

Aus der Abteilung für Experimentelle Zahnheilkunde der Klinik für Zahn-,
Mund- und Kieferheilkunde
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Einfluss der Washbrand-Temperatur auf das Temperatur-
Wechselastverhalten aufbrennfähiger Cobalt-Chrom-
Legierungen

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Thorsten Hoopmann

aus Cloppenburg

Gutachter: 1. Priv.-Doz. Dr. R. Strietzel

2. Prof. Dr. med. dent. K. Böning

3. Prof. Dr. J. M. Setz

Datum der Promotion: 30.11.2012

Widmung

In Gedenken an meine Mutter

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	7
2 Schrifttum	9
2.1 Gerüstmaterialien	9
2.1.1 Metalle	10
2.1.1.1 Edelmetalllegierungen	11
2.1.1.2 Nichtedelmetall-Legierungen	11
2.1.2 Keramiken.....	13
2.2 Verblendmaterialien	14
2.2.1 Kunststoffe	14
2.2.2 Keramiken.....	14
2.3 Verbund zwischen Metall und Keramik	15
2.3.1 Verbund durch mechanische Kräfte.....	16
2.3.2 Kontraktionsvorgänge beim Brennen und Abkühlen	17
2.3.3 Zwischenmolekulare Anziehungskräfte	18
2.3.4 Chemische Bindung durch Haftoxide	20
2.3.5 Einfluss der Verarbeitung	20
2.3.5.1 Gerüsterstellung.....	21
2.3.5.2 Verblendung	22
2.3.6 Einfluss einwirkender Kräfte	24
2.3.6.1 Mechanische Einflüsse	24
2.3.6.2 Thermische Einflüsse.....	26
2.3.6.3 Chemische Einflüsse	27
2.4 Werkstoffprüfungen	28
2.4.1 Notwendigkeit von Prüfverfahren.....	28
2.4.2 Verfahren zur werkstoffkundlichen Prüfung.....	28
2.5. Prüfverfahren für die Verbundfestigkeit	29
2.5.1 Bruchlastversuch nach VOSS	30
2.5.2 Drei-Punkt-Biegeversuch nach SCHWICKERATH	30
2.5.3 Schertest nach SCHMITZ-SCHULMEYER	30
2.5.4 Zugversuch nach PÜCHNER	31
2.5.5 Temperaturwechsellasttest.....	31
2.5.6 Abschrecktest	31
2.5.7 Thermoschocktest.....	33

2.6 Vergleich der Methoden und klinische Übertragbarkeit	33
3 Material und Methoden	36
3.1. Verwendete Materialien	36
3.1.1 Verwendete Metalle.....	36
3.1.1.1 Wirobond C - Physikalische Parameter und Zusammensetzung.....	36
3.1.1.2 Wirobond 280 - Physikalische Parameter und Zusammensetzung.....	37
3.1.2 Verwendete Keramiken.....	38
3.1.2.1 Vita VM13	38
3.1.2.2 Duceram Kiss	39
3.2 Herstellung der Prüfkörper	39
3.3 Der Abschrecktest	42
4 Ergebnisse	46
4.1 Ergebnisse des Abschrecktests für Wirobond C	47
und Duceram Kiss	47
4.2 Ergebnisse des Abschrecktests für Wirobond C	48
mit Vita VM 13.....	48
4.3 Ergebnisse des Abschrecktests für Wirobond 280	49
mit Duceram Kiss	49
4.4 Ergebnisse des Abschrecktests für Wirobond 280	51
mit Vita VM 13.....	51
4.5 Klassifizierung der Bruchverläufe.....	53
4.5.1 Abhängigkeit des Bruchverlaufs von der Washbrand-Temperatur.....	53
4.5.2 Abhängigkeit des Bruchverlaufs von der Abschrecktemperatur	60
4.5.3 Bruchverlauf bei Wirobond C mit Duceram Kiss	62
4.5.4 Bruchverlauf bei Wirobond C/Vita VM 13	64
4.5.5 Bruchverlauf bei Wirobond 280/ Duceram Kiss	65
4.5.6 Bruchverlauf bei Wirobond 280/Vita VM 13.....	67
4.6 Vergleich der Systeme	69
5 Diskussion.....	78
5.1 Fehlerdiskussion	78
5.1.1 Herstellung der Gerüste	78
5.1.2 Verblendung der Gerüste	80
5.1.3 Versuchsaufbau- und durchführung	81
5.1.3.1 Temperatur im Versuchsofen.....	81
5.1.3.2 Temperatur im Wasserbad.....	81
5.1.4 Auswertung und Beurteilung der Sprünge.....	82
5.1.4.1 Direkte Sprünge im Versuch.....	82

5.1.4.2 Spätsprünge einen Tag nach dem Versuch	82
5.1.4.3 Eignung des Testverfahrens	83
5.2 Diskussion der Messwerte	83
5.2.1 Wirobond C mit Duceram Kiss.....	83
5.2.2 Wirobond C mit Vita VM 13	84
5.2.3 Wirobond C - Duceram Kiss vs. Vita VM 13.....	85
5.2.4 Wirobond 280 mit Duceram Kiss.....	86
5.2.5 Wirobond 280 mit Vita VM 13	87
5.2.6 Wirobond 280 - Duceram Kiss vs. Vita VM 13.....	88
5.2.7 Vergleich Wirobond C und Wirobond 280	89
5.3 Klinische Bedeutung.....	89
6 Zusammenfassung	91
6.1 Summary	93
7 Literaturverzeichnis	94
8 Anhang	100
8.1 Werkstoffverzeichnis.....	100
8.2 Abkürzungsverzeichnis	101
Danksagung	102
Lebenslauf	103
Selbständigkeitserklärung	104

1 Einleitung

In der Zahnmedizin und der Zahntechnik gilt es seit je her ästhetische und langfristig stabile prothetische Restaurationen zu fertigen.

Seitdem es den Firmen DEGUSSA aus Pforzheim und VITA Zahnfabrik aus Bad Säckingen in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts gelang, einen dauerhaften Verbund zwischen Metall und Keramik zu erzeugen, kann man dieser Forderung entscheidend nachkommen. So konnten Metallgerüste hergestellt werden, die eine hohe Passung gewährleisteten und die man mit einer Keramik so verblenden kann, dass den ästhetischen Ansprüchen gerecht werden konnte [1-2].

Möglich war dies, indem man die Wärmeausdehnungskoeffizienten beider Werkstoffe aufeinander abstimmt [3-5]. Dabei näherte man die Wärmeausdehnungskoeffizienten einander an, dass sie sich nur noch minimal unterschieden. Es kommt dabei zu dem Effekt, dass sich Metall und Keramik beim Brennen der Keramik und dem anschließenden Abkühlen derart ausdehnen, dass die Keramik auf das Metall aufschumpft. Der Schmelzpunkt des Metalls, bzw. die Liquidustemperatur der Metallegierung, muss dabei höher sein als die Brenntemperatur der keramischen Massen.

Dies wurde zunächst nur für hochgoldhaltige Legierungen entwickelt. Im Laufe der Zeit wurden aber auch immer mehr edelmetallreduzierte und dann auch edelmetallfreie Legierungen entwickelt, die in gleicher Weise keramisch verblendet werden sollten. 1999 entwickelte die Firma BEGO in Bremen (Bremer Goldschlägerei) eine der ersten edelmetallfreien Legierungen auf Cobalt-Chrom-Basis (Wirobond®LFC), die auf eine niedrig schmelzende und hochexpandierende Keramik abgestimmt war.

Aufgrund der Kosteneinsparungen im Gesundheitssystem - und spätestens als Folge der Gesundheitsreform 2005, in der Nichtedelmetall-Legierungen (NEM) als zahntechnische Leistung den entsprechenden Regelversorgungen hinterlegt sind - gewinnen solche aufbrennfähigen Legierungen immer mehr an Bedeutung [6]. Deren Weiterentwicklung steht umso mehr im Fokus der Forschung.

Mittlerweile stehen edelmetallfreie Legierungen der hochgoldhaltigen Legierung in kaum etwas mehr nach. Dies gilt insbesondere für die Cobalt-Chrom-Legierungen [7]. Dennoch kommt es in der Praxis immer wieder zu Abplatzungen und Spätsprüngen in der keramischen Masse. Es werden Risse, Sprünge und Abplatzungen registriert, die als Versagen der prothetischen Restauration zu werten sind und eine Neuanfertigung indizieren [8].

Praktische Versuche und Überlegungen, dieses Problem zu beherrschen, haben erkennen lassen, dass sich durch Erhöhung der Washbrand-Temperatur ein besserer Verbund zu ergeben scheint. Um diesem Ansatz nachzugehen, wird das Verhalten entsprechend verblendeter Kronen im Abschrecktest untersucht.

Der Versuch wurde mit 2 verschiedenen und frei auf dem Markt verfügbaren Cobalt-Chrom-Legierungen der Firma BEGO sowie mit 2 verschiedenen ebenfalls frei verfügbaren Verblend-

Keramiken durchgeführt. Es ergeben sich somit 4 verschiedene Kombinationsmöglichkeiten. Es wurden 20 Serien aus jeweils sechs Frontzahnkronen und einer 3-gliedrigen Frontzahnbrücke hergestellt.

Ziel dieser Arbeit ist es, zu untersuchen, ob die Festigkeit der Metall-Keramik-Systeme durch Veränderung der Washbrand-Temperatur verbessert und dies im Rahmen des Abschrecktests dargestellt werden kann.

2 Schrifttum

2.1 Gerüstmaterialien

Zahnersatz ist kein Thema der neueren Geschichte. Seit jeher besteht aufgrund von Zahnverlust der Bedarf an Zahnersatz. Ebenso alt ist auch die Frage nach dem Wie und dem Womit.

Nachvollziehbaren und als solchen zu identifizierbaren Zahnersatz hatte man bereits in der Zeit von 1000 – 400 v. Chr.. Damals stellten die Etrusker aufgrund ihrer großen Fähigkeiten im Bereich der Goldschmiedekunst ersten Zahnersatz her, indem sie Ersatzzähne mit Golddraht in eine Goldbandprothese eingliederten [9].

Es galt von Anfang an, sowohl funktionelle als auch ästhetische Ansprüche an den Zahnersatz zu befriedigen. Diesen Forderungen kamen Ersatzzähne aus Rinderknochen oder Elfenbein nicht ausreichend nach. Auch Ersatzzähne von anderen Tieren und menschliche Zähne, die in Prothesen eingebunden wurden, erfüllten den Anspruch nur unzureichend. Als Folge stellte sich der Umstand ein, dass getragener Zahnersatz nicht alltagstauglich und somit auch nicht sozial verträglich war. Man versuchte, Zahnlücken z.B. durch Fächer zu verstecken und zog sich zum Essen in abgesperrte Räume zurück [10].

Es stellte sich also vor allem die Frage nach dem richtigen Material, mit dem man einen möglichst langfristigen, sowohl stabilen als auch ästhetischen Ansprüchen genügenden Zahnersatz herstellen konnte.

Erst im 18. Jahrhundert brachte dieser Anspruch PIERRE FAUCHARD dazu, zahnfarbene Keramik auf Brückengerüste aus Gold zu brennen. Diese Art der Verbindung hatte nicht den erhofften Erfolg, da der Verbund keinen dauerhaften Bestand hatte. Die Idee gilt aber als Grundlage eines Konzeptes, welches bis heute weiter verfolgt wird [11].

Später legten der Apotheker DUCHÂTEAU und der Zahnarzt DE CHÉMENT den Grundstein für den heutigen Standard der keramischen Verblendung von meist metallischen Gerüstmaterialien, indem sie künstliche Zähne aus Porzellan herstellten [12]. Dieser Ansatz wurde seit 1838 in England und 1844 in Nordamerika, aber erst Ende des 19. Jahrhunderts in Deutschland serienmäßig industriell ausgebaut [13].

Der Verbund zwischen Metall und Keramik war also möglich. Allerdings hielt diese Verbindung einer thermischen und mechanischen Belastung dauerhaft weiterhin unzureichend stand. 1949 gelang es GATZKA durch die Einführung des Vakuumbrennverfahrens, die in der Keramik eingeschlossene Luft nahezu vollständig zu entfernen. Das Porenvolumen konnte von 5,0 auf 0,5 % gesenkt werden, was zur Folge hatte, dass es weniger häufig zu keramischen Abplatzungen führte [14].

Um den Verbund zwischen Metall und Keramik weiter zu verbessern, wurde erkannt, dass die Wärmeausdehnungskoeffizienten der beiden Materialien aufeinander abgestimmt werden müssen. Dieses gelang WEINSTEIN 1952, indem er den Kaliumoxidgehalt seiner Aufbrennkeramik erhöhte [15].

1962 waren es die Firmen DEGUSSA und die VITA Zahnfabrik, die ein marktfähiges System anboten (Vita-Metall-Keramik, VMK-Technik).

Diese Technik stellt bis heute eine sehr gute Möglichkeit dar, zerstörte oder auch verloren gegangene Zähne und Zahnschmelze in einer Weise zu ersetzen, die den funktionellen und auch ästhetischen Ansprüchen immer näher kommt.

Im Laufe der Zeit sind viele verschiedene Materialien, Metalle und Keramiken, auf den Markt gekommen. Um optimale Ergebnisse zu erzielen, müssen Zahnarzt und Zahntechniker gut über die moderne Werkstoffkunde informiert sein. Das bedeutet, dass Gerüstmaterialien und Verblendmaterialien sehr gut aufeinander abgestimmt sein müssen, um einen dauerhaften Verbund garantieren zu können.

2.1.1 Metalle

Metalle werden in der Zahntechnik in elementarer Form oder als Legierung verarbeitet. Legierungen wurden entwickelt, da die Eigenschaften der natürlichen Metalle (Schmelzpunkt, Verformbarkeit) oftmals nicht den Anforderungen des Einsatzes als dentaler Werkstoff entsprechen [16]. Die Einteilung der Dentallegierungen erfolgt meist in Edelmetall- und edelmetallfreie Legierungen (Tab. 1). Die weitere Aufteilung erfolgt nach dem Massegehalt der zu Grunde liegenden Elemente, wobei das Element mit dem größten Masseanteil die Gruppenzugehörigkeit der Legierung bestimmt.

Metalle			
Edelmetalle		Nichtedelmetalle	
Elementarform	Legierung	Elementarform	Legierung
-Gold z.B. Galvano- Technik	-Au-Leg - hochgoldhaltig - goldreduziert	-Titan z.B. Folien, Implantate	-Fe-Leg. z.B. Stähle, Drähte
	-Pd-Leg - kupferhaltig - silberhaltig		-Ni-Leg. z.B. Kronen, Brücken
	-Ag-Leg. -Ag-Pd-Leg. -Ag-Au-Leg.		-Co-Leg. z.B. MoGu
			-Ti-Leg. z.B. Implantate

Tab.1: Darstellung von Reinform und Legierungen von Edelmetallen und Nichtedelmetallen.

2.1.1.1 Edelmetalllegierungen

Zu den Edelmetallen, die in legierter Form in der Zahntechnik Anwendung finden, gehören u. a. Gold, Palladium und Silber. Gold ist dabei das einzige Edelmetall, welches auch in Reinform in der Galvano-Technik verarbeitet wird. Die anderen genannten Edelmetalle werden ausschließlich als Legierungen angeboten.

Es ergeben sich verschiedene Legierungen:

Gold-Legierungen

- Hochgoldhaltig
- Goldreduziert

Palladium-Legierungen

- Kupferhaltig
- Silberhaltig

Silber-Legierungen

- Silber-Palladium-Legierungen
- Silber-Gold-Legierungen

2.1.1.2 Nichtedelmetall-Legierungen

Nichtedelmetall-Legierung bedeutet nicht, dass kein Edelmetall in der Legierung enthalten ist oder sein darf. Da die Legierung nach dem Element mit dem höchsten Masseanteil benannt wird, spricht man in dem Fall, dass der größte Anteil aus einem Nichtedelmetall besteht, von einer Nichtedelmetall-Legierung (NEM). Das gilt solange, wie der Nichtedelmetallgehalt den der Edelmetalle übersteigt [17-18]. Im Gegensatz dazu stehen die edelmetallfreien Legierungen (EMF). Diesen ist kein Edelmetall zulegiert. Aufgrund der Spannungsreihe der Elemente scheinen die Nichtedelmetalle viel eher zu korrodieren als die Edelmetalle. Allerdings bilden die Nichtedelmetalle im Mundhöhlenmilieu eine sehr stabile Passivierungsschicht. Diese Passivierungsschicht entsteht, wenn insbesondere Chrom mit Sauerstoff reagiert und sich als Chromoxidschicht an der Oberfläche bildet. Andere Nichtedelmetalle, wie Titan, Cobalt, Molybdän oder Nickel spielen bei der Bildung einer Passivierungsschicht eine untergeordnete Rolle [19].

2.1.1.2.1 Cobalt-Chrom-Legierungen

Cobalt-Chrom-Legierungen existieren seit Beginn des 20. Jahrhunderts und ihnen fällt unter den NEM- bzw. EMF-Legierungen die größte Bedeutung in der Zahnmedizin zu.

Sie bestehen meist aus ca. 54 m% - 70 m% Cobalt, 20 m% - 31 m% Chrom und ca. 5 m% Molybdän. Cobalt und Chrom sind verantwortlich für die günstigen physikalischen Eigenschaften, wie ein hohes Elastizitätsmodul (E-Modul) und eine hohe Härte bei ausreichender Elastizität und geringer Korrosionsanfälligkeit.

Klassischer Weise kennt man die Cobalt-Chrom-Legierungen aus der Modellguss-Prothetik. Dort konnten sie aufgrund ihres hohen E-Moduls von ca. 200 GPa als verwindungsstabile Prothesengerüste verarbeitet werden.

Durch Modifizierung der Nichtedelmetall-Legierungen - und hier besonders die der Cobalt-Chrom-Legierungen - finden sich heutzutage auch aufbrennfähige, also keramisch verblendbare Cobalt-Chrom-Legierungen auf dem Markt. Dazu wurde die Härte zum Teil vermindert und der Wärmeausdehnungskoeffizient der jeweiligen Keramik angepasst [20].

Die Härte der Cobalt-Chrom-Legierungen, die man eben in der Modellguss-Prothetik schätzt, stellt in der Kronen- und Brückenprothetik einen Nachteil dar, da die Ausarbeitung für den Techniker weitaus schwieriger ist, als man es aus der Bearbeitung von Hochgold-Legierungen kennt. Das Bestreben in jüngerer Vergangenheit war es also, die Vickers-Härte von manchmal weit über 300 HV 10 auf unter 300 HV 10 zu reduzieren.

2.1.1.2.2 Weitere Nichtedelmetall-Legierungen

Neben den Cobalt-Chrom-Legierungen finden auch weitere Nichtedelmetall-Legierungen Anwendung in der Zahntechnik.

Dabei handelt es sich um Eisen-Legierungen, die vornehmlich in der Kieferorthopädie als Drähte Anwendung finden. Nickel-Legierungen, die zwar auch in der Kronen- und Brückenprothetik Erwähnung finden, im deutschsprachigen und skandinavischen Raum aber kaum noch Bedeutung haben, sowie Titan und dessen Legierungen, was besonders in der Implantologie aber auch in der Kronen- und Brückenprothetik verwendet wird.

2.1.2 Keramiken

In der Zahntechnik finden verschiedenste Keramiken Anwendung. Dabei handelt es sich um zahnärztliche Gläser, Glaskeramiken und Keramiken [21]. Bei der Bearbeitung der Keramiken unterscheidet man die additiven von den subtraktiven Verfahren [22-23]. Zu den additiven Herstellungssystemen zählt die Sintertechnologie, die Gusskeramik, sowie die Press- und Infiltrationskeramik. Die Fräsverfahren, zu denen die Maschinenfräsung, das Kopierschleifverfahren und die Sonoerosionstechnik zählen, bezeichnet man zusammengefasst als substraktive Formgebungsverfahren [2, 24-26]

Als Gerüstmaterial für Kronen und insbesondere für Brücken sind die Aluminium- und Zirkonoxidkeramik zu nennen, wobei die Zirkonoxidkeramik dabei aufgrund höherer Werte in der Biegefestigkeit den höheren Stellenwert hat.

Zirkonoxidkeramische Gerüste werden heute in breiter Masse im CAD/CAM-Verfahren gefräst und erfolgreich klinisch verarbeitet. Mittlerweile können auch mehrspannige Brückengerüste mit einer guten Passung gefräst werden [27-28].

Die Materialeigenschaften von Metall und Keramik werden folgend tabellarisch gegenübergestellt.

Materialeigenschaft	Metall	Keramik
Härte	-	++
E-Modul	+	++
Hochtemperaturfestigkeit	-	+
Thermische Ausdehnung	+	-
Duktilität	+	-
Löslichkeit/Korrosionsbeständigkeit	-	+
Verschleißbeständigkeit	-	+
Elektrische Leitfähigkeit	+	0
Dichte	+	-
Wärmeleitfähigkeit	+	0

Tabelle 2: Vergleich der Eigenschaften von Metall und Keramik

(„+“: günstig, „0“: neutral, „-“: ungünstig)

Aus „Med. Diss. Berlin; Nadine Schwalbe; 2008“ [29]

2.2 Verblendmaterialien

2.2.1 Kunststoffe

Moderne Kunststoffe setzen sich aus einer organischen und einer anorganischen Phase zusammen.

Um die mechanischen Eigenschaften dieser Verblendkunststoffe zu verbessern, mengt man ihnen Füllstoffe bei, um matrixbedingte Eigenschaften, wie Polymerisationsschrumpfung, Quellung durch die Wasseraufnahme und den Wärmeausdehnungskoeffizient zu optimieren. Das Bestreben in diese Richtung hält weiterhin an [30]. Weitere Bemühungen gehen dahin, die Farbstabilität der Kunststoffe gegenüber exogene Einflüsse zu verstärken [31].

Der Anteil an Füllstoffen beträgt bei derzeit auf den Markt befindlichen Kunststoffen durchschnittlich 70 - 80 Gew. %. Die Füllstoffpartikel entstehen durch Zerkleinern und Mahlen von kristallinem Siliziumdioxid (Quarz), unterschiedlichen Gläsern (Barium, Strontium) und Silikaten (z.B. Aluminium, Barium-Aluminium-Bor, Lithium-Aluminium, Zirkonium). Diese werden durch nass-chemisches Ausfällen aus einem Sol oder durch Pyrolyse gewonnen [32].

Der Verbund von Metall und Kunststoff entsteht durch ein Zusammenwirken von mechanischen, chemischen und intermolekularen Kräften. Die Abstimmung dieser Parameter ist dabei entscheidend [33].

Kunststoffe werden heutzutage hauptsächlich für die Verblendung von Langzeitprovisorien oder manchmal auch bei Kombinationszahnersatz verwendet. In der definitiven Kronen- und Brückenprothetik spielen sie - aufgrund der im Vergleich zu den Keramiken vor allem langfristig ungünstigeren Optik und Haltbarkeit - kaum mehr eine Rolle.

2.2.2 Keramiken

Dentalkeramiken können zur Verblendung von Metall- und Keramikgerüsten herangezogen werden. Es handelt sich um anorganische, nichtmetallische Massen, deren Hauptbestandteile Feldspat, Kaolin, Metalloxide und Quarz sind. Für eine bessere Farbwirkung und eine bessere Verarbeitbarkeit werden ihnen Flussmittel und Farbstoffe zugesetzt. Durch Zusammenschmelzen der ungeformten Rohstoffe, Fritten genannt, wird der kristalline Anteil des Feldspats reduziert, wodurch sich makromolekulare Silikat-Ketten bilden. Dadurch erhält das Material eine amorphe, glasartige Struktur höherer Transparenz und gleichzeitig sinkt die Schmelztemperatur, was entscheidend ist, da diese unterhalb der des Gerüstmaterials liegt [34].

Damit keramische Verblendungen und insbesondere der Verbund zwischen Metall und Keramik den Kau- und Scherbelastungen im Mund standhalten, mussten der Wärmeausdehnungskoeffizient von Legierung und Keramik aufeinander abgestimmt werden.

Der Wärmeausdehnungskoeffizient (WAK) definiert sich als „Kennwert, der das Verhalten eines Stoffes bezüglich Veränderungen seiner Abmessungen bei Temperaturveränderungen“ beschreibt. Der hierfür verantwortliche Effekt ist die Wärmeausdehnung. Da die Wärmeausdehnung bei vielen Stoffen nicht gleichmäßig über alle Temperaturbereiche erfolgt, ist auch der Wärmeausdehnungskoeffizient selbst temperaturabhängig und wird deshalb für eine Bezugstemperatur oder einen Temperaturbereich angegeben. Es wird zwischen dem thermischen Längenausdehnungskoeffizienten α (auch linearer Wärmeausdehnungskoeffizient oder Wärmedehnung genannt) und dem thermischen Raumausdehnungskoeffizient γ (auch als räumlicher oder kubischer Ausdehnungskoeffizient bezeichnet) unterschieden. Die Einheit, in der der Wärmeausdehnungskoeffizient angegeben wird, ist K^{-1} [35].

