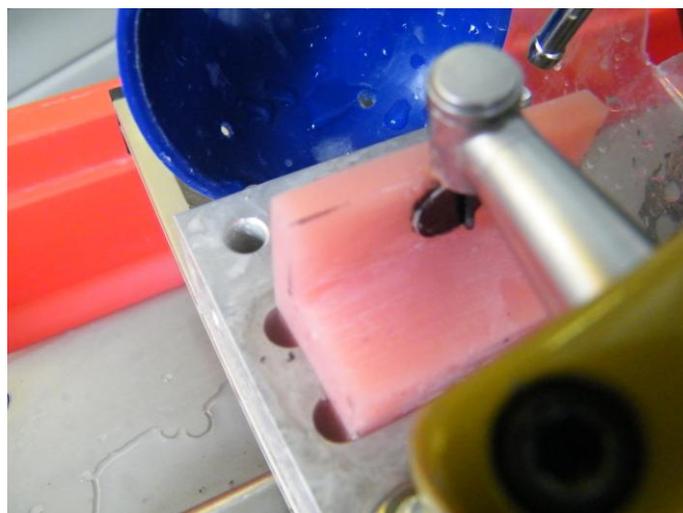


Abbildung 25: Prüfkörper an Acrylblock mit fixiertem Winkelstück [2]

Die Umdrehungszahl des Winkelstücks betrug 20.000 U/min, die vorgeschriebene optimale Umdrehungszahl des Herstellers. Die Apparatur des Winkelstückes wurde auf der Schiene der X-Achse, 15 bis 20 Mal gleichmäßig manuell hin und her bewegt. Um die Abnutzung des Diamanten zu beachten und für alle Prüfkörper einen gleichmäßigen Abtrag zu gewährleisten, wurde dieser nach fünf Proben durch einen Neuen ersetzt.



Abbildung 26: Prüfkörper während des Schleifvorgangs

4.3.3 Oberflächenzustand „Glanzbrand“

Gruppe 4 wurde beschliffen und mit einem Glanzbrand versehen. Für den Glanzbrand wurde die Flüssigkeit Stains Universal (LOT 1109034A, REF 299-110-40, 20 ml) und das dazugehörige Pulver Stains Universal neutral (LOT 1009065D, REF 296-199-19, 3 g) der Firma Dentauro (Ispringen, Deutschland) verwendet. Flüssigkeit und Pulver gehörten zu der Produktreihe der Verblendkeramik Triceram® und waren somit darauf abgestimmt. Mit der Flüssigkeit Stains Universal werden im Praxisalltag farbliche Modifikationen der Keramik vorgenommen.



Abbildung 27: Stains Universal Pulver Dose mit angerührter Masse auf einer Glasplatte

Zur Durchführung des Glanzbrandes wurden 3 Tropfen der Flüssigkeit Stains Universal auf eine saubere Glasplatte gegeben. Mit einem Spatel wurde das Pulver Stains Universal neutral dazu gegeben, bis die Masse milchig wurde und keine Pulverspuren und -schlieren zu erkennen waren. Mit einem Pinsel wurde die angerührte Masse aufgenommen und auf der beschrifteten Oberseite des Prüfkörpers verteilt. Spatel und Pinsel wurden mit destilliertem Wasser nach jedem Gebrauch gesäubert.

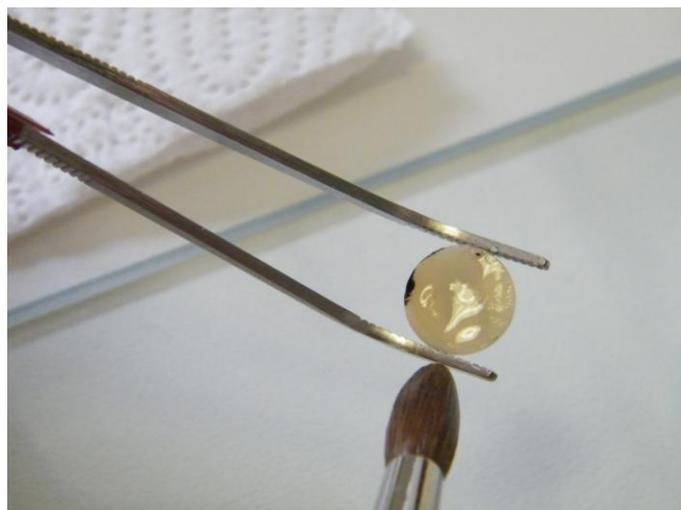


Abbildung 28: Aufgetragene Glanzbrandmasse auf einer Probe

Um die Masse gleichmäßig zu verteilen, wurde der Prüfkörper mit einer Pinzette gefasst und mit dem geriffelten Griff einer anderen Pinzette daran gerieben. Somit erzielte man einen vibrierenden Effekt, der die Glanzbrandmasse homogen auf der Keramikoberfläche verteilte. (Siehe Abbildung 29).

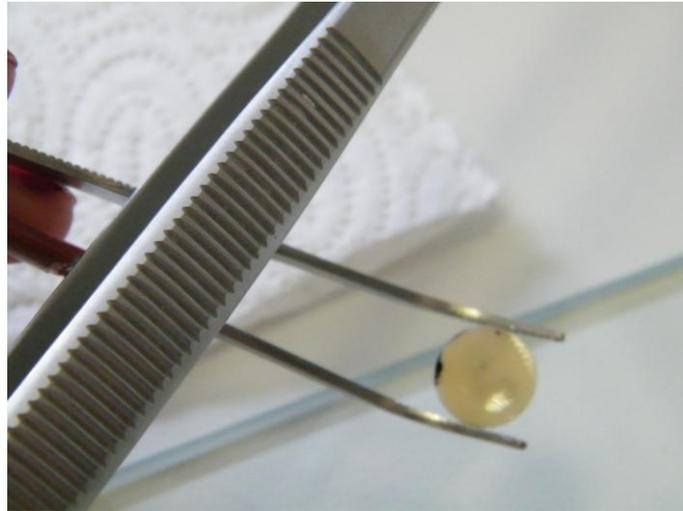


Abbildung 29: Verteilung der Masse mittels geriffeltem Griff einer Pinzette auf einer Probe

Jeweils vier bestrichene Proben wurden, wie bei der Herstellung, auf den Brenngutträger gelegt. Dieser wurde in den Brennofen Austromat 654 press-indent der Firma DEKEMA Dental-Keramiköfen GmbH (Freilassing, Deutschland) gestellt und der Glanzbrand erfolgte. Hierbei wurden die Brennprogramme für das jeweilige Gerüstmaterial, Titan oder Zirkoniumdioxid, manuell gewählt. Auch bei der Durchführung des Glanzbrandes wurde die Reihenfolge der Proben beachtet.

4.3.4 Oberflächenzustand „Poliert“

Die Prüfkörper der Gruppe 4 wurden beschliffen und im Anschluss mittels EVE Diapol Diamantpolierer (EVE ErnstVetter GmbH, Pforzheim, Deutschland) poliert. Beides erfolgte im oben beschriebenen Schleif- und Poliergerät (siehe Kap. 4.3.2.1). Für eine optimale Politur und um die arbeitsalltägliche Situation zu simulieren, wurden pro Prüfkörper drei verschiedenen EVE Diapol Diamantpolierer in absteigender Körnungsstärke verwendet. Alle drei Polierer

waren kelchförmig und anhand ihrer verschiedenen Farben zu unterscheiden, welche die Körnung festlegte. Diese Diamantpolierer werden im Praxisalltag zur Korrektur von Oberflächenfehlern einer Dentalkeramik eingesetzt.

Zuerst wurde der grobe W17 Dg Diamantpolierer zum Abtrag und Verschleifen von Keramiken und Metallen (Farbe Blau) angewendet. Danach kam der mittlere W17 Dmf Diamantpolierer zum Vorpolieren und Glätten von Keramiken und Metallen (Farbe Rot) zum Einsatz. Zum Schluss wurde der feine W17 D Diamantpolierer zum Hochglanzpolieren von Keramiken und Metallen (Farbe Grau) verwendet. Diese wurden in einem langsamdrehenden Grün-Ring Winkelstück der Firma KaVo (INTRAmatic 14 ES, KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, Deutschland) in das Schleif- und Poliergerät eingespannt, welches im täglichen Praxisalltag zum Einsatz kommt. Die Umdrehungszahl des Winkelstücks richtete sich nach der Empfehlung des Herstellers der Polierer und wurde bei 12.000 U/min festgelegt. Der Prüfkörper wurde erneut mit Aluwachs an dem Acrylblock des Schleif- und Poliergerätes befestigt. Bei der Befestigung wurde darauf geachtet, dass die sichtbare Schleifspur an der Oberseite der Probe senkrecht stand. Das heißt in entgegengesetzter Richtung zur waagrechten Polierbewegung, um möglichst effizient die Schleifspuren zu entfernen. Der erste Durchgang mit dem blauen Polierer dauerte zwei Minuten. Die Oberfläche der Prüfkörper war nach der Bearbeitung inhomogen, matt und die Tiefe der sichtbaren Schleifspuren hatte abgenommen. Die Bearbeitungszeit mit dem roten Diamantpolierer betrug ebenfalls zwei Minuten. Das Ergebnis war eine homogene, matte Oberfläche. Die Schleifspuren waren nicht mehr sichtbar. Zum Schluss erfolgte die Hochglanzpolitur mittels grauem Polierer. Dieser wurde eine Minute eingesetzt. Zu sehen war eine leicht glänzende, homogene Oberfläche. Die blauen Polierer wurden nach jedem zehnten Prüfkörper gewechselt, die Roten nach jedem Fünfzehnten und die weißen Polierer nach jedem Dreizehnten Keramikkörper.

Tabelle 5: Übersicht EVE Diapol Diamantpolierer

Diamantpolierer	Körnung	Anwendungsdauer	Wechsel	Funktion
blau W17 Dg Art. Nr.: 7087	Grob	2 min	Nach 10 Proben	Abtrag und Verschleifen
rot W17 Dmf Art.-Nr.: 7187	Mittel	2 min	Nach 5 Proben	Vorpolieren und glätten
grau W17 D Art. Nr.: 7287	Fein	1 min	Nach 13 Proben	Hochglanzpolitur

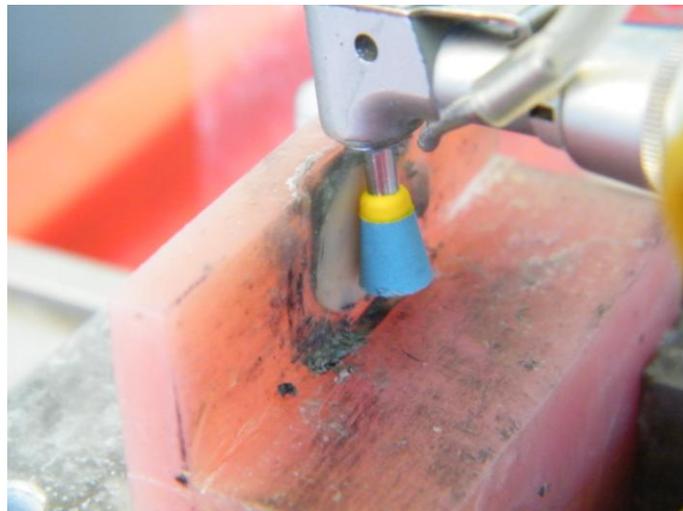


Abbildung 30: Polieren des Prüfkörpers [2]

4.4 Vermessung der Prüfkörper

Alle 400 Prüfkörper wurden nach jedem Arbeitsschritt mit einer Schieblehre vermessen. An jeweils drei beliebigen Stellen wurde der Durchmesser und die Dicke der Probe gemessen. Von diesen drei Werten wurde der arithmetische Mittelwert berechnet. Alle dokumentierten Werte wurden in Excel Tabellen festgehalten. Die Mittelwerte des Endzustandes wurden für die Berechnung der Bruchfestigkeit herangezogen.



Abbildung 31: Darstellung der Schieblehre mit Probe

4.5 Messung der Oberflächenrauheit

Bevor die Proben auf Biegefestigkeit geprüft wurden, erfolgte die Messung der Oberflächenrauheit. Hierfür wurden die ersten zehn Proben von jedem Oberflächenzustand des Titanbrandes und Zirkonbrandes herangezogen, d. h. 40 Proben vom Titanbrand und insgesamt 40 Proben vom Zirkoniumdioxidbrand. Mit der Tastnadel des Gerätes Perthometer S6P der Firma Mahr (Göttingen, Deutschland) wurde die Messung durchgeführt. Hierbei wurde die 3D-Topographie der Oberfläche mit 121 Messprofilen, über eine Fläche von 3x3 mm, mit der 2 µm Tastnadel MFW-250, erfasst. Der vertikale Radius der Nadel lag bei $\pm 250 \mu\text{m}$. Die Software des Perthometers, hieß Perthometer Concept, Version 7.0. Aus allen 121 Profilen wurde von jedem Prüfkörper die mittlere Rauheit $R_a [\mu\text{m}]$ bestimmt und graphisch in Abhängigkeit des Bearbeitungszustandes für jedes Brennprofil dargestellt.

4.6 Materialprüfungen

4.6.1 Biaxialer Biegetest gemäß ISO Norm 6872

Der biaxiale Biegetest wurde in Anlehnung an die deutsche DIN ES ISO 6872 Norm für keramische Werkstoffe aus dem Jahr 2015 durchgeführt. Für diesen Versuch wurde die Universalprüfmaschine Z010 der Firma Zwick (Ulm, Deutschland) benutzt. Alle Proben wurden mit der bearbeiteten Seite nach unten auf drei konzentrisch angeordnete Stahlkugeln (siehe Abbildung 32) gelegt. Somit lag die bearbeitete Seite in der Zugspannungszone.



Abbildung 32: Detailansicht des Lagers der Prüfmaschine: Links: konzentrisch angeordneten Stahlkugeln [2]; Rechts: Probe auf Kugeln gelagert (beschriftete/nicht bearbeitete Seite oben)

Die Proben befanden sich auf den Stahlkugeln in einem Lager, welches in mittels einem Griff in einem Stempelgehäuse positioniert wurde (siehe Abbildung 33). Der Prüfstempel hatte einen Radius von ungefähr 1,5 mm. Die Vorschubgeschwindigkeit des Stempels betrug 0,5 mm pro Minute. Dieser übte solange Kraft auf den Prüfkörper aus, bis es zum vollständigen Bruch kam. Die gemessene Gesamtkraft während des Bruchs, diente der Berechnung der Biegefestigkeit.



Abbildung 33: Stempelgehäuse/Stempel mit Lager



Abbildung 34: Ansicht des eingespannten Stempels und Lager in der Prüfmaschine [2]

Die Kräfte, welche zum Versagen der Prüfkörper geführt haben, wurden in Newton gemessen und mittels Computerprogramm Zwick testXpert® 12.0 software in einem Messprotokoll dargestellt.

In der Abbildung 35 ist eine Beispielskizze des Graphen des ISO-Tests dargestellt.

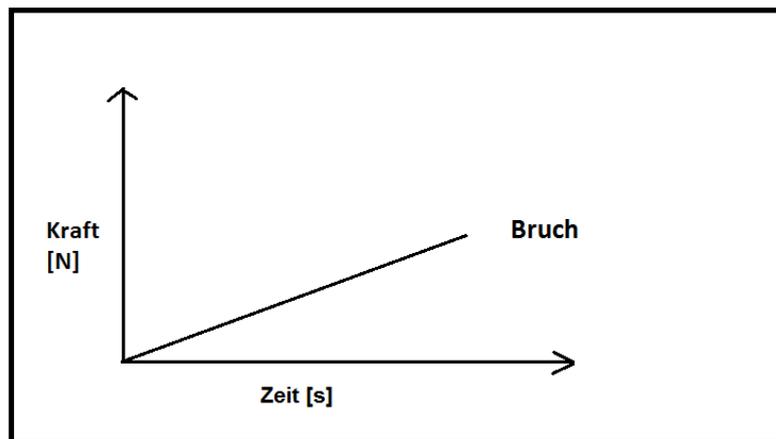


Abbildung 35: Beispielskizze ISO-Test

In der vorliegenden Arbeit wird dieser Test auch als ISO-Test bezeichnet.

4.6.2 Ermüdungstests

4.6.2.1 Statischer Stufentest

Der statische Stufentest erfolgte ebenfalls anhand des biaxialen Biegetests mittels Universalprüfmaschine Zwick Z010 (Ulm, Deutschland). Der Prüfstempel übte eine Kraft von 20 N, über eine Haltezeit von 4 Stunden auf den Prüfkörper aus. Wenn es während der Haltezeit von 4 Stunden nicht zu einem Bruch kam, wurde die Kraft über weitere 4 Stunden um 20 N erhöht. Dies wurde so lange zyklisch wiederholt, bis es zu einem Bruch kam. Für jede Messung wurden ein Weg-Zeit- und ein Kraft-Zeit-Diagramm erstellt. Erkennbar waren erste Risse bei Kraft F [N] und der Bruch der Probe anhand der Wegstreckenänderung des Graphen. Ebenfalls waren die einzelnen Kraftstufen ΔF und die Bruchlast [N], bei welcher der Bruch erfolgte, die Gesamtzeit t [sek] bis zum Bruch der Probe und die Zeit Δt auf der Kraftstufe bis zum Bruch, ersichtlich. In der

nachfolgenden Abbildung 36 ist eine Beispielskizze der Diagramme zur Veranschaulichung der Vorgehensweise zur Ermittlung der Bruchlast [N] dargestellt.

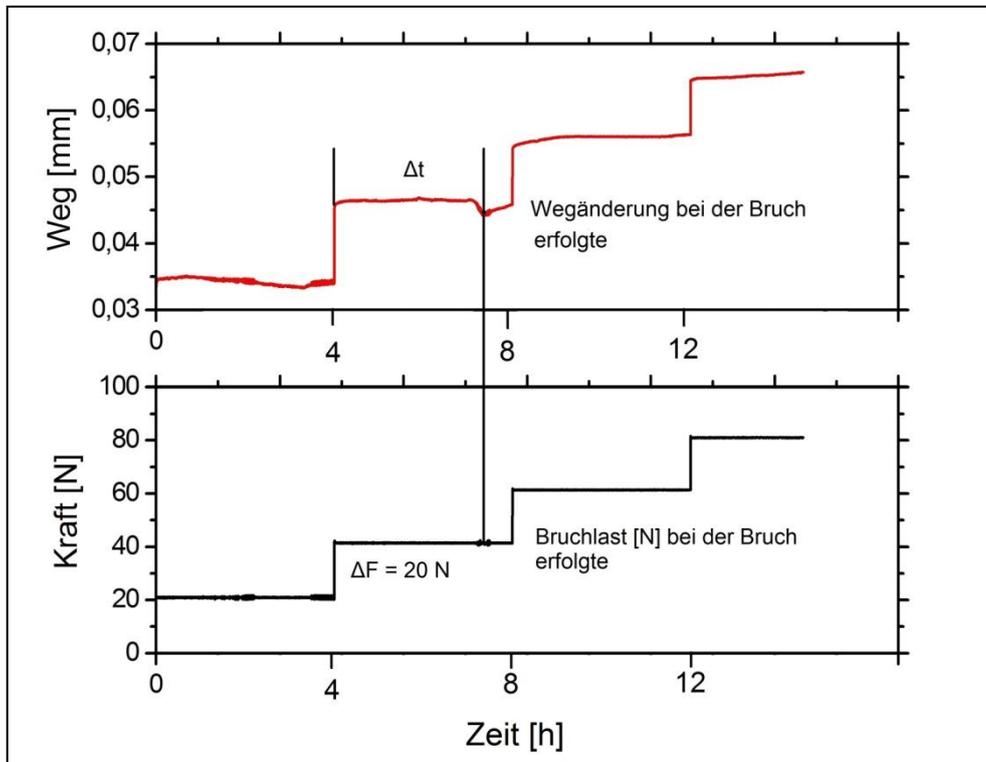


Abbildung 36: Beispielkurven des statischen Stufentests

4.6.3 Dynamischer Stufentest

Für den dynamische Stufentest wurde auch der biaxiale Biegetest herangezogen, allerdings mithilfe einer servo-pneumatischen Schwingprüfmaschine der Firma Dyna-Mess (Aachen, Deutschland) (siehe Abbildung 37). Das Lager der Prüfkörper und der Stempel bzw. Stempelgehäuse waren die Gleichen, wie bei der Prüfmaschine Zwick Z010 (siehe Abbildung 33).

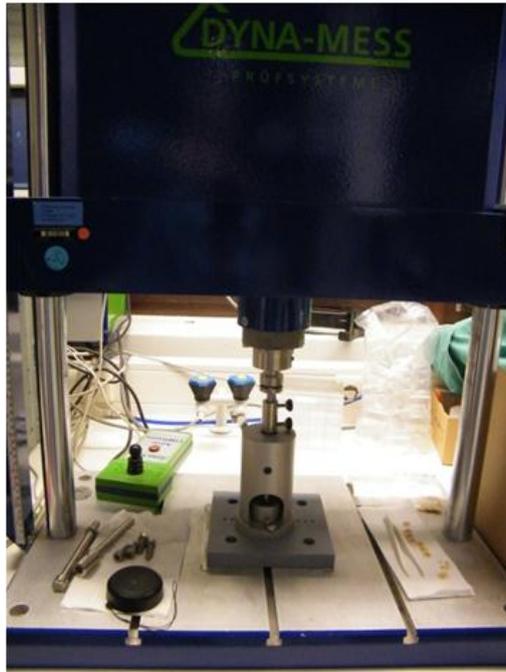


Abbildung 37: Schwingprüfmaschine Dyna-Mess (Aachen) [2]

Der Stempel übte eine Kraft von 20 N, mit einer Frequenz von 5 Hz und 72 000 Zyklen (Lastwechsel), über 4 Stunden auf die Prüfkörper aus. Wenn es während dieser 4 Stunden zu keinem Bruch kam, wurde die Kraft um 20 N über weitere 4 Stunden erhöht. Dies wurde solange zyklisch wiederholt bis es zu einem Bruch kam. Pro Prüfkörper wurde ein Weg-Lastwechsel- und eine Kraft-Lastwechsel Diagramm aufgezeichnet. In dem Weg-Lastwechsel-Graphen sind einmal das Weg-Maximum (obere Linie) und das Weg-Minimum (untere Linie) eingezeichnet. Auch in dem Kraft-Lastwechsel-Graphen ist das Kraft-Maximum und Kraft-Minimum dargestellt. Das Weg-Lastwechsel und Kraft-Lastwechsel Diagramm ist beispielhaft in Abbildung 38 gezeigt.

Die Lastwechselzahl und dazugehörige Kraft F in Newton wurden bei Eintritt des Bruches registriert.

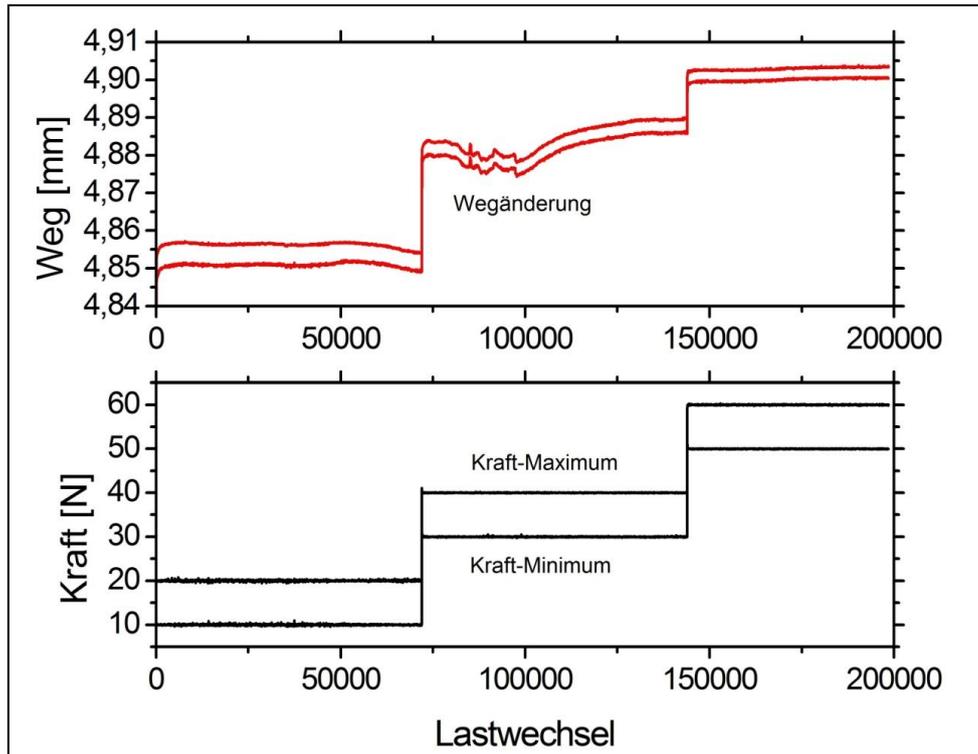


Abbildung 38: Beispielkurven des dynamischen Stufentests

4.7 Berechnung der Biegefestigkeit

Aus den erhaltenen Werten wurde mithilfe der nachfolgenden Gleichung die Biegefestigkeit σ , in der Einheit Megapascal, berechnet. Die Gleichung ist in der DIN ISO-Norm 6872 zu finden:

$$\sigma = \frac{-0,2387 P (X - Y)}{b^2}$$

σ = maximale Biegespannung, welche in der Mitte des Prüfkörpers angreift in Megapascal

P = die gemessene Gesamtkraft beim Bruch in Newton

b = Dicke des Prüfkörpers

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

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

v = Poisson'sche Zahl ($v = 0,25$)

- r_1 = Radius des Unterstützungskreises in mm
($r_1 = 5$ mm)
- r_2 = Radius des zu belasteten Bereichs in mm
($r_2 = 0,75$ mm)
- r_3 = Radius des Prüfkörpers (individuell)

4.8 Darstellung der Proben mittels Rasterelektronenmikroskop

Um einen optischen Eindruck der verschiedenen Oberflächenzustände der Proben zu gewinnen, wurden diese nach der Materialprüfung, mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) abgebildet und dokumentiert. Hierfür wurde jeweils eine beliebige Probe der vier Oberflächenzustände, der Gruppe A und B gewählt (8 Proben insgesamt). Um die Oberfläche der Proben für das REM elektrisch leitfähig zu machen, wurden diese durch Kathodenzerstäubung mittels Sputtergerät SCD 005 der Firma BAL-TEC GmbH (Witten, Deutschland) besputtert (engl. to sputter - zerstäuben).

4.8.1 Das Sputtergerät SCD 005 BAL-TEC

4.8.1.1 Aufbau des Sputtergerätes SCD 005 BAL-TEC

Das Sputtergerät bestand aus einer Probenkammer und einem Bedienungs- und Anzeigeteil. Die Probenkammer war auf einem Sockel (1.) angebracht. Sie bestand aus einem Objektisch (7.), auf welchem die Proben zum besputtern fest positioniert werden konnten. Der Objektisch (7.) konnte innerhalb eines Plexiglaszylinders (6.) in der Höhe verstellt werden. Über dem Objektisch befand sich der Sputterkopf (Sputtertarget) (5.) aus Gold-Palladium, in Form einer Scheibe. An den Sputterkopf wurde eine Spannung angelegt. Den Gegenpol zu dieser Spannung stellten die Proben dar. Zum Schutz war die Probenkammer von einem Splitterschutz aus Plexiglas (8.) umgeben. Mit einem Deckel (9.) konnte die Kammer verschlossen werden.

Der Bedienungs- und Anzeigeteil (4.) bestand aus einer Vakuum-Anzeige [mbar], aus einer Prozesszeit-Anzeige [s] mit Prozesszeit-Wahlschalter [s], einer Sputterstrom-Anzeige [mA], aus einer Prozess-Starttaste und-Stopptaste und aus dem Hauptschalter (2.) des Gerätes. Weiter unten am Gerät befanden

sich zwei Bedienungstasten: Zum einen die Taste „Flush“ (10.) zum Spülen der Probekammer mit dem Edelgas Argon und zum anderen die Taste „on“ (11.) zum Starten des Sputterprozesses. (siehe Abbildung 39)



- | | |
|---------------------------------|----------------------------------|
| 1. Probenkammer-Sockel | 7. Objektisch mit Probehalter |
| 2. Hauptschalter | 8. Plexiglas-Splitterschutz |
| 3. Argon Gashahn | 9. Deckel der Probekammer |
| 4. Bedienungs- und Anzeigepanel | 10. Taste „Flush“/Argonspültaste |
| 5. Sputterkopf | 11. Taste „Einschalten on“ |
| 6. Plexiglaszylinder | |

Abbildung 39: Sputtergerät SCD 050 BAL-TEC

4.8.1.2 Sputtervorgang

Die Proben waren nach der Materialprüfung in mehrere Bruchstücke gebrochen. Um die gesamte Probe zu besputtern, wurde diese lose in die ursprüngliche Pelletform zusammen gesetzt. Anschließend wurde ein

Probenhalter mit einem doppelseitig klebenden Graphitplättchen, welches stromleitend war, beklebt (siehe Abbildung 40).

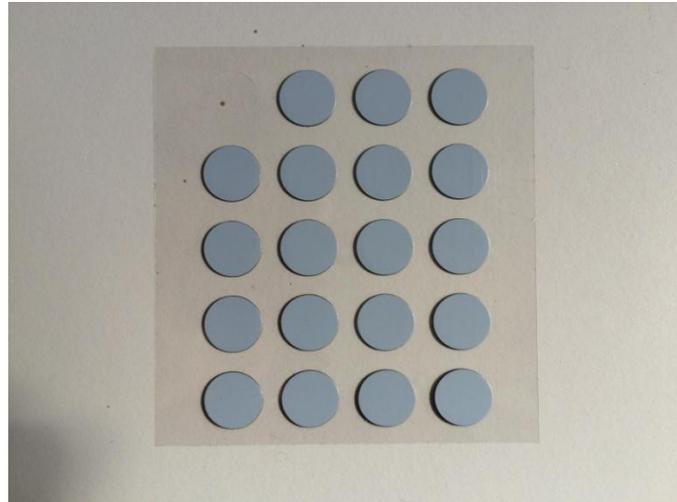


Abbildung 40: Graphitplättchen

Auf die Oberseite des Plättchens wurde die zusammen gesetzte Probe aufgeklebt. Mit Leitsilber (einer Suspension aus Silber und Xylol) wurde punktförmig der Rand aller acht Proben mit dem Probehalter verbunden. Dieses „Leitsilber“ diente als Haftmasse und elektrischer Leiter.

Die so vorbereiteten Probenhalter wurden auf den Objektträger in das Sputtergerät gestellt. Der Arbeitsabstand des Objektträgers zum Sputtertarget betrug 50 mm. Anschließend wurde die Probenkammer sachgemäß verschlossen. Hierbei wurde auf eine saubere Dichtung geachtet. Das Gerät wurde mit dem Netzschalter eingeschaltet und die Probenkammer mit einem Druck von ca. 5×10^{-2} -bar evakuiert. Die Sputterzeit von 100 sec bei 62 mA wurde eingestellt und der Sputtervorgang gestartet. Alle acht Proben wurden mit einer Gold-Palladium Schicht in einer Stärke von ~ 30 nm besputtert.



Abbildung 41: Besputterte Proben auf Probehalter

4.8.2 Das Rasterelektronenmikroskop Zeiss LEO 1430

Die besputterten Proben wurden im Rasterelektronenmikroskop LEO 1430 der Firma Zeiss (Jena, Deutschland) betrachtet. Von jeder der acht Proben wurde jeweils ein Bild mit der Vergrößerung 35-, 500- und 1000fach angefertigt.

4.9 Statistische Methoden

Nachdem alle Ergebnisse der Materialprüfungen vorlagen, wurden statistische Methoden angewandt, um die Ergebnisse miteinander zu vergleichen und die Bruchwahrscheinlichkeit der Dentalkeramik Triceram® festzustellen. Hierfür wurden die Computerprogramme Microsoft Office Excel 2007 (Microsoft, Redmond, USA) und Microcal™ Origin®, Version 6.0 (Microcal Software Inc., Northampton, USA), verwendet.