Bei der Auswahl der Verblendkeramik muss man sich nach dem Gerüstmaterial und dessen Wärmeausdehnungskoeffizienten richten. So ergeben sich verschiedene Indikationen für konventionelle Verblendkeramiken, LFC-Keramiken (low fusing ceramic) und Keramiken für Titan-, Aluminium- oder Zirkoniumgerüste [36-37].

2.3 Verbund zwischen Metall und Keramik

Im weiteren Verlauf wird nunmehr der Verbund zwischen Metall und Keramik beleuchtet. Die Frage, die sich stellt, ist also die, warum und wie sich zwei verschiedene Werkstoffe miteinander verbinden lassen.

Der Verbund muss zwischen zwei verschiedenen Werkstoffen entstehen. Damit sich aber Keramik und Metall langfristig miteinander verbinden lassen und auch extremen mechanischen und thermischen Belastungen standhalten, müssen die Werkstoffe nicht nur in ihren physikalischen Eigenschaften, wie z.B. dem WAK aufeinander abgestimmt sein, sondern teilweise auch entsprechend vorbehandelt werden.

Folgende 3 Parameter müssen erfüllt sein, damit es zu einem homogenen Verbund zwischen Metall und Keramik kommen kann und so der verblendete Zahnersatz möglichst lange unbeschadet in situ verbleiben kann [38].

1. Eine gereinigte Metalloberfläche. Die Metalloberfläche muss nach ihrer Bearbeitung vollständig gereinigt und entfettet sein. Anderenfalls kann der Haftverbund negativ beeinflusst sein. Dazu eignet sich unter Berücksichtigung der korrekten Anwendung das Dampfstrahlen sehr gut [39].

2. Eine aufgeraute Metalloberfläche. Das wird durch Abstrahlen mit Aluminiumoxid erreicht. Ziel ist es, zum einen ein mikroretentives Relief zu schaffen und zum anderen auch im Bereich der mikroskopischen Feinstruktur jegliche Kanten zu beseitigen [40].

3. Bei Edelmetalllegierungen muss zusätzlich eine Oxidschicht geschaffen werden. Die dient zur besseren Anbindung der keramischen Masse.

Die Haltbarkeit dieses Verbundes ist entscheidend für die Haltbarkeit des Zahnersatzes [41].

Da diese Oxidschicht bei den hier behandelten Cobalt-Chrom-Legierungen jedoch nicht in einem separaten Schritt erzeugt werden muss, wird dieser Punkt nicht weiter verfolgt. Es gibt mehrere Haftungsmechanismen, die dem metall-keramischen Verbundsystem zugrunde liegen. Unumstritten gibt es drei Gruppen von Kräften, die zum Verbund führen [42-43].

Kräfte	Erklärung
Mechanische	<ul style="list-style-type: none"> • Aufschumpfen der Keramik auf das Metallgerüst während des Sinterprozesses • Wärmeausdehnungskoeffizienten • Retention
Adhäsive	<ul style="list-style-type: none"> • Zwischenmolekulare Anziehungskräfte
Chemische	<ul style="list-style-type: none"> • Mischoxidbildung

Tab. 3: Für den Metall-Keramik-Verbund verantwortliche Kräfte.

2.3.1 Verbund durch mechanische Kräfte

Eine augenscheinliche, mechanische Kraft ist die Retention. Damit ist eine Verzahnung der einzelnen Materialien gemeint. Die Retention kann in Makro- und Mikroretention unterschieden werden. Heute spricht man bei metall-keramischen Verbundsystemen nur noch von Mikroretentionen, da Makroretentionen, die durch Perforationen der Gerüste oder Retentionsperlen oder -gitter geschaffen werden können, keinen sinnvollen Effekt mit sich bringen, da mit Keramikschlickern eine nur unzureichende Benetzung des Gerüsts erzielt werden kann [44].

Eine Mikroretention wird erzielt durch:

- Abstrahlen
- Elektrolytisches Anätzen
- Chemisches Anätzen

Beim Abstrahlen, welches eine gute Möglichkeit darstellt, eine mikroretentive Oberfläche zu bekommen, erzielt man auch gleichzeitig eine Reinigung der Oberfläche von Gussartefakten und Einbettmasseresten und eine Verminderung der Oxidschichtdicke. Zudem erhöht sich dabei die Oberflächenenergie. Bei edelmetallfreien Legierung empfiehlt sich das Abstrahlen mit Korund, einer Modifikation des Aluminiumoxids, in einer Korngröße von 250 µm und einem Strahldruck von 3-4 bar, wobei die Arbeitsempfehlungen der Legierungshersteller zu beachten sind.

Die Oberflächenenergie ist direkt nach dem Abstrahlen am höchsten. Daher sollte auch direkt nach dem Abstrahlvorgang mit der weiteren Verarbeitung des Gerüsts fortgefahren werden, da dann der Opaker-Schlicker besser auffließen kann und die gesamte Legierungsoberfläche benetzen kann, so dass dann auch ein einheitlicher Verbund zustande kommen kann [45].

2.3.2 Kontraktionsvorgänge beim Brennen und Abkühlen

Das Aufschrumpfen der Keramik auf das Metallgerüst ist entscheidend für das Spannungsgefüge in der Grenzschicht von Metall und Keramik. Dabei stellt der Wärmeausdehnungskoeffizient einen wesentlichen Faktor dar.

Der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient, der innerhalb eines Temperaturbereiches (meist für den Bereich von 20 °C bis 600 °C oder von 25 °C bis 500 °C angegeben) beschrieben ist und nicht immer linear verlaufen muss, gibt an, um wie viel µm sich ein 1 m langer Stab eines Materials bei Erhöhung oder Erniedrigung der Temperatur um 1 K (Kelvin) oder 1 °C ausdehnt oder zusammenzieht.

Der lineare WAK wird definitionsgemäß in der Einheit $10^{-6} \times K^{-1}$ angegeben.

Der WAK der Keramik muss dabei niedriger sein, als der des Metalls. Ansonsten käme es beim Abkühlen zu Zugspannungen, die die Keramiken reißen oder abplatzen ließen. Wenn der WAK des Metalls also höher ist als der der Keramik, schrumpft das Metall beim Abkühlen auch mehr als die Keramik, so dass auch die Keramik ein wenig mehr schrumpft, als sie es außerhalb des metall-keramischen Verbundes würde. So entsteht eine Druckspannung, die sich günstig auswirkt, da die Keramik auf Druck stark belastbar ist [46-47].

Eine optimale Differenz der WAK sollte zwischen 0,7 und 1 liegen. Das entspricht bei einer klassischen Feldspatkeramik einem Unterschied von 5-10 % [48-49].

Die Druckspannung entwickelt sich tangential innerhalb der keramischen Grenzschicht, wohingegen sich senkrecht zum Metallgerüst eine ungünstige Zugspannung entwickelt. Diese muss durch andere Kräfte (s. u.) kompensiert werden [50].

Nicht direkt mit der mikroretentiven Verbundkraft in Verbindung stehend, hat aber dennoch die Warmverzugfestigkeit der zu verarbeitenden Legierung großen Einfluss auf ein passgenaues und verzugsfreies Gerüst. Wichtig dabei ist, dass die Brenntemperatur mindestens 150 °C vom Soliduspunkt der Legierung entfernt liegt. Aber auch andere Parameter sind für die Warmverzugfestigkeit entscheidend. So sollten die Temperaturzyklen möglichst gering sein, die Dichte der Legierung eher gering und eine Modellation des Gerüsts ausgewogen sein. Eine nicht ausgewogene Modellation wäre z.B. eine Brücke mit großen Spannen, massiven Zwischengliedern und kleinen Verbindern. So kann es bei den Brennvorgängen leicht zum Verziehen des Gerüsts kommen [51-52].

2.3.3 Zwischenmolekulare Anziehungskräfte

Neben der mechanischen Verbundkraft spielt die Adhäsion zwar eine weitaus geringere Rolle, darf aber nicht außer Acht gelassen werden. Die adhäsiven Kräfte entstehen durch die als van der Waals'schen Kräfte bezeichneten zwischenmolekularen Anziehungskräfte. Dabei handelt es sich um eine Gruppe von Kräften, wobei die größte Bedeutung den Dipol-Wechselwirkungen und den Wasserstoff-Brückenbindungen zukommt [53].

Die zwischenmolekularen Anziehungskräfte, die oft auch zwischen funktionellen Gruppen, wie z.B. Hydroxid-Gruppen, entstehen, kommen vor allem beim Auftragen des Schlickers auf das Gerüst zustande. Dadurch entsteht dann eine chemische Verbindung der beiden unterschiedlichen Werkstoffe Metall und Keramik. Die Adhäsion allein würde nicht für einen Verbund der beiden Werkstoffe ausreichen, sind sie jedoch unverzichtbar für die Benetzbarkeit der Oberflächen und so entscheidend für die Verarbeitung der Keramik [54].

Als Dipole werden Teile von Molekülen bezeichnet, bei denen die Ladungsschwerpunkte nicht zusammenfallen. Es kommt zu keiner Ladungsverschiebung, allerdings wäre bei einer Messung die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen bei dem einen Atom mit der höheren Elektronegativität größer, als bei dem mit der niedrigeren. Nähern sich dann zwei Dipole, so kommt es zu einer Wechselwirkung der korrespondierenden Dipolpartner, woraus dann eine Anziehung resultiert (Abb. 1).

Ohne diese Eigenschaft würde sich die Keramik nicht gleichmäßig auf der Metalloberfläche verteilen lassen.

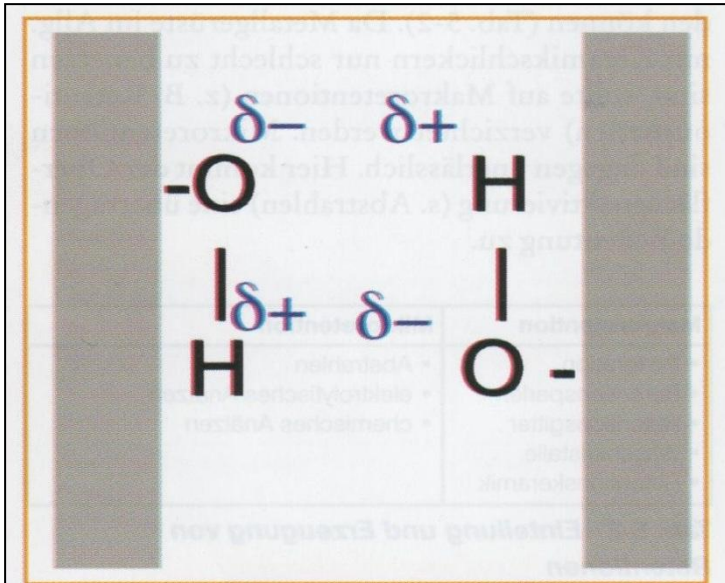


Abb. 1: Schematische Darstellung einer Dipol-Wechselwirkung

Aus „Die Werkstoffkunde der Metall-Keramik-Systeme“, Dr. Roland Strietzel, 2005 [55]

Bei einer Wasserstoffbrückenbindung kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen einem positiv polarisierten Wasserstoff-Atom und einem freien Elektronenpaar des Sauerstoffs eines Nachbarmoleküls (Abb. 2). Die Anziehung ergibt sich also durch unterschiedliche Elektronegativitäten.

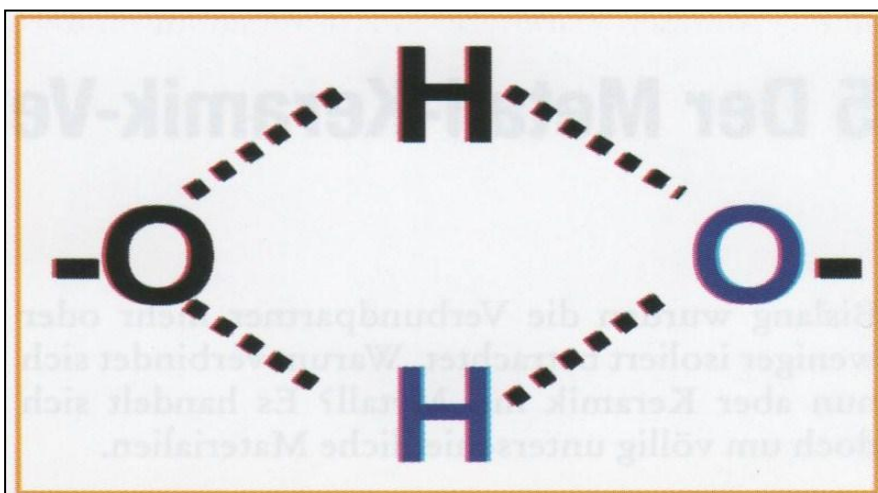


Abb. 2: Schematische Darstellung einer Wasserstoff-Brückenbindung;

Aus „Die Werkstoffkunde der Metall-Keramik-Systeme“, Dr. Roland Strietzel, 2005 [55]

Eine Wasserstoffbrückenbindung ist nur ca. 5-10 % so stark wie eine Ionenbindung [56].

2.3.4 Chemische Bindung durch Haftoxide

Zu den chemischen Bindungen zählt - neben der Ionenbindung - die Metall-, die metallische und die kovalente Bindung. Für die Entstehung einer nicht-metallischen chemischen Bindung sind reaktive Gruppen erforderlich. Metalle haben solche reaktiven Gruppen nicht. Das bedeutet, dass die Metalloberfläche speziell vorbehandelt werden muss, damit sich solche reaktive Gruppen bilden. Das geschieht z.B. durch das Abstrahlen der Oberfläche, da es somit zu einer spontanen Oxidation der unedlen Legierungsbestandteile auf der Legierungsoberfläche kommt. Bei Nichtedelmetalllegierungen besteht die Oxidschicht vornehmlich aus Chromoxiden der Passivierungsschicht. Bei Edelmetalllegierungen müssen der Legierung unedle Bestandteile zugefügt werden, damit sich darüber eine Oxidschicht an der Oberfläche bilden kann. Dabei handelt es sich meistens um Indium, Zinn, Eisen, Gallium, Zink oder Mangan [57].

Im Herstellungsprozess, und dort besonders beim Oxidbrand, muss genau auf die Temperatur und die Dauer des Brandes geachtet werden, damit die Oxidschicht nicht zu dünn oder zu dick wird. Andernfalls wirkt sich dieses Kriterium direkt auf die Qualität des Verbundes aus [58-60]. Die chemische Verbindung besteht dann zwischen Metall und der Metalloxidschicht sowie zwischen Metalloxidschicht und Keramik (Abb. 3) [61].

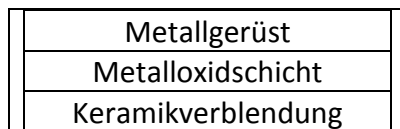


Abb. 3: Schematische Darstellung der Verbundschichten eines keramisch verblendeten Metallgerüsts.

2.3.5 Einfluss der Verarbeitung

Der Verbund von Metall und Keramik gilt heute als Standardverfahren, um einen langfristig stabilen und ästhetisch zufriedenstellenden Zahnersatz zu gewährleisten. Dennoch stellt dieses Verfahren eine Aneinanderkettung vieler labortechnisch äußerst genau und sauber durchzuführender Einzelschritte dar. Diese handwerkliche Kunst muss von gelerntem Fachpersonal, dem Zahntechniker, erbracht werden. Und trotzdem bergen die Arbeitsschritte ein hohes Fehlerpotential, welches dazu führen kann, dass in letzter Konsequenz der Zahnersatz nicht funktionell ist und somit den hohen Praxisbelastungen nicht standhalten kann. Oft ist ein Versagen des gesamten Zahnersatzes auf das Versagen des Verbundes zwischen Metall und Keramik zurückzuführen.

Wichtig ist also, die Arbeitsschritte korrekt durchzuführen und die Materialien entsprechend der Herstellervorgabe zu verwenden. Der Erfahrungswert des Technikers ist dabei entscheidend wichtig.

2.3.5.1 Gerüsterstellung

Zu aller erst muss die wichtige Frage des richtigen Materials geklärt sein. Das heißt, dass Metall und Keramik zueinander passen und aufeinander abgestimmt sein müssen. Vor dem Hintergrund des oben bereits angeführten Wärmeausdehnungskoeffizienten müssen die beiden Materialien kompatibel sein, so dass es beim Aufbrennen der Keramik zu keinen internen Spannungen führt [62].

Damit sich das Metallgerüst in seiner Dimension und Passgenauigkeit beim Gießen nicht verzieht, muss auf eine entsprechende Wachsmodellation geachtet werden, die nach Möglichkeit keine zu großen Spannen aufweist, eine einheitliche Schichtstärke besitzt und deren Verbinder nicht zu klein gestaltet werden.

Beim Ausarbeiten des gegossenen Gerüstes muss mit einem Substanzabtrag von bis zu 0,1 mm gerechnet werden. Dieses Defizit muss in der Wachsmodellation ebenfalls Berücksichtigung finden. Insgesamt soll eine Metallstärke von ca. 0,3 - 0,5 mm eingehalten werden. Diese kann auch so gering gewählt sein, da das E-Modul der Nichtelegierungen mit ca. 200 GPa eine derart grazile Gestaltung des Gerüstes, bei dennoch hoher Stabilität erlaubt. Die zahnärztliche Präparation des Zahnstumpfes muss dann noch genügend Platz zum Antagonisten für die Verblendung lassen. Genügend Platz bedeutet in den Fall okklusal oder inzisal eine Keramikstärke von ca. 2 mm. Massiver sollte die Keramik nicht gestaltet sein, da es sonst zu Unregelmäßigkeiten in der Keramik kommen würde und so Spätsprünge provoziert würden [38, 63-65].

Beim Gießen des Metalls muss auf die richtige Temperatur und den richtigen Zeitpunkt des Gusses geachtet werden. Wenn zu lange mit dem Gießen nach Erreichen der Gusstemperatur gewartet wird, reichern sich an der Oberfläche zu viele Oxide an, die dann dazu führen können, dass die Oxidschicht zu dick wird [66]. Das hätte wiederum zur Folge, dass es zu einer mechanischen Instabilität kommt und so Brüche in der Keramik riskiert werden [67-69].

Eine verlängerte Oxidationszeit beim Schmelzen des Metalls führt laut SMITH also eindeutig zum vorzeitigen Versagen einer Metall-Keramik-Restauration. Man kann dem aber heutzutage durch vollautomatische Gießautomaten entgegenwirken und einen sicheren Guss gewährleisten. Eine dadurch nur mäßig und auf keinen Fall zu starke Oxidschicht erleichtert dem Techniker auch die einfachere und schnellere Ausarbeitung des Metallgerüstes, was auch einen positiven wirtschaftlichen Effekt darstellt [70].

Die Bearbeitung des Gerüsts beginnt mit dem Entfernen der Einbettmasse und anderer Fremdpartikel. Dazu verwendet man Hartmetallfräsen, Rosenbohrer oder keramisch gebundene Schleifkörper aus Aluminiumoxid. Bei der Ausarbeitung ist auf eine gleichmäßige Schleifrichtung zu achten [71-72]. Ein adäquates Ausarbeiten der Metalloberfläche soll einer Blasenbildung innerhalb der Keramik, beim Aufbrennen der selbigen, vermeiden. Wobei nachgewiesen werden konnte, dass die Richtung des Ausarbeitens dabei keine Rolle zu spielen scheint [73].

Damit die Oberfläche gleichmäßig und reaktiv ist, empfiehlt sich das Abstrahlen des Gerüsts mit Aluminiumoxid. Es muss dabei darauf geachtet werden, dass immer frisches Strahlmittel verwendet wird, da ansonsten Verunreinigungen in die Metalloberfläche impaktiert werden könnten. Dabei muss auf einen entsprechenden Druck, dem richtigen Strahlwinkel, der nicht zu steil sein darf, und der richtigen Korngröße geachtet werden. Auf diese Art soll verhindert werden, dass die Oberfläche ungleichmäßig abgestrahlt wird und sich evtl. Strahlmittel oder andere Fremdpartikel in die Oberfläche impaktieren [45, 65, 74].

Das Abstrahlen hat allerdings nicht nur reinigenden und aktivierenden Charakter, sondern schafft zusätzlich ein mikroretentives Relief [75], das es der Keramik ermöglicht, besser an der Metalloberfläche zu haften und so einen besseren Haftverbund zu garantieren [73-74].

Die aktivierte Oberfläche sollte nun unmittelbar verblendet werden, da die kinetische Energie, die sich beim Abstrahlen auf die Metalloberfläche übertragen hat, nun für eine bessere Benetzbarkeit durch den Opaker sorgt [45, 73]. Das bringt mit sich, dass die Oberfläche des Metalls nach dem Abstrahlen nicht mehr angefasst oder in sonst einer Form kontaminiert werden darf und auch nicht zu lange unbehandelt zwischengelagert werden sollte [71, 76].

Für den Fall, dass doch eine Verunreinigung stattgefunden hat, kann der Techniker auf Empfehlung der meisten Legierungshersteller die Oberfläche abdampfen [77], wobei andere Untersuchungen genau das als negativen Effekt, bezogen auf die Festigkeit des Verbundes, ansehen [39].

2.3.5.2 Verblendung

Mit der Verblendung des Gerüsts sollte unmittelbar nach dem Abstrahlen begonnen werden, um die dadurch erhöhte Oberflächenenergie des Metalls auszunutzen. Der erste Schritt ist in der Regel das Auftragen einer Grundmasse, die im Wash-Brand die Voraussetzung für einen festen Verbund zwischen Metall und Keramik schafft. Der Wash-Opaker soll sehr dünnflüssig und nicht vollständig deckend aufgetragen werden.

Es folgt dann der Opaker, der als gleichmäßig deckende Schicht aufzutragen ist und so der farblichen Abdeckung des Metallgerüsts dient. Dabei empfiehlt es sich, das Gerüst durch

Riffeln in Vibration zu versetzen, damit man eine homogene und deckende Opakerschicht erhält. Der Opaker muss alle zu verblendenden Bereiche des Metalls abdecken. Die Brandführung richtet sich nach den Herstellervorgaben.

Beim Auftragen der Dentinmasse muss berücksichtigt werden, dass die Keramik beim Brennen einer Schrumpfung von bis zu 30 % unterliegt. Das wird als Brennschwund bezeichnet. Das hat zur Folge, dass die Keramik überdimensioniert modelliert werden muss. Man kann diese Schrumpfung, die auf den hohen Flüssigkeitsanteil des Bindemittels in der Keramikmasse vor dem Brand zurückzuführen ist, reduzieren, indem man durch Riffeln des zu verblendenden Gerüsts die Flüssigkeit an die Oberfläche der Keramikmasse bringt und dort mit einem Fließpapier oder ähnlichem abnimmt. Jedoch kann die Schrumpfung nicht auf weniger als 15 % reduziert werden [75].

Es sollten nicht mehr als zwei Dentinbrände durchgeführt werden. Im ersten Schritt soll die Dentinmasse schon die Zahnform geben.

Bei der Modellation der keramischen Masse soll darauf geachtet werden, dass die Schichtstärke nahezu gleichmäßig ist. Jedoch eine Stärke von 2 mm nicht übersteigen soll [47]. Ansonsten kann es schon beim Brennen zu Warmrissen kommen. Durch die Kontraktion der Keramik kann es bei stark unterschiedlichen Schichtstärken zu Spannungsunterschieden und somit auch wieder zu Spätsprüngen in der Keramik kommen [38, 76].

Wenn nicht die gesamte Krone, sondern nur ein Teilbereich verblendet werden soll, dann ist darauf zu achten, dass die Übergänge nie scharfkantig, sondern immer weich und dennoch klar definiert sein müssen. Approximal ist ein Mindestabstand zum Kontaktpunkt von 1 mm einzuhalten und okklusal sind 2 mm Abstand zu wahren. Anderenfalls besteht die Gefahr der Keramikfraktur bei Kaudruckbelastung [38].

Im zweiten Schritt sollen dann nur noch Formkorrekturen vorgenommen werden, die durch die Schrumpfung beim ersten Brand entstanden sind, so dass dann auch schon definierte Kontaktpunkte bestehen [71].

Der letzte Brand, der Glanzbrand, hat dann noch glättenden und versiegelnden Charakter. Dadurch werden oberflächliche Risse und Poren verschlossen, die sonst ursächlich für spätere Risse oder Sprünge sein könnten. Zudem verbessert der Glanzbrand die optische Erscheinung der Krone und es kommt intraoral - durch die glatte Oberfläche - zu einer geringeren Plaqueanlagerung.

Generell gilt, dass immer nach Herstellerangaben verblendet und gebrannt werden soll. So sollte auch die Anzahl der Brände nicht unnötig erhöht werden. Mehrere Brände erhöhen die Leucitbildung in der Keramik und damit auch den Wärmeausdehnungskoeffizienten. Die Leucitbildung wird bei der Langzeitabkühlung ausgenutzt, um stark unterschiedliche WAK von Legierungen und Keramiken anzugleichen.

Ob nun die Fehler vornehmlich im Metallgerüst in Form von Spannungen und Verformungen zu suchen sind [51], oder ob nicht die Fehler lt. EICHNER bei den Zahnärzten (Tangential- oder

generell ungünstige Präparation) und Zahntechnikern zu suchen sind [63], ist noch heute Diskussionsgrundlage. Vor dem Hintergrund, dass der Zahnarzt bedingt durch anatomische Gegebenheiten die Präparation und somit auch das Platzangebot für den Zahnersatz vorgibt, kann der Fehler nicht nur bei dem einen oder anderen zu suchen sein. Das wird auch bei der schwerpunktmäßigen Betrachtungsweise TAUBERs auf die korrekte Gerüstgestaltung und das ausgewogene Verhältnis zwischen Metall- und Keramikstärke und -position deutlich [38, 49, 78].

Die bisherigen Ausführungen machen deutlich, dass es einige Fehlerquellen bei der Herstellung eines Metall-Keramik-Verbundes gibt, die in letzter Konsequenz zu einem Versagen des Zahnersatzes führen können.

2.3.6 Einfluss einwirkender Kräfte

Wenn der Zahnersatz im Labor fertiggestellt ist, erfährt er nach dem Eingliedern in den Patientenmund die nächste und eigentliche Bewährungsprobe. Hier wird die Metall-Keramik-Restaurations den vielfältigen physikalischen Kräften ausgesetzt und muss diesen standhalten. Nachdem im Herstellungsprozess große thermische Spannungen auszuhalten waren, setzen sich diese zwar nur in abgeschwächter Form fort, dafür aber in häufiger Wiederholung. Diese thermische Belastung ist Gegenstand dieser Arbeit. Es kommen aber noch viele andere Kräfte zusammen, die auf Metall, Keramik und Haftverbund einwirken.

2.3.6.1 Mechanische Einflüsse

Es gibt verschiedene Arten von einwirkenden Kräften. CRAIG gibt mit Druckkraft, Zugkraft und Scherkraft drei Basistypen an [79]. TAUBER macht zusätzlich auf Biege- und Torsionskräfte aufmerksam.

Wohingegen im Seitenzahnbereich hauptsächlich vertikale Kräfte auftreten, sind im Frontzahnbereich horizontale, besonders nach sagittal gerichtete Kräfte wirksam [78].

Einteilung der Kräfte

Druckkräfte entstehen in der Mundhöhle vor allem beim Kauen und wirken dort vertikal auf Zähne und Zahnersatz ein. Die Druckfestigkeit wird in MPa angegeben [79].

Wenn die Zähne beim Kauen aufeinander kommen, können sehr hohe Kräfte entstehen, deren Spitzenwert als maximale Kaukraft angegeben wird. Diese Maximalkraft wirkt sehr kurz auf die Oberfläche ein. Neben der kurzfristigen Belastung gibt es aber auch die Dauerbelastung, die auch schon bei geringem Druck Schäden sowohl an den natürlichen Zähnen als auch am Zahnersatz hervorrufen können [80].

In einem Jahr macht der Mensch ca. 250.000 bis 300.000 Kauzyklen [79, 81]. Selbst wenn eine adäquate Okklusion und kein Bruxismus vorliegen, kann es bei einer solchen Dauerbelastung zu einer Materialschädigung kommen, wenn vorhandene Fehler wie Porositäten oder Einkerbungen das Risswachstum im Material fördern. Unter einer solchen permanenten Belastung können solche Poren Ausgangspunkt für Abplatzungen der Keramik darstellen oder den Bruch einer Brückenkonstruktion verursachen [45, 79].

Wenn **Zugkräfte** auftreten, reagieren die Materialien entweder mit Dehnung oder mit Bruch.

Die Metalle, die ein höheres E-Modul haben (Nichtedelmetalllegierungen ca. 200 GPa), reagieren zunächst mit einer Verlängerung. Die Keramik hingegen hat nur ein E-Modul von ca. 50 MPa [82] und bricht bei einwirkenden Zugkräften, sobald die 0,2 % Dehngrenze (die willkürlich festgelegt ist, sich aber im dentalen Bereich etabliert hat [45]) überschritten ist.

Daher ist es wichtig, dass der WAK der beiden Verbundpartner aufeinander abgestimmt wird, um die Keramik nicht zusätzlich unter Zugspannung zu setzen und so Abplatzungen zu provozieren.

Zugspannungen treten bei metall-keramischen Restaurationen bei Belastung besonders an der basalen Seite von Brückenkonstruktionen auf [79, 83].

Eine Kombination aus Druck- und Zugkräften bezeichnet man als **Biegekräfte**. Im Mund treten Druck- und Zugkräfte nie isoliert auf, sondern die eine Kraft an der einen Stelle induziert die andere Kraft an anderer Stelle. Zonen mit Druckbelastung (Kaubelastung) induzieren Zonen mit Zugbelastung (Gerüstverbiegung) [38, 79].

Allerdings führt eine Verbiegung eines Brückengerüsts aufgrund der so geringen Biegefestigkeit der Keramik zum Abplatzen der keramischen Verblendung [83].

Wenn zwei Kräfte sich parallel zueinander entwickeln, spricht man von **Scherkräften**, die z.B. in der Okklusion beim „Entlanggleiten“ der Arbeitshöcker zu beobachten sind [84]. Materialverbände, die starken Scherkräften ausgesetzt sind, können mit Scherprüfungen getestet werden. Dazu gehören z.B. Metall-Kunststoff-Verblendungen oder adhäsiv geklebte Veneers [54].

Das Zusammenwirken von Druck-, Biege, Scher- und Zugkräften bezeichnet man als Torsionskraft. **Torsionskräfte** entstehen besonders an Verbindern von Brückenkonstruktionen im Bereich der Eckzähne [78].

Die Kräfte treten nie isoliert an einem Zahn auf. Es handelt sich immer um ein Zusammenwirken von verschiedenen physikalischen Einflüssen, die bedingt werden durch Muskelarbeit der Kaumuskulatur und der Zunge, sowie das Bewegen des Nahrungsbolus entlang der Zahnreihen. Ursprung und Ansatz der Muskulatur bestimmen dabei die Richtung der Kaukraft [85].

Allerdings kann dieser Winkel durch Laterotrusion, bei den Frontzähnen besonders durch die Protrusionsbewegung, verändert werden, wodurch es zu einer extraaxialen Krafteinwirkung kommt [86].

Bei den Kaukräften kann kein Unterschied zwischen den Kieferhälften festgestellt werden [87-90].

Im Seitenzahnbereich können größere Kaukräfte gemessen werden, als im Frontzahnbereich. Einige Untersuchungen geben ca. 40 % mehr Kaukraft an [90-93].

2.3.6.2 Thermische Einflüsse

Der verblendete Zahnersatz muss sich von Beginn an thermischen Einflüssen und Veränderungen aussetzen.

In der Herstellungsphase sind es im Rahmen der keramischen Brände extreme Temperaturen, die zu einem Spannungsgefüge zwischen Metall und Keramik führen [94-95]. Dieser „Hintergrundstress“ ist entscheidend für die Verbundfestigkeit von Metall und Keramik [64].

Aber auch intraoral kommt es zu Temperaturdifferenzen, die bedingt sind durch Nahrungsaufnahme und auch der Atmung. Im Laufe der Menschheitsgeschichte und vor allem im Zuge der fortschreitenden Zivilisation, mussten Zähne und Zahnersatz immer größeren Temperaturamplituden standhalten, da sich die Temperaturgrenzen der Nahrung immer weiter nach oben und nach unten ausgedehnt haben. So werden Zähne und Zahnersatz Temperaturen von +85 °C bis - 12 °C ausgesetzt [96-97].

Diese Temperaturen übertragen sich aber nicht ohne Verlust auf die Zahnschicht oder die Keramik. Bei einer Temperaturmessung mit Kupferkonstanthahnthermoelementen, die 0,5 mm unter den Schmelz zementiert wurden, hat man bei einer Nahrungstemperatur von - 7 °C bei Speiseeis und + 75 °C bei gekochten Kartoffeln eine Temperaturdifferenz im Zahn von +16 °C bis +43 °C gemessen [96]. Es ergibt sich also eine Temperaturamplitude von 27 °C.

Daraus resultiert ein Standardwert der Temperaturschwankung für die Testung von konservierenden und prothetischen Restaurationsmaterialien zwischen 5 °C und 55 °C [97-100].

Andere Untersuchungen mit Testspeisen, bei denen eine Temperatur von bis zu 61 °C gemessen wurde, weisen auf Werte zwischen 1 °C und 58,5 °C, auf der okklusalen Schmelzoberfläche eines ersten oberen Molaren, hin [101]. In weiteren Versuchen liegen die Mittelwerte auch bei 5 bis 55 °C [102-103].

Bei diesen Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass diese Temperaturwechsel während einer klinischen Lebensdauer des eingegliederten Zahnersatzes von ca. 10 -15 Jahren in etwa 5.000 bis 50.000 mal geschehen [104-105].

2.3.6.3 Chemische Einflüsse

Zahnersatz ist, wie natürliche Zähne auch, einer permanenten chemischen Beeinflussung ausgesetzt. Das heißt, er wird ständig mit Speichel und somit Wasser umspült.

Die chemische Löslichkeit darf laut EN ISO 6872 nicht mehr als 100 µg/cm² betragen. In den meisten Fällen kann das problemlos eingehalten werden und es lassen sich lediglich Werte von durchschnittlich 30 % des Maximalwertes von 100 µg/cm² nachweisen [103, 106].

Dentalkeramiken sind sehr empfindlich gegen Risswachstum, was unter Wassereinwirkung und mechanischer Belastung verstärkt wird. Die Anfälligkeit der Keramik für das stete Fortschreiten eines Risses in Feuchtigkeit wird als Spannungsrissskorrosion bezeichnet [107].

Durch Anlagerung und Wechselwirkung der Wassermoleküle, mit der durch einen Riss geschädigten Kristallstruktur an der Risspitze, wird die für das Risswachstum notwendige Energie herabgesetzt. Dieses geschieht besonders effektiv, wenn das Material belastet wird [108].

Zudem muss auch der pH-Wert, der den Zahnersatz umspülenden Flüssigkeit berücksichtigt werden. Dieser ändert sich nämlich ständig durch Nahrungs-, Flüssigkeits- und Medikamentenaufnahme. Die pH-Wert-Verschiebung findet im Speichel und somit an allen Oberflächen des Mundes statt. Obst, saure Getränke, übermäßiger Aspirinbedarf (Aspirinburn) und auch bulimischer Reflux bewirken, dass die unterschiedlichsten Säuren auf die oralen Strukturen einwirken. Ebenso kann eine kohlenhydratreiche Ernährung indirekt innerhalb von 5 Minuten durch Plaquebakterien zu einer Bildung organischer Säuren führen, wodurch es auch dann zu einer unmittelbaren pH-Wert-Verschiebung auf unter „4“ kommen kann (Stefan-Kurve). Eine Neutralisation des oralen pH-Wertes findet circa nach einer halben Stunde statt, wenn neuer Speichel produziert worden ist [109].

Ein Versuch mit einer Cobalt-Chrom-Legierung machte deutlich, dass sich Metallionen in der Lösung nachweisen lassen und das Ausmaß der Korrosion zum einen von der im Versuch verwendeten Lösung und zum anderen von dem pH-Wert abhängt. Aber in allen Lösungen und bei allen pH-Werten, die im Versuch zwischen 3,5 und 6,0 lagen, konnten Metallionen und somit Korrosion nachgewiesen werden [110]. Im sauren Milieu sinkt die Korrosionsresistenz von Metallen [111].

Die mit dem Zahnersatz in Kontakt tretenden Flüssigkeiten bewirken auch eine elektrochemische Reaktion an den Materialien. Beim Metall nennt man diesen Vorgang Korrosion, bei Kunststoffen und Keramiken spricht man genauer von „in Lösung gehen“ [112].

Bei der Korrosion entstehen Metallionen, die aus dem Verbund herausgelöst wurden. Für den Patienten bedeutet dies eine Materialschwächung, Oberflächenverfärbungen des Werkstückes oder gar eine Sensibilisierung.

Bei der Hydratation werden die Partikel aus dem Kunststoff oder der Keramik direkt herausgelöst und gehen in Lösung. Das Lösungsmittel umgibt ein Partikel und löst es heraus. Man spricht, wenn es sich bei dem Lösungsmittel um Wasser handelt von Hydratation, ansonsten von Solvatation [112].

Das Korrosionsverhalten wird durch verschiedene Faktoren bestimmt. So können neben werkstoffspezifischen Faktoren, auch das Korrosionsmedium, die Temperatur, die Chloridkonzentration, der Sauerstoffpartialdruck und der pH-Wert Einfluss auf die Korrosion nehmen [113-117].

2.4 Werkstoffprüfungen

2.4.1 Notwendigkeit von Prüfverfahren

Werkstoffprüfungen sind wichtig, um Prognosen bezüglich der Langlebigkeit, der Belastbarkeit und der Biokompatibilität angeben zu können. All das kann zu einem großen Teil in in-vitro-Testverfahren kontrolliert werden. Die Hersteller müssen vor Einführung ihrer Produkte nachweisen, dass sie entsprechend des Medizinproduktegesetzes den Anforderungen in der klinischen Situation entsprechen. Das Medizinproduktegesetz, welches auf Grundlage der EG-Richtlinie 93/42/EWG vom 14.06.1993 verabschiedet wurde, definiert die Dentallegierungen für die sogenannte Klasse II a, da sie dauerhaft in der Mundhöhle verbleiben [118].

2.4.2 Verfahren zur werkstoffkundlichen Prüfung

Metall-Keramik-Systeme können in unterschiedlichen Verfahren auf verschiedene Komponenten hin untersucht werden. In der Mundhöhle treten mehrere physikalische Kräfte gleichzeitig auf. Das kann im Versuch nicht reproduziert werden. Demnach zeigen alle Versuchsformen eine isolierte Darstellung, dürfen aber zur Bewertung eines Sachverhaltes nie isoliert herangezogen werden. Es gibt eine Vielzahl von Versuchsmodellen. Es wird zwischen mechanischen, thermischen und chemischen Prüfverfahren unterschieden.

Mechanisch

- Bruchlastversuche (VOSS) [119]
- Biegeversuche (SCHWICKERATH) [120]
- Scherversuche (SHELL-NIELSEN) [121]
- Zugversuche (HATTEMER/KÜBEL; PÜCHNER) [122]

Thermisch

- Abschrecktest [123]
- Thermocycling (Temperaturlasttest) [124]
- Thermoschocktest [125]

Chemisch (hier gibt es eine Vielzahl von Versuchsmodifikationen, um zu testen, wie sich eine pH-Verschiebung auf Zahn und Zahnersatz auswirkt. Als Standardlösung dient eine mit Milchsäure hergestellte Lösung mit einem pH von 2,3. [126])

- Lagerung in Korrosionslösung
- Lagerung in Essigsäure
- Lagerung in künstlichem Speichel
- Lagerung in destilliertem Wasser

Um eine abschließende Beurteilung eines Materials treffen zu können, müssen in der Regel die Ergebnisse mehrerer Prüfungen herangezogen und beurteilt werden. Ein Werkstoff kann nicht allein auf seine isoliert betrachteten mechanischen, thermischen oder chemischen Eigenschaften reduziert werden. Hinzu kommt, dass es sich bei den hier genannten Prüfverfahren nur um in-vitro-Verfahren handelt. Klinische Langzeitstudien müssen das Testverfahren vervollständigen, um eine endgültige Bewertung abgeben zu können.

Es wird also deutlich, dass Komponenten getrennt und alleine geprüft werden können, nicht aber isoliert betrachtet Aussagekraft bezüglich der Qualität eines Werkstoffes haben können.

Es gibt kaum festgelegte Standards für die jeweiligen Prüfverfahren. Das macht es mitunter schwer, alle Verfahren und insbesondere deren Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Man muss die Versuchsbedingungen und -protokolle bei einer vergleichenden Arbeit genau prüfen und berücksichtigen. Einzig im Drei-Punkt-Biegeversuch nach SCHWICKERATH sind die Versuchsbedingungen in einer ISO-Norm definiert [127-128].

2.5. Prüfverfahren für die Verbundfestigkeit

Vor dem Hintergrund des Schwerpunktes dieser Arbeit sollen nun noch einmal diejenigen Prüfverfahren beleuchtet werden, die insbesondere den Verbund zwischen Metall und Keramik unter Belastung testen. Dabei wird auffallen, dass nur die Gesamtheit der Prüfverfahren ein aussagekräftiges Bild geben kann, da jede Prüfmethode für sich genommen einen anderen Sektor des Haftverbundes zwischen Metall und Keramik testet. Unter den verschiedenen

Blickwinkeln haben alle vorgestellten Methoden - jede für sich - eine Berechtigung. Die Empfehlungen für ihre Anwendung richten sich aber nach der entsprechenden Fragestellung im Metall-Keramik-Haftverbund.

2.5.1 Bruchlastversuch nach VOSS

Bei der Druckprüfung nach VOSS handelt es sich um eine Testung der Material- und Verbundeigenschaften von Metall-Keramik-Systemen und deren Widerstandskraft im Ganzen. Der Versuchsaufbau sieht so aus, dass eine Frontzahnkrone an der inzisalen Kante in einem Winkel von 45° zur Kronenachse auf Druck belastet wird. Man schaut, bis zu welcher Kraft die Keramik dieser Belastung standhält, bevor sie abplatzt. Diese Belastungsart ist der klinischen Belastungssituation sehr ähnlich. Allerdings ist aufgrund der Prüfkörperherstellung und in Abhängigkeit der Druckrichtung und Kraftangriffspunkt eine hohe Fehlerquote zu berücksichtigen [129-130].

2.5.2 Drei-Punkt-Biegeversuch nach SCHWICKERATH

Bei dem genormten Biegeversuch nach SCHWICKERATH [131] ist die Prüfkörpergeometrie klar definiert und so können verschiedene Materialien getestet und die Ergebnisse verglichen werden.

Es wird ein Metallstreifen aus der entsprechenden Legierung in der Mitte mit der entsprechend zu testenden Keramik verblendet. Die Belastung dieser Konstruktion erfolgt mit einem Kolben in einem Winkel von 90°. In der Verbundzone befindet sich dabei die Zugzone. Es wird die Kraft gemessen, bei der die Keramik abplatzt. Es sollten Werte von mindestens 25 MPa erreicht werden, bevor es zu einer Rissbildung kommt, in deren Folge dann die Keramik abplatzt.

Der Versuchsaufbau ist in der DIN EN ISO 9693 festgelegt. Da die Prüfkörper leicht und in gleicher Weise produzierbar sind, ist der Versuch nach SCHWICKERATH gut nachvollziehbar und durchführbar [132-136].

2.5.3 Schertest nach SCHMITZ-SCHULMEYER

Die Prüfkörper sind quadratisch und haben eine Kantenlänge von 6 mm. Auf der einen Hälfte wird der Prüfkörper keramisch verblendet, so dass die Keramik ein Ausmaß von 3x3x6 mm aufweist.

Die Prüfkörper werden in ein Scherwerkzeug eingespannt. Ein Druckstempel setzt auf der Keramik in einem Winkel von 45° an und belastet sie bis zum Bruch. Der Laststempel wird nahe der Verbundzone seitens der Keramik angesetzt und die keramische Verblendmasse durch den

Laststempel mit einem Vorschub von 1,0 mm/min bis zum vollständigen Abscheren der Grundmasse belastet [137-138].

2.5.4 Zugversuch nach PÜCHNER

Der Zugversuch nach PÜCHNER ist eine Modifikation des Zugversuchs nach NALLY/BERTA. Es werden 2 Rundstäbe aus der entsprechend zu testenden Legierung mittig mit einer Keramikmasse verbunden. Die Stäbe werden dann nach lateral auseinandergezogen. Als Versuchsergebnis gilt der Moment, in dem die keramische Verbindung versagt und die Metallstäbe nicht mehr miteinander verbunden sind. Nach PÜCHNER wird die Verankerung für den Kraftansatz an die Metallstäbe als Unterschied zu NALLY/BERTA erst nach der keramischen Verbindung angesetzt, damit es dadurch zu keinen Spannungen kommen kann [139].

2.5.5 Temperaturwechsellasttest

Beim Temperaturwechsellasttest werden die Prüfkörper abwechselnd für jeweils 30 Sekunden zunächst in ein 5 °C kaltes Wasserbad gelegt, dann in ein 55 °C warmes Wasserbad. Der Wechsel findet mithilfe eines maschinell gesteuerten Schwenkarms statt. Dieser Zyklus, von einem Bad ins andere, wird 5.000-mal wiederholt. Man unterzieht die Proben damit einer künstlichen Alterung. Es können bei diesem Prüfverfahren interne Spannungen zwischen Metall und Keramik nachgewiesen werden.

Die Versuchsanordnung richtet sich dabei nach den Vorgaben des Ergänzungsentwurfes zur ISO 10477 [140].

2.5.6 Abschrecktest

Der Abschrecktest ist ein nicht genormter thermischer Test zur Erkennung von thermischen Spannungen innerhalb eines Metall-Keramik-Verbundes. Er ist primär von der Industrie entwickelt worden.

Bei den Prüfkörpern handelt es sich um Kronen, deren Metall-Gerüst keramisch verblendet wird. Dabei muss darauf geachtet werden, dass sowohl die Stärken des Metalls als auch die der Keramik gleichmäßig sind, damit nahezu gleiche Prüfkörper entstehen, die dann auch im Ergebnis vergleichbar sind. Die Prüfkörper werden nach Fertigstellung verschiedenen Temperaturschwankungen ausgesetzt. Dies geschieht einerseits, um zu sehen, ob dabei Sprünge in der Keramik entstehen, andererseits wird festgestellt, ob es nach einer Lagerung von einem Tag zu Spätsprüngen gekommen ist.

Die Kronen werden, beginnend mit einer Temperatur von 105 °C, für 30 Min. in einen Ofen gestellt. Danach werden sie unmittelbar in ein Glas mit 5 °C kaltem Eiswasser gegeben. Im

Anschluss werden die Kronen nach einer kurzen Trocknungs- und Wartezeit von 15 Min. unter einem Mikroskop und einfach visuell betrachtet und auf Sprünge hin untersucht. Wenn keine Sprünge zu erkennen sind, gehen die Prüfkörper in die nächste Runde und durchlaufen den Test erneut. Nun wird die Temperatur im Ofen um 15 °C erhöht, liegt dann also bei 120 °C. Das geht weiter bis zu einer Temperatur von 165 °C, kann aber auch weiter modifiziert werden. Am Folgetag werden dann noch einmal alle Kronen in gleicher Weise begutachtet und kontrolliert, ob Spätsprünge aufgetreten sind.

Die Testergebnisse, also die Tatsache, ob oder dass Sprünge in der Keramik aufgetreten sind, lassen Rückschlüsse auf Restspannungen zu, die auf nicht angepasste Wärmeausdehnungskoeffizienten von Gerüst- und Verblendmaterial hindeuten können [141-145].

Eine solche Restspannung kann auch schon modellationsbedingt zu hoch sein, wenn die Keramiksichtdicke ungleichmäßig und zu hoch ist. Daher ist es bei der Herstellung des Gerüsts und bei der Modellation der Verblendkeramik wichtig, dass Schichtstärken gleichmäßig eingehalten werden. Form und Gestalt der Krone nehmen also großen Einfluss auf die Ergebnisse des Tests und die klinische Langlebigkeit. Fehler in diesem Bereich müssen daher ausgeschlossen werden [144].

Spannungen innerhalb des gesamten metall-keramischen Gefüges können mit dem Abschrecktest nachgewiesen werden. Er stellt also eine Möglichkeit dar, zu testen, ob die vorliegende Materialkombination geeignet ist.

Untersuchungen an vollkeramischen Systemen konnten zeigen, dass Materialien mit insgesamt geringeren Wärmeausdehnungskoeffizienten der Temperaturwechselbelastung besser standhalten, als es Systeme mit höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten zu können scheinen [145].

Die Werte, die in der Literatur zu finden sind, müssen vor dem Hintergrund der nicht standardisierten und sich oftmals wechselnden Parameter, individuell betrachtet und dürfen nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden. So variiert die Anzahl der Prüfkörper von z.B. 84 Prüfkörpern in Kleinserien [29] bis hin zu 550 Prüfkörpern in Großserien [146]. Auch können die Temperaturamplituden zwischen den einzelnen Abschreckversuchen unterschiedlich sein und der Versuch bei unterschiedlichen Temperaturen anfangen und aufhören. Heutzutage wird der Abschrecktest - wie bereits skizziert - in der Regel bei 105 °C begonnen und steigt in 15 °C-Schritten auf 165 °C, wo der Versuch dann auch endet [123]. Bei ANUSAVICE begann der Versuch aber schon bei 90 °C und ging in 10 °C-Schritten auf bis zu 200 °C [146].

In der folgenden graphischen Darstellung zeigt sich allerdings, dass sich doch ein Temperaturfenster um 150 - 165 °C herauskristallisiert hat, das für die meisten Materialkombinationen erreichbar ist und als Schwellenwert für das Bestehen des Tests genommen wird [123].