4.9.1 Weibullstatistik

Aufgrund der ungleichmäßigen Verteilung der Homogenität des Gefüges einer Keramik, ist diese nicht mit der Gaußschen Normalverteilung (Wahrscheinlichkeitsverteilung) zu erklären, da ein asymmetrisches Festigkeitsspektrum vorliegt. Deshalb wurde eine Weibull-Analyse mit zwei Parameter durchgeführt. Diese waren der Weibullmodul m und die Weibull-Festigkeit σ_0 [MPa]. Der Zusammenhang beider Parameter ist in der nachfolgenden Formel aus der DIN ISO Norm 6872 dargestellt:

$$Pf = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right\}$$

P_f	=	Versagenswahrscheinlichkeit
σ	=	Biegefestigkeit
σ_0	=	Weibullfestigkeit
m	=	Weibullmodul m

Für die Berechnung des Weibull Moduls m wurde die Versagenswahrscheinlichkeit P_f jeder Probe ausgerechnet. Anschließend wurde der Doppellogarithmus der Bruchwahrscheinlichkeit $\ln \ln \left[\frac{1}{(1-P_f)} \right]$, gegen den Logarithmus der gemessenen Biegefestigkeit $\ln \sigma$ [MPa], in einem Diagramm aufgetragen. Die Steigung M der resultierenden Regressionsgeraden, stellte den Weibullmodul m dar:

$$y = Mx + b$$

Die Weibull-Festigkeit σ_0 wurde anhand der Gleichung der Regressionsgeraden errechnet. Hierbei wurde der y -Wert gleich 0 gesetzt und der dazugehörige x -Wert ermittelt. Dieser stellte die Weibullfestigkeit σ_0 [MPa] dar.

4.9.2 T-Test

Um die verschiedenen Versuchsreihen miteinander zu vergleichen, wurde der Zweistichproben t-Test durchgeführt. Anhand dieses statistischen Tests wurde festgestellt, ob die Ergebnisse der Bruchfestigkeit der einzelnen Gruppen signifikant voneinander abweichen oder nicht. Hierfür wurden die Mittelwerte der Biegefestigkeit errechnet und daraus der p -Wert festgelegt. Liegt der errechnete p -Wert über 0,05, sind die Ergebnisse der Messungen nicht signifikant unterschiedlich. Falls der Wert unter 0,05 liegt besteht ein signifikanter Unterschied mit 5% Sicherheit.

5 Ergebnisse

5.1 Oberflächenrauheit

Für die Messung der Oberflächenrauheit wurden jeweils die ersten 10 Proben von jedem Oberflächenzustand der beiden Brände verwendet, d.h. 40 Proben vom Titanbrand und 40 Proben vom Zirkoniumdioxidbrand.

5.1.1 Titanbrand

Die mit dem Perthometer S6P gemessenen durchschnittlichen Mittenrauwerte zeigen beim Titanbrand deutliche Unterschiede. Die Mittenrauwerte R_a sind in Tabelle 6 und Abbildung 42 dargestellt. Hieraus ist zu erkennen, dass vor allem der Oberflächenzustand „geschliffen“ (2) mit $1,46 \mu\text{m}$ den größten Mittenrauwert aufweist. Die Referenzgruppe „as-fired“ (1) hat mit $0,77 \mu\text{m}$, einen höheren Wert, als die bearbeiteten Gruppen 3 und 4.

Auffallend ist, dass die polierte Gruppe 4 mit Abstand den geringsten Wert zeigt.

Die Standardabweichung des Mittenrauwerts der Referenzgruppe „as-fired“ (1) weist mit $0,15 \mu\text{m}$ den größten Wert auf. In absteigender Reihenfolge folgen Gruppe 3, 4 und 2 mit den Werten $0,05 \mu\text{m}$, $0,04 \mu\text{m}$ und $0,03 \mu\text{m}$.

Tabelle 6: Mittenrauwerte und deren Standardabweichung des Titanbrandes

Titanbrand Gruppe A	Rauheit R_a [μm] MW	Rauheit R_a [μm] SD
as-fired (1)	0,77	0,15
geschliffen (2)	1,46	0,03
Glanzbrand (3)	0,56	0,05
poliert(4)	0,04	0,04

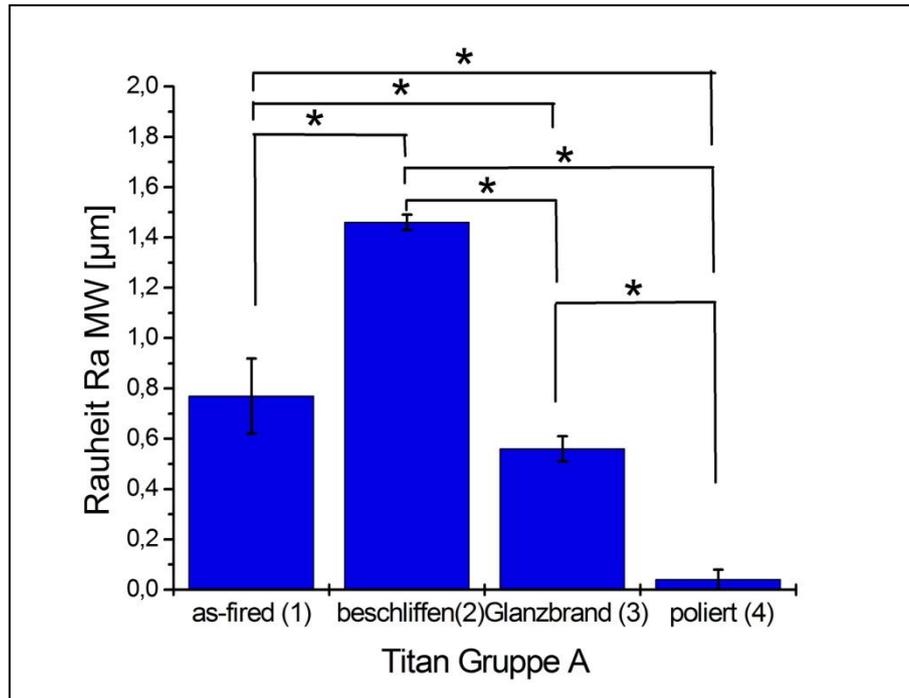


Abbildung 42: Darstellung der Mittenrauwerte und deren Standardabweichung des Titanbrandes

5.1.2 Zirkoniumdioxidbrand

Den größten Mittenrauwert weist beim Zirkoniumdioxidbrand der Oberflächenzustand „beschliffen“ (2), mit im Durchschnitt $1,23 \mu\text{m}$, auf (siehe Tabelle 4 und Abbildung 43). Dieser Wert ist fast das Dreifache der unbearbeiteten Referenzgruppe (1) „as-fired“, mit $0,46 \mu\text{m}$.

Auch hier stellt Gruppe 4 den mit Abstand kleinsten Wert ($0,06 \mu\text{m}$) dar.

Die Standardabweichung der Gruppe „as-fired“ (1) ist mit $0,22 \mu\text{m}$ am größten.

Der Wert der beschliffenen Oberfläche (2) liegt bei $0,03 \mu\text{m}$.

Auffallend ist, dass Gruppe 3 und 4 mit im Durchschnitt $0,03 \mu\text{m}$, die gleiche Standardabweichung der Rauheit haben.

Tabelle 7: Mittenrauwerte und deren Standardabweichung des Zirkoniumdioxidbrandes

Zirkonoxid Gruppe B	Rauheit Ra [μm] MW	Rauheit Ra [μm] SD
as-fired (1)	0,46	0,22
beschliffen (2)	1,23	0,05
Glanzbrand (3)	0,6	0,03
poliert (4)	0,06	0,03

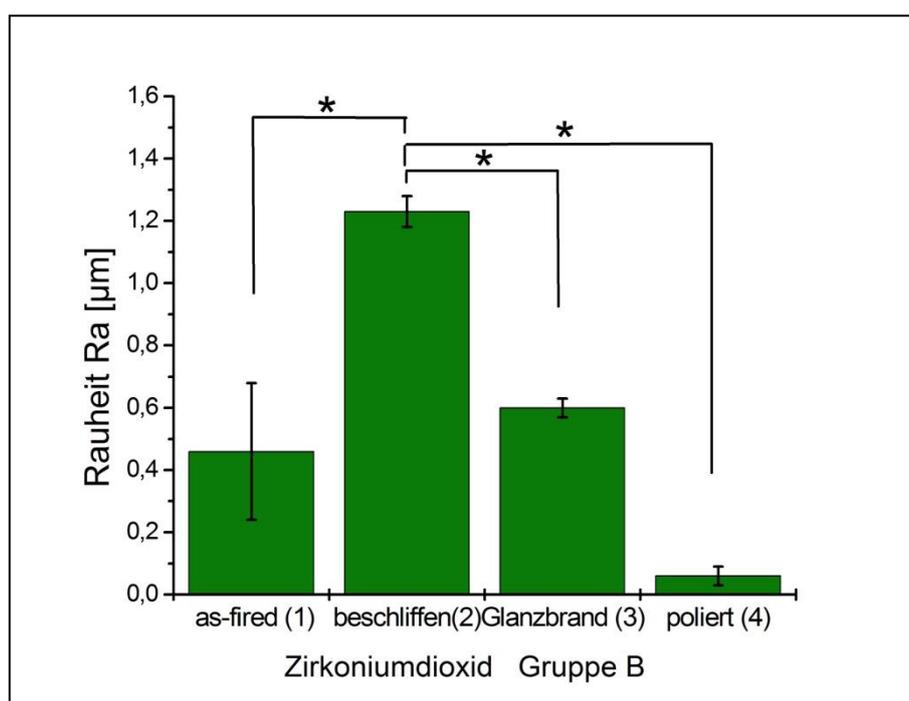


Abbildung 43: Darstellung Mittenrauwerte und deren Standardabweichung [μm] des Zirkoniumdioxidbrandes

5.1.3 Oberflächenrauheit Vergleich Titan- und Zirkoniumdioxidbrand

Der Vergleich der Mittenrauwerte Ra der beiden Brände zeigt, dass die Rauheit der Referenzgruppe „as-fired“ (1) des Titanbrandes fast doppelt so groß ist wie der Wert des Zirkoniumdioxidbrandes. Der Zustand „as-fired“ zeigt die größte Differenz der beiden Brände von allen vier Oberflächenzuständen. Bei der Gruppe „beschliffen“ (2) ist die Mittenrauheit Ra des Titanbrandes größer als die des Zirkoniumdioxidbrandes.

Bei den Gruppen 3 und 4 zeigt der Zirkoniumdioxidbrand etwas höhere Werte, als der Titanbrand. Der Zustand „poliert“ (4) hat die kleinste Differenz von 0,02 μm aller Oberflächenzustände.

Auffallend ist, dass bei Gruppe 1 und 2 der Titanbrand größere Mittenrauwerte aufweist, mit einer deutlich größeren Differenz der beiden Brände. Bei Gruppe 3 und 4 zeigt der Zirkoniumdioxidbrand größere Werte, allerdings mit einer deutlich geringeren Differenz der Brände untereinander.

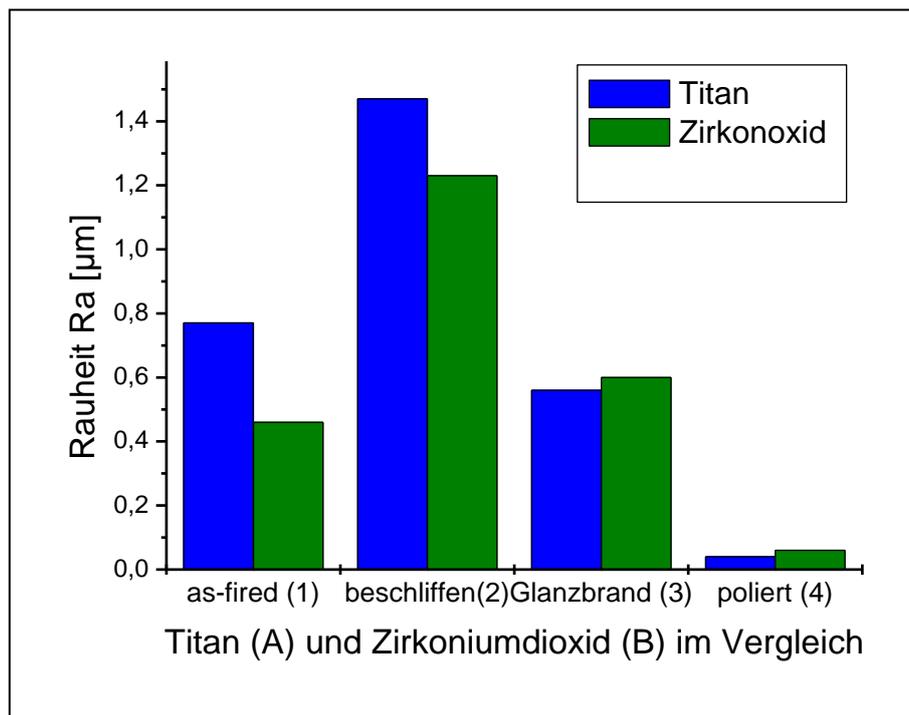


Abbildung 44: Vergleich Mittenrauwerte Titan- und Zirkoniumdioxidbrand

5.2 Biaxiale Biegetest nach ISO Norm 6872

5.2.1 Titanbrand

Die Werte der biaxialen Biegefestigkeit des ISO-Tests des Titanbrandes zeigen, dass die Referenzgruppe „as-fired“ (1) mit einem Mittelwert von 141,56 MPa den größten Wert aufweist.

Einen ähnlichen Mittelwert mit 135,26 MPa hat Gruppe „Glanzbrand“ (3). Daraus ist ersichtlich, dass die Biegefestigkeit der Prüfkörper welche mit

Glanzbrand versehen wurden fast um das Doppelte im Vergleich zur Referenzgruppe steigt. Die Mittelwerte der oberflächenbearbeiteten Gruppen „geschliffen“ (2) und „poliert“ (4) liegen mit Werten von 79,35 MPa und 81,93 MPa im Mittel ebenfalls nah beieinander und sinken stark ab im Vergleich zur Referenzgruppe.

Tabelle 8: Biaxiale Biegefestigkeit Titanbrand [2]

Titanbrand Gruppe A	Biaxiale Biegefestigkeit [MPa] MW	Biaxiale Biegefestigkeit [MPa] SD
as-fired (1)	141,56	24,98
geschliffen (2)	79,35	12,45
Glanzbrand (3)	135,26	29,05
poliert (4)	81,93	12,51

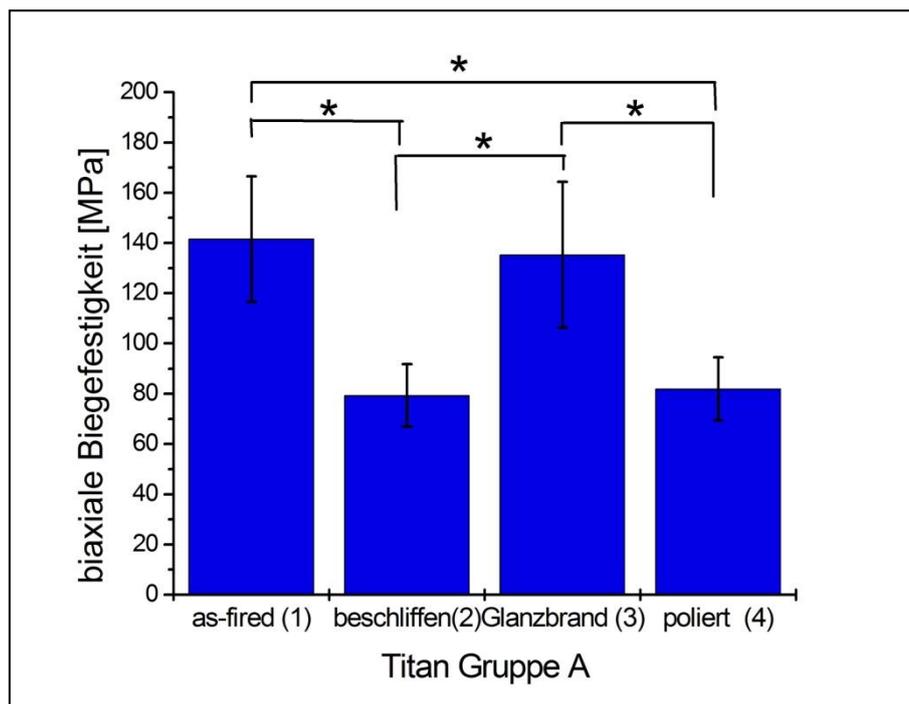


Abbildung 45: Darstellung biaxiale Biegefestigkeit Titanbrand

5.2.2 Zirkoniumdioxidbrand

Die Gruppe des Zirkoniumdioxidbrandes des ISO-Tests zeigt, dass den größten Mittelwert der Biegefestigkeit die Gruppe „Glanzbrand“ (3) mit 146,35 MPa hat. Die Referenzgruppe „as-fired“ (1) hingegen zeigt mit einem Mittelwert von 104,38 MPa den zweitgrößten Wert. Die oberflächenbearbeitete Gruppe poliert (4) hat einen durchschnittlichen Biegefestigkeitswert von 103,57 MPa. Den niedrigsten Wert mit 87,57 MPa hat ebenfalls die Gruppe „beschliﬀen“ (2).

Tabelle 9: biaxiale Biegefestigkeit Zirkoniumdioxidbrand [2]

Zirkoniumdioxidbrand Gruppe B	Biaxiale Biegefestigkeit [MPa] MW	Biaxiale Biegefestigkeit [MPa] SD
as-fired (1)	104,38	29,56
beschliﬀen (2)	87,57	14,43
Glanzbrand (3)	146,35	36,47
poliert (4)	103,57	14,29

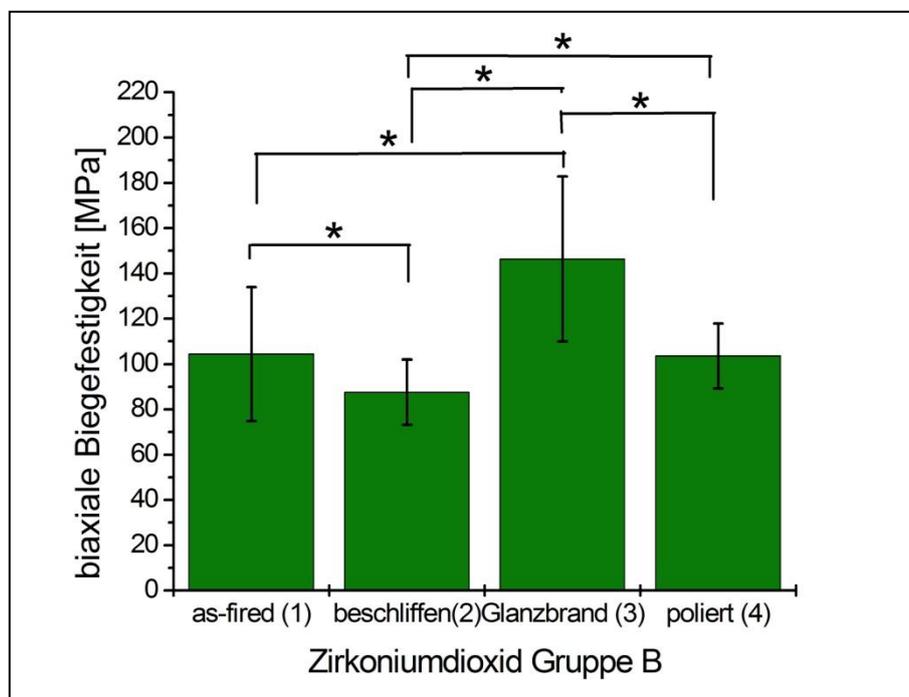


Abbildung 46: Darstellung biaxiale Biegefestigkeit Zirkoniumdioxidbrand

5.2.3 Biaxiale Biegefestigkeit Vergleich Titan- und Zirkoniumdioxidbrand

Anhand der nachfolgenden Tabelle ist ersichtlich, dass die durchschnittlichen biaxialen Biegefestigkeitswerte des Titan- und Zirkoniumdioxidbrandes unterschiedlich ausfallen.

Der Titanbrand weist bei den Gruppen „as-fired“ (1) und „Glanzbrand“ (3) ähnliche Biegefestigkeitswerte auf. Ebenso liegen die Gruppen „beschliffen“ (2) und „poliert“ (4) nah beieinander. Im Vergleich hierzu liegen die Mittelwerte des Zirkoniumdioxidbrandes etwas weiter auseinander.

Der Wert der Referenzgruppe „as-fired“ (1) des Zirkoniumdioxidbrandes mit 104,38 MPa ist weit unter dem Wert der Titangruppe „as-fired“ (1). Wohingegen die restlichen Biegefestigkeiten des Zirkoniumdioxidbrandes über denen des Titanbrandes sind. Den größten Mittelwert der gesamten Testreihe mit 146,35 MPa im Mittel, weist die Gruppe „Glanzbrand“ (3) des Zirkoniumdioxidbrandes auf.

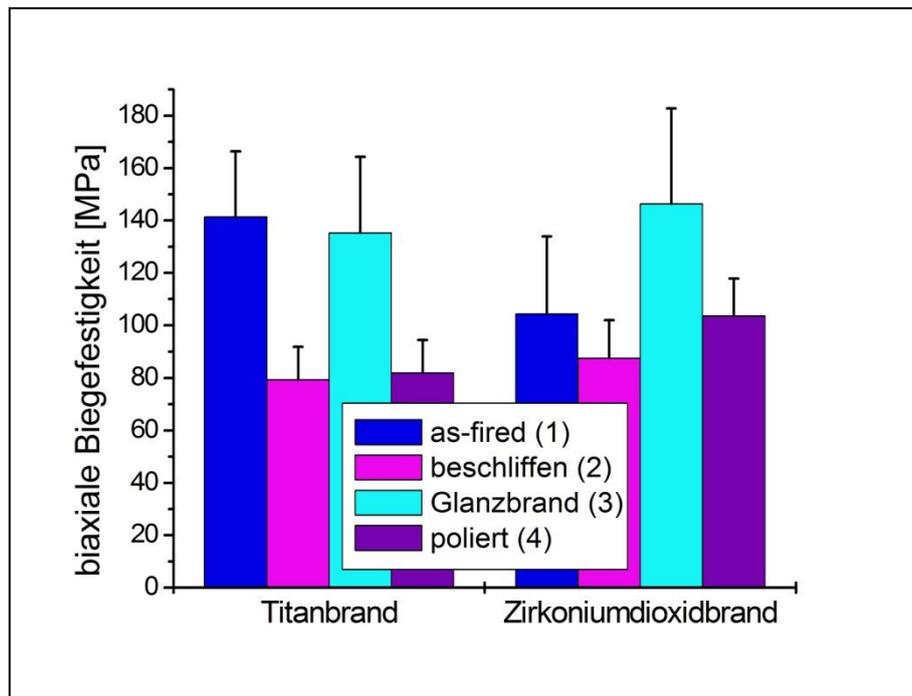


Abbildung 47: Vergleich der biaxiale Biegefestigkeit von Titan- und Zirkoniumdioxidbrand

5.3 Weibull Statistik

Die Weibull-Statistik wurde ausschließlich mit Gruppe A und B des biaxialen ISO-Tests durchgeführt.

5.3.1 Weibull-Modul m

5.3.1.1 Vergleich der einzelnen Brände

Das nachfolgende Diagramm stellt den Weibullmodul m des Titanbrandes (Gruppe A) dar. Zu erkennen ist, dass die Verteilung der Werte der Gruppen „Glanzbrand“ (3) und „poliert“ (4) nah beieinander liegt. Ebenso zeigt sich die Verteilung bei den Gruppen „as-fired“ (1) und „beschliffen“ (2). Es gilt, je größer der Weibullmodul m ist, desto geringer ist die Streuung der Riss auslösenden Fehler der Keramik. Den größten Wert der Verteilung hat die Oberflächenbearbeitung „poliert“ (4) mit einem Weibullmodul von 8,00. Es folgt die Gruppe „beschliffen“ (2) mit 7,11. Die Oberflächenzustände „as-fired“ (1) und „Glanzbrand“ (3) zeigen den kleinsten Weibullmodul mit 6,46 und 5,01.

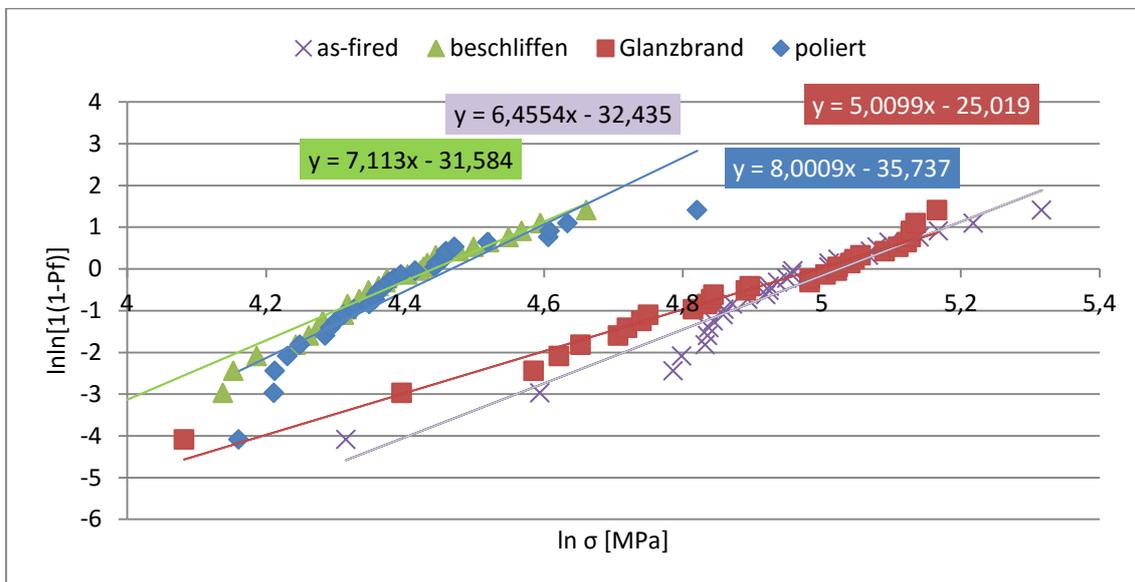


Abbildung 48: Weibull Verteilung Titanbrand A [2]

Die Weibull Verteilung des Zirkoniumdioxidbrandes (Gruppe B) (Abbildung 49) zeigt, dass die Gruppen „as-fired“ (1), „beschliffen“ (2) und „poliert“ (4) nahe beieinander liegen. Beim Zirkoniumdioxidbrand hat ebenfalls wie beim

Titanbrand der Oberflächenzustand „poliert“ (4) den größten Weibullmodul mit 8,79. Der Wert ist somit beim Zirkoniumdioxidbrand größer, als beim Titanbrand. Das heißt, dass bei beiden Bränden die Gruppe „poliert“ (4) die kleinste Streuung an Riss auslösenden Fehlern besitzt. Den Weibullmodul der Gruppe „beschliffen“ (2) des Zirkoniumdioxidbrandes (7,38) zeigt nahezu den gleichen Wert wie die Gruppe 2 des Titanbrandes (7,11). Im Gegensatz zum Titanbrand ist beim Zirkoniumdioxidbrand der Weibullmodul der Gruppe 3 größer, als der von Gruppe 1.

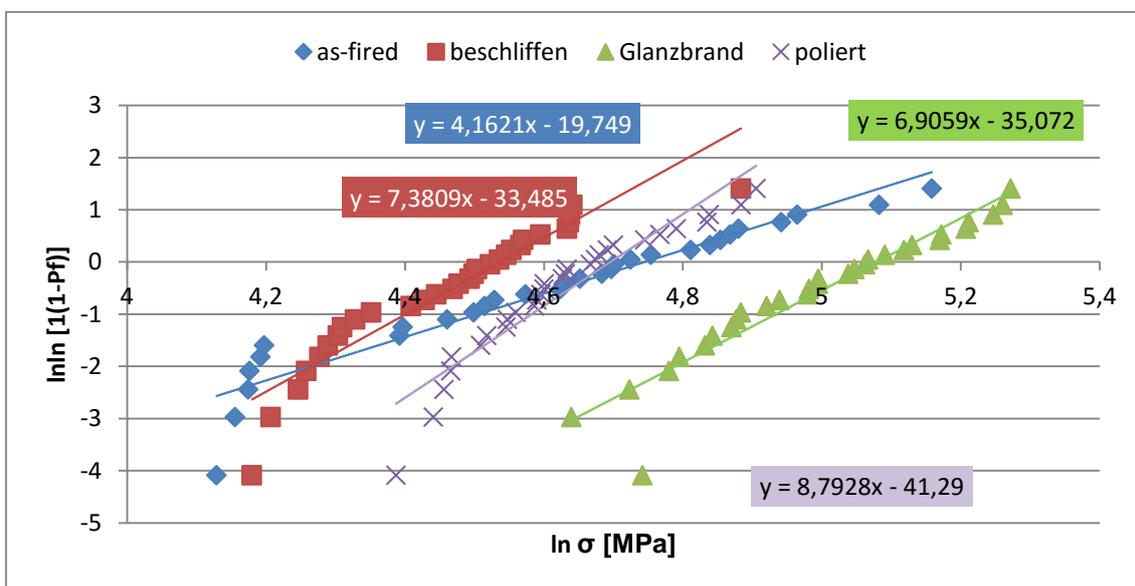


Abbildung 49: Weibull Verteilung Zirkoniumdioxidbrand B [2]

Tabelle 10: Weibull Modul m Vergleich Titan- und Zirkoniumdioxidbrand [2]

Weibull modulus m	Titanbrand Gruppe A	Zirkonoxidbrand Gruppe B
as-fired (1)	6,46	4,16
beschliffen (2)	7,11	7,38
Glanzbrand (3)	5,01	6,91
poliert (4)	8,00	8,79

5.3.1.2 Vergleich der einzelnen Oberflächenzustände

In der nachfolgenden Abbildung 50 ist der Oberflächenzustand „as-fired“ der beiden Brände (Gruppe A und B) dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Steigung des Titanbrandes mit 6,44 größer ist, als die des Zirkoniumdioxidbrandes mit 4,16. Die unbearbeitete Referenzgruppe 1 hat im Vergleich zu den drei bearbeiteten Gruppen den kleinsten Weibullmodul m und somit ist die Streuung der Riss auslösenden Fehler in der Keramik bei dieser Gruppe am größten.

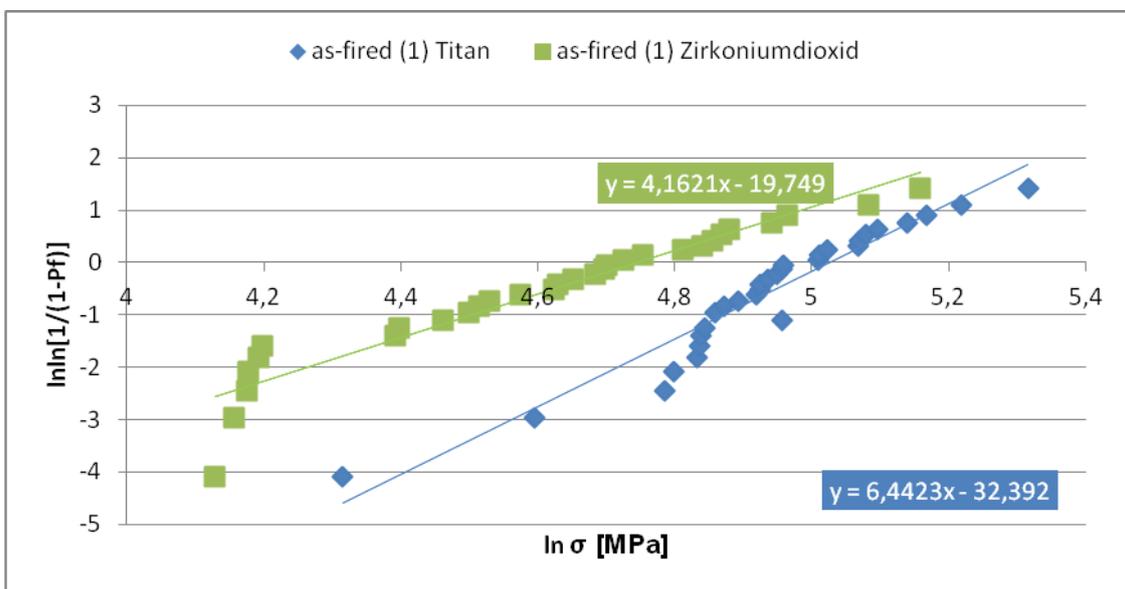


Abbildung 50: Weibull Verteilung as-fired (1) Titan- und Zirkoniumdioxidbrand im Vergleich

Bei der Gruppe „beschliffen“ (2) (Abbildung 51) zeigt sich, dass beide Graphen nah beieinander liegen und fast die identische Steigung besitzen (7,11 und 7,38). Der Weibullmodul m der beschliffenen Proben, ist größer als der der unbearbeiteten „as-fired“.

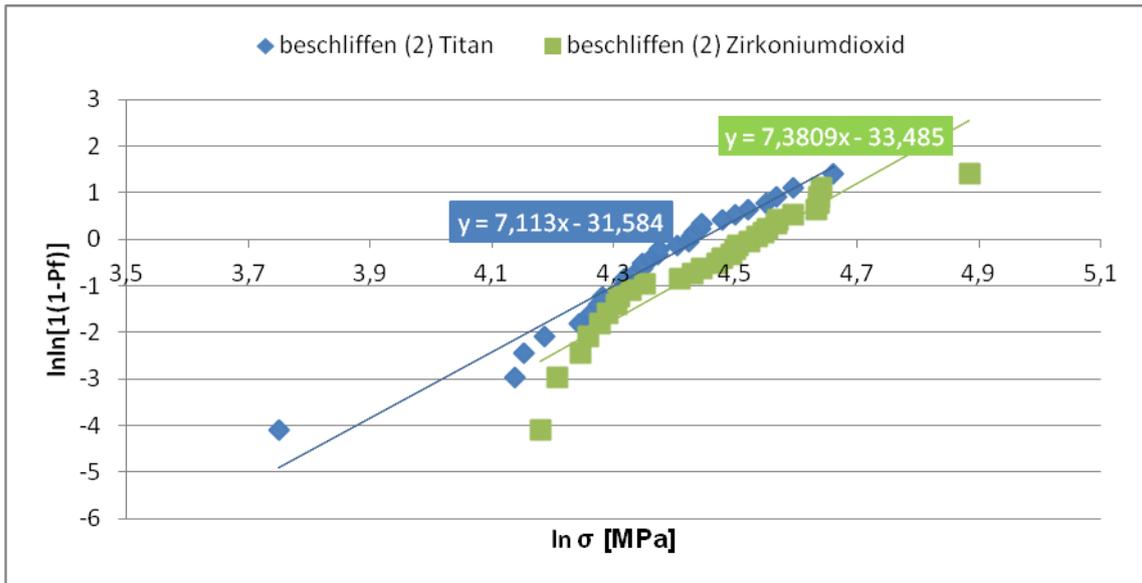


Abbildung 51: Weibull Verteilung beschliffen (2) Titan- und Zirkoniumdioxidbrand im Vergleich

Nachfolgend wird die Weibull Verteilung des Oberflächenzustandes „Glanzbrand“ (3) in Abbildung 52 beschrieben. Hieraus ist ersichtlich, dass der Zirkoniumdioxidbrand mit einem Weibullmodul von 6,90 einen größeren Wert aufweist, als der Titanbrand mit 5,00. Im Vergleich zu den anderen beiden oberflächenbearbeiteten Gruppen 2 und 3, hat die Gruppe „Glanzbrand“ (3) den kleinsten Weibullmodul m .

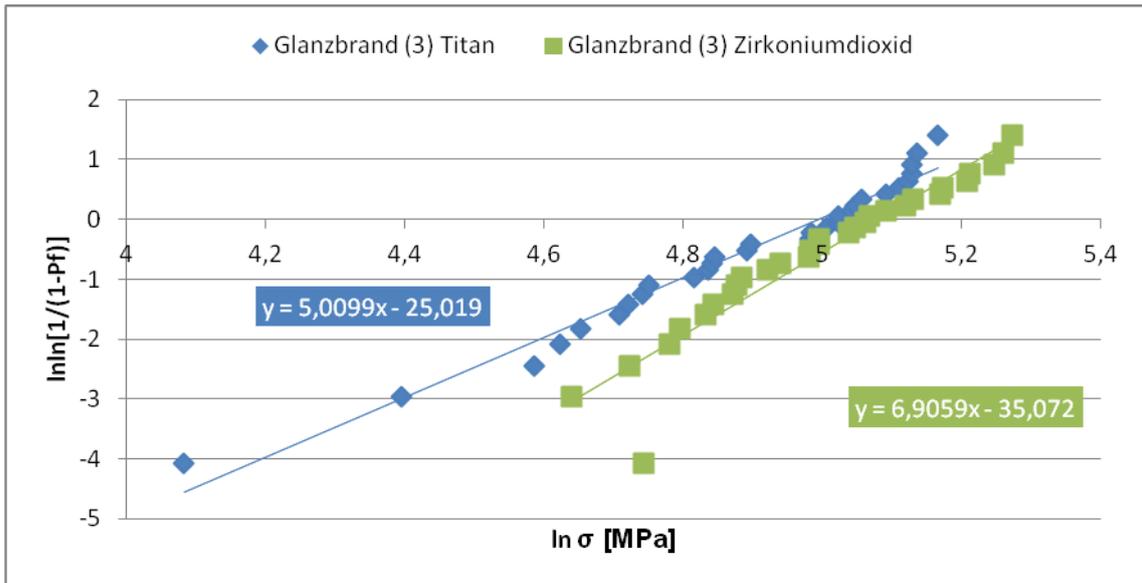


Abbildung 52; Weibull Verteilung Glanzbrand (3) Titan- und Zirkoniumdioxidbrand im Vergleich

Der Weibullmodul m der Gruppe „poliert“ (4) hat in Abbildung 53 im Vergleich zu den anderen Gruppen den größten Wert und somit ist bei dieser Gruppe die Streuung der Riss auslösenden Fehler in der Keramik am geringsten. Hierbei ist der Modul m des Zirkoniumdioxidbrandes mit 8,79 größer als das des Titanbrandes mit 8,00.

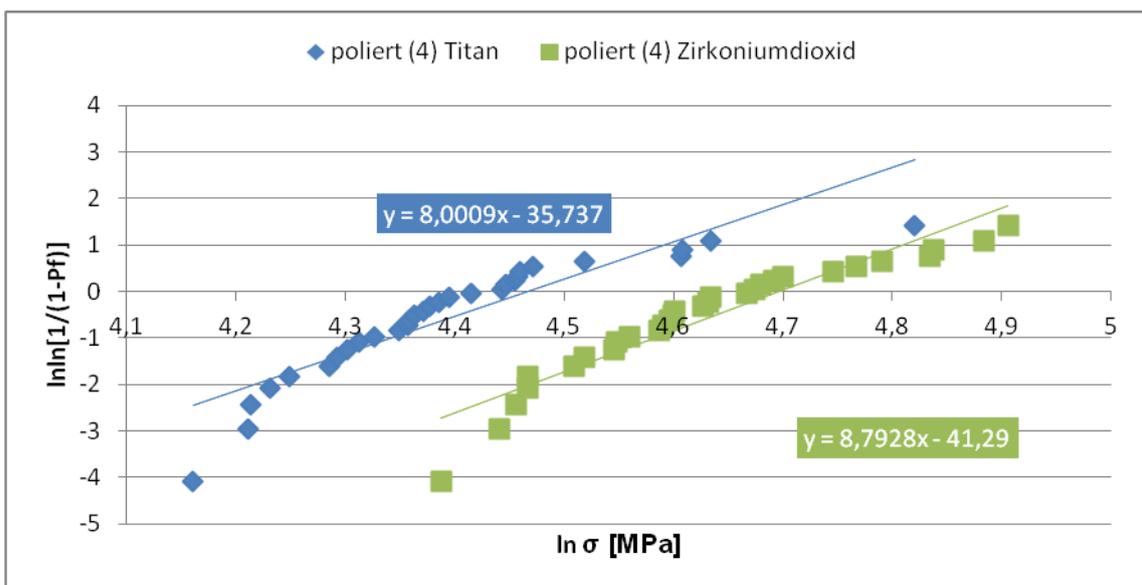


Abbildung 53: Weibull Verteilung poliert (4) Titan- und Zirkoniumdioxidbrand im Vergleich

5.3.2 Weibull-Festigkeit σ_0

Die Weibull-Festigkeit σ_0 [MPa] gibt die Zugspannung an, bei welcher 63,21% aller Proben versagen.

Aus der nachfolgenden Tabelle 11 wird ersichtlich, dass beim Titanbrand die Referenzgruppe „as-fired“ (1) mit 152,14 MPa den größten Wert zeigt. Einen ähnlich hohen Wert hat Gruppe 3 mit 147,51 MPa. Die Weibull-Festigkeitswerte der Gruppen 2 und 4 sind etwas niedriger. Auch hier liegen die Werte nah beieinander (84,40 MPa und 87,06 MPa). Den niedrigsten Wert zeigt Gruppe „beschiffen“ (2).

Beim Zirkonoxidbrand sieht die Verteilung der Weibullfestigkeit σ_0 etwas anders aus. Den größten Wert mit 160,54 MPa zeigt Gruppe 3. Die Referenzgruppe „as-fired“ liegt bei 115,00 MPa. Der Oberflächenzustand „poliert“ (4) ist beim Zirkonoxidbrand mit 109,49 MPa auffallend höher als beim Titanbrand (87,06 MPa). Die geringste Weibullfestigkeit zeigt auch bei diesem Brand Gruppe 2. Auffallend ist, dass der Zirkonoxidbrand, bis auf Gruppe 1, eine größere Weibull-Festigkeit aufweist, als der Titanbrand.

Tabelle 11: Weibullfestigkeit σ_0 des Titan- und Zirkonoxidbrandes [2]

Weibullfestigkeit σ_0	Titanbrand [MPa] Gruppe A	Zirkonoxidbrand [MPa] Gruppe B
as-fired (1)	152,14 ± 18,37	115,00 ± 11,02
beschiffen (2)	84,80 ± 17,30	93,38 ± 18,46
Glanzbrand (3)	147,51 ± 14,15	160,54 ± 19,92
poliert (4)	87,06 ± 19,61	109,49 ± 22,98

Nachfolgend sind die obigen Ergebnisse in graphischer Form dargestellt (Abbildung 54).

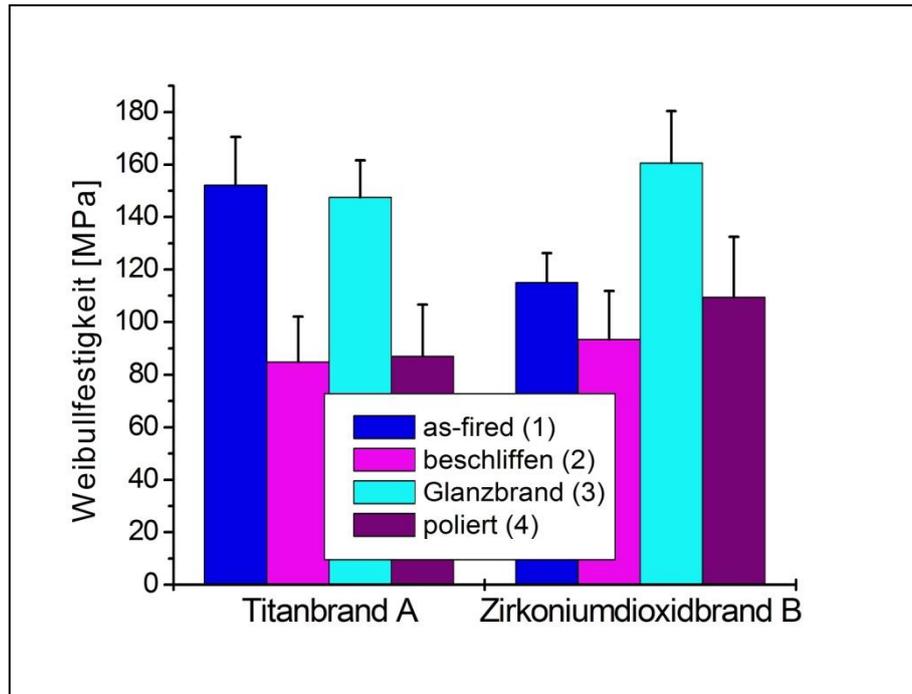


Abbildung 54: Weibullfestigkeit Vergleich Titan- und Zirkoniumdioxidbrand

Eine ähnliche Verteilung der Werte zeigt die biaxiale Biegefestigkeit nach DIN ISO 6872 Norm (siehe Kapitel 5.2.3).

5.3.3 Übersicht Weibull-Modul m und Weibull-Festigkeit σ_0

Tabelle 12: Übersicht Weibullstatistik [2]

Brand	Oberflächen- zustand	Weibull- modul m	Weibull- Festigkeit σ_0 [MPa]
Titanbrand Gruppe A	as-fired (1)	6,46	152,14
	beschiffen (2)	7,11	84,80
	Glanzbrand (3)	5,01	147,51
	poliert (4)	8,00	87,06
Zirkonium- dioxidbrand Gruppe B	as-fired (1)	4,16	115,00
	beschiffen (2)	7,38	93,38
	Glanzbrand (3)	6,91	160,54
	poliert (4)	8,79	109,59

5.4 Dauerfestigkeitstests

5.4.1 Statischer Stufentest

Der statistische Stufentest erfolgte mit den Gruppen C (Titanbrand) und D (Zirkoniumdioxidbrand).

5.4.1.1 Exemplarische Messkurven

Nachfolgend sind exemplarisch gewählte Weg-Zeit- und Kraft-Zeit-Diagramme von jeweils einem Oberflächenzustand der Gruppe C und D dargestellt.

In Abbildung 55 ist Probe C10 und in Abbildung 56 ist Probe D5, beide mit dem Oberflächenzustand „as-fired“ zu sehen. Anhand dieser Diagramme ist zu erkennen, dass nach jeder Krafterhöhung um 20 Newton nach vier Stunden es auch eine Wegänderung der Stempels gab. Bei Probe C10, welche mit dem Titanbrand hergestellt wurde, hatten wesentlich mehrere Krafterhöhungen und somit Kraftstufen durchlaufen bis diese versagt hat als Prüfkörper D5, der mit dem Zirkoniumdioxidbrand gebrannt wurde.

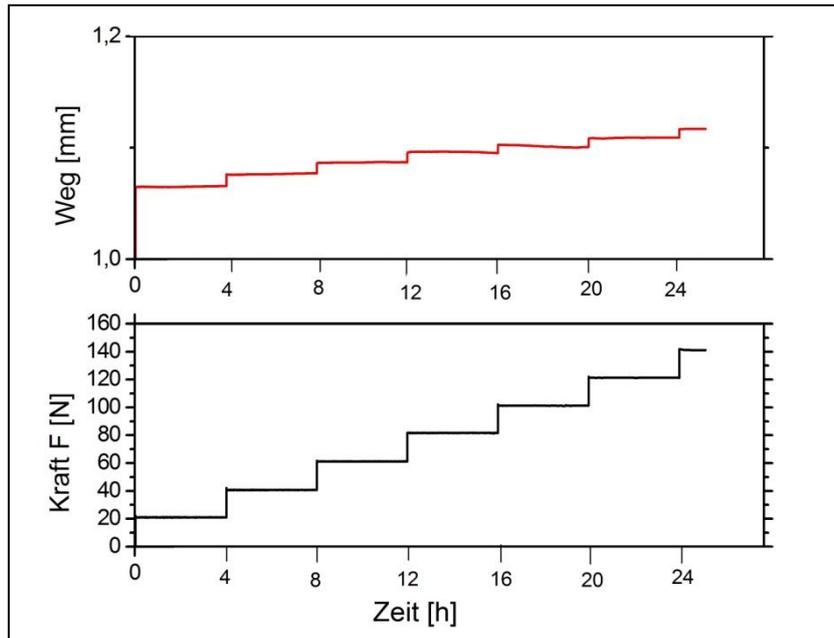


Abbildung 55: Diagramm der Probe C10 (as-fired)

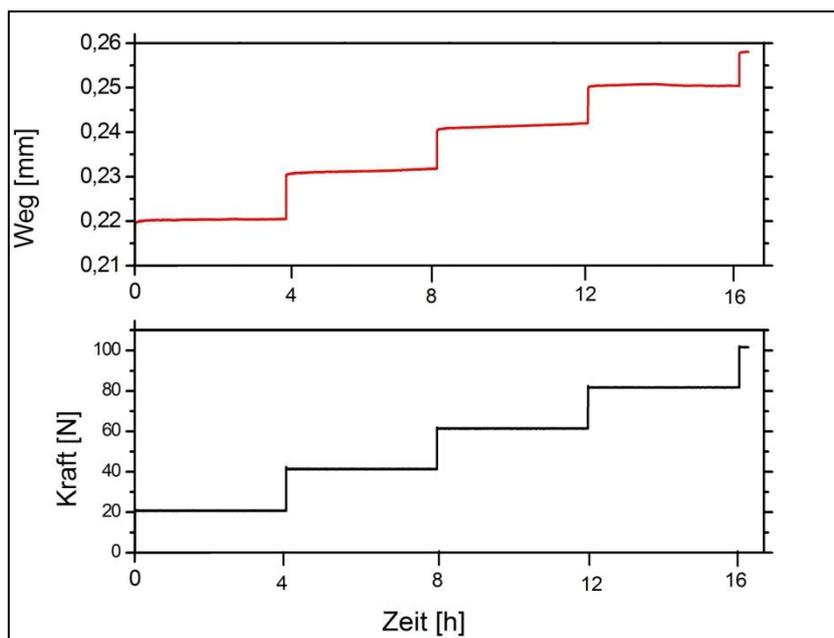


Abbildung 56: Diagramm der Probe D5 (as-fired)

Vor allem bei dem Oberflächenzustand „beschliffen“ (Probe C16 und D19) ist anhand der Kraft-Zeit-Kurve eine Kraftänderung zu erkennen, was auf einen starken Kraftabfall hin deutet. Gleichzeitig ist bei beiden Proben im Weg-Zeit-Diagramm eine starke Wegänderung verzeichnet.

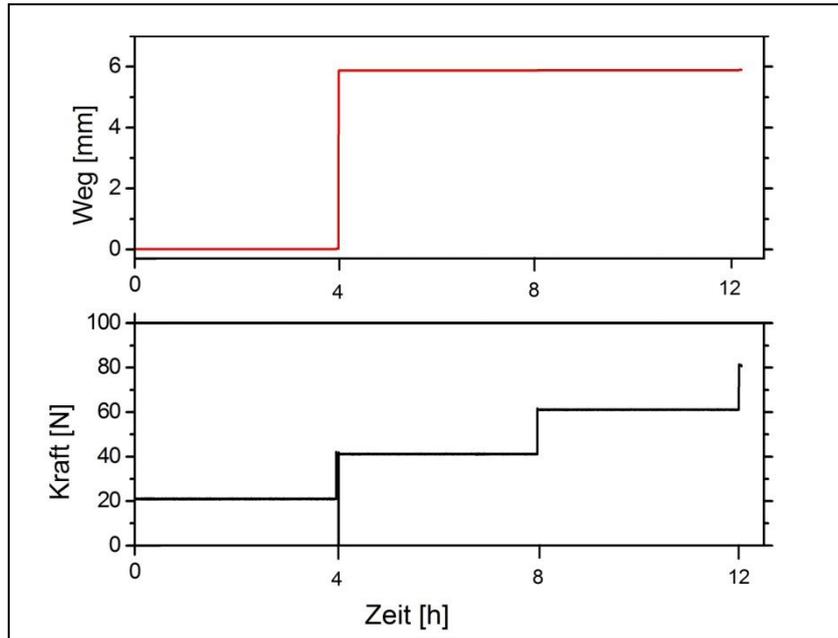


Abbildung 57: Diagramm der Probe C16 (beschliffen)

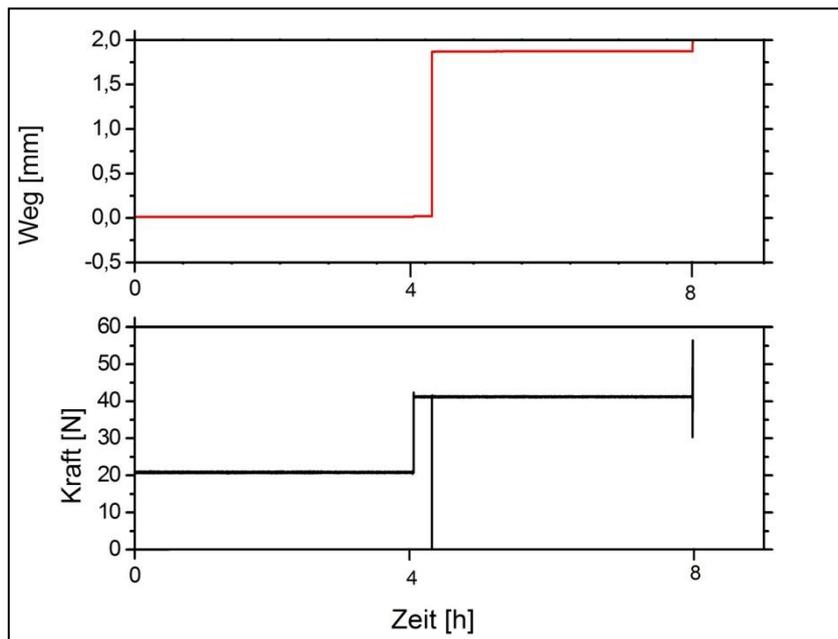


Abbildung 58: Diagramm der Probe 19 (beschliffen)

Auch Probe D33 Oberflächenzustand „poliert“ (siehe Abbildung 59), zeigt eine Kraft- und Wegänderung am Übergang von Stufe 1 zu Stufe 2.

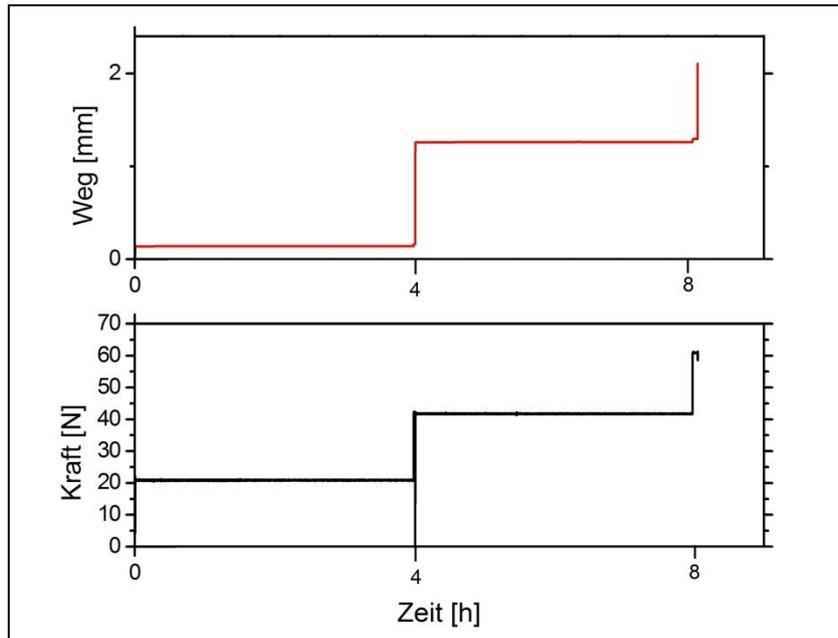


Abbildung 59: Diagramm der Probe D33 (poliert)

Bei Probe C27 (Gruppe „Glanzbrand“) ist im Weg-Zeit-Diagramm Mitte/Ende Stufe 3 eine Wegänderung zu erkennen, die mit keiner Kraftänderung einhergeht (siehe Abbildung 60).

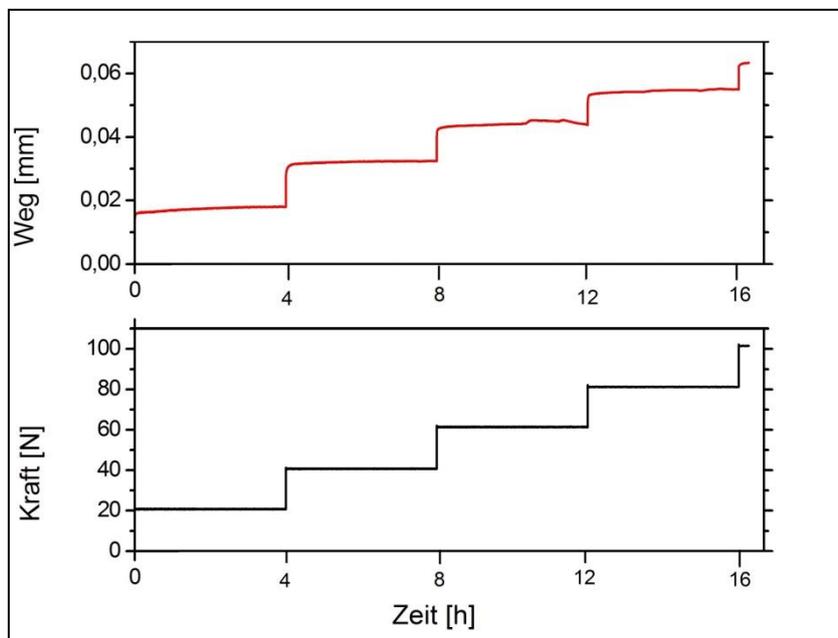


Abbildung 60: Diagramm der Probe C27 (Glanzbrand)

Beim Zirkoniumdioxidbrand Probe D30 (Gruppe „Glanzbrand“), sind bereits leichte Wegänderungen auf Stufe 1 zu erkennen, was auf eine starke Rissbildung hindeutet. Eine stärkere Wegänderung ist Ende Stufe 2 zu sehen. An dieser Stelle erfolgte eine starke Schädigung der Probe, da auch zum gleichen Zeitpunkt eine Kraftänderung zu erkennen ist. (siehe Abbildung 61).

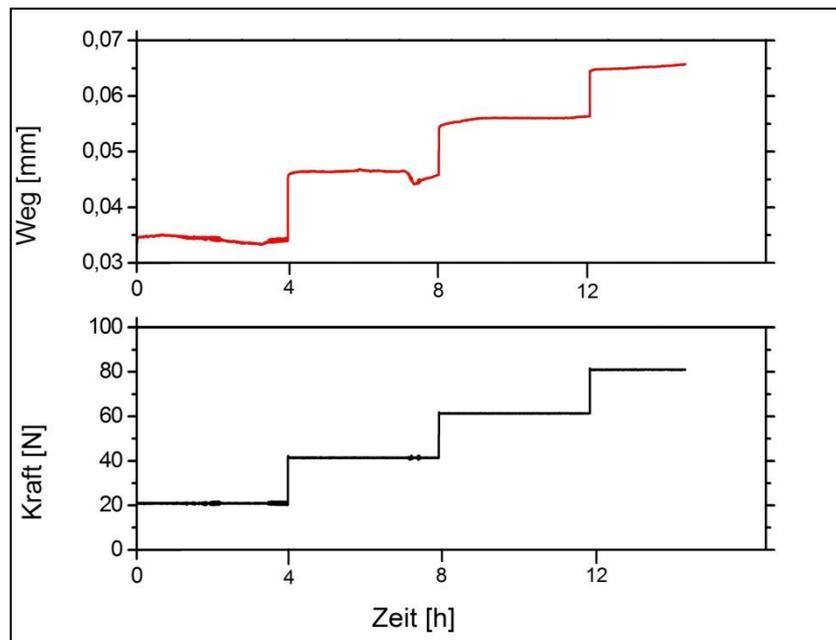


Abbildung 61: Diagramm der Probe D 30 (Glanzbrand)

5.4.2 Auswertung der Messkurven

Im Kapitel 4.6.2 Statischer Stufentest ist die Auswertung des Graphen geschildert.

5.4.2.1.1 Biegefestigkeitswerte Gruppe C und D

Die Auswertung der Weg-Zeit- und Kraft-Zeit-Diagramme des statischen Stufentests ergaben folgende Biegefestigkeitswerte im Mittel (siehe Tabelle 13 und Abbildung 62):

Mit einem Mittelwert von 64,81 MPa zeigt Gruppe 1 des Titanbrandes die größte Biegefestigkeit der beiden Brände. Die Oberflächenbearbeitung „Glanzbrand“ (3) weist beim Zirkoniumdioxidbrand (56,38 MPa) den höchsten Wert auf und beim Titanbrand (62,13 MPa) den zweitgrößten Wert. Die

Referenzgruppe „as-fired“ (1) des Zirkoniumdioxidbrandes liegt mit 41,78 MPa im Mittel hinter der Biegefestigkeit der Gruppe 3. Der Oberflächenzustand „beschliffen“ (2) hat beim Titanbrand (24,46 MPa) und beim Zirkoniumdioxidbrand (21,92 MPa) die kleinsten Festigkeitswerte. Gruppe 4 zeigt bei beiden Bränden fast den identischen Wert.

Tabelle 13: Biegefestigkeitswerte des statischen Stufentests

Oberflächenzustand	Titanbrand [MPa] Gruppe C	Zirkonoxidbrand [MPa] Gruppe D
as-fired (1)	64,81 ± 7,45	41,78 ± 5,43
beschliffen (2)	24,46 ± 1,66	21,92 ± 10,18
Glanzbrand (3)	62,13 ± 5,23	56,38 ± 9,85
poliert (4)	34,95 ± 6,5	33,3 ± 7,38

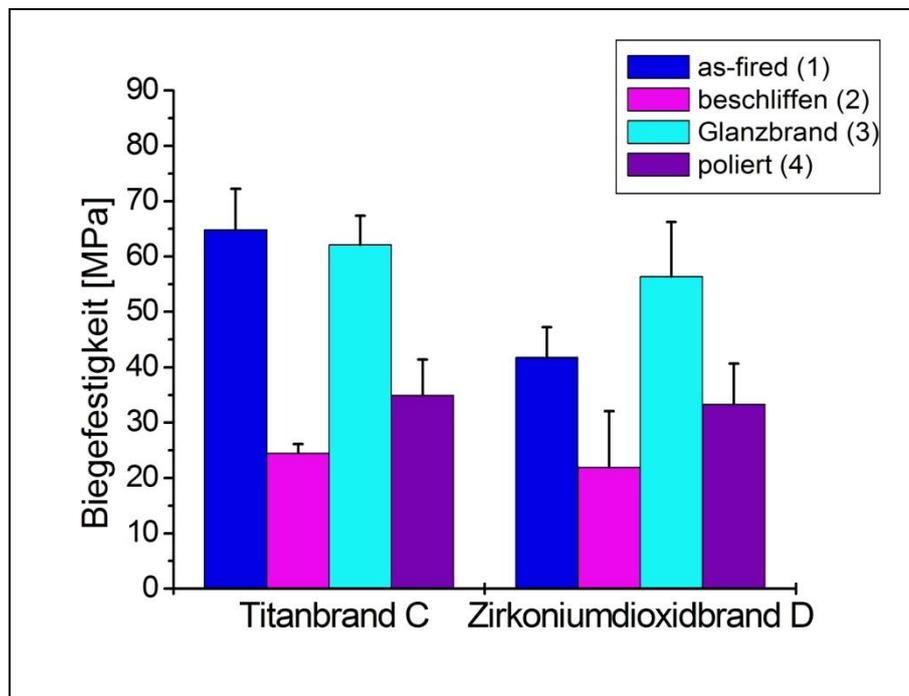


Abbildung 62: Vergleich Biegefestigkeit statischer Stufentest

5.4.2.1.2 Darstellung Kraftstufen ΔF , Zeit auf der Kraftstufe ΔF bis zum Bruch und Gesamtzeit t bis zum Bruch des statischen Stufentests

In Tabelle 14 ist die tabellarische Auswertung der Messkurven des statischen Stufentests der Gruppe C ersichtlich. Dargestellt ist die Kraftstufe, die Gesamtzeit t in Stunden und die Kraft F in Newton, bei welchen der Bruch der Probe erfolgte. Auch wird die Kraft F in Newton bei welcher der erste Riss erfolgte, der Weg in Millimeter des Prüfstempels und die Zeit Δt in Stunden gezeigt, die auf einer Kraftstufe bis zum Bruch ablief. Die Gruppe C1-10 mit dem Oberflächenzustand „as-fired“ ist blau und die Gruppe C11-20 mit dem Zustand „beschliffen“ ist in der folgenden Tabelle rötlich unterlegt. Die Gruppe C21-30, welche mit einem Glanzbrand versehen wurden, ist grün und die Gruppe 31-40 mit dem Oberflächenzustand „poliert“ ist lila dargestellt. Besonders aus den Graphen der Oberflächenzustände „beschliffen“ (2) und „poliert“ (4) ist ersichtlich, dass es kaum bis gar keine Rissbildung bei diesen Gruppen gab. Es ist zu erkennen, dass der Oberflächenzustand „as-fired“ (1) bei Stufe 6, der Zustand „beschliffen“ (2) Beginn Stufe 2, die Gruppe „Glanzbrand“ (3) auf Stufe 4 und Gruppe „poliert“ (4) auf den Stufen 2 und 3 gebrochen sind.