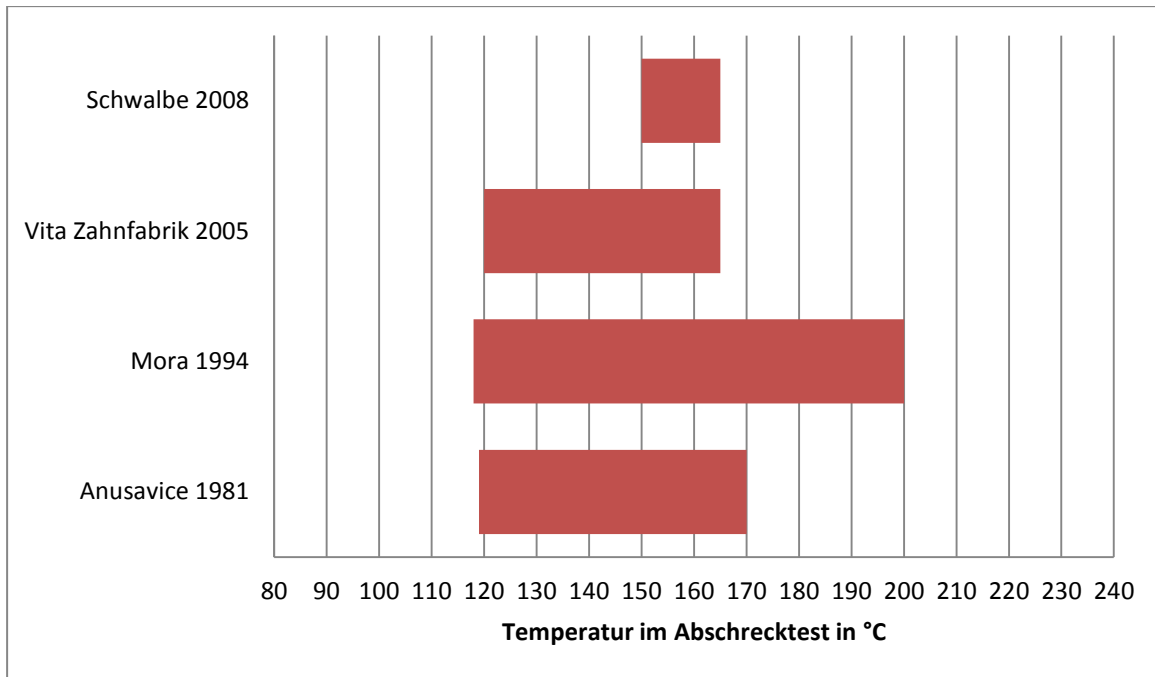


Abb. 4: Dargestellt ist, in welchem Temperaturfenster die Prüfkörper der einzelnen Versuchsreihen versagen.

2.5.7 Thermoschocktest

Der Thermoschocktest ist als Modifikation des Abschrecktests zu verstehen [125]. Die Versuchsanordnung behält sich vor, je nach Interessengebiet Parameter, wie das Prüfmaterial, die Zeitspanne und Temperaturstufen, zu variieren. Aber auch hier werden die Prüfkörper kurzfristig abgeschreckt, so dass sich ein Temperaturgradient ergibt, der dann zu internen Spannungen im metall-keramischen Gefüge und nach Überschreiten eines kritischen Wertes zur Schädigung des Prüfkörpers führt [147].

2.6 Vergleich der Methoden und klinische Übertragbarkeit

Die verschiedenen Prüfverfahren können nur schwer miteinander verglichen werden. Oftmals ist das für einen einzelnen Test kaum möglich, da in den meisten Fällen gar keine Standards zur Herstellung der Prüfkörper und zur Durchführung des Tests definiert sind.

Für den Biegeversuch nach SCHWICKERATH sind die Parameter zur Durchführung des Tests festgelegt. Die Proben können einfach produziert werden und entsprechen auch den klinisch zu findenden Schichtstärken.

Zwar ist der SCHWICKERATH-TEST nach der DIN-Norm einfach zu reproduzieren und ein einfach durchzuführender Test. Es werden hier im Gegensatz zu den physikalischen Parameter, wie Dicke oder E-Modul der Legierung, die Eigenschaften des Verblendmaterials nicht berücksichtigt [54]. Zudem ist ein Vergleich verschiedener Materialkombinationen nicht möglich [148]. Andere Autoren sind der Auffassung, dass auch bei definiertem Prüfprotokoll die Ergebnisse der Prüfung stark von der Herstellungsmethode abhängen [149]. Kritisch müssen die praxisferne Geometrie der Prüfkörper und die Übertragbarkeit der Ergebnisse des Tests betrachtet werden.

Mit dem SCHWICKERATH-TEST lassen sich Aussagen über die Oberflächenbeschaffenheit des Metalls, der Haftoxidbildung und den chemischen Verbund zwischen Metall und Keramik machen [84, 150]. Es können Aussagen über die Qualität eines Verbundsystems unter Biegelast getroffen werden. Rückschlüsse auf die Verbundpartner sollten keine getroffen werden.

Der VOSS-TEST ist ein Scherrversuch, der, gemessen an der Prüfkörper-Geometrie und der Art der Belastung, der klinischen Situation sehr nahe kommt.

Geprüft wird hier die Festigkeit von Metall-Keramik-Kronen. Dabei können die gemessenen Kräfte, die zum Versagen des Verbundes geführt haben, mit den physiologischen Kräften in Bezug gebracht werden [84]. Die Praxisnähe erklärt sich auch aus der Tatsache, dass die Prüfkörper alle Schritte durchlaufen, die eine Krone in der Praxis auch durchläuft, bevor sie den klinischen Belastungen ausgesetzt wird. [84, 150]. Daraus ergibt sich aber auch die Schwierigkeit, dass die Prüfkörpergeometrie schwierig zu reproduzieren ist und dadurch die Haftfläche schwer zu bewerten ist.

Es besteht also das Problem, Mindestanforderungen an den Test zu stellen [84, 150]. Durch die variable Kronenform und des nicht genau definierten Kraftansatzpunktes werden die Ergebnisse zudem beeinflusst [54, 119, 148, 151].

Bei der Herstellung der Prüfkörper muss das Geschick des Technikers berücksichtigt werden. Die Ergebnisse können Rückschlüsse auf die mechanische und chemische Verbundfestigkeit zwischen Metall und Keramik geben.

Die Kaukraft ist allerdings kein fester Wert, sondern ist individuell stark unterschiedlich. Das hängt von der Anzahl der Zähne, der Position der Zähne im Mund, der parodontalen Situation sowie Ausrichtung und Stärke der Kaumuskulatur ab [83, 152-154].

Beim Abschrecktest finden sich ebenfalls Prüfkörper, die der klinischen Krone und daher der realen Situation entsprechen. Die Kronen für den Abschrecktest durchlaufen alle zahntechnischen Schritte im Labor, wie auch die Kronen und Brücken, die dem Patienten eingesetzt werden. Der daraus resultierende Nachteil, dass die Prüfkörper wieder nicht zu 100% formkongruent sind und ein absoluter Vergleich schwer ist, gilt hier wie bei den Prüfkörpern des VOSS-TESTS.

Im Abschrecktest wird versucht, die Temperaturwechsel zu simulieren, wie sie sich auch im Mund ergeben [155]. Der Wechsel von warm auf kalt geschieht da plötzlich. Man findet Temperaturen von 5 °C bis 55 °C. Diese Angaben variieren in der Literatur allerdings.

Es gibt eine Empfehlung der Industrie, nach der der Abschrecktest durchzuführen ist [123]. Das ist aber keine bindende Norm und so kann die Versuchsanordnung variiert werden.

Befürworter des Abschrecktests heben hervor, dass man mit diesem Prüfverfahren Restspannungen im metallkeramischen Verbund nachweisen kann, die sich dadurch ergeben können, dass z.B. die Wärmeausdehnungskoeffizienten von Metall und Keramik nicht ausreichend genug aufeinander abgestimmt wurden. Das ist eine Information, die entscheidend für den Zahntechniker ist.

3 Material und Methoden

Es werden 2 verschiedene Dentallegierungen und 2 verschiedene Verblendkeramiken verwendet. Bei den Metallen handelt es sich um Cobalt-Chrom-Legierungen. Jedes Metall wird mit beiden Keramiken verblendet, so dass 4 Kombinationsmöglichkeiten entstehen. Bei der Herstellung der Prüfkörper werden 5 unterschiedliche Washbrand-Temperaturen festgelegt. Somit resultieren bei 4 Metall-Keramik-Alternativen und 5 verschiedenen Brenntemperaturen beim Washbrand 20 Serien à 6 Einzelkronen (Zahn 21) und je eine 3-gliedrige Brücke (Zahn 13-11). Die Herstellung der Prüfkörper erfolgt unter immer gleichen Laborbedingungen in einem Forschungslabor der Firma BEGO. Der Abschrecktest erfolgt ebenfalls unter immer gleichen Bedingungen. Im Anschluss werden die Kronen und Brücken auf Sprünge in der Keramik überprüft – visuell und unter dem Stereomikroskop.

3.1. Verwendete Materialien

Bei den Dentallegierungen handelt es sich mit Wirobond C und Wirobond 280 in beiden Fällen um Cobalt-Chrom-Legierungen. Bei den Verblendkeramiken handelt es sich um VITA VM 13 der Firma Vita Zahnfabrik und DUCERAM KISS der Firma DeguDent. Alle Materialien sind frei auf dem Dentalmarkt erhältlich und sind folglich auch in vivo erprobt.

Die Zusammensetzung der Legierungen, sowie deren chemischen und physikalischen Eigenschaften, werden im Weiteren tabellarisch veranschaulicht.

Eine Übersicht über alle verwendeten Materialien und deren Chargennummern findet sich im Anhang.

3.1.1 Verwendete Metalle

3.1.1.1 Wirobond C - Physikalische Parameter und Zusammensetzung

Wirobond C ist eine von der Firma BEGO hergestellte aufbrennfähige Cobalt-Chrom-Legierung. Die Markteinführung fand im Jahr 1993 statt.

Wirobond C

Farbe	Silber
Dichte [g/cm ³]	8,5
Vickershärte(HV 10)	310
Elastizitätsmodul [GPa]	ca. 210
Dehngrenze (R _{p0,2}) [MPa]	480
Zugfestigkeit (R _m) [MPa]	720
Bruchdehnung (A ₅) [%]	9
Schmelzintervall [°C]	1370-1420
Gießtemperatur [°C]	ca. 1500
WAK [10 25-500 °C/20-600 °C]	14,0/14,2

Tab. 4: Legierungsmerkmale Wirobond C; Produktinformation der Fa. BEGO Bremen

Zusammensetzung in Masse-%	
Co	63,3
Cr	24,8
W	5,3
Mo	5,1
Si	<1
Fe	<1
Ce	<1

Tab. 5: Zusammensetzung Wirobond C; Produktinformation der Fa. BEGO Bremen

3.1.1.2 Wirobond 280 - Physikalische Parameter und Zusammensetzung

Wirobond 280 ist eine Aufbrennlegierung und ebenfalls für die Kunststoffverblendung geeignete Cobalt-Chrom-Legierung. Sie wurde 2005 von der Firma BEGO in Deutschland eingeführt.

Wirobond 280

Farbe	Silber
Dichte [g/cm ³]	8,5
Vickershärte(HV 10)	280
Elastizitätsmodul [GPa]	ca. 220
Dehngrenze (R _{p0,2}) [MPa]	540
Zugfestigkeit (R _m) [MPa]	680
Bruchdehnung (A ₅) [%]	14
Schmelzintervall [°C]	1360-1400
Gießtemperatur [°C]	ca. 1500
WAK [10 25-500 °C/20-600 °C]	14,0/14,2

Tab. 6: Legierungsmerkmale Wirobond 280; Produktinformation der Fa. BEGO Bremen

Zusammensetzung in Masse-%	
Co	60,2
Cr	25
Ga	2,9
Mn	<1
Mo	4,8
Si	<1
W	6,2

Tab. 7: Zusammensetzung Wirobond 280; Produktinformation der Fa. BEGO Bremen

3.1.2 Verwendete Keramiken

Die verwendeten Verblendkeramiken Vita VM13 und Duceram Kiss sind auf dem Markt bewährte und in vivo erprobte Verblendkeramiken.

3.1.2.1 Vita VM13

Vita VM13 wird von der Firma VITA Zahnfabrik, Bad Säckingen vertrieben. Laut Herstellerangaben ist sie für die Verblendung sowohl von hochgoldhaltigen, goldreduzierten, Palladium-Basis-Legierungen als auch für Nichtedelmetall-Legierungen geeignet. Dabei gilt jeweils der WAK-Bereich von 13,8-15,2 $\mu\text{m}/\text{mK}$. VM13 ist eine Feldspat-Keramik. Feldspat ist eine Sammelbezeichnung für eine Gruppe von Mineralien, die zu den Gerüstsilicaten gehören.

Die allgemeine Brennempfehlung für Vita VM13 sieht laut Hersteller wie folgt aus.

	Vt. °C	→ Min.	↗ °C/Min.	Temp. °C	→ Min.
Washbrand	500	4.00	75	940	2.00
Opaker	500	4.00	75	920	1.00
1.Dentinbrand	500	6.00	55	880	1.00
2.Dentinbrand	500	6.00	55	870	1.00
Glanzbrand	500	0.00	80	880	2.00

Tab. 8: Empfohlene Brandführung bei der Verblendung von Nichtedelmetall-Legierungen. [„Arbeitsanweisung Vita VM13“ der Fa. Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen] [156]

3.1.2.2 Duceram Kiss

Duceram Kiss wird von der Fa. Degudent, Hanau-Wolfgang vertrieben. Laut Herstellerangaben ist sie für die Verblendung sowohl von hochgoldhaltigen, goldreduzierten als auch von Nichtedelmetall-Legierungen, jeweils für den WAK-Bereich von 13,8-15,4 $\mu\text{m}/\text{mK}$ geeignet.

Die allgemeine Brenneempfehlung für Duceram Kiss sieht laut Hersteller wie folgt aus.

	Vt°C	→Min.	↗°C/Min.	Temp. °C	→Min.
Wash-Brand	575	7.00	55	980	2.00
Opaker	575	7.00	55	950	2.00
1.Dentinbrand	575	6.00	55	920	1.00
2.Dentinbrand	575	4.00	55	910	1.00
Glanzbrand	575	3.00	55	890	1.00

Tab. 9: Empfohlene Brandführung bei der Verblendung von Nichtedelmetall-Legierungen. [„Arbeitsanweisung Duceram Kiss“ der Fa. Degudent, Hanau-Wolfgang] [157]

3.2 Herstellung der Prüfkörper

Vorgabe bei der Herstellung der Prüfkörper war es, 20 Serien à 6 Einzelkronen und einer 3-gliedrigen Frontzahnbrücke zu erstellen. Die erste Hälfte wurde ohne Probleme nach Herstellerangaben mit Vita VM 13 verblendet. Die andere Hälfte wurde mit Duceram Kiss verblendet, allerdings zunächst (entgegen der Verarbeitungsanleitung) ohne Langzeitabkühlung. Die Keramik zeigte nach dem ersten Dentinbrand Risse und Sprünge, so dass einige Metall-Käppchen der zweiten Hälfte, die mit Duceram Kiss verblendet werden sollten, noch einmal neu modelliert werden mussten. Dabei wurde die Anzahl der Einzelkronen auf 7 erhöht, um eine Ersatzkrone zu haben, falls im weiteren Verlauf der Ausarbeitung der Metall-Käppchen ein Problem auftreten sollte, dass zum Verwerfen dieser Krone führen würde. So kommt es, dass einige Serien aus 6, andere aus 7 Einzelkronen bestehen. Wenn alle 7 Kronen verwertbar blieben, wurden auch alle mit in den Versuch einbezogen.

Die Kronen und Brücken werden auf reproduzierbaren Gipsstümpfen hergestellt. Die Wachsmodellation der Gerüste erfolgt durch Eintauchen der Gipsstümpfe in ein Tauchwachsbecken. Die Wachsmodellation hat eine Stärke von ca. 0,4 mm. Auf der palatinalen Seite wird ein dünner Wachsdraht (1 mm) angestiftet, der später bei der Verblendung als Ansatz für die Klemme zum Halten der Krone dienen soll. Inzisal wird der Gusskanal mit einem

4 mm Wachsdraht angestiftet. Pro Muffel wird eine Serie, also 6 Kronen und eine Brücke, eingebettet.

Die Wachsmoellationen werden mit Bellavest SH® eingebettet. Bellavest SH ist eine phosphatgebundene Einbettmasse, die für die schnelle oder konventionelle Präzisionsguss-Einbettung für Kronen, Brücken und für die Press- und Überpresskeramik entwickelt wurde. Sie wird mit BegoSol® HE im Verhältnis 90% angemischt, kurz durchgespatelt und dann 60 Sekunden unter Vakuum angemischt. Nach 30 Sekunden Sumpfzeit wird die Wachsmoellation in die Muffel eingebettet und dann für 10 Minuten in den Drucktopf bei 4 bar gestellt.

Über Nacht werden die Muffeln in einen 900 °C heißen Ofen gestellt, morgens das Metall gegossen (Nautilus® CC Plus). 10 Serien werden mit Wirobond C, die anderen 10 Serien mit Wirobond 280 gegossen. Für beide Legierungen gibt es vorprogrammierte Programme. Die Gießtemperatur liegt für beide Metalle bei 1500 °C. Ein entsprechendes Gießprotokoll kann ausgedruckt werden.

Die Ausarbeitung der Metall-Gerüste beginnt mit dem Abtrennen der Gusskanäle. Nach Entfernen aller Einbettmassenreste werden die Käppchen mit kreuzverzahnten Metallfräsen auf die geforderte Stärke von 0,3 mm gebracht.

Um die Metall-Gerüste für die Verblendung vorzubereiten, werden sie mit Aluminiumoxid (Korox®) in einer Körnung von 250 µm bei 3-4 bar abgestrahlt und danach mit dem Dampfstrahler gereinigt. Ab jetzt dürfen die zu verblendenden Metallflächen nur noch mit der Klemme angefasst werden, um die Oberfläche nicht zu verunreinigen.

Die einzelnen Serien werden nun in Setzkästen sortiert. Von den zehn Serien aus Wirobond C werden fünf Serien mit Duceram Kiss, die anderen fünf Serien mit Vita VM 13 verblendet. Von den zehn Serien aus Wirobond 280 werden ebenfalls fünf Serien mit Duceram Kiss, die anderen mit Vita VM 13 verblendet (Tab. 10). Die keramischen Brände erfolgen in einem programmierten Keramik-Brennofen (Ivoclar, Programat P90).

	Wirobond C	Wirobond 280
Duceram Kiss	X	X
Vita VM 13	X	X

Tab. 10: 2 Legierungen und 2 Verblendkeramiken ergeben 4 Kombinationsmöglichkeiten

Im Rahmen der Verblendung ist der dann folgende Schritt, das Auftragen des Wash-Opakers, der einzige Schritt, in dem sich die Herstellung der Kronen der einzelnen Serien unterscheidet.

	Washbrand- Temperatur	Wirobond C /Duceram Kiss	Wirobond280 /Duceram Kiss		Washbrand- Temperatur	Wirobond C /Vita VM 13	Wirobond280 /Vita VM 13
-50 °C	930 °C	6+1	6+1	-50 °C	890 °C	6+1	6+1
0 °C	980 °C	6+1	6+1	0 °C	940 °C	6+1	6+1
+50 °C	1030 °C	6+1	6+1	+50 °C	990 °C	6+1	6+1
+100 °C	1080 °C	6+1	6+1	+100 °C	1040 °C	6+1	6+1
+200 °C	1180 °C	6+1	6+1	+200 °C	1140 °C	6+1	6+1
		35	35			35	35

Tab.11: Washbrand-Temperaturen der 20 Serien, ausgehend von den empfohlenen Washbrand-Temperaturen der Hersteller. Es ergeben sich bei 6 Kronen und einer Brücke pro Kombinationsmöglichkeit und Temperatur insgesamt 120 Kronen und 20 Brücken

Der Wash-Opaker wird nicht deckend auf die Oberfläche „einmassiert“. Durch Riffeln mit einem Instrument legt sich der Opaker gleichmäßig auf die Oberfläche. Der Wash-Opaker wird für jede Serie mit entsprechender Temperatur gebrannt (Tab. 11). Nach dem Washbrand und nach jedem folgenden keramischen Brand, werden die Gerüste mit dem Dampfstrahler gereinigt.

Es folgt das Auftragen des Opakers, der minimal deckend aufgetragen wird. Durch Riffeln mit einem Instrument ergibt sich auch hier eine homogen deckende Schicht. Ab nun erfolgen wieder alle Brände, so auch der des Opakers, für alle Serien entsprechend der Herstellerangabe.

Nach erneutem Dampfstrahlen wird nun die Keramik geschichtet. Das Pulver wird mit der speziellen Anmischflüssigkeit angemischt. Die Masse ist nun gut zu modellieren. Damit aber die Masse standhaft ist und bleibt, muss der Masse Flüssigkeit entzogen werden. Durch Riffeln der Krone wird die Flüssigkeit an die Oberfläche getrieben, wo sie dann mit einem Zellstoff abgenommen werden muss. Je mehr Flüssigkeit in der Masse verbleibt, umso stärker schrumpft sie beim Brennvorgang. Der 1. Dentinbrand folgt. Das Schrumpfungsdefizit wird mit erneutem Auftragen keramischer Masse ausgeglichen. Der 2. Dentinbrand folgt. Die Krone wird nun in Form geschliffen. Dabei wird darauf geachtet, dass die Schichtstärken der Keramiken einheitlich eingehalten werden. Diese sind wie folgt festgelegt (Tab. 12).

Vestibulär	1,35mm
Palatinal	1,7mm
Inzisal/Okklusal	2,5mm

Tab. 12: Schichtstärken der Kronen nach Verblendung.

Abschließend erfolgt, nach erneuter Reinigung im Dampfstrahler, der Glanzbrand. Danach ist die Keramik verdichtet, die Oberfläche verschlossen und bedarf keiner weiteren Bearbeitung.

3.3 Der Abschrecktest

Der Abschrecktest wird frühestens einen Tag nach Verblendung der Prüfkörper durchgeführt, um herstellungsbedingte Fehler zu erkennen und ausschließen zu können. Er dient der Erkennung thermischer Spannungen innerhalb des Gefüges. Bis heute gibt es keine allgemein verbindliche Norm zur Durchführung und Bewertung dieses Testverfahrens. Anusavice beschrieb 1981 eine Versuchsanordnung, die später von MORA und O'Brien modifiziert wurde [145-146].

Ein Keramik-Brennofen (De Trey, Multimat Mach2) wird auf 105 °C aufgeheizt. Jede Serie wird einzeln für 30 Minuten in den Ofen gestellt. Dabei wird darauf geachtet, dass die Prüfkörper auf dem Objekträger recht dicht beieinander stehen. Nach Ablauf der halben Stunde werden die Prüfkörper möglichst ohne Zeitverlust vom geöffneten Ofen in ein Glas mit 5 °C kaltem Wasser gegeben. Das Glas enthält einen Kunststoffeinsatz, damit die Prüfkörper beim Hineinfallen nicht durch Kontakt mit den Glaswänden beschädigt werden. Die Tatsache, dass die Kronen und die Brücke eng beieinander stehen, gewährleistet, dass alle Prüfkörper relativ zeitgleich ins Eiswasser fallen und sich so ein gleichmäßiges und vergleichbares Ergebnis ergibt. Die Prüfkörper verbleiben 30 Sekunden im 5 °C kalten Wasser. Danach werden sie herausgenommen, kurz trockengeblasen und zum Trocknen weitere 15 Minuten zur Seite gelegt. Nach dieser Viertelstunde werden die Prüfkörper auf Sprünge hin untersucht. Das geschieht visuell mit bloßem Auge unter einer Lichtquelle. Zusätzlich werden Kronen und Brücken auch unter dem Stereomikroskop untersucht. Es zeigt sich allerdings, dass viele Sprünge innerhalb der Keramik deutlicher in der visuellen Kontrolle auffallen und unter dem Mikroskop gar nicht registriert werden.

Prüfkörper, die den Test bei 105 °C überstanden haben, werden dem nächsten Test, dann 15 °C höher, bei 120 °C unterzogen. Es wird in gleicher Weise verfahren. Der Test wird so lange durchgeführt, bis alle Prüfkörper defekt sind. Die Temperaturen unterscheiden sich bis 165 °C jeweils um 15 °C. Ab 165 °C erhöht man die Temperatur nur noch um 10 °C. Es ergeben sich also folgende Temperaturen, mit denen der Abschrecktest durchgeführt wird.

105 °C →120 °C→135 °C→150 °C→165 °C→175 °C→185 °C→195 °C→...

Der Test gilt (lt. Fa. Vita/Bego) offiziell als bestanden, wenn nach 5 Testzyklen, also nach der Temperaturstufe 165 °C, 1-2 Kronen den Test ohne Sprünge überstanden haben und die Brücke

nicht vor 135 °C gesprungen ist. In diesem Fall wird der Test dahingehend modifiziert, als dass der Test so lange weitergeführt wird, bis alle Prüfkörper Sprünge aufweisen.

Ob und bei welcher Temperatur die Prüfkörper gesprungen sind, wird in einem Dokumentationsbogen (Abb. 5a+b) für jede Serie festgehalten. Darin wird vermerkt, bei welcher Temperatur welche Krone/Brücke gesprungen ist. Die Prüfkörper werden dann chronologisch nummeriert. Die Bruchverläufe werden durch Skizzierung in einer Fotografie des Prüfkörpers dokumentiert.

○

Projekt : Diss. CDA Prüfer: Thorsten Hoopmann Datum: 08.04.2010
980°C

Abschrecktest :

Es wurden ⁷ 7 Kronen und eine 3er Brücke aus Wirobond C gefertigt und mit Ducram Kiss verblendet. Anschließend wurde der Abschrecktest vorgenommen.

Temp.	Kronen	Sprünge	Brücke
105 °C	<u>7x 1.0</u>	<u>0</u>	<u>1x 1.0</u>
120 °C	<u>7x 1.0</u>	<u>0</u>	<u>1x 1.0</u>
135 °C	<u>7x 1.0</u>	<u>0</u>	<u>1x 1.0</u>
150 °C	<u>4x 1.0</u>	<u>3</u>	<u>1x 1.0</u>
165 °C	<u>0x 1.0</u>	<u>5</u>	<u>0x 1.0</u>
175 °C	_____	_____	_____
185 °C	_____	_____	_____
195 °C	_____	_____	_____
205 °C	_____	_____	_____
215 °C	_____	_____	_____

} 150 - 165

Test bestanden: ja nein

Test abgeschlossen

Abb. 5a: (siehe Abb. 5b)

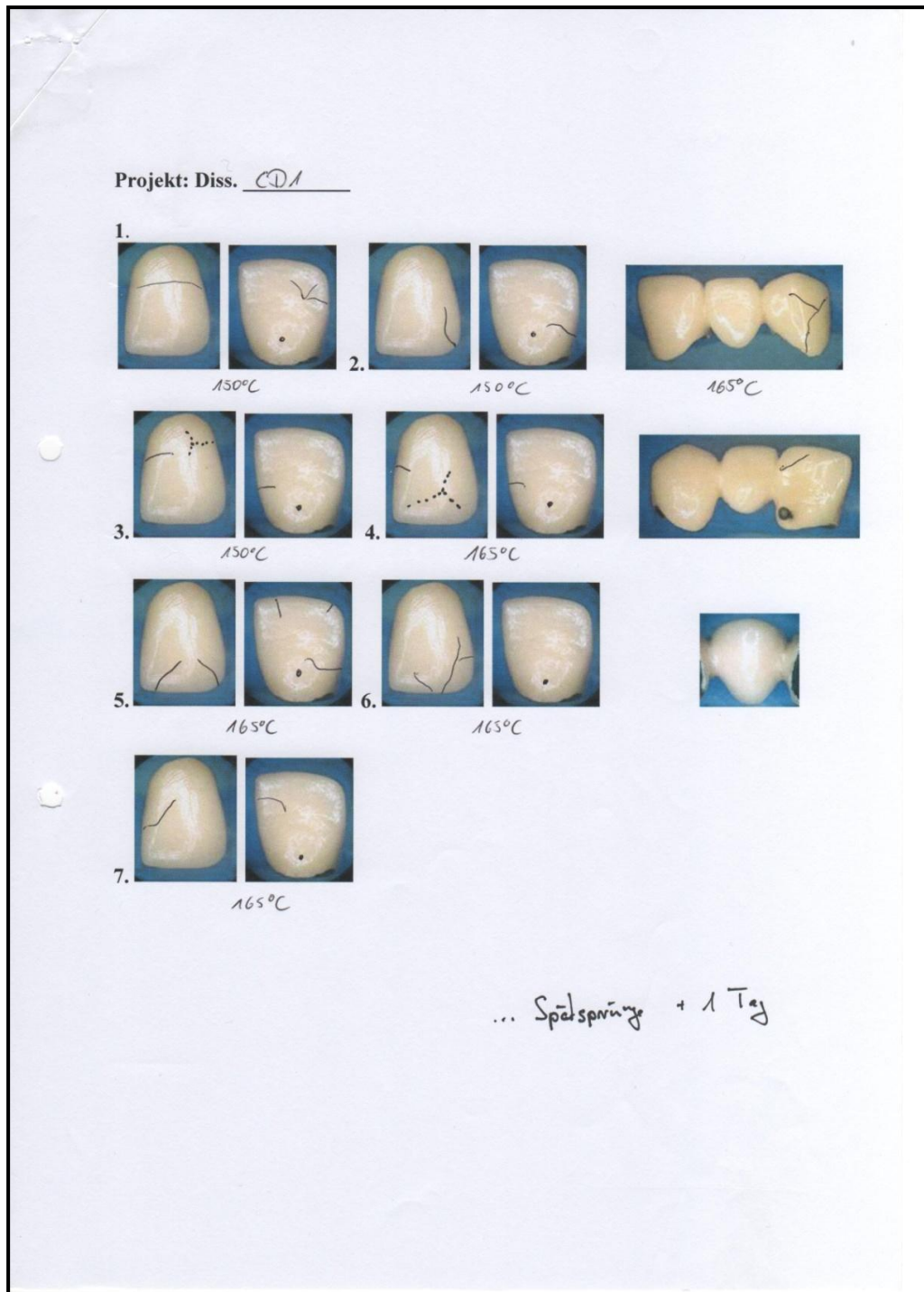


Abb. 5b: Abb. 5a+b zeigen einen Dokumentationsbogen als Versuchsprotokoll zur Darstellung der Temperaturen und der Bruchverläufe (am Beispiel Wirobond C/Duceram Kiss 980 °C).

Jeweils einen Tag nach dem jeweiligen Testlauf werden die Prüfkörper einer jeden Serie noch einmal auf Spätsprünge untersucht. Diese Kontrolle muss sehr genau erfolgen, da bereits schon alle Prüfkörper Sprünge aufweisen. Spätsprünge und deren Verläufe werden ebenfalls im Dokumentationsbogen beschrieben (siehe gestrichelte Bruchverläufe).

Abschließend werden die Brüche innerhalb der Keramik auf ihren Verlauf hin näher betrachtet. Nach Auswertung der graphischen Dokumentation werden die Verläufe in sinnvolle Klassen eingeteilt. Da die Verläufe sehr variabel sind, hat man sich auf die Einteilung in zwei Klassen beschränkt. Durch die Einteilung in nur wenige Klassen wird allzu vielen Grenzenscheidungen aus dem Weg gegangen. Es kann durchaus vorkommen, dass Bruchverläufe innerhalb einer Krone auf Vorder- und Rückseite in verschiedene Klassen unterteilt werden müssen.

Es werden 2 Klassen definiert. Bruchverläufe der Klasse I definieren sich als zentrale, die der Klasse II als periphere Bruchverläufe. Die Einteilung ergibt sich aus der Projektion des Metallgerüsts (Abb. 6 a+b).

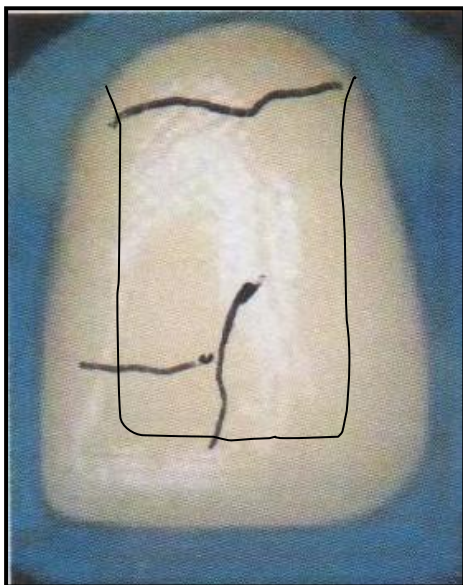


Abb. 6a: Bsp. Für einen zentralen Bruchverlauf → Klasse I

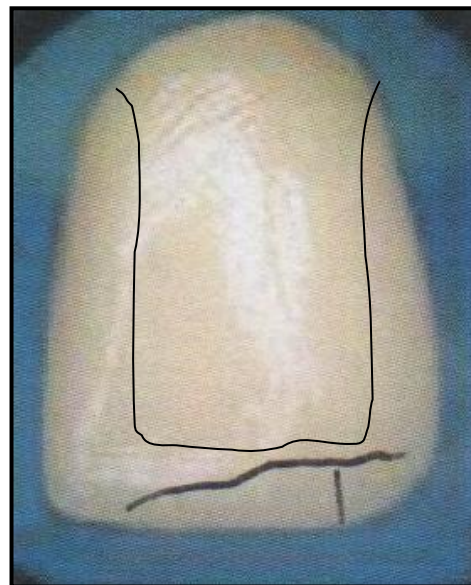


Abb. 6b: Bsp. Für einen peripheren Bruchverlauf → Klasse II

4 Ergebnisse

Im Laufe des Abschrecktests sind die Kronen und Brücken aller Serien, wie gefordert gesprungen. Es kam in allen Fällen zu Sprüngen und Rissen in der Keramik, nie aber ist die Keramik vollständig abgeplatzt oder vom Metallgerüst abgeschert.

Die Ergebnisse werden zunächst im Dokumentationsbogen festgehalten. Später werden sie zur besseren Veranschaulichung in einer Tabelle und im Diagramm dargestellt.

Die Anzahl der Sprünge vor dem Hintergrund der Metall-Keramik-Kombination verteilt sich wie folgt. Es zeigt sich sowohl bei den Kronen (Abb. 7) als auch bei den Brücken (Abb. 8) eine nahezu gleiche Verteilung. Zu erkennen ist aber, wenn auch nicht sehr auffällig, dass die mit Duceram Kiss verblendeten Kombinationen häufiger gesprungen sind. Das gilt für Kronen und Brücken.

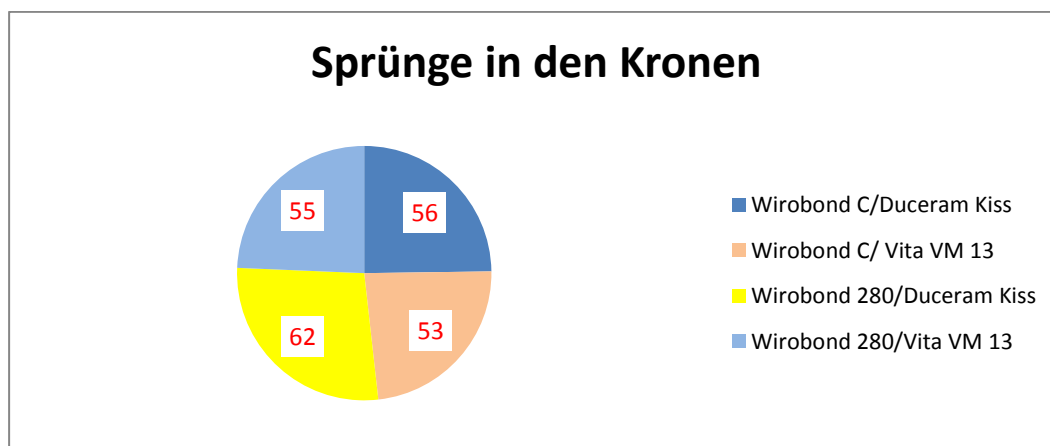


Abb. 7: Anzahl der Sprünge in den Kronen; dargestellt für die einzelnen Metall-Keramik-Kombinationen.

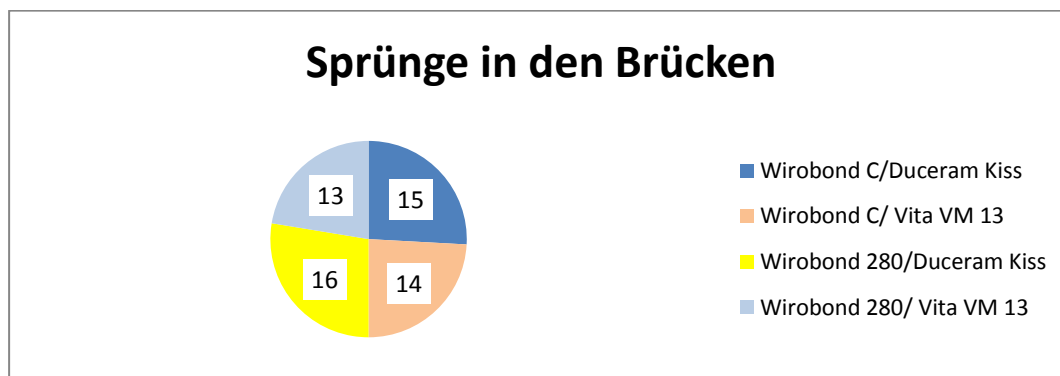


Abb. 8: Anzahl der Sprünge in den Brücken; dargestellt für die einzelnen Metall-Keramik-Kombinationen.

4.1 Ergebnisse des Abschrecktests für Wirobond C und Duceram Kiss

Im Laufe des Tests sind alle Kronen und die Brücke gesprungen. Es werden 5 Serien mit unterschiedlichen Washbrand-Temperaturen untersucht. Ausgehend von der vom Hersteller empfohlenen Washbrand-Temperatur von 980 °C ergeben sich weitere Washbrand-Temperaturen von 930 °C, 1030 °C, 1080 °C und 1180 °C (Tab. 13).

Kronen; Wirobond C/Duceram Kiss

	930 °C	980 °C	1030 °C	1080 °C	1180 °C
105 °C	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
120 °C	100,00	100,00	100,00	100,00	57,14
135 °C	100,00	100,00	50,00	0,00	0,00
150 °C	100,00	57,14	16,67	0,00	0,00
165 °C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
175 °C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
185 °C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. 13: Überlebensraten der Kronen bei entsprechender Abschrecktest-Temperatur in Prozent.

Die Kronen mit einer erniedrigten Washbrand-Temperatur (930 °C) springen alle in einem Testzyklus bei 165 °C. Mit der regulären Temperatur von 980 °C gebrannte Kronen bestehen den Test bei 150 °C zu 57 %. Die letzten Kronen dieser Serie springen ebenfalls bei 165 °C. Ebenso in der Serie mit 1040 °C als Washbrand-Temperatur. Hier springen die ersten Kronen allerdings schon bei 135 °C. Die Temperatur, bei der die ersten und letzten Kronen einer Serie springen, fällt mit ansteigender Washbrand-Temperatur, so dass in der Serie mit einer Washbrand-Temperatur von 1180 °C die ersten Kronen bereits bei 120 °C, die letzten bei 135 °C springen.

Brücken; Wirobond C/Duceram Kiss

	930 °C	980 °C	1030 °C	1080 °C	1180 °C
105 °C	100	100	100	100	100
120 °C	100	100	100	100	100
135 °C	100	100	100	0	0
150 °C	100	100	100	0	0
165 °C	0	0	0	0	0
175 °C	0	0	0	0	0
185 °C	0	0	0	0	0

Tab. 14: Überlebensraten der Brücken bei entsprechender Abschrecktest-Temperatur in Prozent.

Ähnlich ist das Bild bei den Brücken (Tab. 14). Die Serien mit Washbrand-Temperaturen von 930 °C, 980 °C und 1030 °C versagen alle bei einer Abschrecktemperatur von 165 °C, die Serien 1080 °C und 1180 °C 2 Zyklen vorher, bei 135 °C.

4.2 Ergebnisse des Abschrecktests für Wirobond C mit Vita VM 13

Im Laufe des Tests sind alle Kronen und die Brücke gesprungen. Es werden 5 Serien mit unterschiedlichen Washbrand-Temperaturen untersucht. Ausgehend von der vom Hersteller empfohlenen Washbrand-Temperatur von 940 °C ergeben sich weitere Washbrand-Temperaturen von 890 °C, 990 °C, 1040 °C und 1140 °C (Tab. 15).

Kronen; Wirobond C/Vita VM13

	890 °C	940 °C	990 °C	1040 °C	1140 °C
105 °C	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
120 °C	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
135 °C	83,33	85,71	100,00	66,67	33,33
150 °C	16,67	71,43	50,00	16,67	0,00
165 °C	16,67	57,14	16,67	0,00	0,00
175 °C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
185 °C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. 15: Überlebensraten der Kronen bei entsprechender Abschrecktest-Temperatur in Prozent.

Die ersten drei Serien durchlaufen 5 Testzyklen, bevor dann bei 175 °C die letzten Kronen gesprungen sind. In den ersten beiden Serien springt die Keramik der ersten Kronen bei 135 °C, in der dritten Serie einen Zyklus später bei 150 °C. Die Serie mit einer Washbrand-Temperatur von 1040 °C versagt mit der ersten Krone bei 135 °C, mit der letzten bei 165 °C. Die Serie mit der höchsten Washbrand-Temperatur (1140 °C) versagt mit der ersten Krone ebenfalls bei 135 °C, mit der letzten bei 150 °C.

Brücken; Wirobond C/Vita VM13

	890 °C	940 °C	990 °C	1040 °C	1140 °C
105 °C	100	100	100	100	100
120 °C	100	100	100	100	100
135 °C	100	100	100	0	100
150 °C	0	0	0	0	0
165 °C	0	0	0	0	0
175 °C	0	0	0	0	0
185 °C	0	0	0	0	0

Tab. 16: Überlebensraten der Brücken bei entsprechender Abschrecktest-Temperatur in Prozent.

Mit Ausnahme der Brücke mit einer Washbrand-Temperatur von 1040 °C, die bei einer Abschrecktemperatur von 135 °C springt, springen alle anderen Brücken bei 150 °C (Tab. 16).

4.3 Ergebnisse des Abschrecktests für Wirobond 280 mit Duceram Kiss

Im Laufe des Tests sind alle Kronen und die Brücke gesprungen. Es werden 5 Serien mit unterschiedlichen Washbrand-Temperaturen untersucht. Ausgehend von der vom Hersteller empfohlenen Washbrand-Temperatur von 980 °C ergeben sich weitere Washbrand-Temperaturen von 930 °C, 1030 °C, 1080 °C und 1180 °C (Tab. 17).

Kronen; Wirobond 280/Duceram Kiss

	930 °C	980 °C	1030 °C	1080 °C	1180 °C
105 °C	100	100	100	100	57
120 °C	100	100	100	57	0
135 °C	100	86	57	14	0
150 °C	57	71	14	0	0
165 °C	0	14	0	0	0
175 °C	0	0	0	0	0
185 °C	0	0	0	0	0

Tab. 17: Überlebensraten der Kronen bei entsprechender Abschrecktest-Temperatur in Prozent.

Die Kronen mit der regulären Washbrand-Temperatur durchlaufen am meisten Testzyklen, bevor nach dem 6. Zyklus auch die letzte Krone bei 175 °C springt. Die erste springt bei 135 °C. Die letzten Kronen der Serie mit verminderter Washbrand-Temperatur versagen bei 165 °C, nachdem die ersten bei 150 °C gesprungen sind. Mit jeder Erhöhung der Washbrand-Temperatur sinkt die Temperatur im Abschreckversuch, bei der die ersten Kronen springen. Kronen der 3. Serie springen als erstes bei 135 °C, Kronen der 4. Serie bei 120 °C und Kronen der 5. Serie springen gleich im ersten Testzyklus bei 105 °C.

Brücken; Wirobond 280/Duceram Kiss

	930 °C	980 °C	1030 °C	1080 °C	1180 °C
105 °C	100	100	100	100	100
120 °C	100	100	100	100	0
135 °C	100	100	100	0	0
150 °C	0	0	100	0	0
165 °C	0	0	0	0	0
175 °C	0	0	0	0	0
185 °C	0	0	0	0	0

Tab. 18: Überlebensraten der Brücken bei entsprechender Abschrecktest-Temperatur in Prozent.

Die Brücken mit regulärer und verminderter Washbrand-Temperatur versagen bei einer Abschrecktemperatur von 150 °C, die mit 50 °C erhöhter Washbrand-Temperatur durchläuft einen weiteren Zyklus, bevor sie bei 165 °C springt. Mit weiterer Erhöhung der Washbrand-Temperatur auf 1080 °C bzw. 1180 °C sinkt die Temperatur, die für ein Versagen des Prüfkörpers notwendig ist, auf 135 °C bzw. 120 °C (Tab. 18).

4.4 Ergebnisse des Abschrecktests für Wirobond 280 mit Vita VM 13

Im Laufe des Tests sind alle Kronen und die Brücke gesprungen. Es werden 5 Serien mit unterschiedlichen Washbrand-Temperaturen untersucht. Ausgehend von der vom Hersteller empfohlenen Washbrand-Temperatur von 940 °C ergeben sich weitere Washbrand-Temperaturen von 890 °C, 990 °C, 1040 °C und 1140 °C (Tab. 19).

Kronen; Wirobond 280/Vita VM13

	890 °C	940 °C	990 °C	1040 °C	1140 °C
105 °C	100	100	100	100	100
120 °C	100	100	100	100	100
135 °C	86	100	86	86	17
150 °C	57	50	57	29	17
165 °C	0	17	0	0	0
175 °C	0	0	0	0	0
185 °C	0	0	0	0	0

Tab. 19: Überlebensraten der Kronen bei entsprechender Abschrecktest-Temperatur in Prozent.

Die Kronen mit der regulären Washbrand-Temperatur durchlaufen die meisten Testzyklen, bevor die ersten Kronen bei 150 °C und die letzten bei 175 °C springen. Genau gleich verhalten sich in diesem Fall die Kronen mit 50 °C verminderter und erhöhter Washbrand-Temperatur. In beiden Fällen springen die ersten Kronen bei 135 °C und die letzten bei 165 °C. Zwar springen die ersten Kronen der beiden letzten Serien auch erst bei 135 °C und die letzten bei 165 °C. Allerdings ist die Anzahl der Kronen, die bis 165 °C halten, geringer als in den Serien zuvor.

Brücken; Wirobond 280/Vita VM13

	890 °C	940 °C	990 °C	1040 °C	1140 °C
105 °C	100	100	100	100	100
120 °C	100	100	100	0	100
135 °C	100	100	100	0	100
150 °C	100	100	100	0	0
165 °C	100	0	0	0	0
175 °C	0	0	0	0	0
185 °C	0	0	0	0	0

Tab. 20: Überlebensraten der Brücken bei entsprechender Abschrecktest-Temperatur in Prozent.

Die Brücke der ersten Serie springt bei 175 °C. Die Brücken der zweiten und dritten Serie, also mit regulärer und um 50 °C erhöhter Washbrand-Temperatur, springen einen Zyklus früher bei 165 °C. Die Brücke mit einer Washbrand-Temperatur von 1040 °C springt bei 120 °C, die Brücke der letzten Serie bei 150 °C (Tab. 20).

4.5 Klassifizierung der Bruchverläufe

Um einen genaueren Überblick zu bekommen, wie die Sprünge verlaufen und um zu schauen, ob es einen Zusammenhang zwischen Verlauf der Sprünge und den Temperaturen gibt, wurden die Brüche in zentrale und periphere Verläufe klassifiziert (siehe Kapitel 3.3 Abb. 6a und 6b).

Es wurden sowohl bei den Einzelkronen, als auch bei den Brücken jeweils die vestibulären und die palatinalen Flächen begutachtet. Bei den Einzelkronen zeigten sich bei 226 von insgesamt 264 Flächen Sprünge innerhalb der Keramik. An 38 Flächen, also entweder vestibulär oder palatinal waren keine Sprünge zu erkennen. Die Sprungverläufe wurden entweder als zentral (z) oder peripher (p) definiert. Wenn die Verläufe aus der Peripherie ins Zentrum oder umgekehrt verlaufen, wird der Bruch als zentral/peripher, also gemischt gewertet.

Bei 20 dreigliedrigen Brücken ergeben sich 120 zu bewertende Flächen. An 59 dieser Flächen konnten Sprünge nachgewiesen werden.

	Kronen	Brücken
Flächen vestibulär und palatinal insgesamt	264	120
Flächen vestibulär und palatinal mit Sprüngen	226	58
Flächen ohne nachweisbare Sprünge	38	62
Zentraler Verlauf (z)	28	24
Peripherer Verlauf (p)	126	16
Zentral-peripherer Verlauf	72	18

Tab. 21: Anzahl der Sprünge auf den Kronenflächen und deren Verläufe.

4.5.1 Abhängigkeit des Bruchverlaufs von der Washbrand-Temperatur

Die Abhängigkeit der Bruchverläufe von den Washbrand-Temperaturen wird in Abb. 9 ersichtlich. Es ist zu sehen, dass bei Einzelkronen mit steigender Washbrand-Temperatur die Anzahl der rein peripheren Sprünge leicht abnimmt. Ein Maximum an peripheren Bruchverläufen ist bei einer Washbrand-Temperatur von 930 °C zu erkennen. Ein Maximum an zentralen Bruchverläufen findet sich bei einer Washbrand-Temperatur von 1180 °C. Gemischte Bruchverläufe zeigen sich im gesamten Temperaturbereich ohne auffällige Schwankungen.