Tabelle 14: Werte der Gruppe C (Titanbrand)

Prüfkörper	Bruch auf Kraftstufe ΔF	Bruchlast F [N]	Zeit Δt [h] auf Kraftstufe bis Bruch	Gesamtzeit t [h] bis Bruch	Weg [mm] bis Bruch	1. Riss bei Kraft [N]
1	Beginn Stufe 6	121,3	0,28	20,28	1,1	21,06
2	Stufe 6	121,35	0,85	20,85	1,1	21,06
3	Stufe 6	121,35	0,24	20,24	1,1	41,28
4	Ende Stufe 6	101,27	3,93	19,94	1,1	21,11
5	Ende Stufe 6	101,18	3,19	19,19	1,11	20,93
6	Beginn Stufe 6	121,22	0,38	20,38	1,1	20,97
7	Ende Stufe 6	101,22	3,64	19,64	1,1	21,06
8	Ende Stufe 6	101,22	3,16	19,16	1,1	21,06
9	Beginn Stufe 6	121,26	0,48	20,48	1,1	20,93
10	Ende Stufe 5	81,71	3,64	19,64	1,1	40,7
11	Beginn Stufe 2	41,12	0,04	4,03	0,02	

12	Beginn Stufe 2	41	0,04	4,04	0,02	21
13	Beginn Stufe 2	41,12	0,11	4,04	0,02	
14	Beginn Stufe 2	41,12	0,04	4,35	0,02	
15	Beginn Stufe 2	41,12	0,04	4,04	0,02	20,96
16	Beginn Stufe 2	41,12	0,04	4,04	0,02	
17	Beginn Stufe 2	41,12	0,04	4,04	0,02	
18	Beginn Stufe 2	41,12	0,04	4,04	0,02	29,4
19	Beginn Stufe 2	41,12	0,04	4,04	0,02	
20	Beginn Stufe 2	41,12	0,04	4,04	0,02	
21	Stufe 4	81,18	0,41	12,41	0,05	61,42
22	Ende Stufe 4	81,23	3,62	15,62	0,05	20,73
23	Mitte Stufe 4	81,18	2,23	14,27	0,05	20,87
24	Ende Stufe 4	81,23	3,18	15,18	0,05	20,87
25	Mitte Stufe 4	81,18	2,96	14,96	0,05	
26	Mitte Stufe 4	81,27	2,43	14,43	0,05	
27	Ende Stufe 4	81,18	3,8	15,81	0,05	20,87
28	Ende Stufe 4	81,23	3,62	15,81	0,05	20,78
29	Ende Stufe 4	81,18	3,24	15,24	0,05	20,83
30	Ende Stufe 4	81,13	3,85	15,85	0,05	20,78
31	Stufe 2	40	0,4	4,4	0,03	
32	Stufe 2	40	0,37	4,4	0,03	
33	Stufe 3	60	0,93	4,93	0,03	
34	Stufe 2	40	0,9	4,9	0,03	
35	Stufe 3	60	0,01	4,01	0,03	
36	Stufe 3	60	0,89	4,89	0,03	
37	Stufe 2	40	0,7	4,06	0,03	
38	Stufe 2	40	0,65	4,65	0,03	
39	Stufe 3	60	0,9	4,9	0,03	
40	Stufe 3	60	0,04	4,04	0,03	

In der folgenden Abbildung 63 sind die Werte der Tabelle 14 anschaulich dargestellt.

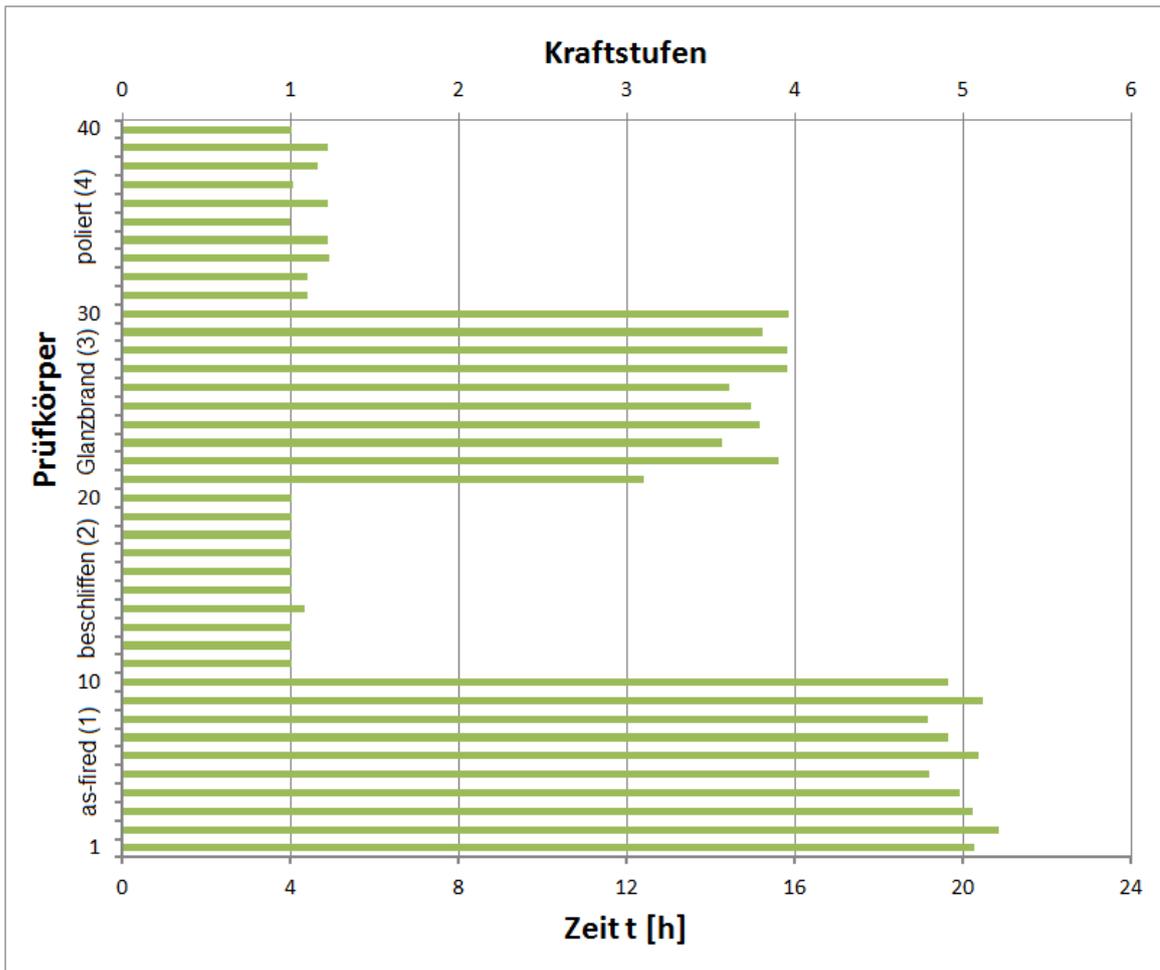


Abbildung 63: Darstellung der Werte Gruppe C (Titanbrand)

In der nachfolgenden Tabelle 15 ist die tabellarische Auswertung der Messkurven der Gruppe D dargestellt. Die Darstellung ist identisch wie bei Gruppe C in Tabelle 14. Hieraus ist zu erkennen, dass bei allen Gruppen eine Rissbildung stattgefunden hat, insbesondere bei den Gruppen 3 und 4. Die Kraftstufen auf denen der Bruch erfolgte variieren beim Zirkoniumdioxidbrand (Gruppe D) mehr als beim Titanbrand (Gruppe C).

Tabelle 15: Werte der Gruppe D (Zirkoniumdioxidbrand)

Prüfkörper	Bruch auf Kraftstufe ΔF	Bruchlast F [N]	Zeit Δt [h] auf Kraftstufe bis Bruch	Gesamtzeit t [h] bis Bruch	Weg [mm] bis Bruch	1. Riss bei Kraft [N]
1	Stufe 4	81,89	0,89	12,9	0,25	20,78
2	Stufe 4	81,84	0,86	12,86	0,25	20,68
3	Mitte Stufe 4	81,75	2,18	14,18	0,25	20,65
4	Ende Stufe 3	61,33	3,59	11,6	0,24	20,87
5	Beginn Stufe 4	81,79	0,1	12,01	0,25	20,87
6	Mitte Stufe 4	81,71	1,45	13,46	0,25	20,78
7	Ende Stufe 3	61,46	3,65	11,65	0,24	20,78
8	Stufe 3	61,46	3,06	11,06	0,24	20,78
9	Beginn Stufe 4	81,88	0,89	12,9	0,25	
10	Stufe 4	81,75	3,83	15,83	0,25	
11	Beginn Stufe 2	40,73	0,26	4,3	0,02	
12	Stufe 2	41,08	1,39	5,4	0,02	
13	Stufe 2	41,17	2,16	6,16	0,02	
14	Stufe 2	41,08	0,08	7,96	0,02	
15	Beginn Stufe 2	41,3	0,27	4,27	0,02	
16	Ende Stufe 1	20,83	3,73	3,73	0,02	20,87
17	Beginn Stufe 2	41,2	0,07	4,1	0,02	20,83
18	Ende Stufe 1	20,87	3,71	3,71	0,01	20,87
19	Ende Stufe 1	20,78	3,79	3,79	0,01	
20	0	0	0	0	0	
21	Stufe 4	80,96	0,9	13,01	0,06	41,48
22	Beginn Stufe 4	81,05	0,75	0,75	0,07	41,48
23	Stufe 4	81,05	1,55	13,55	0,07	
24	Ende Stufe 3	61,37	0,38	11,8	0,06	
25	Stufe 3	80,96	0,71	12,71	0,07	
26	Stufe 3	81,14	1,56	13,57	0,07	
27	Ende Stufe 3	61,42	3,02	11,02	0,06	
28	Ende Stufe 3	61,46	3,69	11,69	0,06	
29	Stufe 4	80,91	2,15	14,16	0,07	
30	Stufe 4	81	0,16	12,16	0,07	
31	Mitte Stufe 2	41,79	1,5	5,5	1,26	20,92
32	Beginn Stufe 2	41,79	0,21	4,21	1,26	
33	Mitte Stufe 2	41,75	1,48	5,5	1,26	
34	Beginn Stufe 2	41,66	0,02	4,02	1,25	
35	Beginn Stufe 3	60,79	0,04	8,04	1,29	
36	Mitte Stufe 2	41,66	2,36	6,36	1,26	
37	Beginn Stufe 3	60,93	0,07	8,07	1,29	
38	Beginn Stufe 2	41,7	0,02	4,02	1,26	

39	Beginn Stufe 3	61,02	0,01	8,01	1,29	
40	Beginn Stufe 3	60,93	0,08	8,08	1,29	

In der nachfolgenden Abbildung 64 ist Tabelle 15 vereinfacht abgebildet.

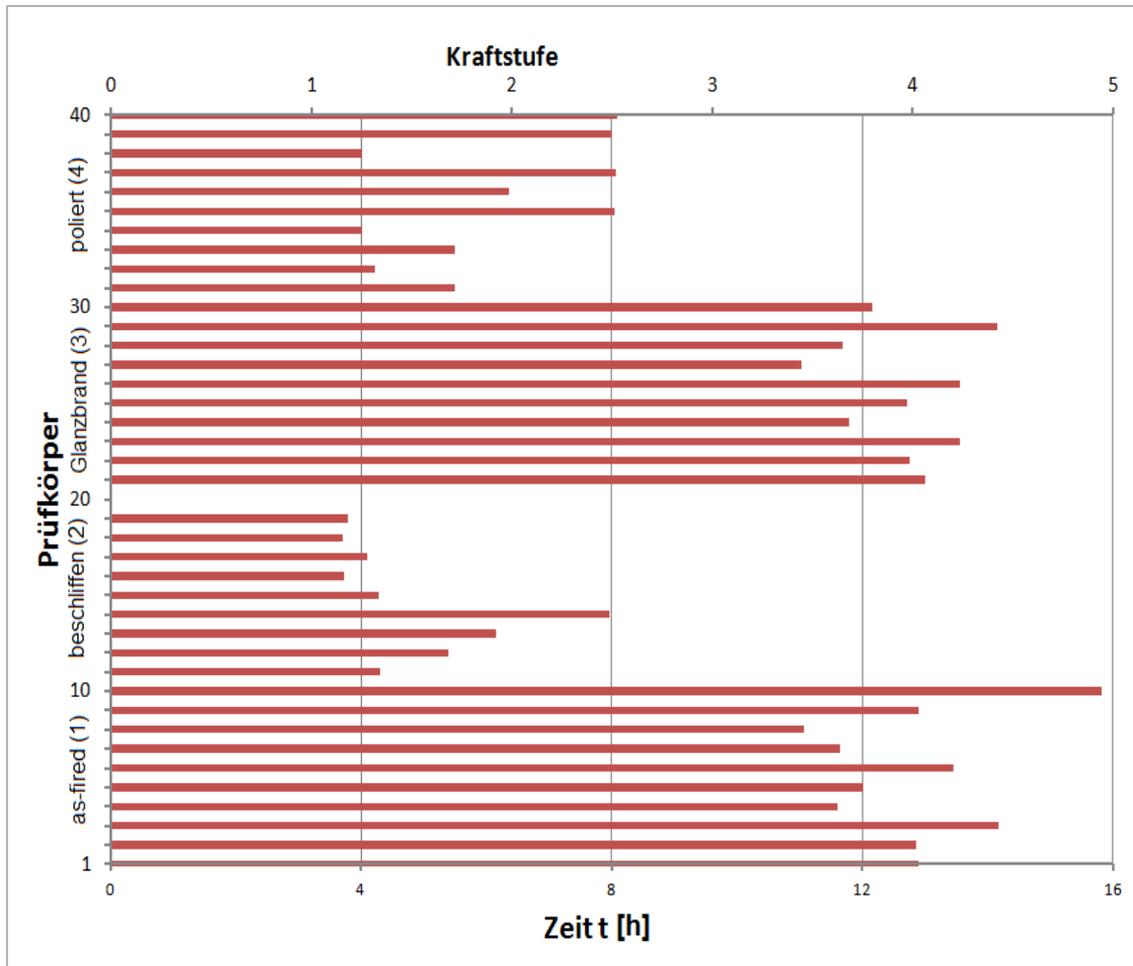


Abbildung 64: Darstellung der Werte Gruppe D (Zirkoniumdioxidbrand)

5.4.3 Dynamischer Stufentest

Anhand der Gruppen E (Titanbrand) und F (Zirkoniumdioxidbrand) wurde der dynamische Stufentest durchgeführt.

5.4.3.1 Exemplarische Messkurven

Anschließend sind exemplarische Messkurven des dynamischen Stufentests abgebildet. Pro Prüfkörper ist ein Weg-Lastwechsel- und eine Kraft-Lastwechsel Diagramm gezeigt. In dem Weg-Lastwechsel-Graphen ist einmal das Weg-

Maximum (obere Linie) und das Weg-Minimum (untere Linie) zu sehen. Auch in dem Kraft-Lastwechsel-Graphen ist das Kraft-Maximum und Kraft-Minimum dargestellt.

Bei Probe E8 (Gruppe „as-fired“) ist eine starke Wegänderung auf Stufe 2 und 3 zu erkennen (siehe Abbildung 65). In diesem Bereich erfolgte der Bruch der Probe.

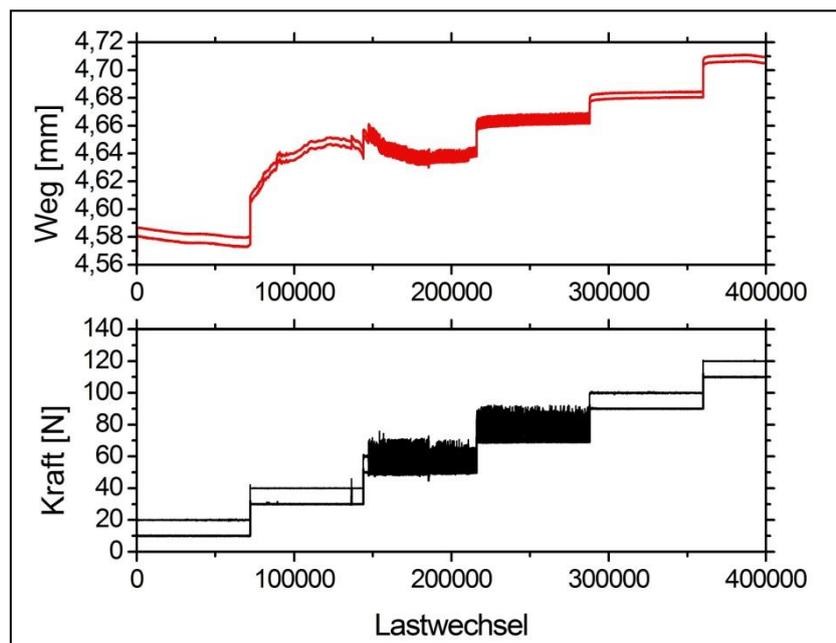


Abbildung 65: Diagramme Probe E8 (as-fired)

Anhand Probe E16 (Gruppe „beschliffen“) (siehe Abbildung 66) ist deutlich zu erkennen, dass Ende Stufe 1 bereits der Bruch eintritt.

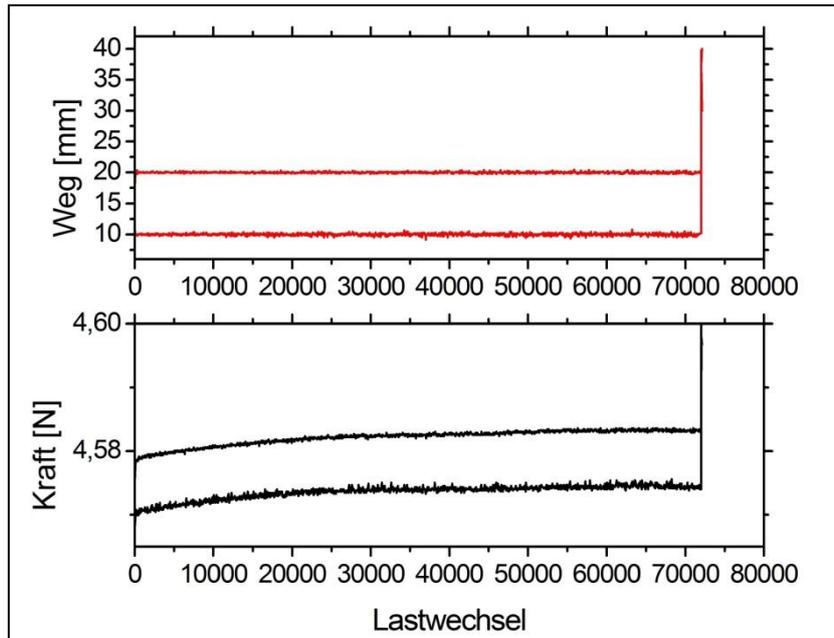


Abbildung 66: Diagramme Probe E16 (beschliffen)

Aus dem Weg-Lastwechsel-Diagramm des Prüfkörpers E24 (Gruppe „Glanzbrand“(3)) wird ersichtlich, dass bereits auf Stufe 1 die Probe gerissen und Mitte Stufe 2 gebrochen ist (siehe Abbildung 67).

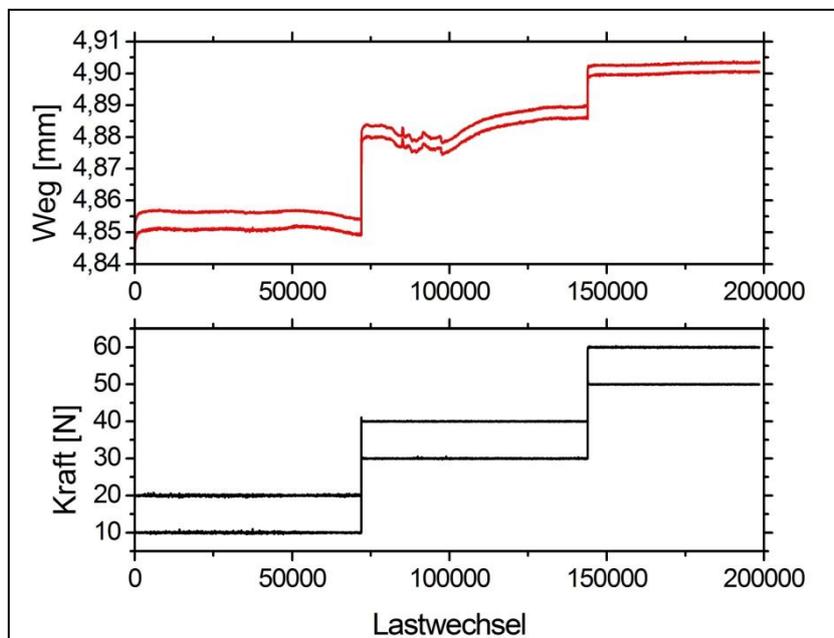


Abbildung 67: Diagramme Probe E24 (Glanzbrand)

Probe E35 (Gruppe „poliert“) (siehe Abbildung 68) ist bereits Anfang Stufe 1 gerissen. Der Bruch erfolgte direkt zu Beginn von Stufe 2. Dies wird auch anhand der Kraftänderung sichtbar.

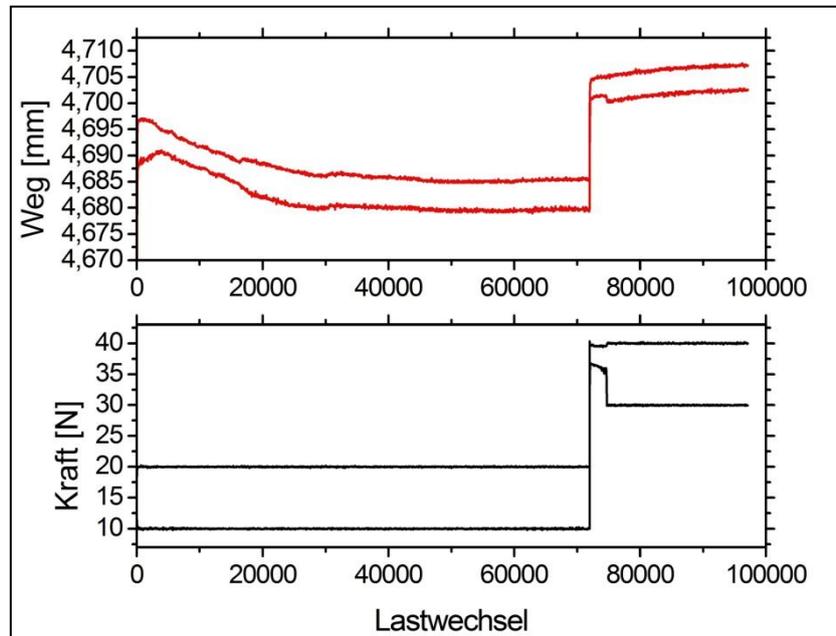


Abbildung 68: Diagramme Probe E35 (poliert)

5.4.3.2 Auswertung der Messkurven

Die Auswertung der Weg-Lastwechsel- und Kraft-Lastwechsel-Diagramme des dynamischen Stufentests hat folgende Biegefestigkeitswerte im Mittel ergeben (Tabelle 16 und Abbildung 69):

Den größten Mittelwert des dynamischen Stufentests zeigt Gruppe 3 des Zirkoniumdioxidbrandes mit 80,97 MPa. Gruppe 3 des Titanbrandes hat eine Biegefestigkeit von 55,64 MPa. Den größten Wert des Titanbrandes hat die Referenzgruppe 1 (75,92 MPa). Auch beim dynamischen Stufentest zeigt der Oberflächenzustand „beschliffen“ (2) die kleinsten Werte.

Tabelle 16: Mittelwerte Biegefestigkeit dynamischer Stufentest

Oberflächenzustand	Titanbrand [MPa] Gruppe E	Zirkonoxidbrand [MPa] Gruppe F
as-fired (1)	75,92 ± 16,58	46,33 ± 5,18
beschliffen (2)	27,64 ± 8,49	40,57 ± 9,29
Glanzbrand (3)	55,64 ± 3,93	80,97 ± 7,42
poliert (4)	43,85 ± 5,63	47,13 ± 7,65

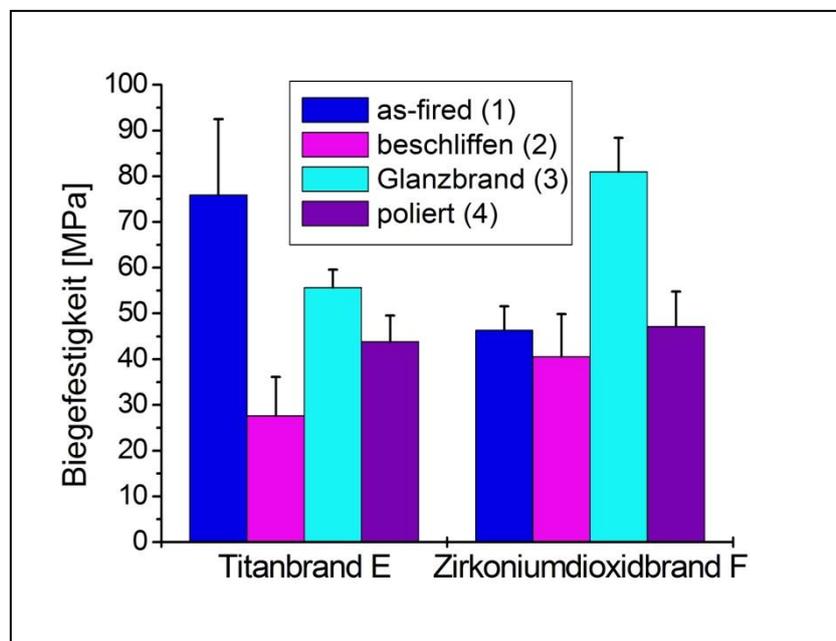


Abbildung 69: Vergleich Biegefestigkeit dynamischer Stufentest

Tabelle 17: Mittlere Anzahl Lastwechsel bis zum Bruch [2]

Oberflächenzustand	Titanbrand Gruppe E	Zirkonoxidbrand Gruppe F
as-fired (1)	357.435 ± 70.522	245.714 ± 106.557
beschliffen (2)	97.280 ± 35.007	137.497 ± 41.596
Glanzbrand (3)	234.686 ± 79.712	223.626 ± 44.006
poliert (4)	143.881 ± 38.918	139.619 ± 37.992

5.5 Vergleich Dauerfestigkeitstests

5.5.1 Vergleich Biegefestigkeit Dauerfestigkeitstests

Aus der nachfolgenden Tabelle 18 und Abbildung 70 ist ersichtlich, dass bei beiden Testverfahren der Oberflächenzustand „beschliffen“, den kleinsten Biegefestigkeitswert im Mittel aufweist. Die durchschnittlich größten Werte zeigt „Glanzbrand“ Gruppe 3. Bei den Titanbränden Gruppe C und E hat die Referenzgruppe 1 den größten Wert. Bei den Zirkoniumdioxidbränden D und F der Oberflächenzustand „Glanzbrand“ (3).

Tabelle 18: Werte Biegefestigkeit Dauerfestigkeitstests [MPa]

	as-fired (1)		beschliffen (2)		Glanzbrand (3)		poliert (4)	
Test	Stat.	Dyn.	Stat.	Dyn.	Stat.	Dyn.	Stat.	Dyn.
Titan	64,81	75,92	24,46	27,64	62,13	55,64	34,95	43,85
Zirkon-oxid	41,78	46,33	21,92	40,57	56,38	80,97	33,3	47,13

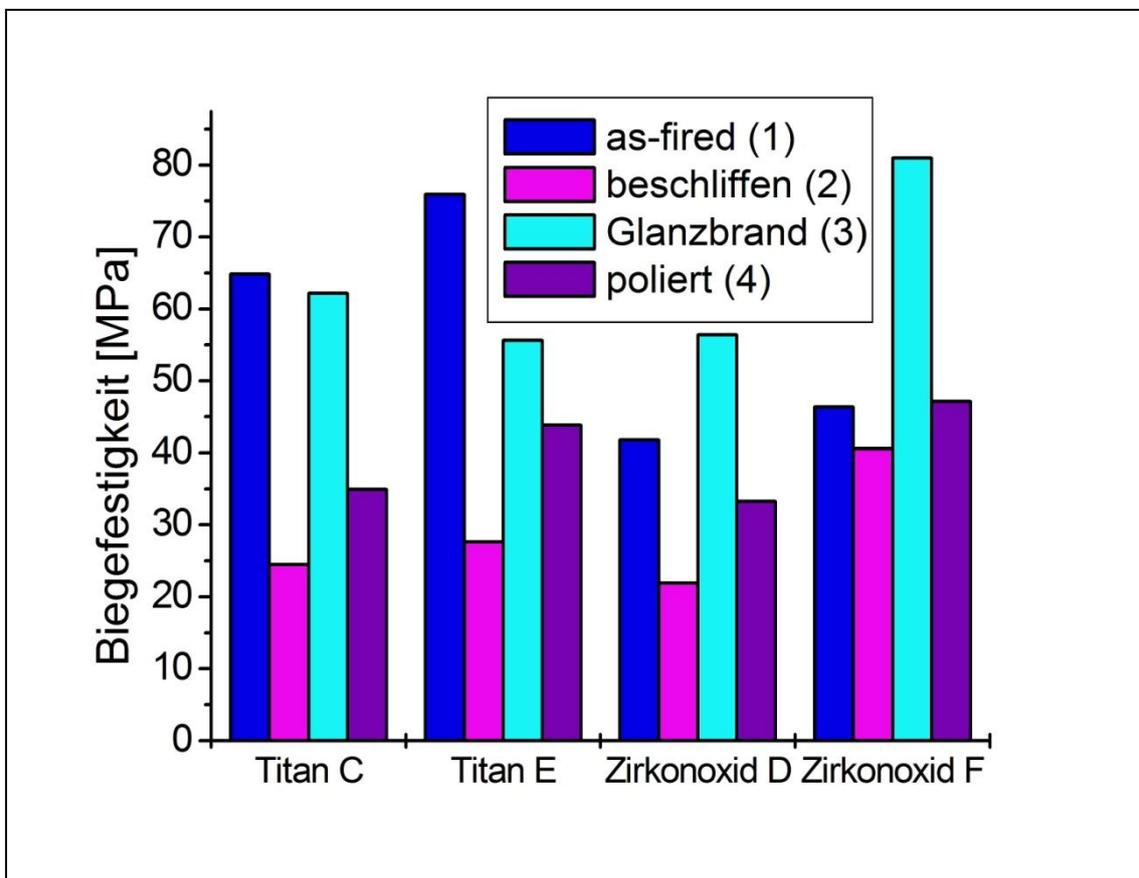


Abbildung 70: Vergleich Biegefestigkeit Dauerfestigkeitstests

5.5.2 Vergleich Spannungs- und Kraftabfall der Dauerfestigkeitstests

In der folgenden Tabelle 19 sind die Ergebnisse des Vergleichs zwischen dem biaxialen ISO-Tests und dem statischen Stufentest dargestellt (in Prozent).

Verglichen wurde die Bruchlast (Kraft [N]) und die Biegefestigkeit (Spannung [MPa]). Auffallend ist, dass sowohl der Kraft-, als auch der Spannungsabfall bei der Zirkoniumdioxidgruppe Oberflächenzustand „as-fired“ fast 100% beträgt (95,2%).

Tabelle 19: prozentuale Abnahme im Vergleich ISO-Test und statischer Stufentest

		prozentuale Abnahme	
Brand	Oberflächenzustand	Bruchlast/ Kraft [N]	Biegefestigkeit/ Spannung [MPa]
Titan	as-fired (1)	61.09%	54%
	beschliffen (2)	65%	69%
	Glanzbrand(3)	66%	54%
	poliert (4)	59.57%	57%
Zirkon- oxid	as-fired (1)	95.20%	95%
	beschliffen (2)	75.49%	95%
	Glanzbrand (3)	63.97%	61%
	poliert (4)	57.57%	68%

In Tabelle 20 ist die prozentuale Abnahme der Kraft und der Spannung im Vergleich des ISO-Tests mit dem dynamischen Stufentest zu sehen. Hier sind die prozentualen Werte der Abnahme geringer als im Vergleich zum statischen Stufentest. Der größte prozentuale Wert ist bei dem Titanbrand Gruppe „Glanzbrand“ (3) mit 67,92% Kraftabfall zu beobachten. Beim Spannungsabfall zeigt der Titanbrand Zustand „beschliffen“ (2) (65%) die größte Abnahme.