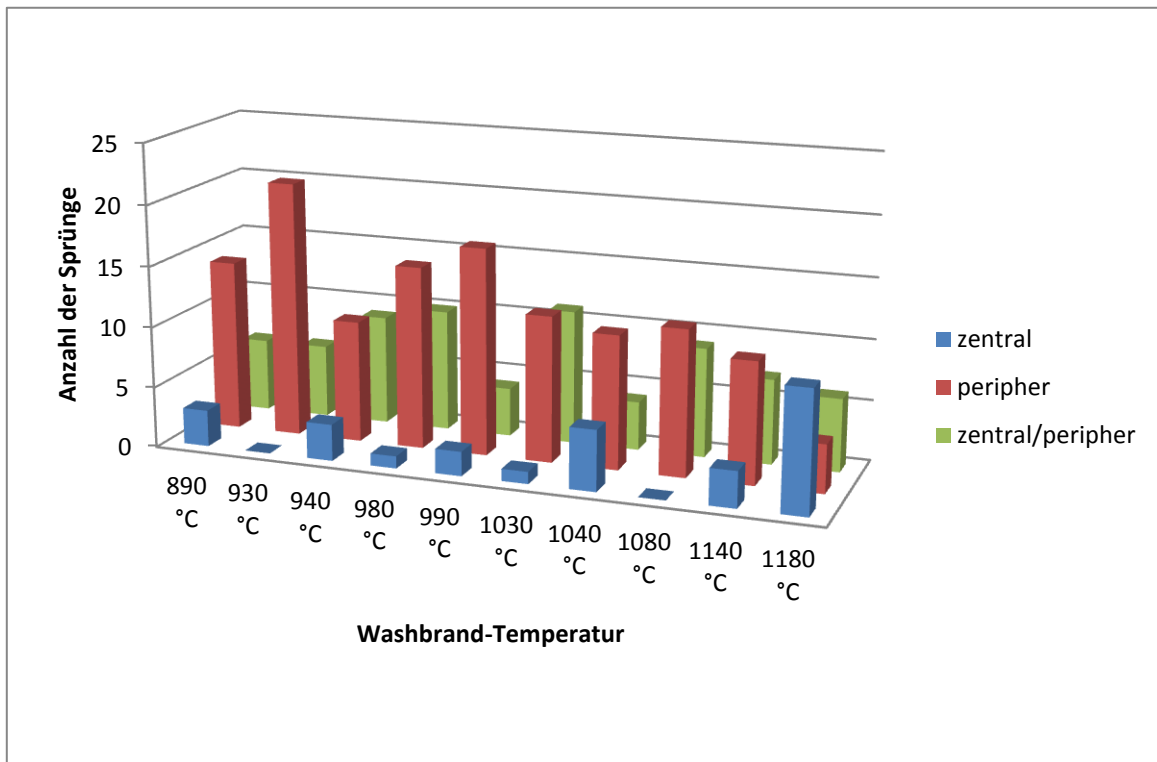


Abb. 9: Verteilung zentraler und peripherer Bruchverläufe von Kronen ungeachtet der Materialkombination in Abhängigkeit der Washbrand-Temperatur.

Eine genauere Darstellung der prozentualen Verteilung der Bruchverläufe bei entsprechender Washbrand-Temperatur zeigen die Abbildungen 10-12.

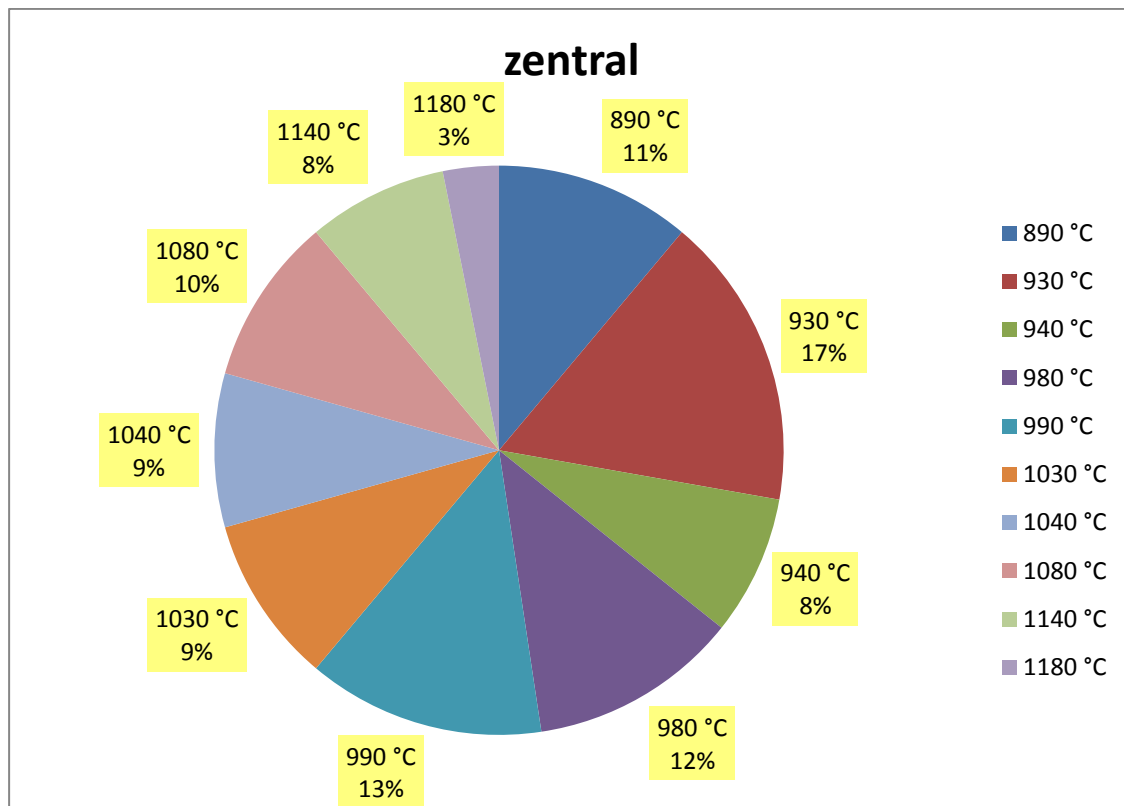


Abb. 10: Prozentuale Darstellung der zentralen Bruchverläufe bei Kronen in Abhängigkeit der Washbrand-Temperatur.

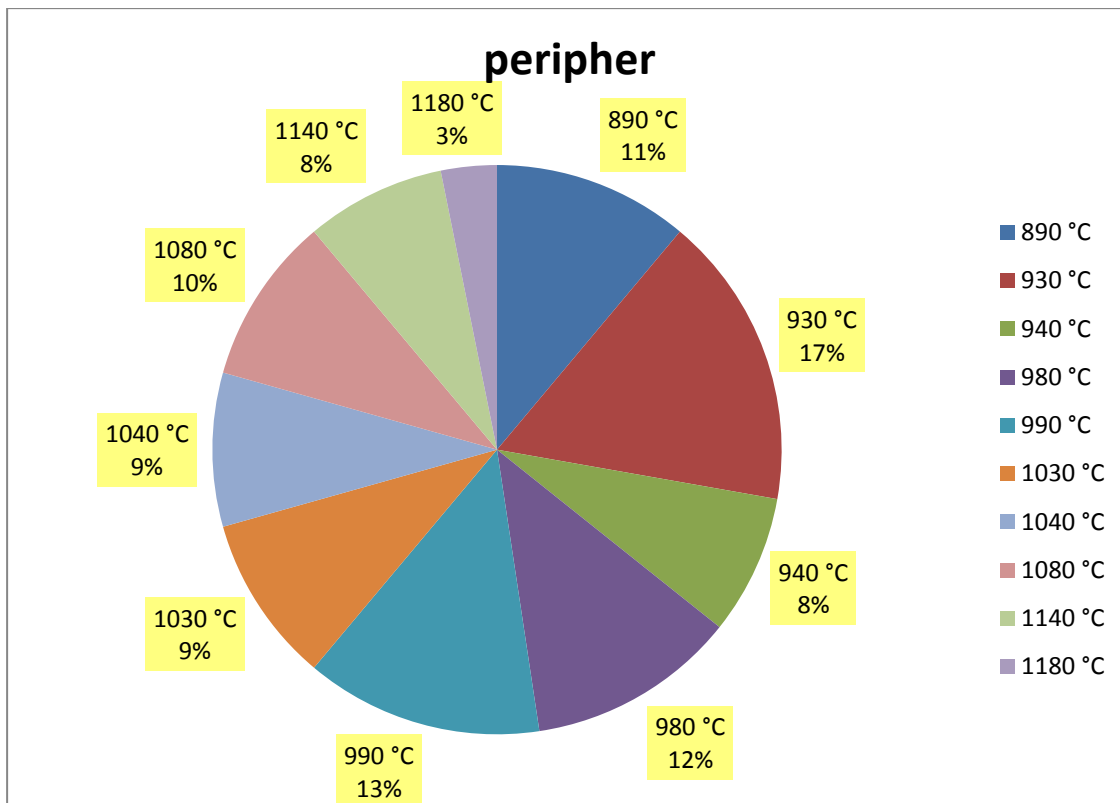


Abb. 11: Prozentuale Darstellung der peripheren Bruchverläufe bei Kronen in Abhängigkeit der Washbrand-Temperatur.

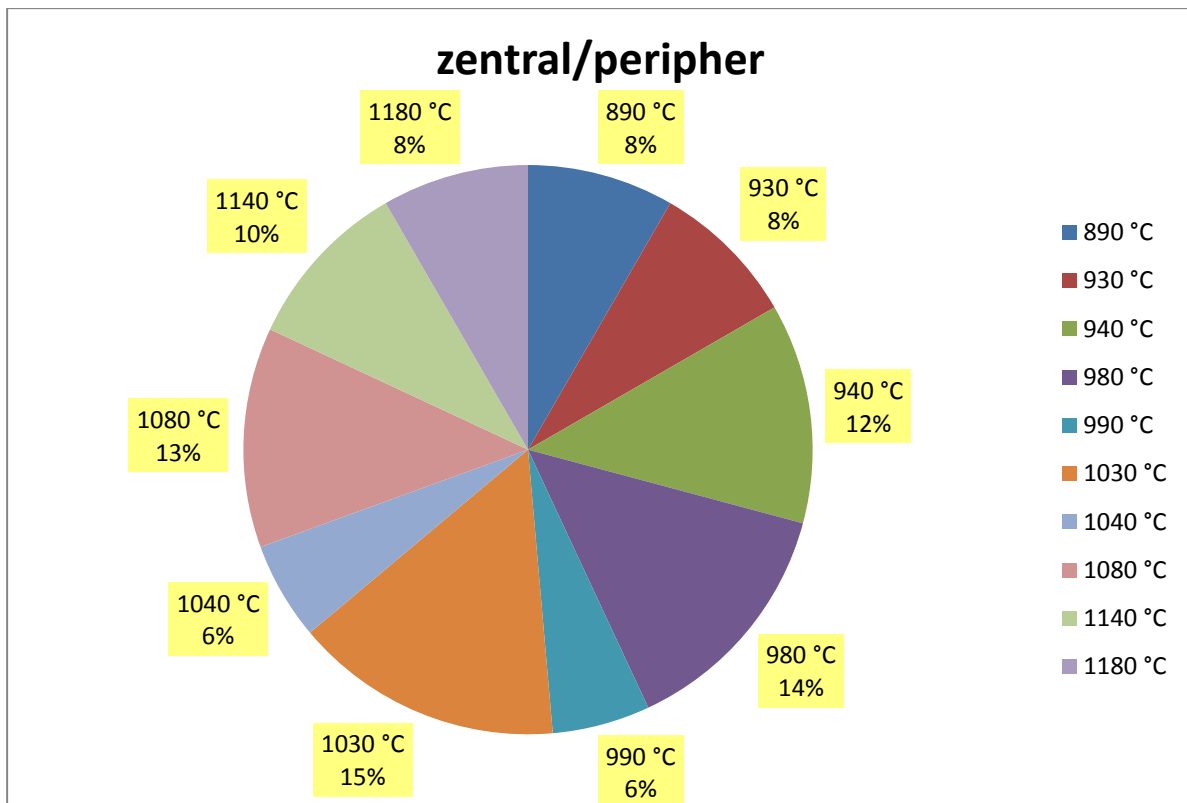


Abb. 12: Prozentuale Darstellung der zentral/peripheren Bruchverläufe bei Kronen in Abhängigkeit der Washbrand-Temperatur.

Man sieht in dieser zweidimensionalen Betrachtungsweise, dass die Sprünge bei den Kronen häufiger im peripheren Bereich der Keramik zu bemerken sind, als im zentralen Bereich (Abb. 9). Bei den Brücken erkennt man deutlich mehr zentrale Bruchverläufe als bei den Kronen (Abb. 13). Ein Maximum an zentralen Bruchverläufen lässt sich bei 1180 °C erkennen. Ansonsten ist die Verteilung der Bruchverläufe - vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Washbrand-Temperaturen - unauffällig (Abb. 14-16).

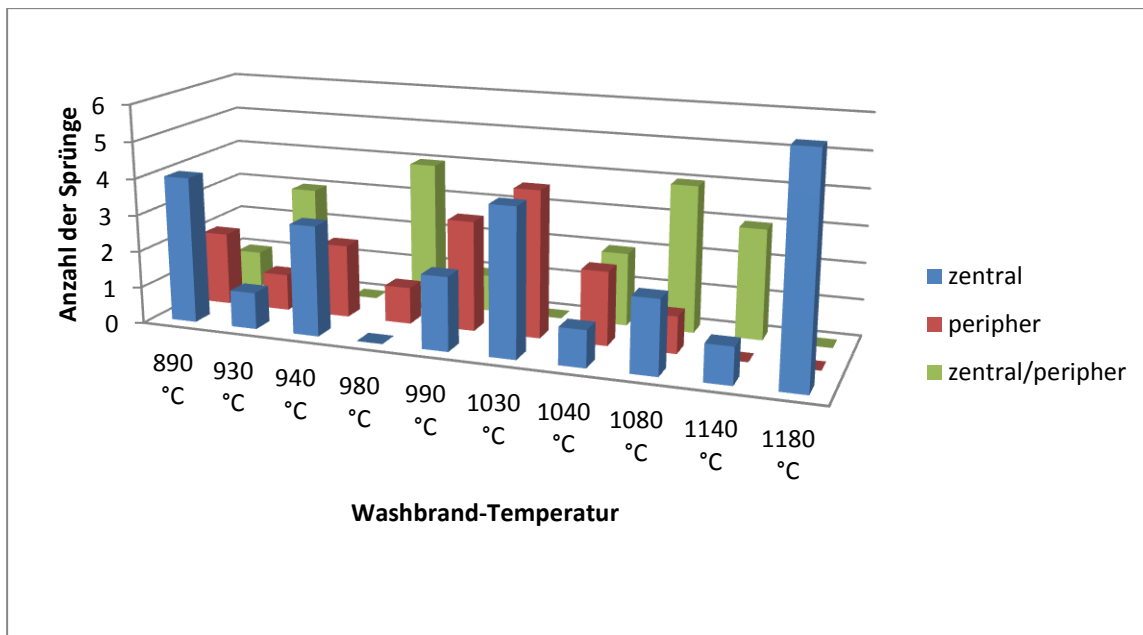


Abb. 13: Verteilung zentraler und peripherer Bruchverläufe von Brücken ungeachtet der Materialkombination in Abhängigkeit der Washbrand-Temperatur.

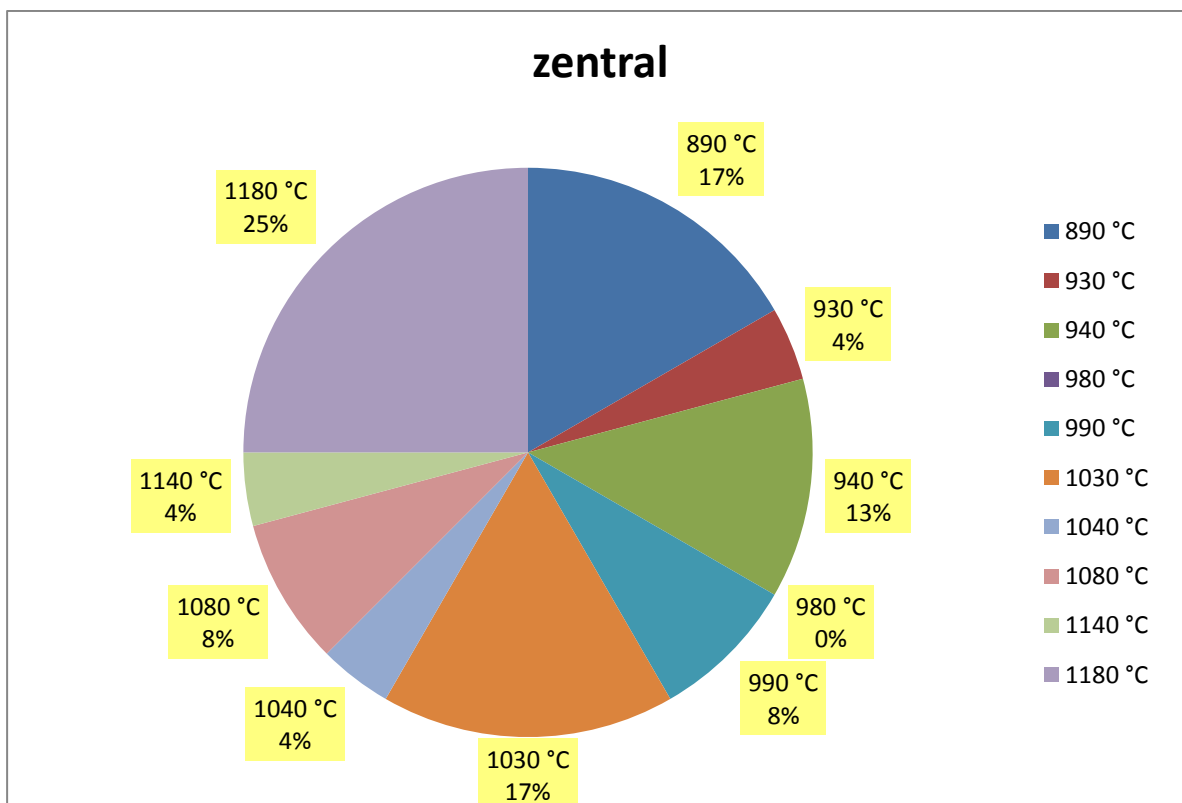


Abb. 14: Prozentuale Darstellung der zentralen Bruchverläufe bei Brücken in Abhängigkeit der Washbrand-Temperatur.

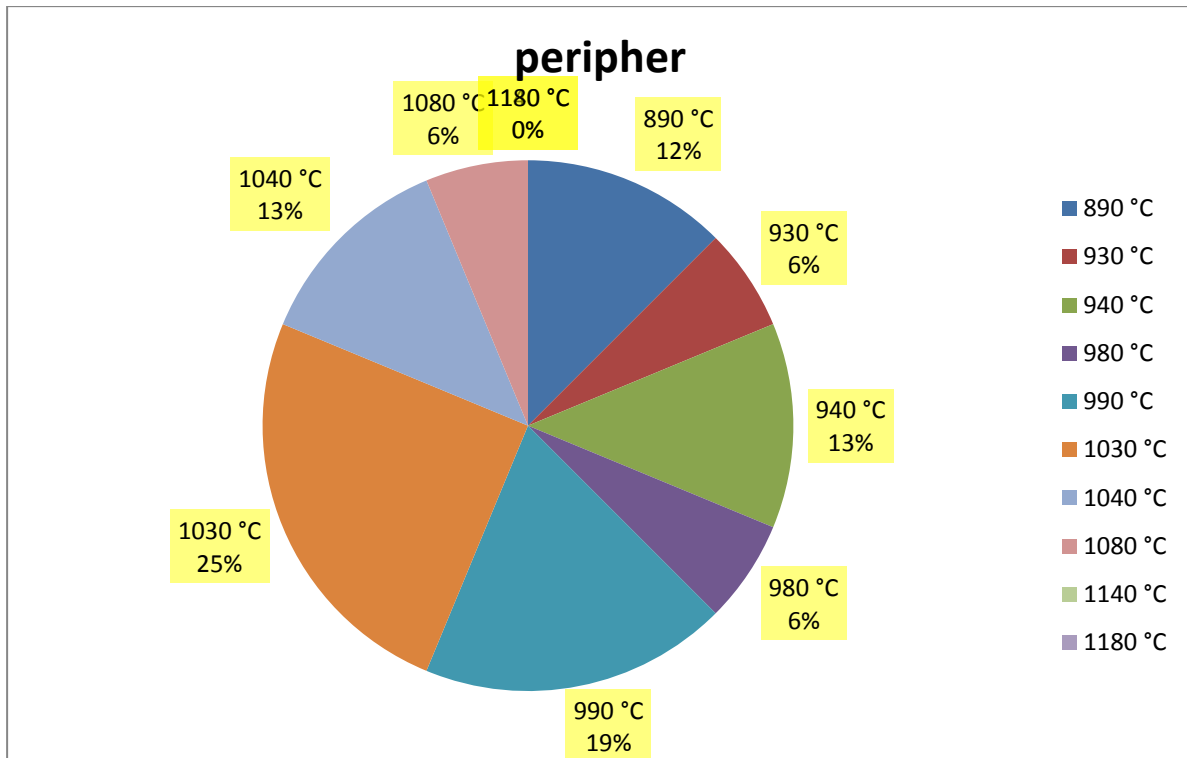


Abb. 15 : Prozentuale Darstellung der peripheren Bruchverläufe bei Brücken in Abhängigkeit der Washbrand-Temperatur.

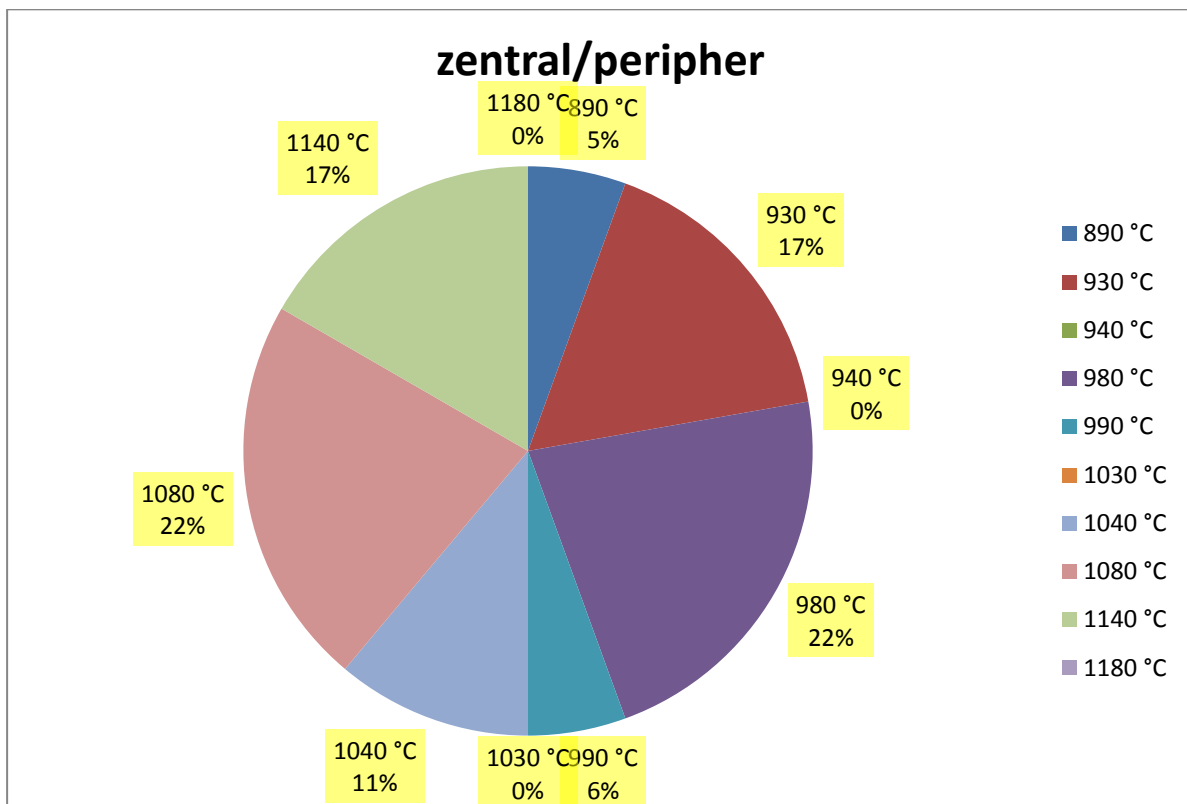


Abb. 16 : Prozentuale Darstellung der zentral/peripheren Bruchverläufe bei Brücken in Abhängigkeit der Washbrand-Temperatur.

4.5.2 Abhängigkeit des Bruchverlaufs von der Abschrecktemperatur

Ferner wird dargestellt, bei welchen Abschrecktemperaturen, welche Bruchverläufe bei den Einzelkronen und den Brücken zu erkennen sind.

Abb. 17 und 18 zeigen zum einen, dass die meisten Sprünge in einem Temperaturbereich von 135 °C – 165 °C zu beobachten sind.

Zum anderen wird in Abb. 17 deutlich, dass bei den Kronen die Anzahl der zentral entstandenen Sprünge über alle Temperaturbereiche relativ niedrig ist. Es ist lediglich ein leichter Anstieg im Bereich von 150 °C zu verzeichnen. Das Maximum an rein peripheren Sprüngen ist bei 165 °C zu erkennen. Die Anzahl der peripheren Sprünge ist im Bereich von 135 °C – 165 °C am höchsten. Das Maximum der zentral und peripher verlaufenden Sprünge liegt bei 135 °C. Mit steigender Abschrecktemperatur sinkt die Anzahl der Sprünge mit entsprechendem Verlauf wieder.

In Abb. 18 wird für die Brücken - ähnlich wie in der Abb. 17 bei den Kronen - deutlich, dass die meisten Sprünge im Temperaturbereich von 135 °C – 165 °C zu registrieren sind. Außerhalb dieses Kernbereiches sind einige zentrale Sprünge bei 105 °C zu bemerken. Bei den Brücken sind mehr zentrale Bruchverläufe zu erkennen. Die meisten zentralen und gemischt verlaufenden Sprünge entstehen bei den Brücken bei 150 °C, die meisten peripheren Brüche bei 165 °C.

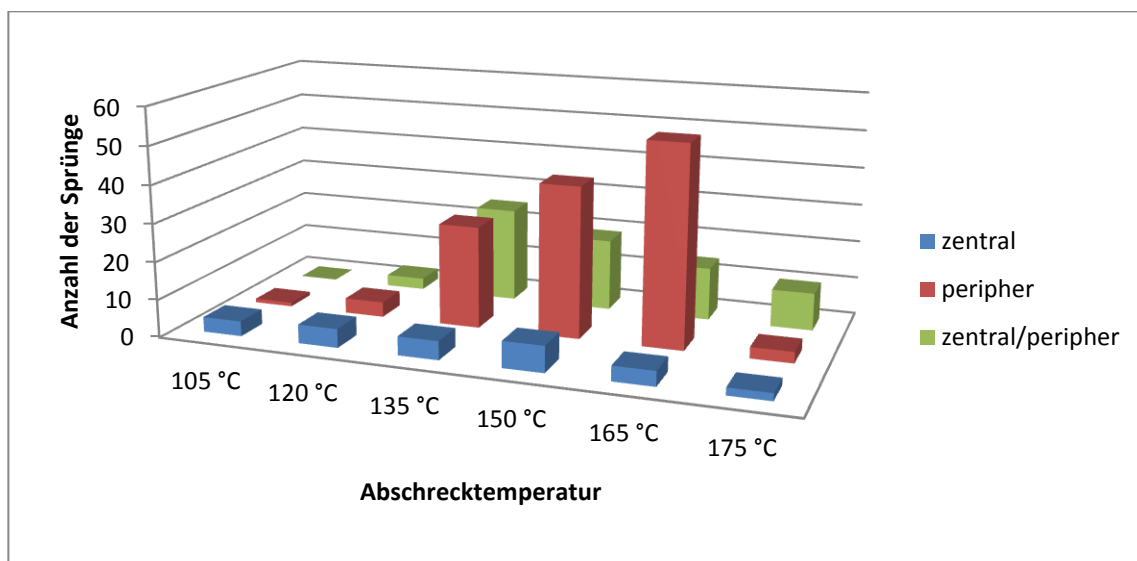


Abb. 17: Verteilung zentraler und peripherer Bruchverläufe von Kronen ungeachtet der Materialkombination in Abhängigkeit der Abschrecktemperatur.

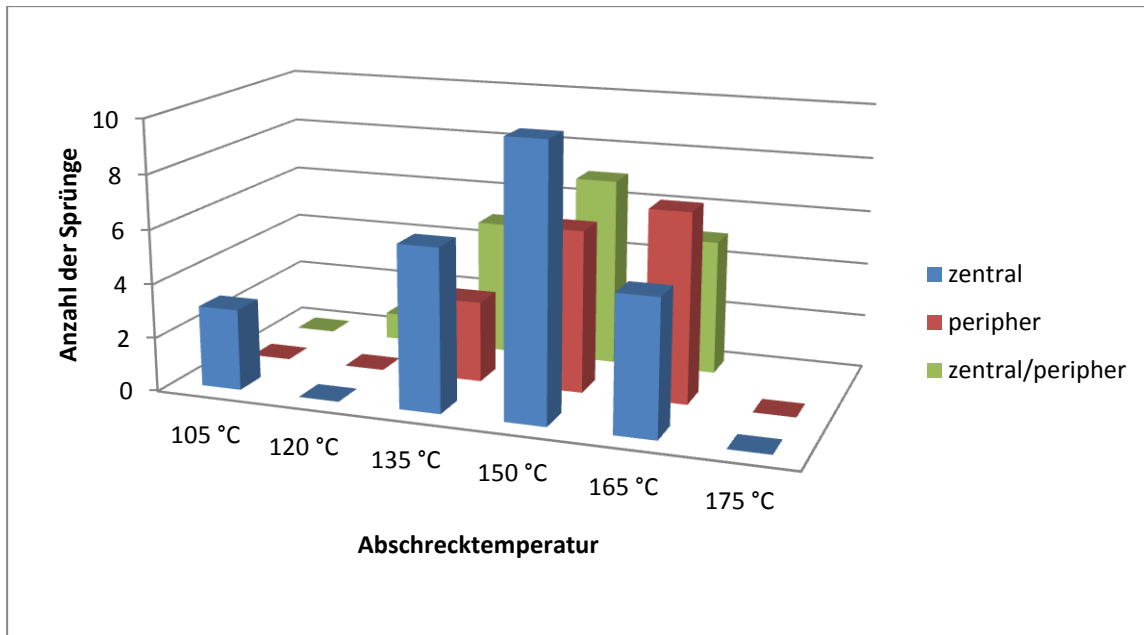


Abb. 18: Verteilung zentraler und peripherer Bruchverläufe von Brücken_ungeachtet der Materialkombination in Abhängigkeit der Abschrecktemperatur.

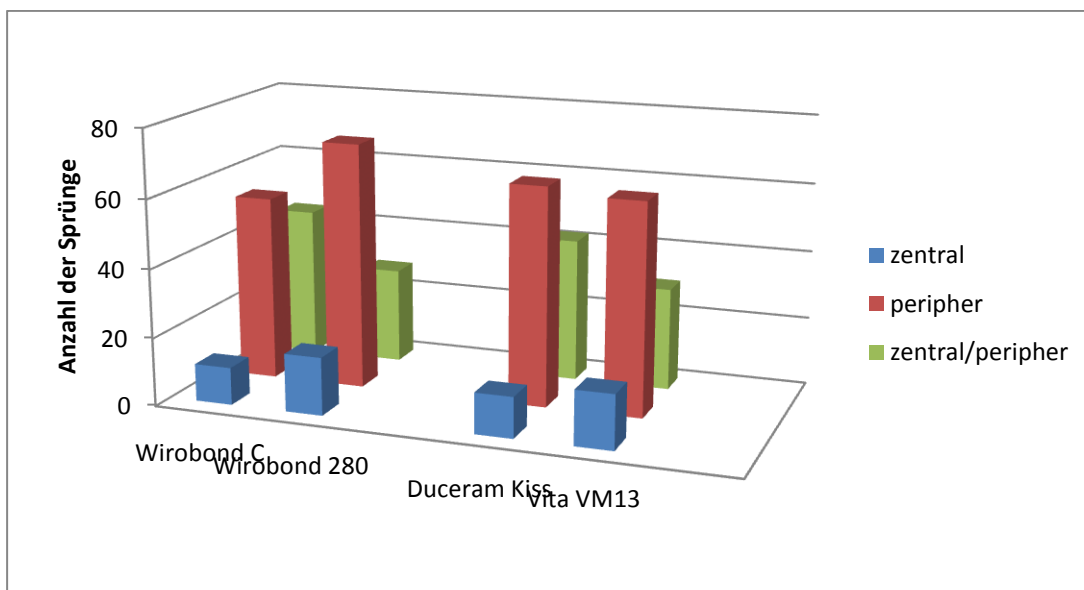


Abb. 19: Verteilung zentraler und peripherer Bruchverläufe von Kronen in Abhängigkeit des Materials.

In Abb. 19 ist erkennbar, dass bei den Einzelkronen die Verteilung der Sprungverläufe der Verteilung der Gesamtsprünge ungeachtet des Materials entspricht. Das gilt für jedes Material -

egal, ob Metall oder Keramik. Bei jedem Material überwiegen die peripheren Sprünge (Abb. 19).

Bei den Brücken ist das nicht so. Hier überwiegen bei einer ansonsten gleichmäßigen Verteilung, die zentralen Bruchverläufe (Abb. 20).

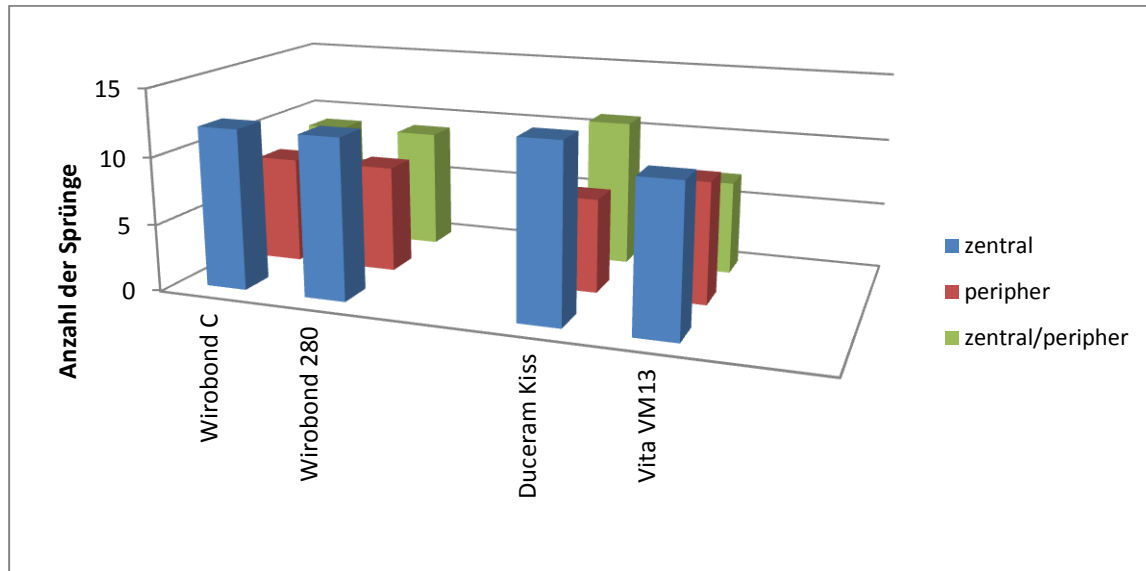


Abb. 20: Verteilung zentraler und peripherer Bruchverläufe von Brücken in Abhängigkeit des Materials.

4.5.3 Bruchverlauf bei Wirobond C mit Duceram Kiss

Bei Kronen aus Wirobond C und Duceram Kiss kann man erkennen, dass sich mit steigender Washbrand-Temperatur die Bruchverläufe ändern. Bei niedrigeren Washbrand-Temperaturen dominieren die rein peripheren Sprünge. Diese finden sich bei steigender Temperatur dann immer weniger und es lässt sich eine geringe Zunahme an zentralen und gemischt verlaufenden Sprüngen erkennen. Bei 930 °C zeigt sich ein deutliches Maximum an peripheren Sprüngen, bei 1180 °C ein deutliches Maximum an gemischt zentral/peripher verlaufenden Sprüngen (Abb. 21).

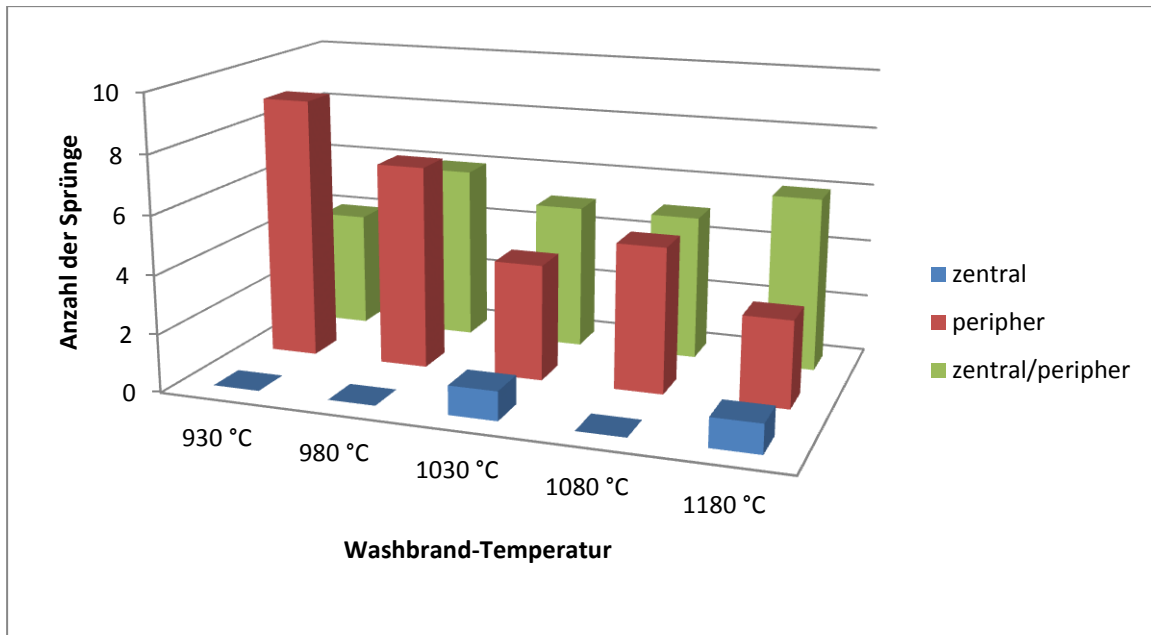


Abb. 21: Zusammenhang Washbrand-Temperatur und Bruchverlauf bei Kronen aus Wirobond C/Duceram Kiss.

Was in Abb. 21 für die Kronen deutlich zu erkennen ist, gilt nicht für die in Abb. 22 dargestellten Sprungverläufe in den Brücken. Deutliche Maximalwerte lassen sich hier nur bei 1030 °C für periphere Sprünge erkennen, bei 1080 °C für zentral-periphere Sprünge und bei 1180 °C für zentrale Sprungverläufe.

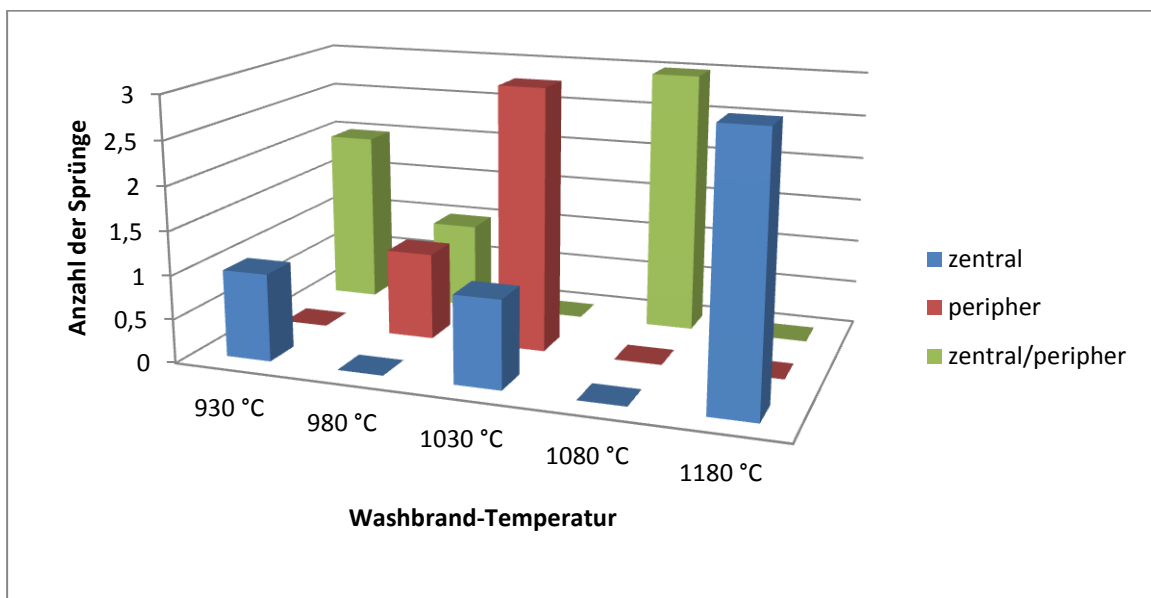


Abb. 22: Zusammenhang Washbrand-Temperatur und Bruchverlauf bei Brücken aus Wirobond C/Duceram Kiss.

4.5.4 Bruchverlauf bei Wirobond C/Vita VM 13

Bei den Kronen aus Wirobond C mit Vita VM 13 zeigt sich, dass auch hier die rein peripheren Bruchverläufe mit steigender Washbrand-Temperatur abnehmen (Abb.23).

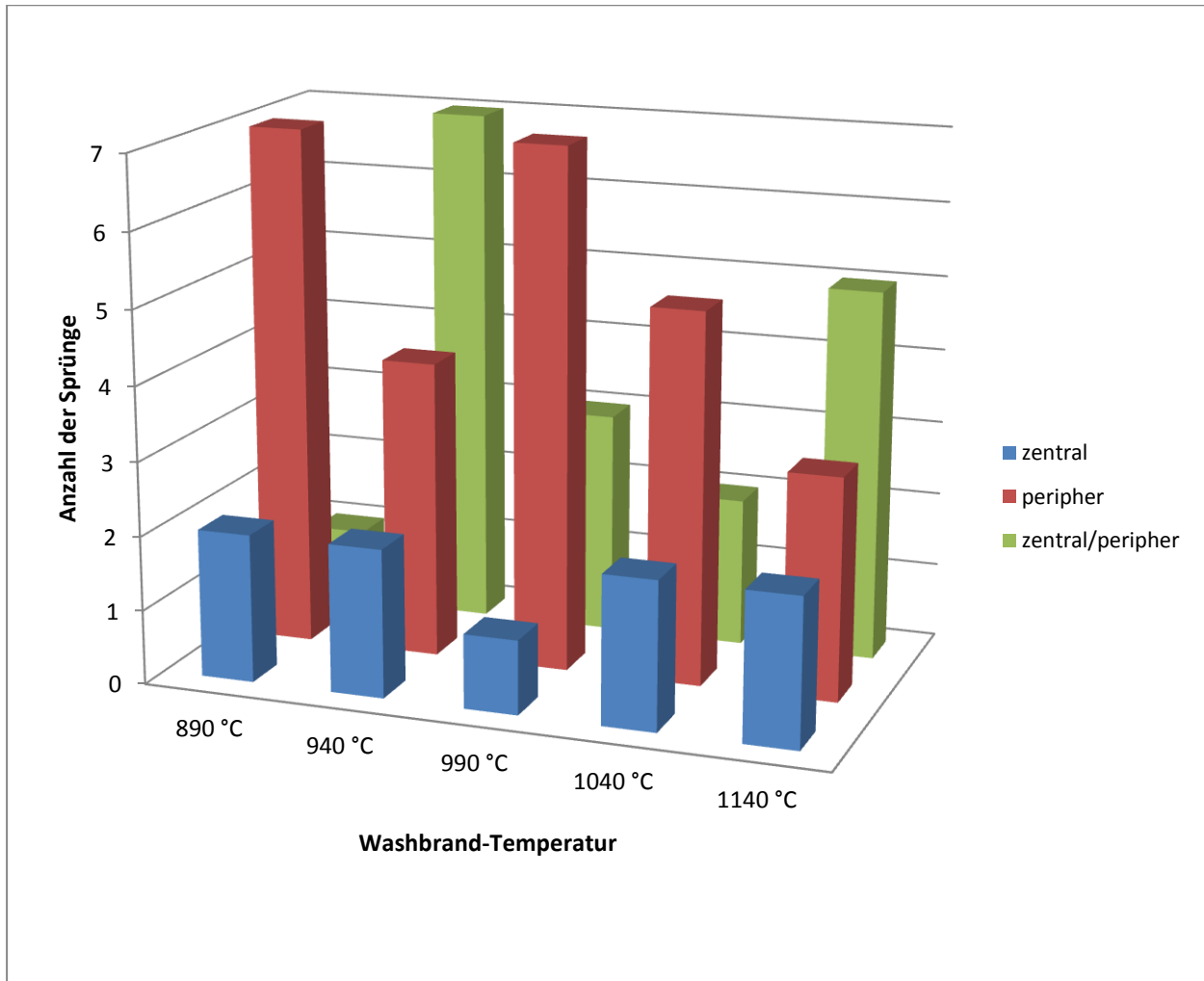


Abb. 23: Zusammenhang Washbrand-Temperatur und Bruchverlauf bei Kronen aus Wirobond C/Vita VM 13.

Bei 940 °C sind allerdings mehr zentral-peripher verlaufende Brüche zu erkennen als rein periphere. Abgesehen von dieser Ausnahme, ähnelt der Verlauf dem der Kronen aus Kapitel 4.5.3.

Bei den Brücken aus Wirobond C mit Vita VM 13 ist eine Verschiebung zu erkennen. Bei niedrigeren Washbrand-Temperaturen entstehen mehr zentrale Sprünge. Mit steigender Temperatur werden es immer weniger, bis bei 1140 °C keine rein zentralen Verläufe mehr zu

erkennen sind. Es ist dafür aber eine Zunahme an peripher und gemischt zentral-peripher verlaufenden Sprüngen deutlich (Abb. 24).

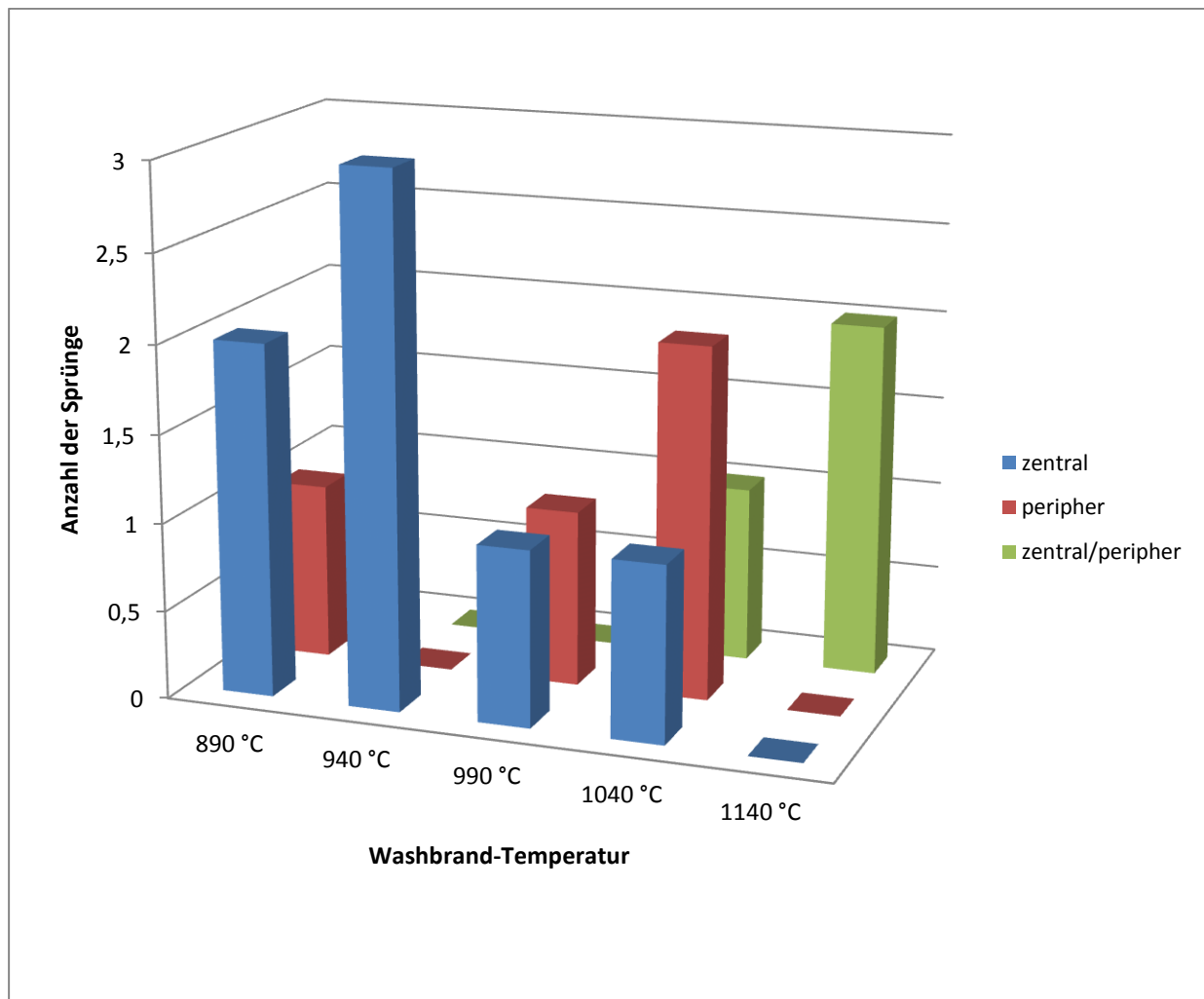


Abb. 24: Zusammenhang Washbrand-Temperatur und Bruchverlauf bei Brücken aus Wirobond C/Vita VM 13.