Tabelle 20: prozentuale Abnahme im Vergleich ISO-Test und dynamischer Stufentest [2]

		prozentuale Abnahme	
Brand	Oberflächenzustand	Bruchlast/ Kraft [N]	Biegefestigkeit/ Spannung [MPa]
Titan	as-fired (1)	59.32%	46%
	beschliffen (2)	64.29%	65%
	Glanzbrand (3)	67.92%	59%
	poliert (4)	53.10%	46%
Zirkon- oxid	as-fired (1)	64%	56%
	beschliffen (2)	55%	54%
	Glanzbrand (3)	62.60%	45%
	poliert (4)	50.19%	54%

5.6 T-Test

Der t-Test wurde durchgeführt, um zu bestimmen, ob sich die Biegefestigkeitswerte im Mittel zweier Stichproben statistisch signifikant unterscheiden. Hierbei wurde jede der sechs Gruppen (A, B, C, D, E und F), als auch die Mittenrauwerte der Gruppen A und B untersucht. Jede dieser Gruppen wurde innerhalb der Gruppe sowie untereinander der gleichen Testverfahren gegenüber gestellt. (Siehe Anhang 10.1 T-Test, Seite 152)

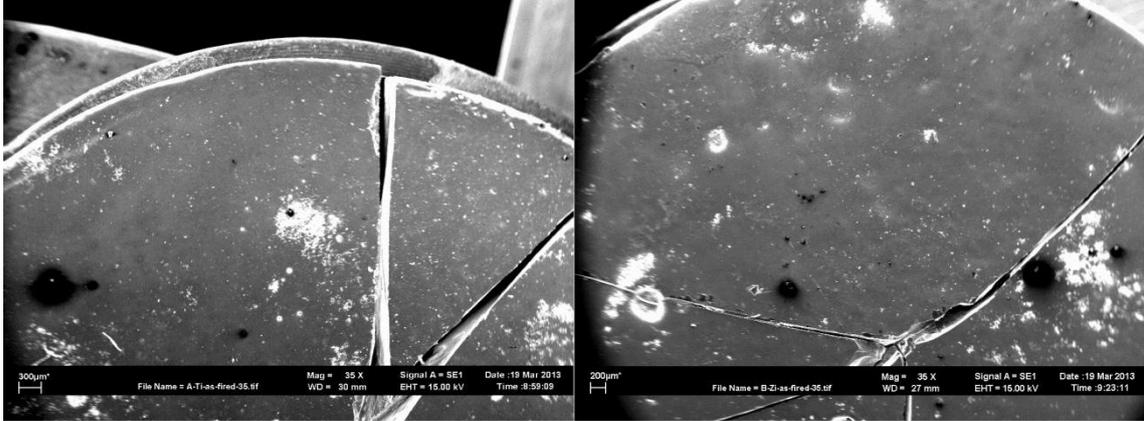
5.7 Rasterelektronenmikroskopische Auswertung

Nachfolgend sind die Rasterelektronenmikroskopbilder der Gruppe A Titanbrand und B Zirkoniumdioxidbrand des ISO-Tests, jeweils in 35-, 500- und 1000facher Vergrößerung, dargestellt. Zum Vergleich der verschiedenen Oberflächenbearbeitungen, wurden diese in der jeweiligen Vergrößerung gegenüber gestellt.

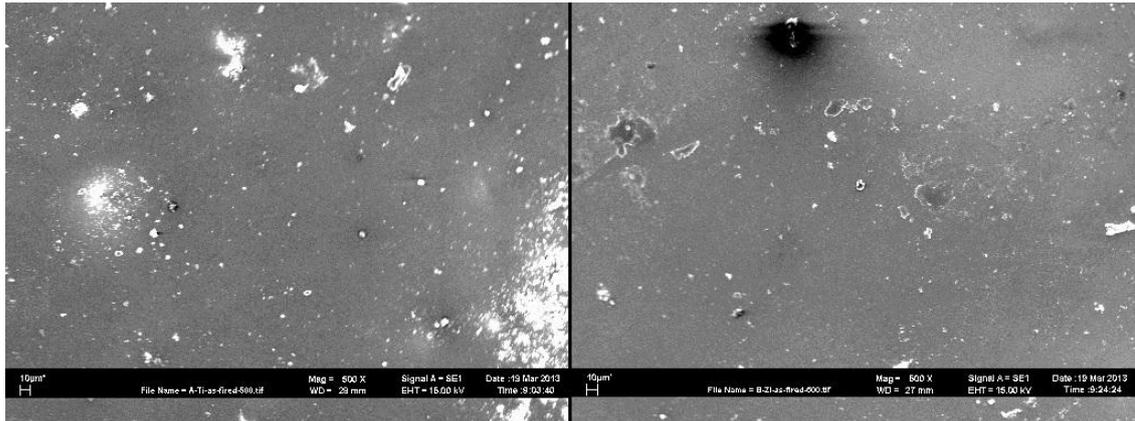
In Abbildung 71 sind die Proben der Gruppen A und B mit dem Oberflächenzustand „as-fired“ dargestellt. In der 35fachen Vergrößerung sind

die Bruchverläufe der Proben zu sehen. In allen drei Vergrößerungen ist eine relativ homogene Oberfläche sichtbar. Die Oberfläche wird durch weiße Punkte und dunkle Punkte mit weißer Randlinie unterbrochen, die auf Verunreinigungen hindeuten.

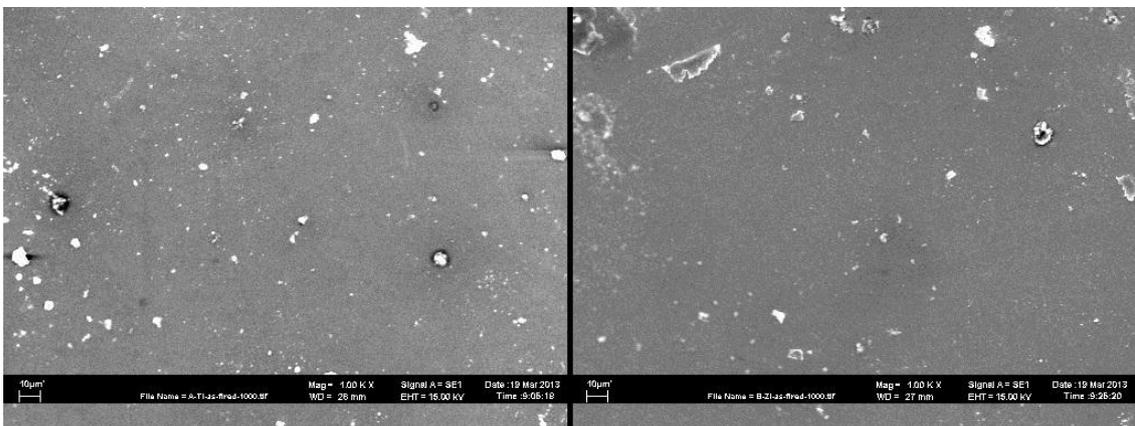
Titan as-fired (1)	Zirkonoxid as-fired (1)
---------------------------	--------------------------------



35 fach vergrößert



500 fach vergrößert



1000 fach vergrößert

Abbildung 71: REM-Bilder Oberflächenzustand as-fired (1)

In Abbildung 72 ist der Oberflächenzustand 2 zu erkennen. Deutlich in der 35fachen Vergrößerung sind ebenfalls die Bruchverläufe zu sehen und tiefe Riefen unterschiedlichen Ausmaßes in Schleifrichtung. Bei dem Titanbrand erscheinen die Riefen ungleich tief. Dies wird durch abwechselnd große und kleine weiße Linien deutlich. Beim Zirkoniumdioxidbrand hingegen sind die Linien gleichmäßiger verteilt und mit weniger Unterschied in der Tiefe und Größe. Bei beiden Bränden sind anhand von weißen und schwarzen Flecken Verunreinigungen der Proben zu sehen. In der 500fachen Vergrößerung sind wabige, zerklüftete Strukturen zu erkennen, welche in der 1000fachen Vergrößerung noch besser dargestellt sind. Das Aussehen dieser Strukturen ist bei beidem Bränden nahezu identisch.

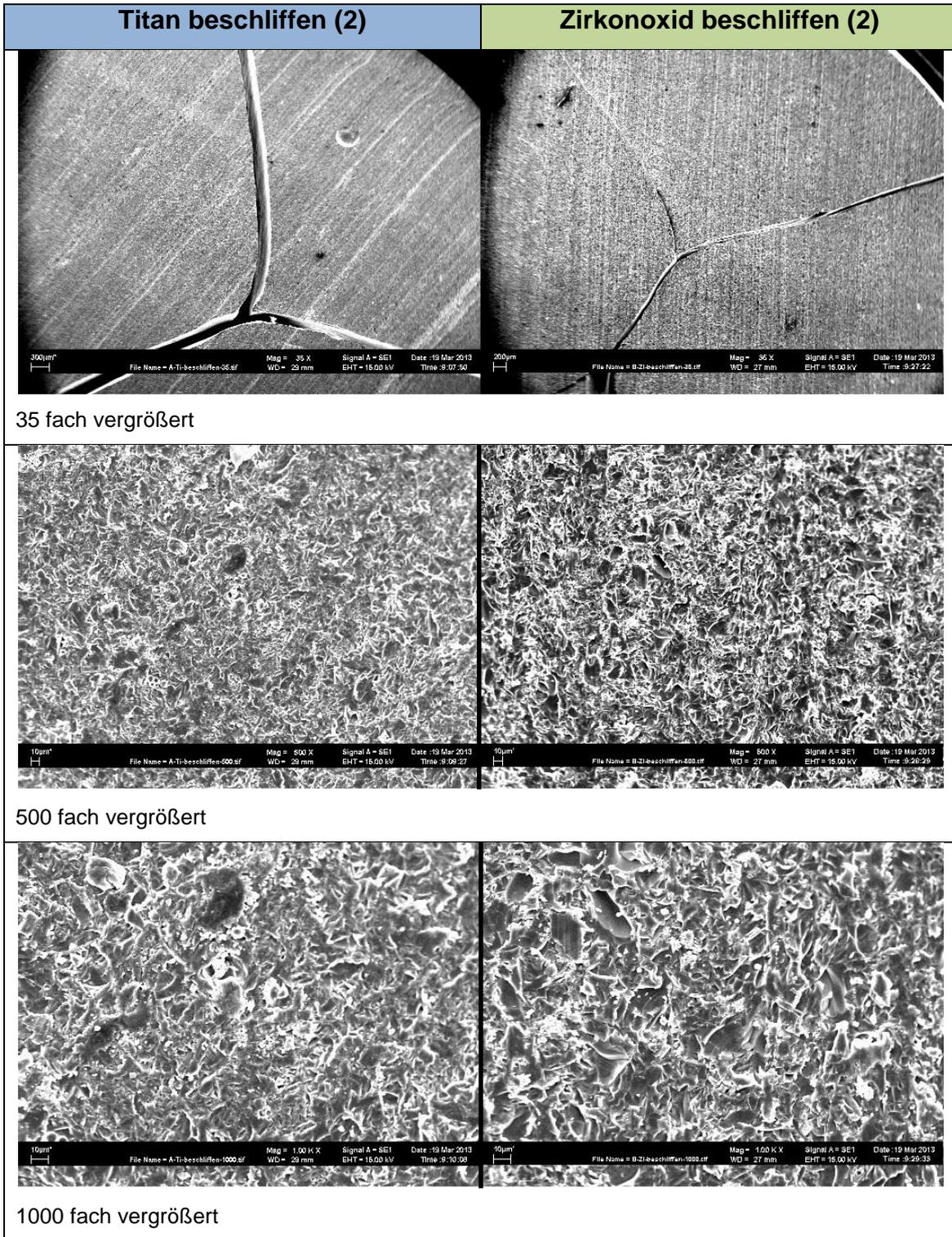


Abbildung 72: REM-Bilder Oberflächenzustand beschliffen (2)

Abbildung 73 zeigt die Oberflächenbearbeitung „Glanzbrand“. Zu sehen in der 35fachen Vergrößerung ist ebenfalls der deutliche Verlauf der Risse der beiden

Proben. Deutlich zu erkennen ist, dass die Risse in der Mitte der Proben, in der der Stempel angreift, ihren Ursprung haben und nach außen verlaufen. Bei dem Prüfkörper des Titanbrandes ist deutlich zu erkennen, dass ein größeres Stück an einer Risslinie abgeplatzt ist. Bei beiden Proben sind trotz Glanzbrand leichte Riefen bzw. Schleifspuren zu sehen. Erstaunlicherweise sind diese in der 500- und 1000fachen Vergrößerung nicht mehr dargestellt. Die Oberfläche erscheint hier homogen und ist mit weißen Punkten, die auf Lufteinschlüsse und/oder Abplatzungen hindeuten, unterbrochen.

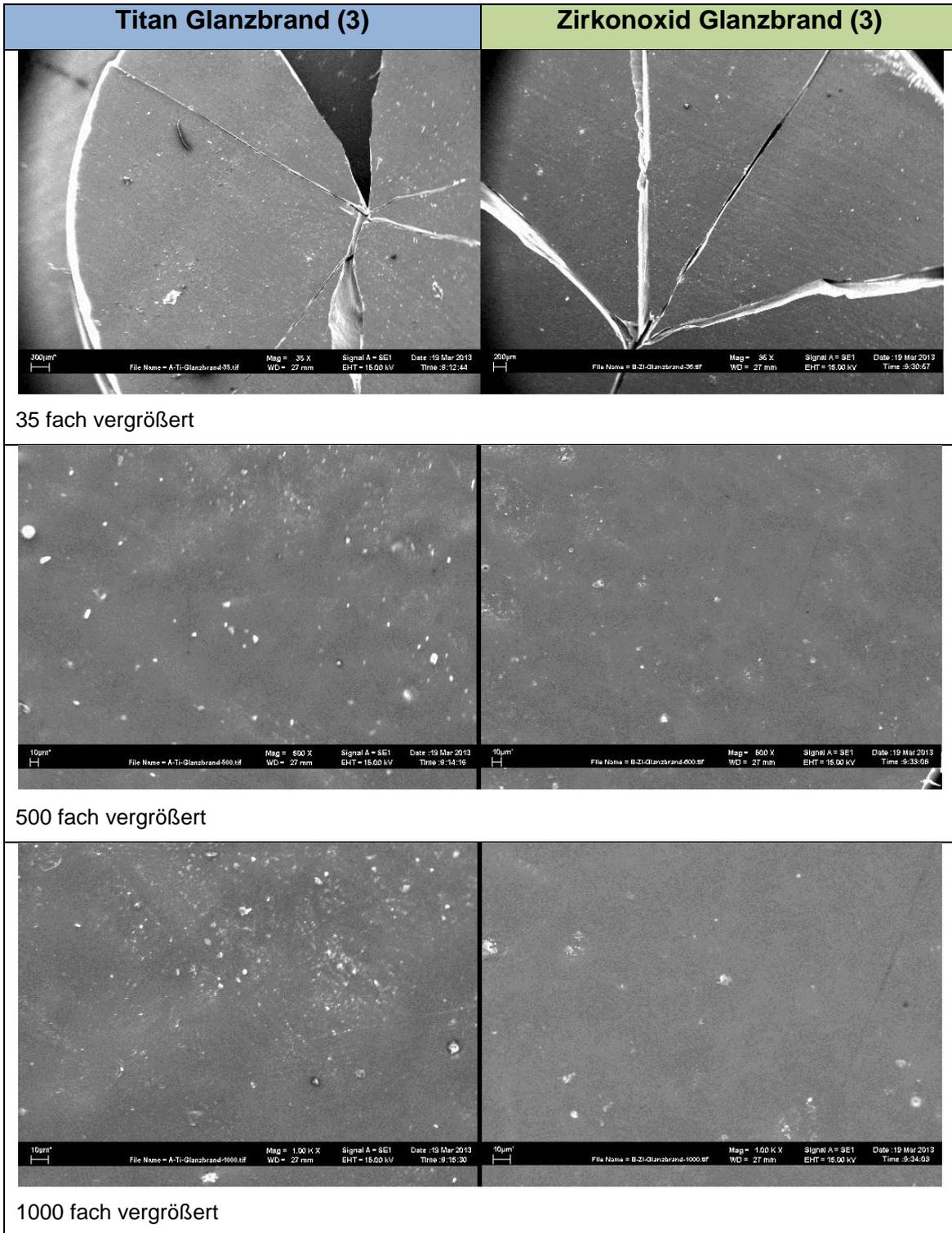


Abbildung 73: REM-Bilder Oberflächenzustand Glanzbrand (3)

Die REM-Bilder der Abbildung 74 zeigen den Zustand 4. Hier ist in der 35fachen Vergrößerung zu erkennen, dass die Risse der Proben näher

beieinander liegen als bei den anderen Oberflächenzuständen. Auch hier sind noch leichte Schleifspuren zu erkennen, die bei den höheren Vergrößerungen nicht mehr zu sehen sind. Die 500- und die 1000fach vergrößerten Aufnahmen zeigen auch wabige Strukturen, wie die Bearbeitung 2, allerdings etwas weniger zerklüftet und nicht so spitz.

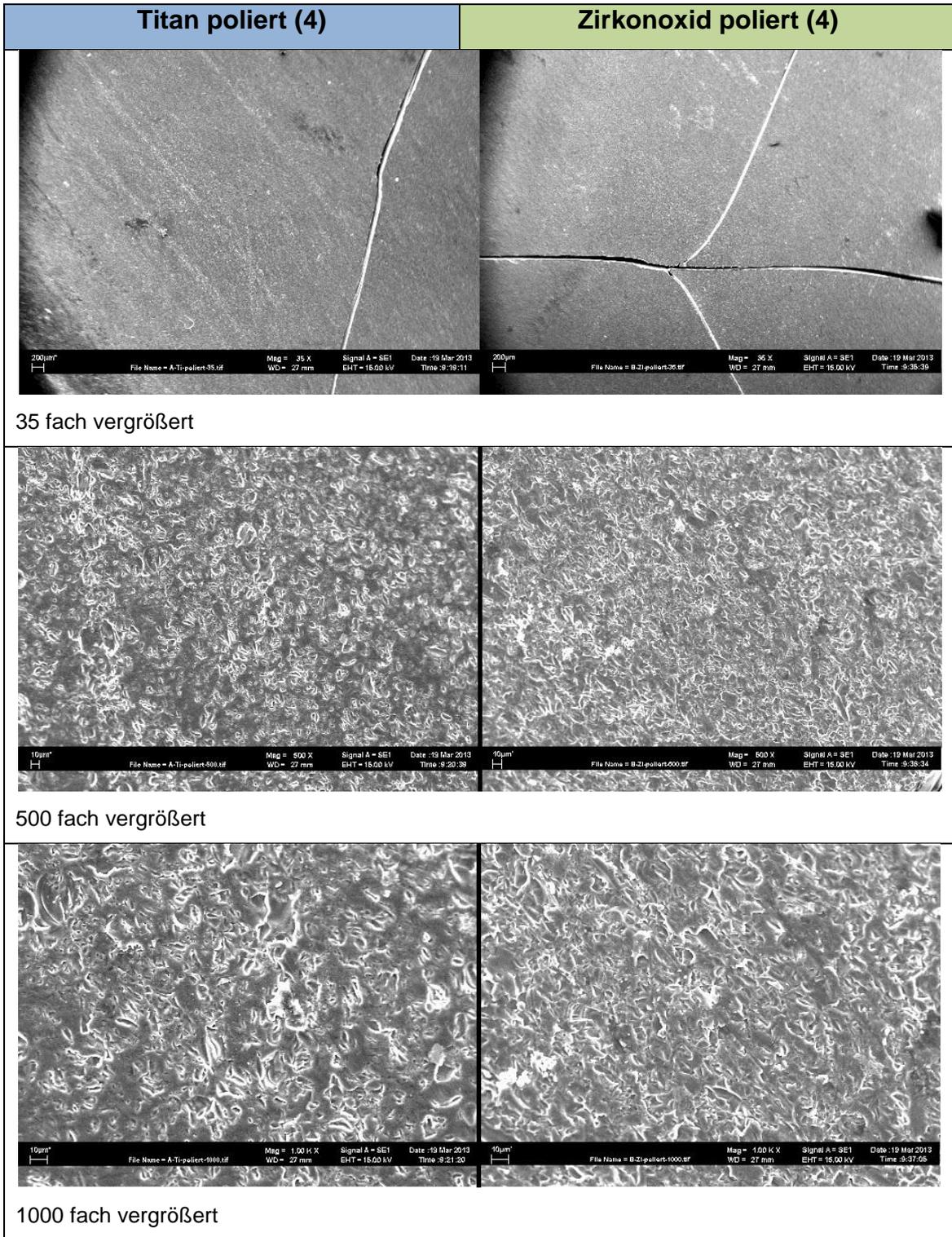


Abbildung 74: REM-Bilder Oberflächenzustand poliert (4)

6 Diskussion

6.1 Allgemein

Ziel dieser In-Vitro Untersuchung war es den Einfluss der Oberflächenbearbeitung der Aufbrennkeramik Triceram® auf die Biegefestigkeit zu untersuchen. Diese Keramik ist aufgrund der Möglichkeit sie als Verblendmaterial auf einem Metall- und auch auf einem Keramikgerüst anwenden zu können besonders interessant. Der klinische Erfolg von Triceram® beruht auf dessen Biegefestigkeit und auf dessen Dauerfestigkeitsverhalten. Daher ist es wichtig, dass die Biegefestigkeit In-vitro getestet wird, um klinische Aussagen über die Beständigkeit der Restauration treffen zu können. Bei In-vitro-Untersuchungen von keramischen Werkstoffen werden entweder geometrisch definierte Prüfkörper in einer standardisierten Versuchsanordnung getestet (Werkstoffprüfung) oder anatomische und klinische Verhältnisse untersucht (Bauteilprüfung). Da letzteres mit Triceram® bereits durchgeführt wurde, befasst sich diese Arbeit ausschließlich mit geometrisch genormten Prüfkörpern und somit mit der Werkstoffprüfung. Hierbei musste darauf geachtet werden, dass die Resultate der Untersuchungen reproduzierbar und untereinander vergleichbar waren.

Im Herstellungsprozess einer Aufbrennkeramik ist die Bearbeitung der Oberfläche unumgänglich. Laut *Baltzer* ist jede Oberflächenbearbeitung ein Angriff auf das Material, wobei Schleifspuren und Risse fahrlässig eingebracht werden. Hierdurch leidet automatisch die Belastbarkeit und Festigkeit der Keramik. Daher stellte sich die Frage, wie die Festigkeitswerte von Triceram® auf diesen Einfluss reagieren [6].

Die Vergleichbarkeit dieser Arbeit mit bereits durchgeführten In-vitro-Studien zur Biegefestigkeit und Ermüdungsverhalten von Dentalkeramiken war nur eingeschränkt möglich, da die verschiedenen Versuchsanordnungen voneinander abwichen. Auch variierten die Keramikmaterialien. Auffallend oft wurde die biaxiale Biegefestigkeit von Keramikgerüstmaterialien, wie

Zirkoniumdioxid, getestet. Über die biaxiale Biegefestigkeit von Verblendkeramiken liegen weniger Untersuchungen vor.

6.2 Diskussion von Material und Methodik

Die Beständigkeit einer keramisch verblendeten Restauration hängt hauptsächlich von den Eigenschaften der Verblendkeramik ab. Deshalb wird in dieser In-vitro Untersuchung die biaxiale Biegefestigkeit und das Ermüdungsverhalten der Verblendkeramik Triceram® unter dem Einfluss der Oberflächenbearbeitung getestet. Laut *Fischer* versagt die Aufbrennkeramik weitaus häufiger als das Gerüstmaterial. Als häufigste Ursache nennt er das sogenannte „Chipping“. Hierbei kommt es zum plötzlichen Abplatzen der Verblendung vom Gerüst [27].

Um möglichst praxisgetreue Verhältnisse zu simulieren, wurden die Proben für den Versuchsaufbau nach Herstellerangaben angefertigt. Des Weiteren wurde die Oberfläche der Verblendkeramik Triceram® gemäß dem Herstellungsprozess einer Restauration weiter bearbeitet. Hierbei wurden die einzelnen Bearbeitungsschritte, wie das Beschleifen der Okklusionskontakte, Polieren oder eine Glasur nachgeahmt. Aufgrund der vielen Herstellungsschritte der Proben in dieser Arbeit konnten währenddessen auch viele Fehler entstehen. Um diese bei der Probenherstellung zu vermeiden, die das Ergebnis hätten beeinflussen können, wurden vor jedem Schritt die Materialien und Instrumente getestet und Vorversuche durchgeführt. Auch alle Arbeitsschritte wurden von derselben Person ausgeführt.

6.2.1 Herstellung der Prüfkörper

Das Ziel der Prüfkörperherstellung war es, den biaxialen Biegeversuchs nach ISO Norm 6872 zu erfüllen. Hierbei musste gewährleistet sein, dass alle Proben genormt und reproduzierbar waren. Laut Norm mussten die Proben einen Durchmesser von 12 bis 16 mm, eine Dicke von $1,2 \pm 0,2$ mm und eine Parallelitätstoleranz von 0,05 mm aufweisen. Um diese Anforderungen zu

erfüllen wurden die Proben mittels Pelletor-System® hergestellt. Es wurde von Zahntechnikermeister *Gerald Wölz* speziell entwickelt, um für Prüfverfahren nach ISO-Normen zylinderförmige Körper aus einer Dentalkeramik herzustellen.

Um die Biegefestigkeitswerte der Proben miteinander vergleichen zu können, war es wichtig, einheitliche Prüfkörper herzustellen. Laut *Spintzyk* erzielt das Pelletor-System® gleichmäßige Ergebnisse von Prüfkörpern [80]. Zu Beginn der Prüfkörperherstellung wurde getestet, ob reproduzierbare und genormte Prüfkörper angefertigt werden konnten. Erst als die Größen aller hergestellten Proben nahezu identisch waren, wurde mit der Herstellung begonnen. Es musste zudem auch auf Fehler während der Verarbeitung der Triceram®-masse mit dem Pelletor-System® geachtet werden. Hierbei muss bedacht werden, dass der Herstellungsprozess manuell und nicht automatisiert durchgeführt wurde. Fehler im Gefüge oder Abweichungen im Herstellungsprozess konnten die Eigenschaften des Materials beeinflussen und somit Auswirkungen auf die Messwerte haben.

Ein weiterer Vorteil des Pelletor-Systems® ist, dass die Grünlinge durch fallen lassen des Schlagbolzens gut verdichtet wurden. In der Praxis wird dies durch das Vibrieren der Keramikmasse während des Modellierens erzielt. Des Weiteren wird in der Literatur beschrieben, dass hierdurch eine große Dichte der Teilchen und somit eine große Homogenität erreicht wird. Dies reduziert den Brennschwund der Keramikmasse [31].

Da Einschlüsse und Verunreinigungen Ursachen für Risse in einer Keramik darstellen, wurden nach jedem Herstellungsdurchgang alle verwendeten Instrumentarien gereinigt. Hierbei wurde darauf geachtet, dass keine Keramikpartikelrückstände vorzufinden waren.

Um das Beschleifen der Prüfkörper zu testen, wurden auch hier Vorversuche durchgeführt. Hierbei musste ein gleichmäßiger Abtrag aller Proben gewährleistet werden. Da die Proben nach dem Brand nicht exakt planparallel

waren, mussten diese fest am Schleif- und Poliergerät fixiert sein. Eine weitere Aufgabe stellte die Befestigung des Winkelstücks und die gesicherte Einstellung der Schleif- und Poliermaschine dar. Dementsprechend mussten diese modifiziert werden. Erst als ein gleichmäßiger Abtrag gewährleistet war, wurde mit dem Beschleifen der Proben unter Wasserkühlung begonnen. Um zu kontrollieren, dass die komplette Oberfläche beschliffen war, wurde die Oberseite der Proben mittels Filzstift geschwärzt. Sobald die Farbe komplett entfernt war, war die gesamte Oberfläche beschliffen.

Die exakte Einstellung eines gleichmäßigen Abtrags aller Proben stellte sich anhand des Schleif- und Poliergerätes als schwierig heraus. Für jeden Prüfkörper musste die Einstellung der Apparatur des Winkelstückes neu vorgenommen werden. Somit konnte nur schwer eine gleichmäßige Einstellung und Position des Gerätes gewährleistet sein. Zudem waren die Proben vor dem Schleifvorgang nicht gleichmäßig dick. Diese Abweichungen beruhten auf dem Sinterprozess während des Brennens der Proben. Deshalb wurden die Proben vermessen und gegebenenfalls nachgeschliffen bis die Abweichungen nur noch im μm Bereich lagen.

Durch das Beschleifen der Proben war es schwierig die Planparallelität zu gewährleisten, die in der ISO Norm 6872 gefordert wurde. Da allerdings die Dicke der Proben in die Berechnung der Festigkeit mit einfließt, ist dies zu vernachlässigen. Außerdem sollte anhand dieses Vorganges das Einschleifen der Okklusion und Artikulation einer Restauration im Praxisalltag simulieren. Das Einschleifen geschieht in der Praxis nur punktuell und es wird dadurch kein gleichmäßiger Abtrag erzielt. Um eine absolute Planparallelität zu erlangen, hätten die Proben, wie in einer Untersuchung von *Erdelt et al.*, mit einer Flachsleifmaschine bearbeitet werden müssen. Durch eine solche Schleifmaschine hätte auch ein gleichmäßiger Anpressdruck gewährleistet werden können. Das maschinelle Beschleifen der Proben hätte diese wohl in ihrer Dimensionierung einheitlicher gestaltet. Allerdings wäre der Praxisalltag nicht simuliert worden [21].

Da das Anrühren der Glasurmasse manuell vorgenommen wurde, können Ungenauigkeiten im Mischverhältnis vorgelegen haben. Auch die Menge der angerührten Masse, die mit einem Pinsel auf dem Proben verteilt wurde konnte variieren.

6.2.2 Materialprüfungen

Die Versuchsdurchführung und Messung wurde für den biaxialen ISO-Test und den statischen Stufentest anhand der Universalprüfmaschine Zwick Z010 (Ulm, Deutschland) durchgeführt. Die gemessenen Werte des ISO-Tests bei Eintritt des Versagens der Probe wurden mittels eines Computerprogramms Zwick testXpert® 12.0 software aufgezeichnet. Dieser automatisierte Vorgang garantiert eine Genauigkeit in der Erfassung der Daten und gestaltet somit die Fehlerwahrscheinlichkeit sehr gering.

Die Auswertung der Ergebnisse der statischen und dynamischen Stufentests erfolgte anhand der Kraft-Zeit- und Weg-Zeit-Kurven mittels Computerprogramm Microcal™ Origin®, Version 6.0 (Microcal Software Inc., Northampton, USA), und stellte sich schwierig dar. Anhand der Weg-Zeit-Kurve von manchen Proben war die Wegänderung und somit der Eintritt erster Risse oder des Bruches nur schwer erkennbar. Die hier abgelesene Bruchlast [N] konnte somit innerhalb einer Kraftstufe um ungefähr $\pm 1,6$ N ungenau sein. Wurde der Bruch auf der falschen Kraftstufe abgelesen, wären Ungenauigkeiten von ungefähr ± 20 N aufgetreten. Bei den Ergebnisswerten des statischen und des dynamischen Stufentests liegen keine großen Abweichungen vor. Auch die Kraftstufen, in der die Proben der jeweiligen Gruppen gebrochen sind, liegen nahe beieinander oder sind gar identisch. Deshalb ist davon auszugehen, dass kaum Fehler oder zu vernachlässigende Fehler in der Auswertung des Dauerfestigkeitstests aufgetreten sind. Um die Methodik zu verbessern und um entstehende Risse oder Bruchstellen der Proben besser zu erkennen, hätte ein Akustiksensoren eingesetzt werden können.

Dieser zeichnet graphisch den Beginn und das Ende eines Bruches auf. Somit kann verglichen werden ob die Bruchlast und somit das Kraftmaximum identisch ist mit dem Eintritt des Bruches der Prüfkörper [29].

Für die Berechnung der Biegefestigkeit wurde die in der ISO 6872 Norm (2015) vorgegebene Formel verwendet. Diese Formel ist laut ISO Norm für den Typ von Proben der vorliegenden Arbeit geeignet. Zu diskutieren ist, dass in die Formel verschiedene zu messende Parameter, wie Dicke und Radius der Proben, als auch die gemessene Gesamtkraft in Newton während des Bruches der Probe einfließen. Eine Fehlerquelle hätte bei der Messung von Dicke und Durchmesser der Prüfkörper vorliegen können. Deswegen wurde bei der Vermessung darauf geachtet, dass alle Werte in einem Bereich liegen und bei starken Abweichungen die betreffende Probe nochmals vermessen, um Messfehler auszuschließen. Die Berechnung der Formel erfolgt anhand des Computerprogrammes Microsoft® Office Excel® 2007. Anhand dieses Programmes wurde die Berechnung durch Zerlegung der Formel stark vereinfacht und übersichtlich dargestellt, um bei diesem Schritt Fehler zu vermeiden. Somit stellte sich die Berechnung der Biegefestigkeit als ein sicherer Schritt dar.

6.2.3 Darstellung der Proben mittels Rasterelektronenmikroskop

Von jedem Oberflächenzustand der Gruppe A und B wurden Rasterelektronenmikroskopaufnahmen nach der Versuchsdurchführung angefertigt, um die verschiedenen Oberflächenbeschaffenheiten und Rissverläufe darzustellen. Es erfolgte die Darstellung der Prüfkörper in 35-, 500-, und 1000facher Vergrößerung. Diese Vergrößerungen wurden gewählt, da bei 35facher der Rissverlauf und Schliffacetten gut erkennbar waren und ein Überblick über die Probe gewonnen werden konnte. Bei 500facher Vergrößerung konnte die Homogenität und die Oberflächenstruktur gut dargestellt werden und bei 1000facher Vergrößerung eine sehr detaillierte Übersicht gegeben werden.

Vor allem bei dem Zustand „beschliffen“ ist die Vergrößerung der Oberfläche aufgrund der wabigen und zerklüfteten Struktur deutlich zu erkennen (siehe Abbildung 72). Im Vergleich hierzu erscheint die polierte Oberfläche (Abbildung 74) weniger rau, die wabige zerklüftete Struktur hat sich etwas geschlossen. Interessanterweise zeigt der Oberflächenzustand „poliert“ die geringste Rautiefe. Dies erscheint allerdings im Vergleich zu den REM-Bildern der „as-fired“ (Abbildung 71) und „Glanzbrand“ (Abbildung 73) Zustände inhomogener.

6.2.4 Beurteilung der Versuchsmethodik

Die Materialeigenschaften einer Keramik, wie Sprödigkeit und plastische Verformbarkeit, haben großen Einfluss auf die Werkstoffprüfung. Bei einem Zugversuch treten unerwünschte Spannungen im Prüfkörper auf, die nur schwer zu bestimmen sind. Des Weiteren ist die Keramik auf Zug- um ein vielfaches empfindlicher als auf Druckbelastung. Im klinischen Alltag ist die Dentalkeramik multiaxialen Kräften ausgesetzt, die sich vektoriell in uniaxiale Kräfte zerlegen lassen. Fraglich ist, welche Kräfte im Alltag auf eine Restauration im Mund wirken. Deshalb war es naheliegend den biaxialen Biegetest nach ISO Norm 6872 mit der Verblendkeramik Triceram® durchzuführen [95].

Vorteile des biaxialen Biegeversuchs gegenüber anderen Versuchsanordnungen sind die geringere Empfindlichkeit gegenüber Verarbeitungsfehlern und verlässlichere Festigkeitswerte [30,87]. Des Weiteren wurde in einer Vergleichsstudie von *Geis-Gerstorfer* und *Kanjantra* der Einfluss des Prüfverfahrens auf die Biegefestigkeit von In-Ceram und IPS-Empress untersucht. Hierbei wurden der 3-Punkt-, 4-Punkt-Biegetest und der biaxiale Biegetest miteinander verglichen. Ein großer Vorteil des biaxialen Biegetests sei, dass aufgrund der Lagerung der Probe und der zentrischen Kraftausübung die Kanten nicht im Bereich der Biegespannung liegen. Hierdurch wird vermieden, dass der Zustand der Kanten der Prüfkörper das Ergebnis beeinflusst. Auch die Durchführung sei leichter als bei uniaxialen

Versuchsanordnungen. Besonders die Probenherstellung kann praxisnah erfolgen. In der Literatur wird beschrieben, dass der Versuchsaufbau des biaxialen Tests, wie Probendurchmesser und -dicke, Stempeldurchmesser oder Vorschubgeschwindigkeit keinen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis haben. Somit können Ergebnisse des biaxialen Tests trotz unterschiedlichen Versuchsaufbaus miteinander verglichen werden [7,30,57].

Fischer, Stawarczyk und Hämmerle haben 2008 eine Untersuchung veröffentlicht, in der sie die Biegefestigkeit von Verblendkeramiken für Zirkoniumdioxid anhand des 3- und 4-Punkt-Biegeversuchs und des biaxialen Biegetest verglichen haben. Unter den getesteten Verblendkeramiken war auch Triceram®. Interessanterweise zeigten die Festigkeitswerte bei allen drei Versuchsanordnungen, bis auf eine Ausnahme, die gleiche Verteilung. Auch alle Werte lagen nahe beieinander. Die Werte des 3-Punkt-Biegetests waren bei fast allen Keramiken am größten und die des 4- Punkt-Tests am kleinsten. Die Ergebnisse des biaxialen Versuchs lagen meistens dazwischen. Die Autoren empfahlen nicht den biaxialen Biegetest, sondern die anderen beiden Versuchsaufbauten. Sie stellten fest, dass der 4-Punkt-Versuch die Unterschiede in den Messergebnissen der verschiedenen Keramiken am besten aufzeigt. Obwohl wie oben dargestellt, der 4-Punkt-Biegeversuch in einer Testreihe mit verschiedenen Materialien bevorzugt werden soll, fällt in dieser Arbeit die Wahl zu Gunsten des biaxialen Biegetests aus. Begründet wird dies damit, dass - wie auch vorangegangen beschrieben - die Ergebnisse des biaxialen Biegetests zwischen denen des 3- und 4- Punkt-Biegeversuchs liegen. Außerdem liefern alle drei Biegefestigkeitstests ähnliche Ergebnisse [27].

Die Proben lagen mit der bearbeiteten Seite auf den Stahlkugeln der Prüfmaschinen auf. Somit erfuhr diese Seite reine Zugspannung. Wie oben aufgeführt, sind spröde Materialien aufgrund ihres Spröbruchverhaltens weitaus empfindlicher auf Zug- als auf Druckbelastung. Die Zugspannung ist verantwortlich für die Rissentstehung, die meistens an Gefügedefekten ihren

Ausgangspunkt haben. Somit war diese Versuchsanordnung für die Untersuchung der Oberflächenbearbeitungen sinnvoll, da die empfindliche, zu untersuchende Seite der Proben im Bereich der Zugbelastung lag und stark beansprucht wurde. Die Situation im Mund stellt sich allerdings genau umgekehrt dar. Durch die Belastung der Antagonisten wird Druck auf die eventuelle bearbeitete Seite der Verblendung ausgeübt. Somit liegt die Verblendung im Druckspannungsbereich. Die Verbundseite mit dem Gerüst liegt in dem Zugspannungsbereich.

Der keramische Werkstoff ist in der Mundhöhle zyklisch schwankenden Kräften nicht nur während des Kaufvorganges ausgesetzt. Diese Dauerschwellenbelastung und das Vorhandensein von kleinen Defekten, in Form von eingeschlossenen Verunreinigungen oder durch Oberflächenbearbeitungen, können zu einem subkritischen, unbemerktem Risswachstum in der Verblendung führen, bis es letztendlich durch Bruchfestigkeitsminderung zum Versagen des Werkstoffes kommt. Dieses Verhalten der Keramik beruht auf deren Eigenschaft der Sprödigkeit und nennt sich auch Sprödbbruchverhalten [31].

Deshalb ist es sehr wichtig, die mechanischen Eigenschaften der Verblendkeramik auf Dauerfestigkeit zu prüfen. Dies wurde in dieser Arbeit anhand der statischen und dynamischen Dauerfestigkeitstests untersucht. Die zyklische Belastung im Mund lässt sich durch mechanische zyklische Belastung anhand von Lastwechselspielen einer Prüfmaschine nachahmen. Allerdings sind dieser Lastwechselspiele bei einer In-vitro Untersuchung definiert über einen bestimmten Zeitraum verteilt und wirken nur in diesem Zeitraum bis zum Versagen der Proben ein. Die Belastung im Mund ist abwechslungsreicher. Diese unterliegt größeren Schwankungen in Kraft und Zeit. Dieser Vorgang lässt sich theoretisch besser mit In-vivo Untersuchungen darstellen. In der Praxis ließe sich diese Untersuchung nur mit sehr großem Aufwand realisieren, mit vermutlich nur gering abweichendem Ergebnis.

Danzer und *Lube* beschreiben, dass die Werkstoffermüdung und somit die Dauerbelastung von Keramiken als wenig untersucht gilt [12]. Auch deshalb war es interessant, das Ermüdungsverhalten von Triceram® zu prüfen. Allerdings wurde anhand der Dauerfestigkeitstests nicht der Einfluss von Speichel über einen längeren Zeitraum auf die Keramik getestet. Dies könnte eventuell in einer weiteren Versuchsreihe mit Triceram® anhand einer thermozyklischen Alterung mit Temperaturwechsel des künstlichen Speichels durchgeführt werden.

Generell lässt sich die Aussage treffen, dass diese In-vitro Untersuchung lediglich die Festigkeitswerte von genormten Triceram®-Proben untersucht und sich nur sehr schwer auf eine reale Situation im Mund eines Patienten übertragen lässt. Nicht untersucht wurden die Einflüsse von Speichel und thermozyklische Wechselwirkungen, in Form von kalten und warmen Speisen. Des Weiteren ist die Dimensionierung der Verblendung unregelmäßig und nicht genormt wie bei den vorliegenden Proben. Die Lagerung der Restauration in einer Prüfmaschine ist sehr viel starrer als im Mund des Patienten. Deshalb erzielen Festigkeitsprüfungen an Brückenkonstruktionen auf starr gelagerten Stümpfen weitaus höhere Festigkeitswerte [47,48]. Dies stellten auch *Stawarczyk* und *Fischer* in einer Untersuchung aus dem Jahr 2008 fest. In dem Versuchsaufbau nach *Voss* hatte Triceram® auf einem Zirkoniumdioxidgerüst Bruchlastwerte von $930,5 \pm 145,8$ N und auf einem Titangerüst $898,6 \pm 105,7$ N. Diese Werte sind weitaus höher als die in der vorliegenden Arbeit ermittelt wurden. Auch das Gerüstmaterial und die Gerüstform spielen eine große Rolle im Bezug auf die Beständigkeit einer Restauration [81].

6.3 Diskussion der Ergebnisse

6.3.1 Rauigkeitsmessung

Für die Messung der Oberflächenrauheit mittels Perthometer S6P der Firma Mahr (Göttingen, Deutschland) wurden jeweils die ersten 10 Proben von jedem Oberflächenzustand der beiden Brände verwendet. Hierbei wurde die

Auswirkung der verschiedenen Oberflächenbearbeitungen auf die Rautiefe untersucht. Die Werte der verschiedenen Bearbeitungszustände unterschieden sich deutlich innerhalb eines Brandes. Der Vergleich der beiden Brände A und B untereinander ergab allerdings eine ähnliche Wertverteilung.

Bei beiden Gruppen A und B zeigte der Zustand „beschliffen“ (2) die größten Werte im Mittel (Titanbrand $1,46 \pm 0,03 \mu\text{m}$, Zirkoniumdioxidbrand $1,23 \pm 0,05 \mu\text{m}$). Die Referenzgruppen „as-fired“ (1) zeigten deutlich niedrigere Rautiefen (Titanbrand $0,77 \pm 0,15 \mu\text{m}$, Zirkoniumdioxidbrand $0,46 \pm 0,22 \mu\text{m}$). Somit führt das Beschleifen der Keramik Triceram® zu einer enormen Oberflächenvergrößerung. Interessanterweise zeigen bei beiden Bränden die Oberflächenzustände „Glanzbrand“ (Titanbrand $0,56 \pm 0,6 \mu\text{m}$, Zirkoniumdioxidbrand $0,6 \pm 0,03 \mu\text{m}$) und „poliert“ (Titanbrand $0,04 \pm 0,04 \mu\text{m}$, Zirkoniumdioxidbrand $0,06 \pm 0,03 \mu\text{m}$) annähernd gleiche Rautiefen. Im Vergleich zur Referenzgruppe hat sich durch den Glanzbrand und die Politur von Triceram® die Rautiefe stark verringert.

Die Messung der Rautiefe mittels Perthometer S6P stellt ein Standardverfahren dar. Für alle untersuchten Proben wurden 121 Messprofile erstellt und daraus die mittlere Rauheit R_a [μm] ermittelt. Da dieser Vorgang automatisiert ist, ist nur bei Ausfall des Gerätes mit Fehlern zu rechnen.

Zu bedenken ist, dass Unterschiede in der Messung der Rautiefe auftreten konnten, je nachdem wie die einzelnen Proben in das Perthometer gelegt wurden. Wurde die Oberflächenrauigkeit in Richtung der Schleifrichtung gemessen, wäre das Ergebnis der Rauigkeitswerte niedriger ausgefallen. Wurde die Rauigkeit senkrecht zur Schleifrichtung gemessen wäre das Ergebnis der Rauigkeit größer. Deswegen wurde während der Messung darauf geachtet, dass die Proben möglichst einheitlich positioniert waren, um Messunterschiede und Ungenauigkeiten zu vermeiden. Um die Unterschiede der Mittenrautiefen der Schleifspuren besser dazustellen, hätten die einzelnen Proben mehrfach vermessen werden können, wie in einer Studie von *Wehnert*,

Slotosch und *Freesmeyer*. In dieser Studie wurde der Einfluss der Oberflächenbearbeitung, wie Abstrahlen und Beschleifen, auf den Verbund von Yttriumoxid-teilstabilisiertem Zirkoniumdioxid untersucht. Hierbei wurden auch Rauigkeitsmessungen gemacht. Um die verschiedenen Rauheitswerte der Schleifspuren der Proben zu erfassen, wurden pro Prüfkörper fünf Messdurchgänge in Längs- und fünf in Querrichtung durchgeführt. [92]

Durch das Beschleifen der Keramik, ohne darauf folgende verbessernde Weiterbearbeitungen der Oberfläche, wie Politur oder Glanzbrand anzuwenden, ist mit höheren Rauigkeitswerten zu rechnen. Dies induziert die Möglichkeit einer höheren Plaqueanlagerung an der Restauration und wurde von *Quirynen* sowohl in einer In-vitro-, als auch In-vivo Studie bewiesen. Darin stellte er fest, dass eine größere Oberflächenenergie und -rauheit die Plaquebildung und das Vorhandensein spezifischer Bakterien begünstigt. Hierdurch wird die Entstehung von Gingivitis, Parodontitis und Karies gefördert [65,66]. Auch *Schwartz* und *Phillipps* beschreiben in einer Studie, dass es durch die höhere Rauigkeit einer unbearbeiteten Keramikoberfläche zu entzündlichen Prozessen an weichem angrenzendem Gewebe führen kann [74]. Dieses Thema greift auch *Haralur* in einer Untersuchung auf, in der er Keramikoberflächen beschleift und/oder mit drei verschiedenen Gummipolieren bearbeitet; u. a. auch mit dem EVE-Diapol Polierer der ErnstVetter GmbH (Pforzheim, Deutschland), der auch in dieser Arbeit Anwendung fand. Anschließend wurden die polierten Proben mit einer Glasur versehen. Das Ergebnis der Untersuchung zeigte, dass die größte Plaqueansammlung die beschliffene Oberfläche hatte, gefolgt von den polierten Proben und die glasierten Prüfkörper die geringste Anlagerung aufwiesen [38].

Die höhere Rautiefe kann zudem Ausgangspunkt für Risse sein und das negative Einwirken von Speichel auf die Keramik fördern. Laut *Rashid* kann eine unbearbeitete raue Keramikoberfläche auch den Antagonisten oder Restaurationen im Gegenkiefer schädigen [59,67,73].

Wie zu erwarten war, verbesserten die Glasur und die Politur den Oberflächenzustand von Triceram®. Die Rauigkeitswerte der Politur sind mit zwei Stellen hinter dem Komma äußerst gering. Somit zeigt diese Arbeit, dass die Politur einer beschliffenen Keramik sehr wichtig und empfehlenswert ist. Manche Autoren geben an, dass die Politur sogar besser ist als die Glasur für den Widerstand einer Keramikoberfläche. Ein weiterer Vorteil der Politur ist, dass der Grad des Glanzes kontrollierbar ist. In einer folgenden Untersuchung könnte der Einfluss verschiedener Poliermethoden auf die Rautiefe und die Biegefestigkeit untersucht werden. Hierbei könnte eine Kontrollgruppe an Proben hergestellt werden, die unbearbeitet bleibt, eine Gruppe deren Oberfläche mit Polierscheiben (Sof-Lex) poliert wird. Weitere Gruppen könnten mit Gummipolierern unterschiedlicher Fabrikation und Stärker und/oder Polierpasten bearbeitet werden, wie zum Beispiel in einer Studie von *Sarikaya*, in der allerdings nur die Oberflächenrauheit und nicht die Biegefestigkeit untersucht wurde [4,73,93].

Inwieweit die verschiedenen Rautiefen Einfluss auf die Biegefestigkeit von Triceram® haben, wurde anhand der Festigkeitstests untersucht und wird in Kapitel 6.3.4 beschrieben.

6.3.2 Biegefestigkeit biaxialer Biegetest nach ISO Norm 6872

Bei dem Titanbrand zeigt Gruppe „as-fired“ (1) mit $141,56 \pm 24,98$ MPa den größten Festigkeitswert, dicht gefolgt von „Glanzbrand“ (3) mit $135,26 \pm 29,05$ MPa. Beide Ergebnisse unterschieden sich statistisch signifikant ($p > 0,05$) voneinander. Beim Zirkoniumdioxidbrand hingegen wies Gruppe 3 eine Festigkeitssteigerung mit dem größten Wert von $146,35 \pm 36,47$ MPa auf. Die Referenzgruppe „as-fired“ hatte hier das zweitgrößte Ergebnis mit $104,38 \pm 29,56$ MPa.

Laut *Fairhurst et al.* verursacht die Glasur Risse in der Oberfläche der Keramik, was die Biegefestigkeit herab setzt. Dieser Vorgang könnte beim Titanbrand stattgefunden haben [22]. Andere Studien zeigen, dass durch den Glanzbrand

die Festigkeit gesteigert wird, wie beim Zirkoniumdioxidbrand [3,5]. In der vorliegenden Arbeit zeigt letztendlich die glasierte Gruppe eine größere Festigkeitssteigerung als die polierten Proben. Eine Untersuchung von *Bracket et al.* aus dem Jahr 1989 testete die Festigkeit von zwei verschiedenen bearbeiteten Gruppen. Gruppe eins wurde zuerst glasiert und danach mit einer zweiten Glasur versehen. Gruppe zwei wurde zuerst poliert und anschließend glasiert. Gruppe eins zeigte die größeren Festigkeitswerte. Allerdings gab es keine unbearbeitete Kontrollgruppe als Vergleich [9]. Des Weiteren wird in der Literatur beschrieben, dass eine Festigkeitssteigerung dadurch bedingt ist, dass der Glanzbrand die Oberfläche glättet und die durch das Beschleifen entstandenen Spannungen und Schäden in der Keramik reduziert [31,32,40].

Der Oberflächenzustand „beschliffen“ (2) zeigt wie erwartet bei beiden Bränden die geringsten Biegefestigkeitswerte (Titanbrand $79,35 \pm 12,45$ MPa, Zirkoniumdioxidbrand $87,57 \pm 14,43$ MPa). Durch das Beschleifen der Oberfläche, wird diese zerstört und bestehende Gefügefehler werden aufgedeckt. Dies stellt ein Ausgangspunkt für Risse dar. *Schwickerath* erklärte die niedrigeren Festigkeitswerte von beschliffenen Keramikstäben durch Oberflächendefekte, die durch den Schleifvorgang hervorgerufen wurden. Diese Oberflächendefekte hatte der Glanzbrand bei den anderen Stäben ausgeglichen. Dadurch ist eine Festigkeitssteigerung zu erklären. Bei beiden Bränden sind die Werte von Gruppe 2 und 3 statistisch signifikant ($p > 0,05$) unterschiedlich [78].

Die Oberflächenvergütung mittels Politur (Titanbrand $141,56 \pm 12,51$ MPa, Zirkoniumdioxidbrand $103,57 \pm 14,29$ MPa) zeigte bei beiden Bränden keine Festigkeitssteigerung zur Referenzgruppe „as-fired“. Beim Titanbrand ist nur eine geringe Steigerung um ungefähr 2,6 MPa im Mittel zur beschliffenen Oberfläche erkennbar. Die polierten Proben des Zirkoniumdioxidbrandes wiesen hier eine größere Werterhöhung um 16 MPa auf. *Rosenstiel et al.* allerdings belegte, dass durch die Politur die Keramik höhere Festigkeitswerte erzielt werden, als durch eine Glasur [69]. Dies konnte nicht verifiziert werden

anhand der vorliegenden Arbeit. *Lohbauer, Müller und Petschelt* beschreiben in einer Untersuchung, dass die Politur wichtig ist für die Langlebigkeit und Festigkeit einer keramischen Restauration [56].

Alle Ergebnisse des ISO-Tests liegen weit über den geforderten 50 MPa der ISO 6872 Norm [17]. Besonders die Werte des Zirkoniumdioxidbrandes liegen über den 85 MPa, die die Firma Dentauro für die Biegefestigkeit von Triceram® angibt [16]. Allerdings war die Dicke der Proben um 0,2 bis 0,5 mm größer als die in der Norm geforderten $1,2 \pm 0,2$ mm. Zu bedenken ist, dass die Dicke der Proben bzw. die Dicke einer Verblendkeramik Einfluss auf deren Festigkeit hat. *Shirakura et al.* stellten in einer Untersuchung an anatomisch geformten Kronen fest, dass dünne Keramikverblendungen auf einem Metallgerüst weniger fest sind und Vollkeramikrestaurationen eine Festigkeit unabhängig von der Verblenddicke zeigen. Hierbei muss bedacht werden, dass die Versuchsanordnungen dieser Arbeit und der von *Shirakura et al.* sehr unterschiedlich sind und einen sehr verschiedenen Kraftangriff auf die Proben vorweisen [79].

Interessant ist, dass bei dem Biegeversuch ein Spannungszustand mittels Druck- und Zugspannung hervorgerufen wird. Übt der Stempel eine Kraft auf die Oberseite einer Probe aus, entsteht hier eine Druckspannung und an der Unterseite eine Zugspannung. In der Mitte des Werkstoffes ist eine neutrale Faser. Wird der Werkstoff anhand eines Biegeversuchs rein elastisch deformiert, nimmt dieser nach Beendigung der Krafteinwirkung, seinen Ausgangszustand an. Die durch die einwirkende Kraft hervorgerufene Spannung ist nicht mehr vorhanden. Erfolgt jedoch eine plastische Verformung, wird der Ausgangszustand nicht mehr eingenommen und es bleibt im Inneren des Werkstoffes eine Spannung. Somit haben plastisch gebogene Materialien eine Eigenspannung, d.h. zur Deformation eines Körpers sind immer größere Kräfte nötig (Hookesches Gesetz). Auch in der Verblendkeramik und im Gerüstmaterial herrschen innere Spannungen, die durch den Herstellungsprozess hervorgerufen werden. Diese entstehen bei dem

Aufbrennen der Verblendung auf das Gerüstmaterial. Vor allem wenn die Restauration nach den einzelnen Aufbrennvorgängen zu schnell abgekühlt wird und der Wärmeausdehnungskoeffizient der Verblendung und des Gerüstmaterials nicht aufeinander abgestimmt sind. Somit besitzt die Restauration eine gewisse Eigenspannung, die dadurch bedingt ist, dass es im Material zu plastischen Verformungen kommt und dadurch dass das Material in seiner Rückstellung behindert wird. Es ist wichtig zu bedenken, dass diese Eigenspannung des Materials auch im Biegeversuch hervorgerufen wird [31].

Äußere Spannungen werden durch Oberflächenbearbeitung der Verblendung, wie zum Beispiel während des Einschleifens der Okklusion und Artikulation, hervorgerufen. Somit können sich an Verunreinigungen und Einschlüssen in der Keramik Ausgangspunkte für Spannungskonzentrationen bei Einwirken von Zugkräften bilden. Durch die Sprödigkeit der Keramik, kann diese nicht plastisch verformt werden, wie das bei metallischen Werkstoffen möglich ist. Dieses Spröbruchverhalten kann bei Zugbeanspruchung die Festigkeit der Keramik herabsetzen. Somit kann es bei langer geringer Einwirkung von Zugbelastung der Restauration, durch unkritisches Risswachstum, zu einem Bruch kommen. Die Spannung erhöht auch die Gefahr des Abplatzens der Verblendung vom Gerüstwerkstoff, das sogenannte „Chipping“. In der Literatur wird beschrieben, dass das „Chipping“ bei vollkeramischem Zahnersatz öfter beobachtet wird, als bei metallkeramischem [31,32].

Um die Spannungen in einer Restauration zu reduzieren, sollte bei der Herstellung darauf geachtet werden, dass der Temperaturanstieg während des Brennens der Verblendung nicht zu schnell geschieht. Auch die Abkühlphase sollte verlängert werden. Wie im obigen Text beschrieben, ist die Abstimmung der Wärmeausdehnungskoeffizienten der Verblendung und des Gerüstmaterials sehr wichtig. Ebenfalls sollte bei der Herstellung auf die Dimensionierung der Verblendung geachtet werden. Die Dicke der Verblendung sollte nicht 1,5 mm überschreiten. Zudem sollte bei der Nachbehandlung der Arbeit auf die

Empfehlungen der Hersteller geachtet werden und eine keramische Verblendung immer unter Wasserkühlung bearbeitet werden [31,32].

In einem Versuch von *Fischer, Stawarczyk* und *Hämmerle* wurde die Biegefestigkeit von Aufbrennkeramiken für Zirkoniumdioxidgerüste getestet. Die Werte wurden anhand des biaxialen Biegetests und des 3- und 4- Punkt-Biegetests ermittelt. Die Festigkeit von Triceram® beim biaxialen Test in dieser Studie lagen bei ungefähr 100 MPa im Mittel. Dieser Zahlenwert kann auch in der vorliegenden Arbeit nachgewiesen werden [27].

Erdelt et al. beschreibt in einer Studie die Biegefestigkeit von Zirkoniumdioxid mit dem biaxialen Biegeversuch. Er testete die Biegefestigkeit in Abhängigkeit von künstlicher Alterung und Einfärbung. Die nicht eingefärbten und nicht gealterten Proben erreichten Festigkeitswerte im Mittel von 1307 MPa. Dieser Wert ist ungefähr das 13fache von den Ergebnissen die mit Triceram® in dieser Arbeit erzielt wurde. Zu bedenken ist, dass Zirkoniumdioxid die Keramik ist mit den größten Festigkeitswerten auf dem Markt. Des Weiteren besitzt Zirkoniumdioxid wie in Kapitel 2.2.3.3 beschrieben, einen Riss entgegen wirkenden Mechanismus. Auch sind die Indikationsgebiete von Triceram® und Zirkoniumdioxid sehr unterschiedlich. Interessant ist allerdings, dass das Gerüstmaterial Zirkoniumdioxid sehr viel höhere Biegefestigkeitsergebnisse als seine Verblendkeramik Triceram® zeigt [21].

Im Schnitt zeigte der Zirkoniumdioxidbrand etwas größere Werte, als der Titanbrand. Die Kontrollgruppe „as-fired“ des Zirkoniumdioxidbrandes wies zwar eine kleinere Biegefestigkeit auf; allerdings die oberflächenbearbeiteten Proben größere Werte. Auch der Festigkeitsabfall von Gruppe 1 zu Gruppe 2 „beschliffen“ ist beim Zirkoniumdioxidbrand geringer. Die Festigkeitssteigerung der Gruppe 2 bei diesem Brand durch Politur und Glanzbrand war ebenfalls größer. Das Temperaturprofil des Zirkoniumdioxid-Sinterprogramms beträgt 760°C bei der Endtemperatur des Vakuumbrandes. Die Endtemperatur des Vakuumbrandes des Titanprogrammes ist 755°C. Somit liegt eine

Temperaturdifferenz von 5°C zugunsten des Zirkoniumdioxidbrandes vor. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass Titan ab einer Temperatur von 800°C sehr reaktionsfreudig mit Sauerstoff ist und dabei eine Oxidschicht ausgebildet wird, die das Verblenden des Metalls erschwert. Bei dem Werkstoff Zirkoniumdioxid liegt dieses Verhalten nicht vor und kann somit stärker erhitzt werden. Möglich ist, dass diese Differenz Auswirkungen auf den Sintervorgang der Keramik hatte. Eventuell konnte durch die höhere Temperatur die Flüssigkeit besser aus der Keramikmasse ausgetrieben werden und die Keramikpartikel besser aneinander anlegen und verschweißen. Ob sich dadurch eine Aussage formulieren lässt, dass die Biegefestigkeitswerte von Triceram® auf einem Zirkoniumdioxidgerüst größer sind, als auf einem Titangerüst, ist zu vermuten. In dieser Arbeit werden lediglich die Unterschiede zwischen den beiden Bränden erarbeitet und nicht der Einfluss des Gerüstmaterials.

Die Biegefestigkeitswerte der Triceram®-Proben wiesen die typische Streuung von spröden Materialien mit Ausreißwerten auf. Zum Beispiel bei Gruppe A „as-fired“ war der kleinste Wert 74 MPa und der größte 200 MPa. Der Mittelwert dieser Gruppe befand sich bei 141,53 MPa. Die Ursache liegt in den mechanischen Eigenschaften einer Keramik, bedingt durch ihre atomare Gefügestruktur. Dadurch erklärt sich die Streuung der Festigkeitswerte. Diese Streuung zeigte sich auch in den sehr hohen Standardabweichungen. Von beiden Bränden war diese bei den glasierten Gruppen (Titanbrand $\pm 29,05$ MPa, Zirkoniumdioxidbrand $\pm 36,47$ MPa) am größten, gefolgt von den Referenzgruppen (Titanbrand $\pm 24,98$ MPa, Zirkoniumdioxidbrand $\pm 29,56$ MPa). Die Abweichungen der beschliffenen (Titanbrand $\pm 12,45$ MPa, Zirkoniumdioxidbrand $\pm 14,43$ MPa) und polierten Proben (Titanbrand $\pm 12,51$ MPa, Zirkoniumdioxidbrand $\pm 14,29$ MPa) lagen bei beiden Bränden sehr nahe beieinander. Alle Werte der Standardabweichungen waren sehr hoch. In der Literatur werden ähnlich große Standardabweichungen für den Werkstoff Keramik beschrieben. *Pröbster et al.* gibt hohe Standardabweichungen in einer Untersuchung mittels 3-Punkt-Biegetest für die Keramik In-Ceram an.

Interessanterweise hatten in dieser Arbeit die beschliffenen und polierten Proben die geringste Standardabweichung. Dies könnte auf eine Veränderung der Gefügestruktur hin deuten [64].

Diese große Streuung der Werte musste in der statistischen Analyse der Ergebnisse bedacht werden. Deshalb wurde die Weibullstatistik mit dem Weibullmodul m und der Weibull-Festigkeit σ_0 [MPa] ausschließlich bei Gruppe A und B angewandt. Es gilt, je größer das Weibullmodul m ist, desto geringer ist die Streuung des Riss auslösenden Fehler der Keramik. Den größten Weibullmodul m des Titanbrandes hatten die polierten Proben. D.h., dass bei dieser Gruppe die Streuung der Fehler im Gefüge am geringsten war. Bei Gruppe Glanzbrand war die Streuung am größten. Diese Aussage ist insoweit interessant, als dass den Ergebnissen der Biegefestigkeitstests der vorliegenden Arbeit widerspricht, da die glasierten Proben die zweitgrößte Biegefestigkeit des Titanbrandes aufwiesen. Beim Zirkoniumdioxidbrand hatte ebenfalls die polierte Gruppe den größten Weibullmodul m Wert, sogar größer als beim Titanbrand. Auch hier lag die Biegefestigkeit der Politur hinter den glasierten Proben und sogar hinter der Referenzgruppe „as-fired“. Die Weibull-Festigkeit σ_0 gibt die Zugspannung an, bei welcher 63,21% aller Proben versagen. Die größte Weibull-Festigkeit σ_0 des Titanbrandes zeigte Gruppe „as-fired“ mit 152,14 MPa und beim Zirkoniumdioxidbrand Gruppe „Glanzbrand“ mit 160,54 MPa. Anhand der Weibull-Statistik ist ersichtlich, dass es zwischen der Datenverteilung der Werte des Weibullmodulus m und der Weibullfestigkeit σ_0 keine Korrelation gibt, d.h., auch bei einer großen Weibullfestigkeit σ_0 kann die Streuung der Fehler im Gefüge einer Keramik groß sein und somit einen Riss auslösen (z.B. beim Titanbrand Gruppe 1). Umgekehrt kann bei einer niedrigen Weibullfestigkeit σ_0 und ein hoher Weibullmodulus m vorliegen und deshalb die Gefahr eines Risses kleiner sein (z.B. beim Zirkoniumdioxidbrand Gruppe 2). (Siehe Tabelle 12: Übersicht Weibullstatistik). Festzustellen ist, dass die Weibullfestigkeit σ_0 aus werkstoffkundlicher Sicht bedeutsamer ist, als der Einfluss der Homogenität, welche das Weibullmodul m darstellt.

Wird die Weibullfestigkeit σ_0 im Zusammenhang mit dem arithmetischen Mittenrauhwert Ra betrachtet zeigt sich interessanterweise, dass bei beiden Bränden die beschliffenen Prüfkörper die größten Mittenrauhwerte Ra [μm] haben und die kleinste Weibullfestigkeit σ_0 . Dies erlaubt die Aussage, dass durch die Vergrößerung der Oberfläche durch den Schleifvorgang, die Weibullfestigkeit der Keramik herabgesetzt wird. Durch die Politur der beschliffenen Proben wurde eine Steigerung der Weibullfestigkeit σ_0 erzielt, allerdings nicht so eine große Steigerung wie durch die Glasur. Die polierten Prüfkörper zeigten allerdings die geringsten Rauheitswerte von allen Oberflächenzuständen. Somit lässt sich aussagen, dass durch die Politur die Weibullfestigkeit nicht so gesteigert werden kann wie durch die Glasur, aber dennoch eine höhere Oberflächengüte erreicht werden kann.

Letztlich ist festzustellen, dass eine Biegefestigkeitssteigerung im Vergleich zur Referenzgruppe nur beim Zirkoniumdioxidbrand durch die Glasur erzielt wurde. Beim Titanbrand reichte die Steigerung der Festigkeit durch den Glasurbrand nahezu an den Wert der Referenzgruppe. Im Vergleich zu den beschliffenen Proben wurde bei beiden Bränden eine Erhöhung der Festigkeit durch Glanzbrand und Politur beobachtet. Die Glasur zeigte allerdings ein sehr viel besseres Ergebnis als die Politur. Auch wenn der Glanzbrand mit einem sehr viel höheren Arbeitsaufwand verbunden ist, ist dieser Bearbeitungsschritt für die Steigerung der Festigkeit einer beschliffenen Keramikoberfläche zu empfehlen. Auch *Geis-Gerstorfer* beschreibt dies in einer Studie, in welcher die Folgen von verschiedenen alltäglichen Arbeitsschritten, wie Beschleifen, Sandstrahlen und Wärmebehandlung (Regenerations- und Glanzbrand) auf die Festigkeit Zirkoniumdioxid getestet wurden [32].

6.3.3 Biegefestigkeit Ermüdungstests

Beim statischen Stufentest wurde eine Kraft von 20 N über einen Zeitraum von vier Stunden stufenweise erhöht, bis es zum Bruch der Probe kam. Das Ergebnis der Biegefestigkeit zeigte bei beiden Bränden eine ähnliche Verteilung der Werte. Beim Titanbrand zeigte die Referenzgruppe mit $64,81 \pm 7,45$ MPa

das höchste Ergebnis, sehr dicht gefolgt von der glasierten Gruppe. Beim Zirkoniumdioxidbrand hatte der „Glanzbrand“ mit $56,38 \pm 9,85$ MPa die höchste Festigkeit. Die Gruppe „as-fired“ wies hier einen Wert von $41,78 \pm 5,43$ MPa auf. Somit zeigte bei diesem Versuch der Zirkoniumdioxidbrand die geringeren Biegefestigkeitswerte. Auch hier lässt sich feststellen, dass das Beschleifen der Prüfkörper die Festigkeit mindert. Durch die Oberflächenvergütung mittels Politur und Glasur ließ sich diese wiederum steigern. Die größte Steigerung erzielte der Glanzbrand. Interessanterweise weist der ISO-Test das gleiche Ergebnis auf. Besonders bei den Prüfkörpern der Referenzgruppen beider Brände zeigte sich eine Rissentwicklung bis es schließlich zum Versagen kam. Erstaunlicherweise zeigen diese beiden Gruppen auch die größten Festigkeitswerte und durchliefen somit die meisten Kraftstufen.

Der prozentuale Abfall der Biegefestigkeit des statischen Stufentests im Vergleich zum ISO-Test betrug beim Titanbrand Werte von 54% bei Gruppe 1 und 3 und bis zu 69% bei der beschliffenen Gruppe. Die Festigkeitsminderung bei dem Zirkoniumdioxidbrand war sehr viel höher. Bei den Gruppen 1 und 2 lagen diese bei 95%.

Beim dynamischen Stufentest wurde eine Kraft von ebenfalls 20 N mit einer Frequenz von 5 Hz und 72.000 Zyklen über vier Stunden stufenförmig erhöht und bis zum Versagen der Probe ausgeübt. Auch hier weisen alle beschliffenen Proben die kleinste Festigkeit auf. Beim Titanbrand ist die Referenzgruppe „as-fired“ mit $75,92 \pm 16,58$ MPa am größten. Gruppe „Glanzbrand“ (3) mit $55,64 \pm 3,93$ MPa am zweitgrößten. Beim Zirkoniumdioxidbrand zeigte der „Glanzbrand“ mit $80,97 \pm 7,42$ MPa die größte Festigkeitssteigerung. Die Werte der anderen Oberflächenzustände waren bis zu 50% geringer. Erstaunlicherweise lag die „Politur“ mit $47,13 \pm 7,65$ MPa vor der Referenzgruppe mit $46,33 \pm 5,18$ MPa.

Die prozentuale Abnahme der Biegefestigkeit des dynamischen Stufentests im Vergleich zum ISO-Test betrug beim Titanbrand der Gruppe 1 und 4 46% und zeigte damit die geringste Festigkeitsabnahme. Die größte lag bei Gruppe 2 mit

65% und Gruppe 3 mit 59%. Beim Zirkoniumdioxidbrand zeigte die Gruppe as-fired mit 56% die größte Festigkeitsabnahme, gefolgt von den Gruppen 2 und 4 mit 54%. Die glasierten Proben der Gruppe 3 hatten einen Festigkeitsverlust von 45%.

Schwickerath testete in mehreren Versuchsreihen die Dauerfestigkeit von Metallkeramiken. In einer Versuchsanordnung untersuchte er die Dauerfestigkeit anhand von Prüfstäben aus einer Metallkeramik. Das Ergebnis dieser Studie stellte dar, dass der Wert der Dauerfestigkeit 55% der Biegefestigkeit betrug und dass nach 1000 Lastspielen die Biegefestigkeit um 1/3 abgenommen hatte. Die Verblendkeramik weiterer Prüfstäbe wurde oberflächenbearbeitet. Die Stäbe, die beschliffen und mit einem Glanzbrand versehen wurden, wiesen eindeutig größere Festigkeitswerte, als diejenigen die nur beschliffen wurden, auf. Die vorliegende Arbeit zeigt das gleiche Ergebnis. Auch die prozentuale Abnahme der Biegefestigkeit bei den beschliffenen Proben zeigt bei beiden Ermüdungstests im Schnitt die größten Werte. Die glasierten Proben haben die kleinsten Werte. Ausnahme hier ist der Zirkoniumdioxidbrand des dynamischen Stufentests. Hier hat der Glanzbrand die größte Festigkeitsabnahme. *Schwickerath* erklärte die niedrigeren Festigkeitswerte der beschliffenen Stäbe durch deren Oberflächendefekte, die durch den Schleifvorgang entstanden. Diese Oberflächendefekte wurden durch den Glanzbrand bei den anderen Stäben ausgeglichen. Auch *Fairhurst et al.* beschreibt, dass das langsame Risswachstum von einem bereits bestehendem Oberflächendefekt zu einem Bruchmechanismus führt [23,76]. Interessanterweise zeigen alle Ergebnisse, dass die Politur zwar die Festigkeit verbessert, aber schlechtere Ergebnisse aufweist als der Glanzbrand.

In einer weiteren Studie gab *Schwickerath* an, dass nach 3 Jahren einer Verblendung bricht, wenn an jedem Tag der Tragezeit 60% der Belastungsobergrenze erreicht wird [75].

Jung et al. beschreibt, dass die Dauerbelastung einer Keramik, die Festigkeit mehr schwächt, als die einmalige statische Belastung bis zum Versagen. Dies

ist darauf begründet, dass durch die Dauerbelastung nicht die Spannungsintensität erreicht wird, die zum Bruch führt. Stattdessen entstehen, wie oben beschrieben, an Gefügefehlern Spannungsspitzen, die zu einem unbemerkten zunehmenden subkritischem Risswachstum bei dynamischer Belastung führen. Laut *Grathwohl* reicht sehr häufig nur ein geringes Risswachstum aus, um den Bruch der Keramik hervorzurufen [23,33,44].

Werden in der vorliegenden Arbeit die Werte des statischen und dynamischen Stufentest miteinander verglichen fällt auf, dass bei den Gruppen 1 und 2 die Biegefestigkeit beim dynamischen Test größer ist als beim statischen. Bei Gruppe 3 und 4 es sich allerdings genau umgekehrt verhält. Im Schnitt zeigt der dynamische Stufentest größere Biegefestigkeitswerte. Auch die prozentuale Abnahme der Festigkeit im Vergleich zum ISO-Test ist beim statischen Stufentest sehr viel höher als beim dynamischen. Daraus resultiert, dass bei beiden Ermüdungstests Triceram® geschwächt wurde, beim statischen Test allerdings mehr als beim dynamischen. Hierbei ist zu bedenken, dass die Biegespannung beim statischen Stufentest konstant auf die Proben bis zum Bruch eingewirkt hat. Beim dynamischen Stufentest wirkte die Biegespannung zyklisch auf die Proben ein, d.h. die Beanspruchung wechselte zwischen Spannungsmaxima und -minima. Somit war die Einwirkdauer der Biegespannung bis zum Versagen der Probe beim statischen Stufentest größer als beim dynamischen.

6.3.4 Beurteilung des Effektes der Oberflächenrauheit auf die Biegefestigkeit

Der Zusammenhang zwischen der Inhomogenität und der niedrigen Biegefestigkeit trifft bei den beschliffenen Proben beider Brände zu. Diese zeigen die größte Oberflächenrauheit und die niedrigste Biegefestigkeitswerte. Interessanterweise hatte die Politur die Rautiefen geebnet und wies das beste Ergebnis der Rauheitsmessung auf. Allerdings hatten die geringen Rautiefen der polierten Oberflächen keinen großen Einfluss auf die Festigkeit; die Glasur

lieferte hier bessere Ergebnisse. Der Glasurbrand zeigte größere Rautiefen auf als die polierten Proben. Somit bewies diese Versuchsdurchführung, dass die Glasur zwar die Rauigkeit von beschliffenen Proben nicht annähernd so gut verbessert, wie die Politur, allerdings bessere Biegefestigkeitswerte hatte. Auch andere Autoren beschreiben, dass der Glanzbrand die Festigkeit einer Keramik verbessert.

Die Werte der Weibullfestigkeit σ_0 in Bezug auf die Mittenrauhwerte zeigen die gleiche Korrelation wie die Werte der biaxialen Biegefestigkeit in Bezug auf die Rauheit der Keramik Triceram®.

Letztendlich bestätigt sich, dass durch die Verletzung der Oberfläche, die Rautiefen größer werden und die Festigkeit der Keramik abnimmt. Durch die Oberflächenvergütungen wie Glasur und Politur wird zwar die Rautiefe verbessert, was allerdings keinen Einfluss auf die Biegefestigkeit von Triceram® hat. Zu bedenken ist, dass durch die Politur eventuell Substanz der Keramik verloren geht und durch die Glasurschicht eine weitere Stärkung vorgenommen wird. Was wiederum das Ergebnis beeinflussen kann.

6.4 Schlussfolgerung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt eindeutig, dass die Oberflächenbearbeitung Einfluss auf die Biegefestigkeit von Triceram® hat. Das Beschleifen der Keramik schwächt ihre Festigkeit. Aufgrund der Vergrößerung der Oberfläche und somit der Rauheit wird die Gefügestruktur verletzt, was Ausgangspunkte für Risse und Spannungskonzentrationen darstellt. Eine darauffolgende Oberflächenvergütung ist unerlässlich. Die Verbesserung der Festigkeit einer beschliffenen Oberfläche durch die anschließende Glasur stärkt das Material besser als die Politur. Somit ist Hypothese 2 und 3 der vorliegenden Arbeit bestätigt.

Zu der Oberflächenrauigkeit ist zu sagen, dass Hypothese 5 bewiesen wurde. Die Proben, welche beschliffen wurden, zeigten auch die größten

Rauhigkeitswerte. Im Hinblick auf die Verbesserung der Rautiefe und somit der Reduzierung der Akkumulation von Plaque zeigt die Politur die besten Ergebnisse. Letztendlich kann gesagt werden, dass beide Oberflächenbearbeitungen, Glasur und Politur, die Eigenschaften des Werkstoffes verbessern, allerdings in unterschiedlicher Weise. Die Ausgangsfestigkeit von Triceram® vor dem Schleifvorgang kann ausschließlich durch die Glasur wieder hergestellt werden. Hypothese 6 wurde nur zum Teil bestätigt. Wie oben erwähnt, hatten die beschliffenen Proben die geringste Biegefestigkeit und die größte Oberflächenrauigkeit. Dies lässt sich allerdings auf die anderen Oberflächenzustände nicht übertragen. Die glasierten Prüfkörper wiesen unter den Oberflächenbearbeiteten Proben zwar die größten Biegefestigkeitswerte auf, hatten allerdings nicht die geringsten Mittenrauhwerte.

Schlussfolgernd lässt sich formulieren, dass Hypothese 1 bestätigt wurde. Die Verblendkeramik Triceram® übersteigt die geforderten 50 MPa der ISO 6872 Norm. Das Ergebnis des ISO-Tests zeigt bei der Referenzgruppe „as-fired“ mit einem Biegefestigkeitswert von 141,56 MPa fast das Dreifache von dem in der Norm geforderten Wert.

Interessanterweise ist Hypothese 4 nicht zu belegen. Es gibt Unterschiede im Vergleich von Titan- mit dem Zirkoniumdioxidbrand. Im Schnitt ist die biaxiale Biegefestigkeit von den Proben die mit dem Zirkoniumdioxidbrand hergestellt wurden größer. Auch die Weibullfestigkeit σ_0 zeigt beim Zirkoniumdioxidbrand bessere Werte als beim Titanbrand.

Anhand der Auswertung der Rasterelektronenmikroskopbilder konnte Hypothese 7 bewiesen werden. Die Oberfläche der beschliffenen Proben zeigte Unterschiede im Vergleich zu den oberflächenvergüteten Prüfkörpern. In der 35 fachen Vergrößerung sind anhand von weißen Linien deutliche Schleifspuren zu erkennen. In der 500- und 1.000 fachen Vergrößerung ist eine wabige und

zerklüftete Struktur zu sehen, die geschlossener und runder auf den Bildern der polierten Oberfläche dargestellt ist. Die Aufnahmen der glasierten Proben zeigt eine sehr homogene Oberfläche, die durch kleine Verunreinigungen und Einschlüsse unterbrochen ist. Abschließend lässt sich formulieren, dass die Proben bei denen auf den Rasterelektronenmikroskopbildern sehr viele oberflächliche Defekte oder gar eine offene Struktur sichtbar ist, auch die geringsten Biegefestigkeitswerte zeigen. Dies beweist, dass unter Zugbelastung sich an Oberflächendefekten Spannungsspitzen bilden und Ausgangspunkte für Risse sind.

Zu bedenken ist, dass die Dimensionierung und Herstellung der Proben nicht der Verblendung im Alltag entsprechen. In dieser Arbeit wurden die Prüfkörper mittels Pelletor-System® und nicht durch Schichttechnik hergestellt. Die Dicke der Proben wich um $1,2 \pm 0,2$ mm von der vorgegebenen Dicke der DIN EN ISO 6872 Norm ab. Dies ist allerdings zu vernachlässigen, da dieser Parameter in die Berechnung der Biegefestigkeit mit einfließt.

Aufgrund der hohen Biegefestigkeitswerte zeigt diese Arbeit, dass die Festigkeit von Triceram® eventuell eher ein untergeordnetes Problem beim Versagen der Verblendung darstellt. Wie manche Autoren vermuten, kann das Problem bei dem Wärmeausdehnungskoeffizienten liegen. Ist der Wärmeausdehnungskoeffizient des Gerüst- und Verblendmaterials nicht aufeinander abgestimmt und besteht eine zu große Differenz, entstehen Spannungen in dem Verbund der beiden Materialien. Diese Spannungen werden durch Bearbeitung der Restauration noch verstärkt. Als Folge dieser inneren Spannungen kann es zum Versagen des Werkstoffes und zum Abplatzen der Verblendung vom Gerüst, dem sogenannten Chipping, kommen [1,27,32].

Der statische und dynamische Ermüdungstest zeigt, dass im Vergleich zum ISO-Test die Festigkeitsabnahme beim statischen Test im Mittel 70% und beim dynamischen mit 60-65% höher waren. Somit ist ersichtlich, dass durch Dauerbelastung eine Ermüdung von Triceram® eintritt, die zugleich mit einer

Festigkeitsminderung einhergeht. Diese Ermüdungserscheinungen werden negativ durch das Beschleifen der Oberfläche und positiv durch die Politur beeinflusst. Des Weiteren ist zu sagen, dass bei den Ermüdungstests sehr viel weniger Bruchlast eingesetzt werden muss als bei dem ISO-Test, was dem Spröbruchverhalten von keramischen Werkstoffen zu verschulden ist.

Neben der Biegefestigkeit gibt es noch andere Parameter von denen die Beständigkeit einer Verblendkeramik abhängt. Diese Parameter sind die Löslichkeit der Keramik im Milieu des Mundes, die Anpassung des Wärmeausdehnungskoeffizienten der Verblendung mit dem Gerüstmaterial, der Gestaltung und Dimensionierung des Gerüsts, als auch der Aufbrennkeramik. Diese Parameter wurden in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht. Es wurden nur allein die Eigenschaften der Aufbrennkeramik Triceram® getestet, ohne Berücksichtigung eines Gerüstmaterials oder der anatomischen Form der Keramik. Deshalb ist die Übertragbarkeit dieser Untersuchung auf den klinischen Alltag nur schwer möglich. Des Weiteren spielt die Behandlung des Materials durch den Zahntechniker und den Zahnarzt eine entscheidende Rolle. Letztendlich kann davon ausgegangen werden, dass eine erhöhte Biegefestigkeit auch bessere klinische Ergebnisse im alltäglichen Gebrauch von Triceram® hat. Hierfür könnte jedoch eine In-Vivo Studie Klarheit schaffen, in welcher Triceram® mit einer Verblendkeramik, die wesentlich niedrigere Biegefestigkeitswerte zeigt verglichen wird.

7 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, durch eine experimentelle In-vitro Untersuchung den Einfluss der verschiedenen Oberflächenbearbeitungen, wie beschleifen, polieren und glasieren, auf die biaxiale Biegefestigkeit und das Ermüdungsverhalten von Triceram® in Abhängigkeit der verschiedenen Brennprogramme für Titan- und Zirkoniumdioxidgerüste zu testen.

Es wurden einheitliche zylinderförmige Proben für jeden Oberflächenzustand (1 = as-fired (Referenzgruppe), 2 = beschliffen, 3 = beschliffen + glasiert, 4 = beschliffen + poliert) für den biaxialen Biegetest 4x30 Proben, für den statischen und dynamischen Dauerfestigkeitstest jeweils 4x10 Proben anhand des jeweiligen Brennprogrammes (Titan- und Zirkoniumdioxidbrand) hergestellt. Der biaxiale Biegetest wurde in Anlehnung an ISO 6872 Norm durchgeführt. Bei allen Versuchen wurde die Kraft beim Eintritt des Versagens aufgezeichnet und anhand der Formel der ISO Norm 6872 die Biegefestigkeit errechnet.

Die Ergebnisse des biaxialen Biegetests zeigten, dass die polierten und glasierten Proben die Festigkeit von Triceram® nach dem Beschleifen steigerten und an die Referenzgruppe heran reichen. Dies gilt für beide Brennprogramme. Der Glanzbrand verbesserte die Festigkeit allerdings um einiges mehr als die Politur. Diese Werte von beiden Bränden unterschieden sich statistisch signifikant ($p > 0,05$) voneinander. Alle Proben mit beschliffener Oberfläche zeigten die niedrigste Biegefestigkeit und unterschieden sich zur Glasur und Politur statistisch signifikant ($p > 0,05$). Der Weibullmodul m zeigte ein besseres Ergebnis bei dem Zirkoniumdioxidbrand als beim Titanbrand. Die prozentuale Abnahme der Biegefestigkeit im Vergleich zum biaxialen Test gemäß ISO 6872 Norm war bei dem statischen Stufentest größer als bei dem dynamischen. Es ist ersichtlich, dass bis zum Versagen des Werkstoffes bei den Ermüdungstests sehr viel weniger Kraft aufgewendet werden musste, als beim biaxialen Test. Die Dauerbelastung führt somit zur Ermüdung des Materials, sodass dieses schneller versagt.

8 Literaturverzeichnis

1. *Aboushelib et al.*: Effect of loading method on the fracture mechanics of two layered all-ceramic restorative systems. *Dent Mater* 2007;(23):952-959
2. *Al Zahrani et al.*: Influence of occlusion grinding on biaxial-flexural strength of veneering porcelain, Florence (Italy) September 4-7
3. *Albakry et al.*: Effect of sandblasting, grinding, polishing and glazing on the flexural strength of two all-ceramic dental materials. *J Dent* 2004;(32):91-99
4. *Al-Wahadni A, Martin DM*: Glazing and Finishing Dental Porcelain: A Literature Review. Jordan University of Science and Technology. <https://www.cda-adc.ca/jcda/vol-64/issue-8/580.html> [Stand: 14.06.2015]
5. *Baharav et al.*: Effect of glaze thickness on the fracture toughness and hardness of alumina-reinforced porcelain. *J Prosthet Dent* 1999;(81):515-519
6. *Baltzer A, Kaufmann-Jinoian V*: Die Belastbarkeit von VITA In-Ceram. *Quintessenz Zahntechnik* 2003;(29):1318-1342
7. *Ban S, Anusavice KJ*: Influence of Test Method on Failure Stress of Brittle Dental Materials. *J Dent Res* 1990;(69):1791
8. *Beuer F*: Arbeitsgruppe Vollkeramik München. <http://arbeitsgruppe-vollkeramik-muenchen.de/index.php?id=20> [Stand: 11.05.2015]
9. *Bracket et al.*: An evaluation of porcelain strength and the effect of surface treatment. *J Prosthet Dent* 1989;(61):446-451
10. *Craig et al.*: Zahnärztliche Werkstoffe. Eigenschaften und Verarbeitung. Elsevier, Urban & Fischer, München 2006
11. *Cramer von Clausbruch S*: Zirkon und Zirkonium. *Dental Labor* 2003;(51):1137-1142
12. *Danzer R, Lube T*: Werkstoffprüfung keramischer Werkstoffe - ein Überblick. Montanuniversität Leoben und Materials Center Leoben, beide A-8700 Leoben, Österreich. http://www.dgm.de/download/tg/687/687_29.pdf [Stand: 09.06.2015]
13. *Dentaurum GmbH & Co. KG*: Triceram® Die Keramik für Titan und Zirkonoxid, zwei Werkstoffe - eine Keramik, Ispringen 2003. <http://www.dentaurum.de/files/989-621-10.pdf> [Stand: 09.06.2015]
14. *Dentaurum GmbH & Co. KG*: Titan Überzeugender Einsatz in der Zahntechnik, Ispringen 2004. <http://www.dentaurum.de/files/989-848-10.pdf> [Stand:09.06.20015]

15. *Dentaurum GmbH & Co. KG*: Neues aus der Wissenschaft - Triceram® im Spiegel der Fachpresse. Untersuchungen und Ergebnisse, Ispringen 2007. http://www.dentaurum.de/files/Neues_aus_der_Wissenschaft_1108.pdf [Stand: 09.06.2015]
16. *Dentaurum GmbH & Co. KG*: Triceram® Die Keramik für Titan und Zirkoniumdioxid. Produktinformation und Gebrauchsanweisung, Ispringen 2013. <http://www.dentaurum.de/files/989-643-10.pdf> [Stand:09.06.2015]
17. DIN- Taschenbuch 267 Zahnheilkunde. Werkstoffe. Beuth, Berlin, Wien, Zürich 2010
18. *Eichner K, Kappert HF (Hrsg)*: Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Hüthig Verlag Heidelberg 1996
19. *Eichner K, Kappert HF (Hrsg)*: Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung 2008
20. *Eichner K. (Hrsg)*: Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Band 1 Grundlagen und Verarbeitung. Hüthig Verlag Heidelberg 1988
21. *Erdelt et al.*: Die Biegefestigkeit von weißkörper-gefrästen Zirkoniumdioxid. In-vitro-Untersuchung in Abhängigkeit von Einfärbung und künstlicher Alterung. Quintessenz Zahntechnik 2004;(30):942-954
22. *Fairhurst et al.*: The effect of glaze in porcelain strength. Dent Mater 1992;(8):203-207
23. *Fairhurst et al.*: Dynamic fatigue of feldspathic porcelain. Dent Mater 1993;(9):269-273
24. *Filser et al.*: Vollkeramischer Zahnersatz im Seitenzahnbereich. Bewertung von Werkstoffen hinsichtlich Bruchlast und Zuverlässigkeit. Quintessenz Zahntechnik 2002;(28):48-60
25. *Fischer et al.*: Effect of Thermal Misfit between Different Veneering Ceramics and Zirconis Frameworks on in vitro Fracture Load of Single Crowns. Dental materials journal 2007;(26(6)):766-772
26. *Fischer J*: Mechanische Eigenschaften metallischer und keramischer Werkstoffe. Quintessenz Zahntechnik 2009;(35(12)):1540-1549
27. *Fischer et al.*: Biegefestigkeit von Verblendkeramiken für Zirkoniumdioxid. Hat die Prüfmethode einen Einfluss auf die Werte? Quintessenz Zahntechnik 2008;34(9):1138-1145
28. *Fokas-Tsentzeratos G*: Influence of the surface and heat treatment on the flexual strength ans reliability of Y-TZP dental ceramic, Tübingen

29. *Geis-Gerstorfer J, Fäßler P*: Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten der Dentalkeramiken Zirkondioxid-TZP und In-Ceram. In: Dtsch Zahnärztliche Z (1999), 692-694
30. *Geis-Gerstorfer J, Kanjantra P*: Zum Einfluß der Prüfmethode auf die Biegefestigkeit von IPS-Empress und In-Ceram. In: Dtsch Zahnärztliche Zeitschrift 47 1992, 618-621
31. *Geis-Gerstorfer J, Marxkors R*: Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde. Vom Defekt zur Restauration ; mit 11 Tabellen. Dt. Zahnärzte-Verl., Köln 2008
32. *Geis-Gerstorfer J.*: Probleme bei der klinischen Bearbeitung von keramischen Restaurationen und die Auswirkungen auf die Stabilität. ZWR - Das Deutsche Zahnärzteblatt 2013;(122 (9)):410-430
33. *Grathwohl G*: Ermüdung von Keramik unter Schwingbeanspruchung. Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 1988;(19):113-124
34. *Gürtler et al.*: Festigkeit und Bruchcharakteristik von 2 Titansystemen. ZWR- Das deutsche Zahnärzteblatt 2005;114(1+2):19-27
35. *Haddad B*: Triceram-Ceramic for Titanium Substructures. Spectrum dialogue 2011;(Vol. 10 No. 3):1-6
36. *Hajtó J*: Vollkeramik: Navigation für Material und Indikation. Vorschau auf das 13. Keramiksymposium der AG Keramik. Das internationale Zahntechnik Magazin 2013;(17):516-524
37. *Hämmerle C*: Dentale Keramiken. Aktuelle Schwerpunkte für die Klinik. Quintessenz-Verl.-GmbH, Berlin, Chicago, Ill, Tokio, Barcelona, Istanbul, London, Mailand, Moskau, Neu Delhi, Paris, Peking, Prag, São Paulo, Seoul, Warschau 2008
38. *Haralur SB*: Evaluation of efficiency of manual polishing over autoglazed and overglazed porcelain and its effect on plaque accumulation. J Adv Prosthodont 2012;(4(4)):179-186
39. *Hoffmann A*: Titan als Dentalwerkstoff. Quintessenz Zahntechnik 2007;(33):430-442
40. *Hohmann A*: Lehrbuch der Zahntechnik. Quintessenz-Verl., Berlin [u.a.] 2005
41. *Janda R*: Silikatkeramiken. Zusammensetzung, Eigenschaften, Anwendung, Wertung: Teil 1. Quintessenz Zahntechnik 2007;(33):448-456
42. *Janda R*: Silikatkeramiken. Zusammensetzung, Eigenschaften, Anwendung, Wertung: Teil 2. Quintessenz Zahntechnik 2007;(33):720-730

43. *Janda R*: Vollkeramiken: Zusammensetzung, Eigenschaften, Anwendung, Wertung. Quintessenz Zahntechnik 2007;(33):46-60
44. *Jung et al.*: Lifetime-limiting strength degradation from contact fatigue in dental ceramics. J Dent Res 2000;(79(2)):722-731
45. *Kappert HF*: Festigkeit von DCS-Zirkoniumdioxidkronen verblendet mit Vitadur D und Triceram. ZWR-Das deutsche Zahnärzteblatt 2001;(110 Heft 3):134-139
46. *Kappert HF, Kah M*: Keramiken - eine Übersicht. Dentalkeramiken und zahntechnische Verfahren zur Herstellung von keramischen Zahnersatz. Quintessenz Zahntechnik 2001;(27):668-687
47. *Kappert et al.*: Metallfreie Brücken für den Seitenzahnbereich. Dental Labor 1990;(37):177-183
48. *Kappert et al.*: Festigkeitsverhalten der In-Ceram-Keramik bei mechanischer und thermischer Wechsellast im Kunstspeichel. Dtsch Zahnärztl Z 1991:129-132
49. *Kelly JR*: Clinical Failure of Dental Ceramic Structures: Insights from Combined Fractography, In Vitro Testing and Finite Element Analysis. Ceram Trans 1995;(48):125-137
50. *Kelly JR*: Ceramics in Restorative and Prosthetic Dentistry. Annu. Rev. Mater. Sci. 1997;(27):443-468
51. *Koke et al.*: Untersuchung zur Zwei-Medien-Abrasion von Titanverblendungen. Deutsche zahnärztliche Zeitschrift 2003;(58):343-346
52. *Körper KH*: Zahnärztliche Werkstoffkunde und Technologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York 1993
53. *Kunzelmann KH*: Vollkeramik auf einen Blick. Leitfaden zur Indikation, Werkstoffauswahl, Vorbereitung und Eingliederung von vollkeramischen Restaurationen. Arbeitsgemeinschaft für Keramik in der Zahnheilkunde, Ettlingen 2008
54. *Lenz E*: Titan als Werkstoff für kombiniert festsitzenden und abnehmbaren Zahnersatz. Sonderdruck aus Innovationen für die Zahnheilkunde. Spitta Verlag 1998
55. *Linsmeier KD*: Technische Keramik. Werkstoffe für höchste Ansprüche. Verl. Moderne Industrie, Landsberg/Lech 2010
56. *Lohbauer et al.*: Influence of surface roughness on mechanical strength of resin composite versus glass ceramic materials. Dent Mater J 2008;(24):250-256

57. *Marshall DB*: An Improved Biaxial Flexure Test for Ceramics. Am Ceram Soc Bull 1980;(59):551
58. *Marx R*: Moderne keramische Werkstoffe für ästhetische Restaurationen - Verstärkung und Bruchzähigkeit. In: Dtsch Zahnärztliche Zeitschrift (1993), 229-236
59. *Marx et al.*: Rissparameter und Weibullmodule: unterkritisches Risswachstum und Langzeitfestigkeit vollkeramischer Materialien. In: Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift (2001), 90-98
60. *McLaren EA, Giordano RA [II]*: Materialeigenschaften, Ästhetik und Schichttechniken einer Zirkonoxid- und Verblendkeramik. Quintessenz Zahntechnik 2007;(33):78-92
61. *McLean JW*: The science and art of dental ceramics. A collection of monographs 1974
62. *Pospiech P*: Werkstoffkundliche und klinische Untersuchungen zur vollkeramischen Klebebrücke. Quintessenz-Verl., Berlin 1999
63. *Praud et al.*: Keramik auf Titan. Keramisch verblendeter Zahnersatz aus Titan: Klinische Abfolge. Dental Labor 2004:1407-1412
64. *Pröbster et al.*: Klinik und Technik des keramischen Kronen- und Brückensystems In-Ceram. Quintessenz 1990;(41):613-620
65. *Quirynen et al.*: The influence of surface free energy and surface roughness on early plaque formation. An in vivo study in man. J Clin Periodontol 1990;(17(3)):138-144
66. *Quirynen M, Bollen CML*: The influence of surface roughness and surface-free energy on supra- and subgingival plaque formation in man. A review of the literature. J Clin Periodontol 1995;(22):1-14
67. *Rashid H*: The effect of surface roughness on ceramics used in dentistry: A review of literature. European Journal of Dentistry 2014;(Vol. 8, Issue 4):571-579
68. *Reise M*: Das kleine ABC der Verblendkeramik. Materialkunde. ZWP spezial 2004:22-25
69. *Rosenstiel et al.*: A comparison of glazed and polished dental porcelain. Int J Prosthodont 1989;(2):524-529
70. *Rosentritt et al.*: Influence of stress simulation parameters on the fracture-strength of all-ceramic fixed-partial dentures. Dent Mater 2006;(22(2)):176-182
71. *Sailer et al*: Five-year clinical results of zirconia frameworks for posterior fixed partial dentures. Int J Prosthodont 2007;(20):383-388

72. *Sailer et al.*: Zirkonoxid-Verblendkeramiken: Farbstabilität und technische Verarbeitung. *Quintessenz Zahntechnik* 2005;(31(5)):498-512
73. *Sarikaya I, Güler AU*: Effects of different polishing techniques on the surface roughness of dental porcelains. *J Appl Oral Sci* 2010;(18(1)):10-16
74. *Schwartz ML, Philipps RW*: Comparison of bacterial accumulation on rough and smooth enamel surfaces. *J Periodontoll* 1957;(28):304-307
75. *Schwickerath H*: Dauerfestigkeit von Keramik. In: *Dtsch Zahnärztliche Zeitschrift* (1986), 264-266
76. *Schwickerath H*: Dauerfestigkeit von Metallkeramik. In: *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift* (1984), 143-145
77. *Schwickerath H*: Werkstoffe der Zahnheilkunde. Grundlagen, Verarbeitung, Beanspruchung und Verhalten im klinischen Einsatz. Buch und Zeitschriften-Verlag „Die Quintessenz“ 1977
78. *Schwickerath H*: Das Festigkeitsverhalten von Dentalkeramik. *ÉAStrength properties of dental ceramicsÉU*. *Deutsche zahnärztliche Zeitschrift* 1985;40(3):273-275
79. *Shirakura et al.*: The Influence of veneering porcelain thickness of all-ceramic and metal ceramic crowns on failure resistance after cycling loading. *J Prosthet Dent* 2009:119-127
80. *Spintzyk et al.*: Ein System zur Herstellung reproduzierbarer Probekörper. *Quintessenz Zahntechnik* 2012;(38(5)):542-549
81. *Stawarczyk et al.*: Einfluss des Gerüstdesigns auf die Bruchlast von ZrO₂-Kronen. *Quintessenz Zahntechnik* 2008;(34):1246-1254
82. *Stawarczyk B, Fischer J*: Vollkeramik, Titan oder konventionelle Metallkeramik. Welche Bruchlast halten die Rekonstruktionen in vitro aus? In: *Quintessenz Zahntechn* 2008; 34(5), 556-564
83. *Strietzel R*: Die Werkstoffkunde der Metall-Keramik-Systeme. Verlag Neuer Merkur, München 2005
84. *Strub et al.*: Curriculum Prothetik. Quintessenz-Verl.-GmbH, Berlin [u.a.] 2005
85. *Tholey MJ, Thiel N*: Das Brennen von dentaler Verblendkeramik. *Quintessenz Zahntechnik* 2009;(8):1018-1029
86. Vollkeramik. Verlag Neuer Merkur, München 2002
87. *Wachtman et al.*: Biaxial Flexure Tests of Ceramic Substrates. *J Mater* 1972;(7):188

88. *Wagner R*: Welche dentalen Aufbrennlegierungen bzw. -typen sind wissenschaftlich anerkannt? *Quintessenz Zahntechnik* 2009;(35):966-969
89. *Weber et al.*: Voll- und Glaskeramikkronen klinisch betrachtet. *Zahnärztliche Mitteilungen* 1987;77.(21):2416-2421
90. *Wehnert et al.*: Einfluss der Bonder auf die Titan-Keramik-Verbundfestigkeit. *Deutsche zahnärztliche Zeitschrift* 2009;(64):28-33
91. *Wehnert et al.*: Untersuchungen zum Verbund von Zirkonia-TZP zu ausgewählten Verblendkeramiken. *Quintessenz Zahntechnik* 2010;(36):36-47
92. *Wehnert et al.*: Einfluss von mechanischen Oberflächenbearbeitungsverfahren auf den Verbund von Y-TZP zu vier Verblendkeramiken. *Quintessenz Zahntechnik* 2011;(37(3)):342-356
93. *Wiley MG*: Effects of porcelain on occluding surface of restored teeth. *J Prosthet Dent* 1989;(61):133-137
94. *Yener et al.*: The effect of glazing on the biaxial flexural strength of the different zirconia core materials. *Acta Odontol. Latinoam.* 2011;(Vol. 24 Nr. 2):133-140
95. *Yilmaz et al.*: Effect of fatigue on biaxial flexural strength of bilayered porcelain/zirconia (Y-TZP) dental ceramics. *Dental materials journal* 2011;(27):786-795

9 Erklärung zum Eigenanteil der Dissertationsschrift

Die Arbeit wurde in der Sektion „Medizinische Werkstoffkunde und Technologie“ des Universitätsklinikums Tübingen unter der Betreuung von Herrn Professor Dr. Jürgen Geis-Gerstorfer durchgeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte durch Professor Dr. Jürgen Geis-Gerstorfer und Frau Christine Schille (physikalisch technische Assistentin).

Sämtliche Versuche wurden nach Einarbeitung durch Labormitglieder (Christine Schille, Sebastian Spintzyk, Ernst Schweizer) von mir durchgeführt.

Die statistische Auswertung erfolgte nach Anleitung von Frau Christine Schille durch mich.

Ich versichere, das Manuskript selbstständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Teile der Arbeit wurden auf der International Association of Dental Research (IADR) Continental European Division 2013 mittels eines Posters veröffentlicht. Die Veröffentlichung wurde von Frau Christine Schille verfasst und die Vorstellung erfolgte durch Herrn Talal Alzahrani (Zahnarzt). Die entsprechenden Teile wurden von mir in der Doktorarbeit im Literaturverzeichnis gekennzeichnet.

Tübingen, den 14.02.2016

Christina Kathrin Margarete Renate Weismann

10 Anhang

10.1 T-Test

Tabelle 21: T-Test Gruppe A Titan

Oberflächenzustände		Ergebnisse t-Test (P-Wert < 0,05)
as-fired (1)	beschliffen (2)	$1,154 e^{-17}$ → signifikant
as-fired (1)	Glanzbrand (3)	0,371 → nicht signifikant
as-fired (1)	poliert (4)	$6,965 e^{-17}$ → signifikant
beschliffen (2)	Glanzbrand (3)	$9,841 e^{-14}$ → signifikant
Glanzbrand (3)	poliert (4)	$5,422 e^{-13}$ → signifikant
beschliffen (2)	poliert (4)	0,426 → nicht signifikant

Tabelle 22: T-Test Gruppe B Zirkon

Oberflächenzustände		Ergebnisse t-Test (P-Wert < 0,05)
as-fired (1)	beschliffen (2)	0,007 → signifikant
as-fired (1)	Glanzbrand (3)	$8,147 e^{-6}$ → signifikant
as-fired (1)	poliert (4)	0,894 → nicht signifikant
beschliffen (2)	Glanzbrand (3)	$2,739 e^{-11}$ → signifikant
Glanzbrand (3)	poliert (4)	$1,463 e^{-7}$

		→ signifikant
beschliffen (2)	poliert (4)	6,254 e ⁻⁵ → signifikant

Tabelle 23: T-Test Gruppe A und B im Vergleich

Oberflächenzustände		Ergebnisse t-Test (p-Wert < 0,05)
Gruppe A as-fired (1)	Gruppe B as-fired (1)	2,156 e ⁻⁶ → signifikant
Gruppe A as-fired (1)	Gruppe B beschliffen (2)	1,229 e ⁻¹⁴ → signifikant
Gruppe A as-fired (1)	Gruppe B Glanzbrand (3)	0,555 → nicht signifikant
Gruppe A as-fired (1)	Gruppe B poliert (4)	1,208 e ⁻⁹ → signifikant
Gruppe A beschliffen (2)	Gruppe B beschliffen (2)	0,022 → signifikant
Gruppe A beschliffen (2)	Gruppe B Glanzbrand (3)	1,842 e ⁻¹³ → signifikant
Gruppe A beschliffen (2)	Gruppe B poliert (4)	2,926 e ⁻⁹ → signifikant
Gruppe A Glanzbrand (3)	Gruppe B beschliffen (2)	4,974 e ⁻¹¹ → signifikant
Gruppe A Glanzbrand (3)	Gruppe B Glanzbrand (3)	0,198 → nicht signifikant
Gruppe A Glanzbrand (3)	Gruppe B poliert (4)	1,498 e ⁻⁶ → signifikant
Gruppe A poliert (4)	Gruppe B beschliffen (2)	0,111 → nicht signifikant

Gruppe A poliert (4)	Gruppe B Glanzbrand (3)	7,468 e ⁻¹³ → signifikant
Gruppe A poliert (4)	Gruppe B poliert (4)	5,419 e ⁻⁸ → signifikant

Tabelle 24: T-Test Gruppe C Titan

Oberflächenzustände		Ergebnisse t-Test (P-Wert < 0,05)
as-fired (1)	beschliffen (2)	2,067 e ⁻¹² → signifikant
as-fired (1)	Glanzbrand (3)	0,363 → nicht signifikant
as-fired (1)	poliert (4)	1,799 e ⁻⁸ → signifikant
beschliffen (2)	Glanzbrand (3)	2,294 e ⁻¹⁴ → signifikant
Glanzbrand (3)	poliert (4)	5,617 e ⁻⁹ → signifikant
beschliffen (2)	poliert (4)	0,0001 → signifikant

Tabelle 25: T-Test Gruppe D Zirkon

Oberflächenzustände		Ergebnisse t-Test (P-Wert < 0,05)
as-fired (1)	beschliffen (2)	3,599 e ⁻⁵ → signifikant
as-fired (1)	Glanzbrand (3)	0,0007 → signifikant
as-fired (1)	poliert (4)	0,009 → signifikant
beschliffen (2)	Glanzbrand (3)	4,269 e ⁻⁷

		→ signifikant
Glanzbrand (3)	poliert (4)	0,01 → signifikant
beschliffen (2)	poliert (4)	$6,254 \cdot 10^{-5}$ → signifikant

Tabelle 26: T-Test Gruppe C und D im Vergleich

Oberflächenzustände		Ergebnisse t-Test (p-Wert < 0,05)
Gruppe C as-fired (1)	Gruppe D as-fired (1)	1 → nicht signifikant
Gruppe C as-fired (1)	Gruppe D beschliffen (2)	$3,599 \cdot 10^{-5}$ → signifikant
Gruppe C as-fired (1)	Gruppe D Glanzbrand (3)	0,0007 → signifikant
Gruppe C as-fired (1)	Gruppe D poliert (4)	0,009 → signifikant
Gruppe C beschliffen (2)	Gruppe D beschliffen (2)	0,445 → nicht signifikant
Gruppe C beschliffen (2)	Gruppe D Glanzbrand (3)	$7,627 \cdot 10^{-9}$ → signifikant
Gruppe C beschliffen (2)	Gruppe D poliert (4)	0,0016 → signifikant
Gruppe C Glanzbrand (3)	Gruppe D beschliffen (2)	$1,7304 \cdot 10^{-9}$ → signifikant
Gruppe C Glanzbrand (3)	Gruppe D Glanzbrand (3)	0,1207 → nicht signifikant
Gruppe C Glanzbrand (3)	Gruppe D poliert (4)	$7,883 \cdot 10^{-9}$ → signifikant
Gruppe C poliert (4)	Gruppe D beschliffen (2)	0,003

		→ signifikant
Gruppe C poliert (4)	Gruppe D Glanzbrand (3)	1,916 e ⁻⁵ → signifikant
Gruppe A poliert (4)	Gruppe D poliert (4)	5,419 e ⁻⁸ → signifikant

Tabelle 27: T-Test Gruppe E Titan

Oberflächenzustände		Ergebnisse t-Test (P-Wert < 0,05)
as-fired (1)	beschliffen (2)	7,931 e ⁻⁶ → signifikant
as-fired (1)	Glanzbrand (3)	0,069 → nicht signifikant
as-fired (1)	poliert (4)	2,239 e ⁻⁵ → signifikant
beschliffen (2)	Glanzbrand (3)	0,007 → signifikant
Glanzbrand (3)	poliert (4)	0,009 → signifikant
beschliffen (2)	poliert (4)	0,168 → nicht signifikant

Tabelle 28: T-Test Gruppe F Zirkon

Oberflächenzustände		Ergebnisse t-Test (P-Wert < 0,05)
as-fired (1)	beschliffen (2)	0,136 → nicht signifikant
as-fired (1)	Glanzbrand (3)	0,243 → nicht signifikant

as-fired (1)	poliert (4)	0,575 → nicht signifikant
beschliffen (2)	Glanzbrand (3)	0,097 → nicht signifikant
Glanzbrand (3)	poliert (4)	0,127 → nicht signifikant
beschliffen (2)	poliert (4)	0,159 → nicht signifikant

Tabelle 29: T-Test Gruppe E und F im Vergleich

Oberflächenzustände		Ergebnisse t-Test (p-Wert < 0,05)
Gruppe E as-fired (1)	Gruppe F as-fired (1)	0,009 → signifikant
Gruppe E as-fired (1)	Gruppe F beschliffen (2)	1,296 e ⁻⁵ → signifikant
Gruppe E as-fired (1)	Gruppe F Glanzbrand (3)	0,859 → nicht signifikant
Gruppe E as-fired (1)	Gruppe F poliert (4)	0,0001 → signifikant
Gruppe E beschliffen (2)	Gruppe F beschliffen (2)	0,008 → signifikant
Gruppe E beschliffen (2)	Gruppe F Glanzbrand (3)	0,035 → signifikant
Gruppe E beschliffen (2)	Gruppe F poliert (4)	0,003 → signifikant
Gruppe E Glanzbrand (3)	Gruppe F beschliffen (2)	0,087 → nicht signifikant
Gruppe E Glanzbrand (3)	Gruppe F Glanzbrand (3)	0,309 → nicht signifikant
Gruppe E Glanzbrand	Gruppe F poliert (4)	0,319

(3)		→ nicht signifikant
Gruppe E poliert (4)	Gruppe F beschliffen (2)	0,409 → nicht signifikant
Gruppe E poliert (4)	Gruppe F Glanzbrand (3)	0,124 → nicht signifikant
Gruppe E poliert (4)	Gruppe F poliert (4)	0,406 → nicht signifikant

Tabelle 30: T-Test Mittenrauhwerte Gruppe A Titan

Oberflächenzustände		Ergebnisse t-Test (P-Wert < 0,05)
as-fired (1)	beschliffen (2)	2,417 e ⁻⁵ → signifikant
as-fired (1)	Glanzbrand (3)	0,041 → signifikant
as-fired (1)	poliert (4)	0,021 → signifikant
beschliffen (2)	Glanzbrand (3)	2,753 e ⁻⁸ → signifikant
Glanzbrand (3)	poliert (4)	0,026 → signifikant
beschliffen (2)	poliert (4)	3,781 ⁻⁹ → signifikant

Tabelle 31: T-Test Mittenrauhwerte Gruppe B Zirkon

Oberflächenzustände		Ergebnisse t-Test (P-Wert < 0,05)
as-fired (1)	beschliffen (2)	1,806 e ⁻⁶ → signifikant
as-fired (1)	Glanzbrand (3)	0,123 → nicht signifikant

as-fired (1)	poliert (4)	0,078 → nicht signifikant
beschliffen (2)	Glanzbrand (3)	5,768 e ⁻⁶ → signifikant
Glanzbrand (3)	poliert (4)	0,975 → signifikant
beschliffen (2)	poliert (4)	1,959 e ⁻⁶ → nicht signifikant

Tabelle 32: T-Test Mittenrauhwerte Gruppe A und B im Vergleich

Oberflächenzustände		Ergebnisse t-Test (p-Wert < 0,05)
Gruppe A as-fired (1)	Gruppe B as-fired (1)	0,012 → signifikant
Gruppe A as-fired (1)	Gruppe B beschliffen (2)	0,001 → signifikant
Gruppe A as-fired (1)	Gruppe B Glanzbrand (3)	0,1 → nicht signifikant
Gruppe A as-fired (1)	Gruppe B poliert (4)	0,077 → signifikant
Gruppe A beschliffen (2)	Gruppe B beschliffen (2)	0,086 → nicht signifikant
Gruppe A beschliffen (2)	Gruppe B Glanzbrand (3)	9,885 e ⁻⁸ → signifikant
Gruppe A beschliffen (2)	Gruppe B poliert (4)	2,926 e ⁻⁹ → signifikant
Gruppe A Glanzbrand (3)	Gruppe B beschliffen (2)	1,544 e ⁻⁶ → signifikant
Gruppe A Glanzbrand (3)	Gruppe B Glanzbrand (3)	0,572 → nicht signifikant
Gruppe A Glanzbrand	Gruppe B poliert (4)	0,434

(3)		→ signifikant
Gruppe A poliert (4)	Gruppe B beschliffen (2)	1,407 e ⁻⁷ → signifikant
Gruppe A poliert (4)	Gruppe B Glanzbrand (3)	0,015 → signifikant
Gruppe A poliert (4)	Gruppe B poliert (4)	0,062 → signifikant

10.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einteilung Dentalkeramik.....	9
Abbildung 2: Phasenumwandlungen des Zirkoniumdioxids (modifiziert nach [8])	12
Abbildung 3: WAK-Werte Triceram® [13].....	23
Abbildung 4: Versuchsaufbau 3-Punkt-Biegetest (modifiziert nach [8]).....	33
Abbildung 5: Versuchsaufbau 4-Punkt-Biegetest (modifiziert nach [8]).....	33
Abbildung 6: Versuchsaufbau biaxialer Biegeversuch (modifiziert nach [21])	34
Abbildung 7: Einteilung der Prüfkörper	40
Abbildung 8: Das Pelletor-System ®	42
Abbildung 9: Keramikpulver portioniert.....	44
Abbildung 10: Keramikmasse angerührt	44
Abbildung 11: Keramikmasse in Kartusche.....	45
Abbildung 12: positionierte Vliespapierchen.....	46
Abbildung 13: Kartusche im Aluminiumgehäuse	46
Abbildung 14: Kartusche mit vollgesogenem Vliespapierchen nach Verdichtung	47
Abbildung 15: fertiger Grünling in Kartusche ohne Vliespapierchen	47
Abbildung 16: Fertiggestellter Grünling auf dem Stempel des Pelletor-Systems®	48
Abbildung 17: Fertiggestellter Grünling auf einem Papiertuch	48
Abbildung 18: Brenngutträger mit festgelegter Reihenfolge der Keramikgrünlinge	49
Abbildung 19: Brenngutträger mit fertiggestellten Keramikrohlingen.....	52
Abbildung 20: Brennofen ist geschlossen, Brenngutträger auf Watte platziert...	53
Abbildung 21: Brennofen offen.....	53
Abbildung 22: Fertiggestellte Prüfkörper nach dem Brand auf einem Papiertuch	54
Abbildung 23: Aufbau des Schleif- und Poliergerätes	56
Abbildung 24: Geschwärtzter Prüfkörper an Acrylblock befestigt.....	57

Abbildung 25: Prüfkörper an Acrylblock mit fixiertem Winkelstück	57
Abbildung 26: Prüfkörper während des Schleifvorgangs.....	58
Abbildung 27: Stains Universal Pulver Dose mit angerührter Masse auf einer Glasplatte	59
Abbildung 28: Aufgetragene Glanzbrandmasse auf einer Probe	59
Abbildung 29: Verteilung der Masse mittels geriffeltem Griff einer Pinzette auf einer Probe.....	60
Abbildung 30: Polieren des Prüfkörpers.....	62
Abbildung 31: Darstellung der Schieblehre mit Probe.....	63
Abbildung 32: Detailansicht des Lagers der Prüfmaschine: Links: konzentrisch angeordneten Stahlkugeln; Rechts: Probe auf Kugeln gelagert (beschriftete/nicht bearbeitete Seite oben)	64
Abbildung 33: Stempelgehäuse/Stempel mit Lager	65
Abbildung 34: Ansicht des eingespannten Stempels und Lager in der Prüfmaschine.....	65
Abbildung 35: Beispielskizze ISO-Test	66
Abbildung 36: Beispielkurven des statischen Stufentests	67
Abbildung 37: Schwingprüfmaschine Dyna-Mess (Aachen)	68
Abbildung 38: Beispielkurven des dynamischen Stufentests.....	69
Abbildung 39: Sputtergerät SCD 005 BAL-TEC	71
Abbildung 40: Graphitplättchen.....	72
Abbildung 41: Besputterte Proben auf Probehalter	73
Abbildung 42: Darstellung der Mittenrauwerte und deren Standardabweichung des Titanbrandes	76
Abbildung 43: Darstellung Mittenrauwerte und deren Standardabweichung [μm] des Zirkoniumdioxidbrandes	77
Abbildung 44: Vergleich Mittenrauwerte Titan- und Zirkoniumdioxidbrand.....	78
Abbildung 45: Darstellung biaxiale Biegefestigkeit Titanbrand	79
Abbildung 46: Darstellung biaxiale Biegefestigkeit Zirkoniumdioxidbrand	80
Abbildung 47: Vergleich der biaxiale Biegefestigkeit von Titan- und Zirkoniumdioxidbrand	81
Abbildung 48: Weibull Verteilung Titanbrand A	82
Abbildung 49: Weibull Verteilung Zirkoniumdioxidbrand B	83

Abbildung 50: Weibull Verteilung as-fired (1) Titan- und Zirkoniumdioxidbrand im Vergleich	84
Abbildung 51: Weibull Verteilung beschliffen (2) Titan- und Zirkoniumdioxidbrand im Vergleich	85
Abbildung 52; Weibull Verteilung Glanzbrand (3) Titan- und Zirkoniumdioxidbrand im Vergleich	86
Abbildung 53: Weibull Verteilung poliert (4) Titan- und Zirkoniumdioxidbrand im Vergleich	86
Abbildung 54: Weibullfestigkeit Vergleich Titan- und Zirkoniumdioxidbrand.....	88
Abbildung 55: Diagramm der Probe C10 (as-fired).....	90
Abbildung 56: Diagramm der Probe D5 (as-fired).....	90
Abbildung 57: Diagramm der Probe C16 (beschliffen).....	91
Abbildung 58: Diagramm der Probe 19 (beschliffen)	91
Abbildung 59: Diagramm der Probe D33 (poliert).....	92
Abbildung 60: Diagramm der Probe C27 (Glanzbrand).....	92
Abbildung 61: Diagramm der Probe D 30 (Glanzbrand).....	93
Abbildung 62: Vergleich Biegefestigkeit statischer Stufentest	94
Abbildung 63: Darstellung der Werte Gruppe C (Titanbrand).....	97
Abbildung 64: Darstellung der Werte Gruppe D (Zirkoniumdioxidbrand).....	99
Abbildung 65: Diagramme Probe E8 (as-fired)	100
Abbildung 66: Diagramme Probe E16 (beschliffen)	101
Abbildung 67: Diagramme Probe E24 (Glanzbrand).....	101
Abbildung 68: Diagramme Probe E35 (poliert)	102
Abbildung 69: Vergleich Biegefestigkeit dynamischer Stufentest	103
Abbildung 70: Vergleich Biegefestigkeit Dauerfestigkeitstests	105
Abbildung 71: REM-Bilder Oberflächenzustand as-fired (1).....	109
Abbildung 72: REM-Bilder Oberflächenzustand beschliffen (2).....	111
Abbildung 73: REM-Bilder Oberflächenzustand Glanzbrand (3)	113
Abbildung 74: REM-Bilder Oberflächenzustand poliert (4).....	115

10.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich Zusammensetzung Porzellan und Dentalkeramik (modifiziert nach [31]).....	8
Tabelle 2: Einteilung Dentallegierungen (modifizierte nach [83]).....	15
Tabelle 3: Sinterprogramm Dentinbrand 1 für Titan.....	50
Tabelle 4: Sinterprogramm Dentinbrand 1 für Zirkoniumdioxid.....	51
Tabelle 5: Übersicht EVE Diapol Diamantpolierer	62
Tabelle 6: Mittenrauhwerte und deren Standardabweichung des Titanbrandes ..	75
Tabelle 7: Mittenrauhwerte und deren Standardabweichung des Zirkoniumdioxidbrandes	77
Tabelle 8: Biaxiale Biegefestigkeit Titanbrand	79
Tabelle 9: biaxiale Biegefestigkeit Zirkoniumdioxidbrand.....	80
Tabelle 10: Weibull Modul m Vergleich Titan- und Zirkoniumdioxidbrand	83
Tabelle 11: Weibullfestigkeit σ_0 des Titan- und Zirkoniumdioxidbrandes.....	87
Tabelle 12: Übersicht Weibullstatistik.....	89
Tabelle 13: Biegefestigkeitswerte des statischen Stufentests	94
Tabelle 14: Werte der Gruppe C (Titanbrand)	95
Tabelle 15: Werte der Gruppe D (Zirkoniumdioxidbrand)	98
Tabelle 16: Mittelwerte Biegefestigkeit dynamischer Stufentest.....	103
Tabelle 17: Mittlere Anzahl Lastwechsel bis zum Bruch.....	104
Tabelle 18: Werte Biegefestigkeit Dauerfestigkeitstests [MPa].....	105
Tabelle 19: prozentuale Abnahme im Vergleich ISO-Test und statischer Stufentest	106
Tabelle 20: prozentuale Abnahme im Vergleich ISO-Test und dynamischer Stufentest	107
Tabelle 21: T-Test Gruppe A Titan	152
Tabelle 22: T-Test Gruppe B Zirkon.....	152
Tabelle 23: T-Test Gruppe A und B im Vergleich.....	153
Tabelle 24: T-Test Gruppe C Titan	154
Tabelle 25: T-Test Gruppe D Zirkon.....	154
Tabelle 26: T-Test Gruppe C und D im Vergleich.....	155

Tabelle 27: T-Test Gruppe E Titan	156
Tabelle 28: T-Test Gruppe F Zirkon	156
Tabelle 29: T-Test Gruppe E und F im Vergleich	157
Tabelle 30: T-Test Mittenrauhwerte Gruppe A Titan.....	158
Tabelle 31: T-Test Mittenrauhwerte Gruppe B Zirkon	158
Tabelle 32: T-Test Mittenrauhwerte Gruppe A und B im Vergleich	159

10.4 Geräte und Materialliste

Autromat 654 press-i-dent	DEKEMA Dental-Keramiköfen GmbH, D-83395 Freilassing
Diamantschleifkörper REF: 88822 314 014	Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG Komet, D-32657 Lemgo
Diapol Keramikpoliersatz	EVE ErnstVetter GmbH, D-75179 Pforzheim
DYNA-MESS Prüfmaschine	DYNA- ESS Prüfsysteme GmbH D-52222 Aachen/Stolberg
INTRAccompact Winkelstück 25 LHC	KaVo Dental GmbH, D-88400 Biberach/Riß
INTRAmatic 14 ES	KaVo Dental GmbH, D-88400 Biberach/Riß
Isolating Fluid Carat Keramikisolierung	Hager & Werken GmbH & Co. KG, D-47260 Duisburg

Keramikbrennstifte	Renfert GmbH, D-78247 Hilzingen
Pelleter-System®	Zahntechnikermeister Gerald Wölz, D-72072 Tübingen
Perthometer S6P	MAHR GmbH, D-37073 Göttingen
Rasterelektronenmikroskop LEO 1430	Zeiss GmbH, D-07745 Jena
Schleif- und Poliergerät	Poliklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde Tübingen Sektion für Medizinische Werkstoffkunde und Technologie, D-72076 Tübingen
Sputtergerät SCD 005	BAL-TEC GmbH, D-58454 Witten
Stains Universal Modellierflüssigkeit; 20 ml Nr.: 299-110-40	Dentaurum GmbH & Co. KG, D-75228 Ispringen
Triceram Dentin Keramikpulver Farbe A3; 40g Dose Nr.: 294-213-60	Dentaurum GmbH & Co. KG, D-75228 Ispringen
Universalprüfmaschine Zwick Zwick 010	Zwick GmbH & Co. KG, D-89079 Ulm
Wabenbrenngutträger	megadental GmbH, D-63654 Büdingen

11 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. J. Geis-Gerstorfer für das Vertrauen und die Überlassung des sehr interessanten Themas sowie die intensive Betreuung.

Sehr herzlich möchte ich Frau Christine Schille danken für das unermüdliche Engagement und Ihre Geduld, mit denen sie mich während der gesamten Zeit der Betreuung unterstützt hat.

Des Weiteren möchte ich mich bei der gesamten Abteilung der Medizinischen Werkstoffkunde und Technologie der Eberhard Karls Universität Tübingen bedanken für das freundliche und angenehme Arbeitsklima und die Hilfsbereitschaft. Insbesondere bei Herrn Ernst Schweizer und Herrn Sebastian Spintzyk.

Mein Dank geht an die Gebr. Brasseler GmbH & Co, Dentaurum GmbH & Co. KG und DEKEMA Dental-Keramiköfen GmbH für die Bereitstellung der Materialien.

Einen herzlichen Dank geht an meinen Vater für die aufgebrauchte Zeit und Geduld beim Korrekturlesen. Meiner Familie möchte ich für die unentwegte Unterstützung und Motivation während dieser Arbeit und des gesamten Studiums danken. Hannes, vielen Dank für die Unterstützung.

12 Curriculum vitae

Persönliche Daten

Name	Christina Kathrin Margarete Renate Weismann
Geburtsort	Landau in der Pfalz
Geburtsdatum	11.10.1987
Familienstand	ledig
Staatsangehörigkeit	Deutsch

Schulbildung und Studium

1994-1998	Grundschule Pestalozzischule, Kaiserslautern
1998-2007	St. Franziskus Gymnasium, Kaiserslautern
16.03.2007	Abschluss der Allgemeinen Hochschulreife am St. Franziskus Gymnasium Kaiserslautern
2008-2014	Studium der Zahnmedizin an der Eberhard Karls Universität zu Tübingen
26.11.2014	Zahnmedizinisches Staatsexamen
08.12.2014	zahnärztliche Approbationsurkunde Regierungspräsidium, Stuttgart