4.5.5 Bruchverlauf bei Wirobond 280/ Duceram Kiss

Wie für die Kronen aus den Kapiteln 4.5.3 und 4.5.4, sieht man auch bei den Kronen aus Wirobond 280 und Duceram Kiss, dass mit steigender Temperatur die rein peripheren Bruchverläufe abnehmen und es zu einer Verlagerung kommt, so dass in diesem Fall ein deutliches Maximum an zentralen Bruchverläufen bei 1180 °C vorliegt. Die zentral-peripher verlaufenden Sprünge weisen ein leichtes Maximum bei 1030 °C auf, fallen aber weiter nicht auf (Abb. 25).

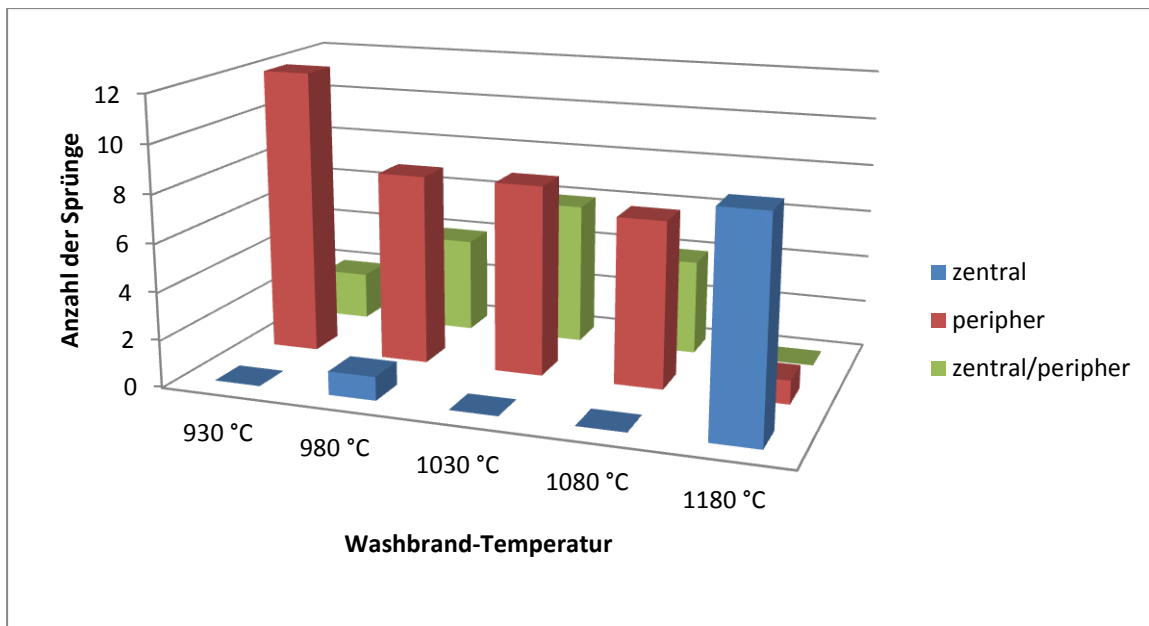


Abb. 25: Zusammenhang Washbrand-Temperatur und Bruchverlauf bei Kronen aus Wirobond 280/Duceram Kiss.

Wie bei den anderen Brücken, ist auch bei denen aus Wirobond 280 und Duceram Kiss zu sehen, dass die zentralen Sprünge überwiegen. Außer in den niedrigeren Temperaturbereichen von 930 und 980 °C, sind keine zentralen, sondern eher zentral-periphere Verläufe zu erkennen. Ein deutliches Maximum an zentral-peripheren Sprüngen liegt bei 980 °C. Bei 930 °C überwiegen die peripheren Verläufe leicht (Abb. 26).

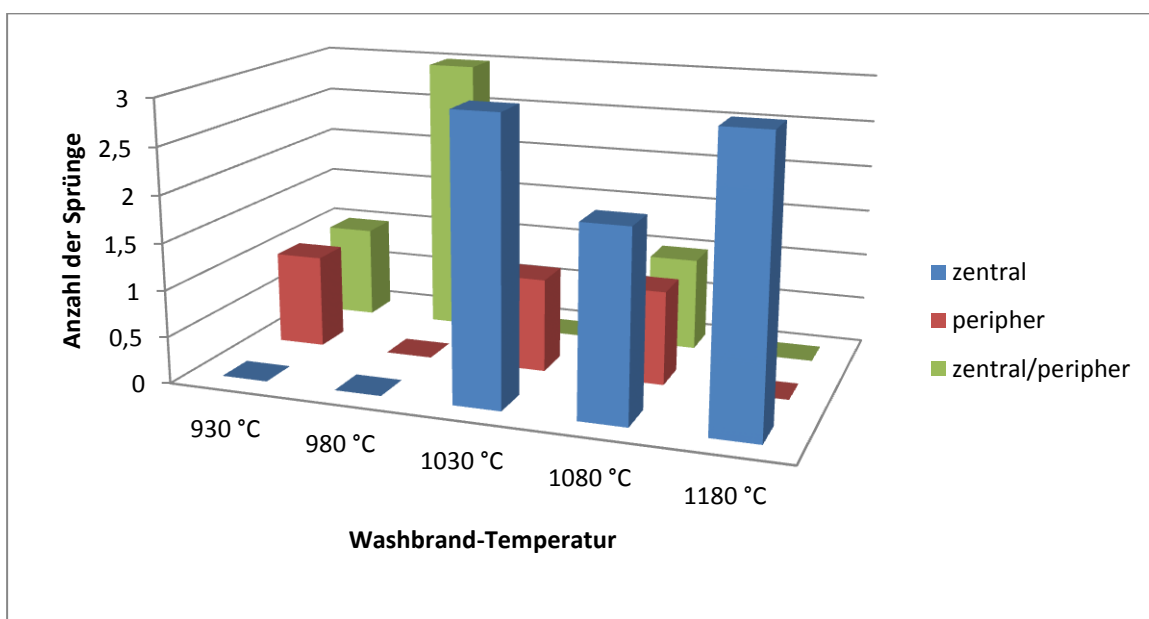


Abb. 26: Zusammenhang Washbrand-Temperatur und Bruchverlauf bei Brücken aus Wirobond 280/Duceram Kiss.

4.5.6 Bruchverlauf bei Wirobond 280/Vita VM 13

Wie in Kapitel 4.5.4, zeigen auch in diesem Fall die Kronen, die mit Vita VM 13 verblendet wurden, im kompletten Temperaturbereich von 890 - 1140 °C, vorwiegend rein periphere Bruchverläufe. Die zentral-peripheren Verläufe nehmen mit steigender Temperatur deutlich ab, die rein zentralen Verläufe bleiben mit einem Maximum bei 1040 °C ansonsten gleichmäßig (Abb. 27).

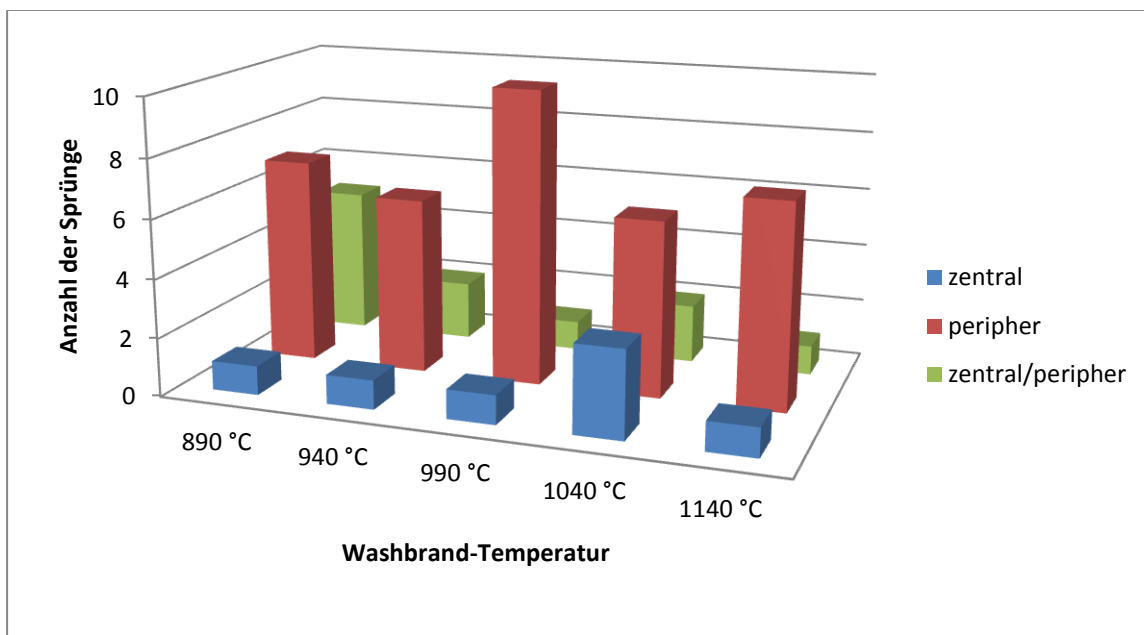


Abb. 27: Zusammenhang Washbrand-Temperatur und Bruchverlauf bei Kronen aus Wirobond 280/Vita VM 13.

Eine Regelmäßigkeit wie bei den Kronen kann man bei den Brücken aus Wirobond 280 und Vita VM 13 nicht erkennen. Die zentral-peripheren Verläufe verhalten sich mit Ausnahme bei 940 °C sehr gleichmäßig. Es zeigen sich viele rein periphere Bruchverläufe bis 990 °C und ein Maximum an zentralen Verläufen bei 890 °C.

Deutliche Tendenzen für den Verlauf der Brüche innerhalb der Keramik gibt es für die Brücken jedoch nicht (Abb. 28).

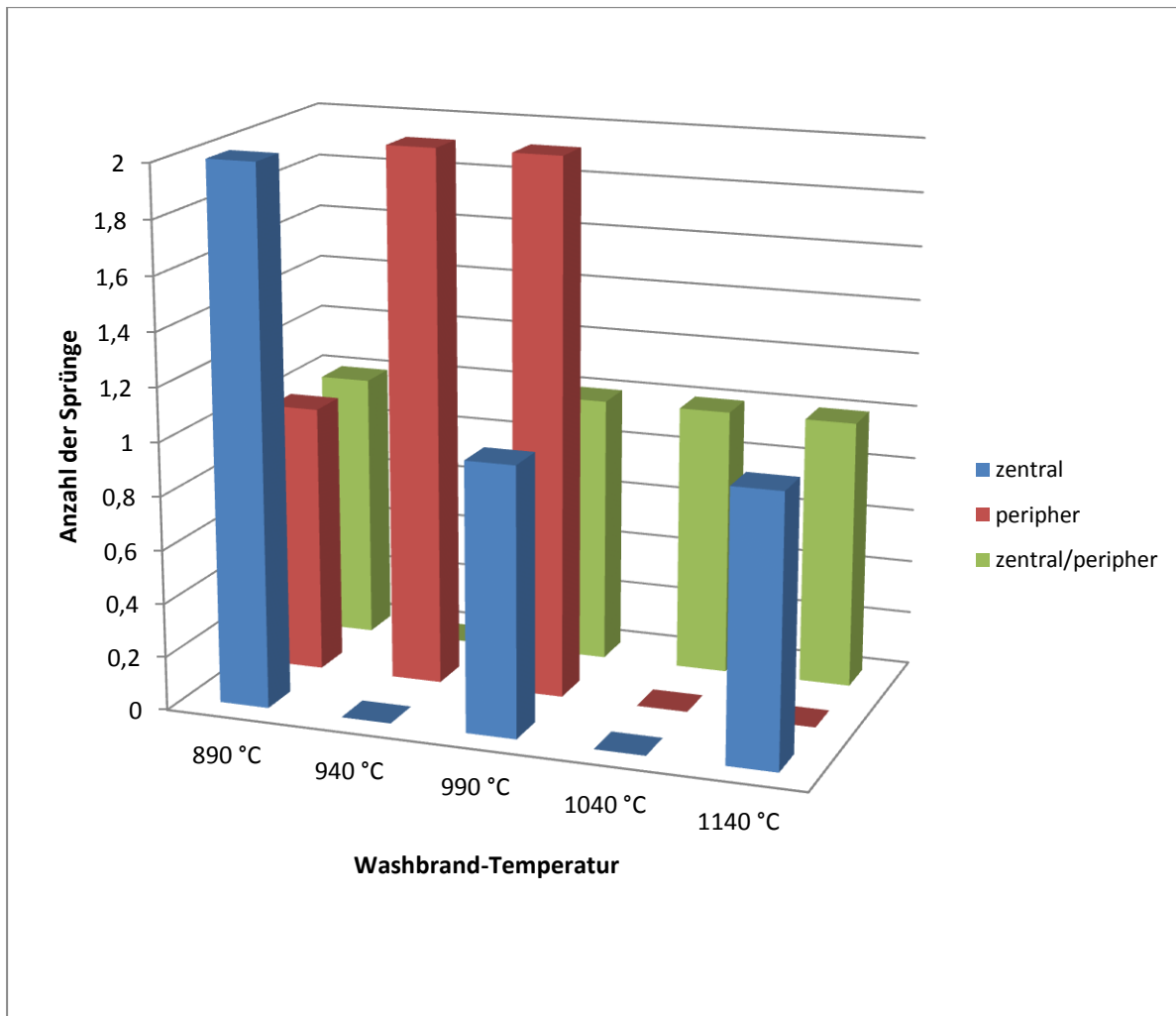


Abb. 28: Zusammenhang Washbrand-Temperatur und Bruchverlauf bei Brücken aus Wirobond 280/Vita VM 13.

4.6 Vergleich der Systeme

Zur besseren Darstellung des Abschrecktests werden die einzelnen Serien in Graphiken dargestellt (Abb. 29 - 36).

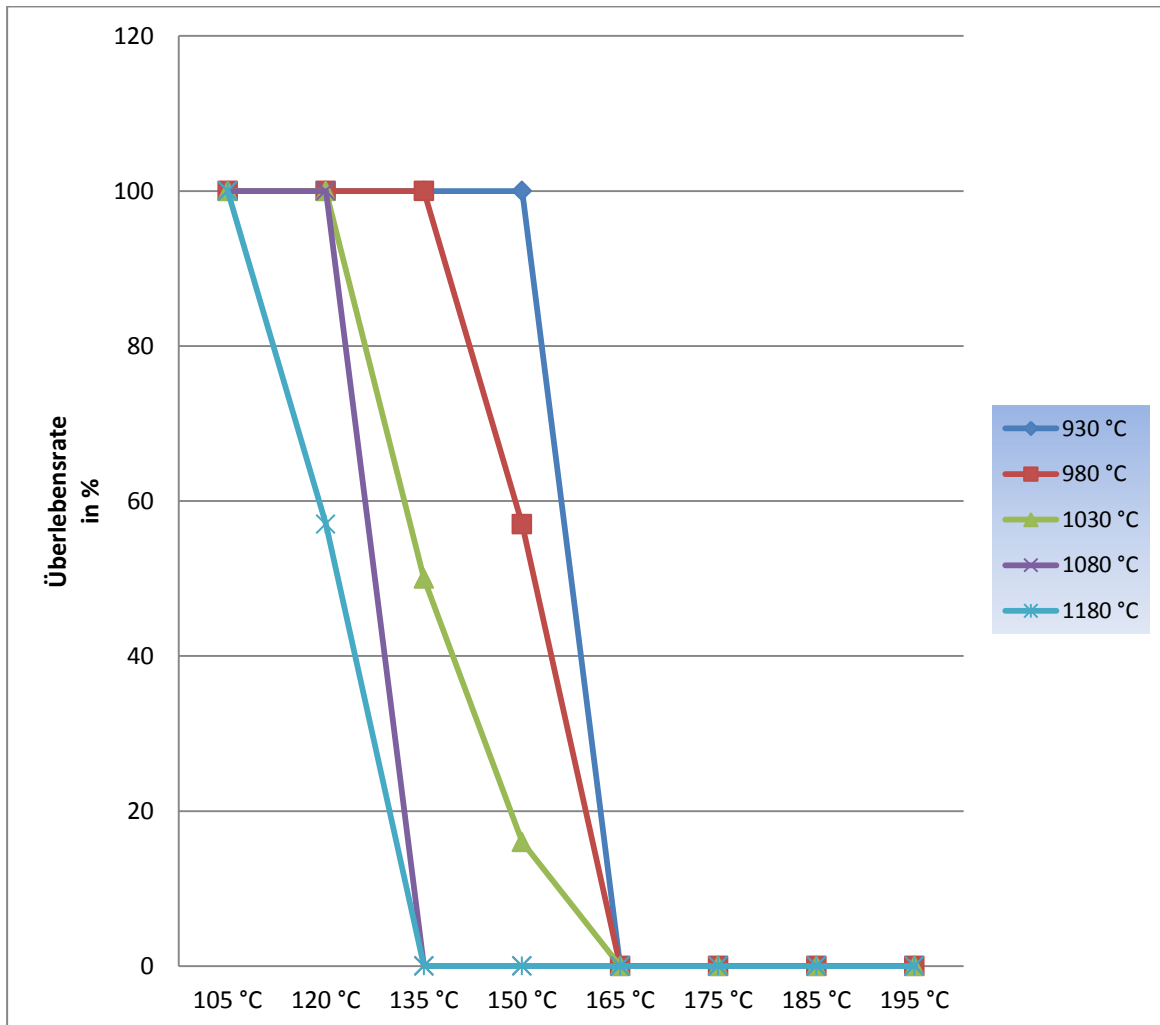


Abb. 29: Überlebensraten im Abschrecktest von Wirobond C/Duceram-Kiss-Kronen in Prozent

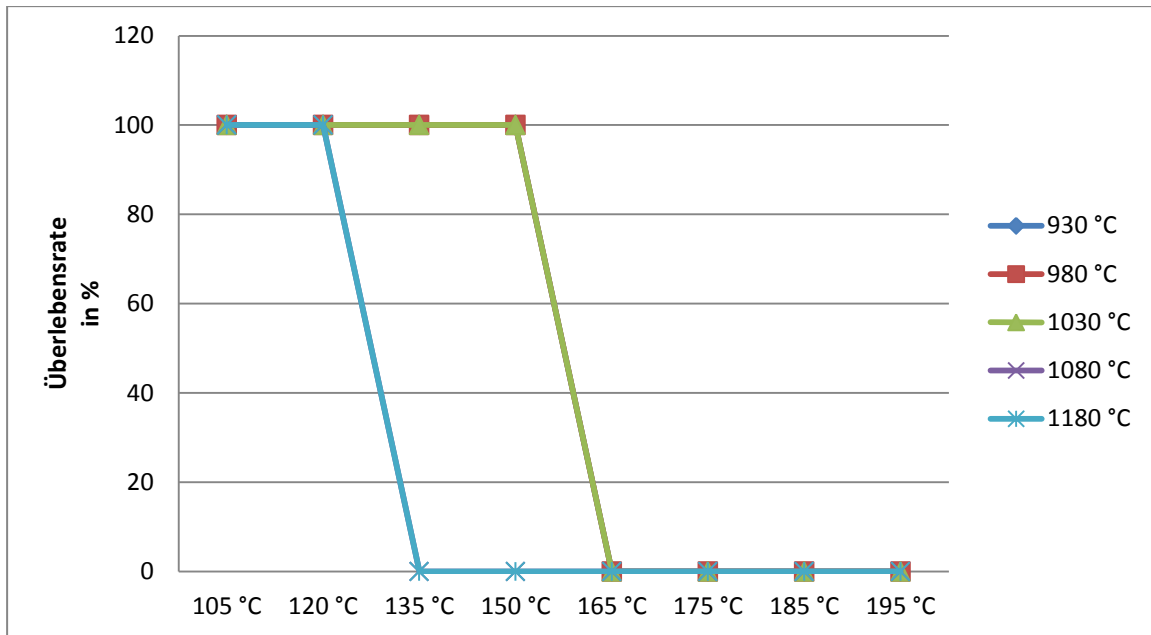


Abb. 30: Überlebensraten im Abschrecktest bei Wirobond C/Duceram-Kiss-Brücken in Prozent

Abb. 29 und 30 zeigen, dass sowohl Kronen als auch Brücken aus Wirobond C, die mit Duceram-Kiss verblendet wurden, in einem engen Temperaturfenster von 45 °C, im Abschrecktest versagen (120 °C - 165 °C). Das Temperaturfenster bei den Brücken ist mit 30 °C, gemessen von 135 °C – 165 °C, etwas schmaler. Eine Ausnahme stellen Kronen der Serie mit um 200 °C erhöhter Washbrand-Temperatur (1180 °C) dar.

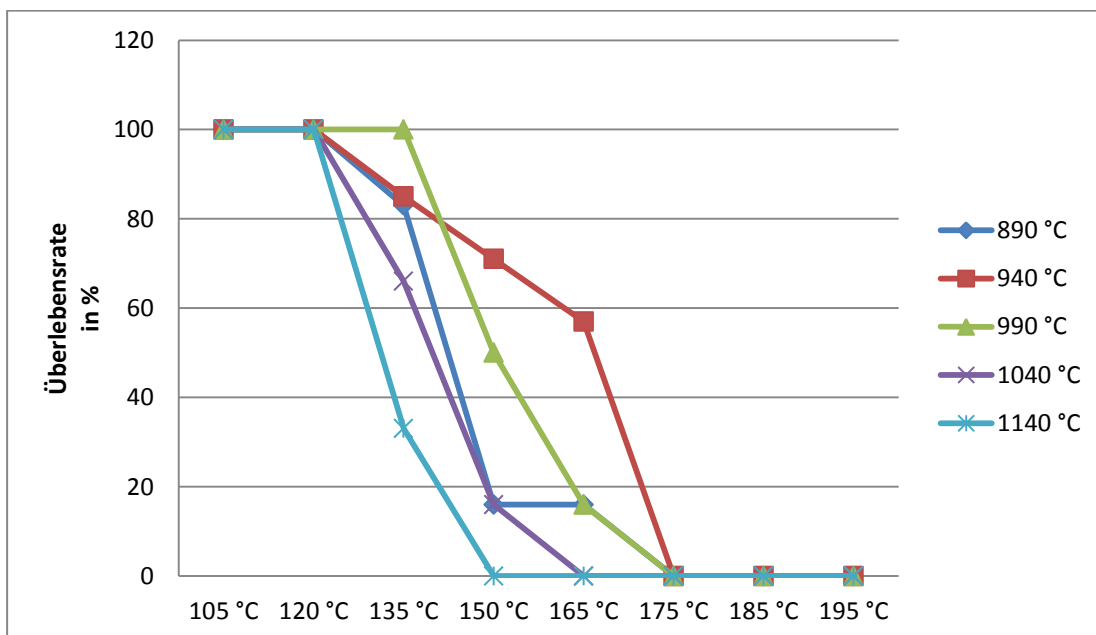


Abb. 31: Überlebensraten im Abschrecktest von Wirobond C/Vita VM13-Kronen in Prozent

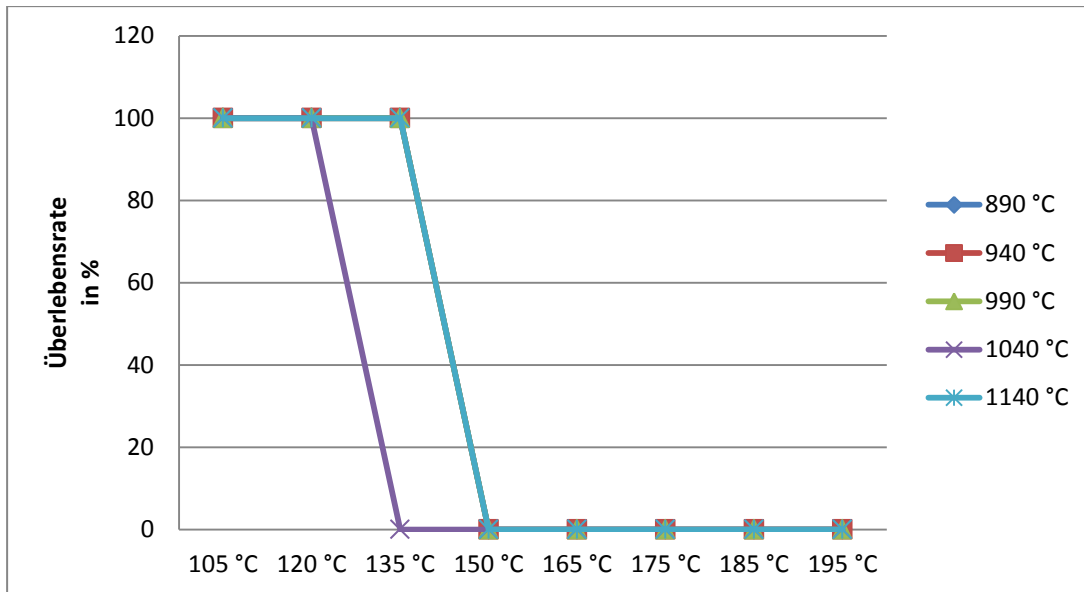


Abb. 32: Überlebensraten im Abschrecktest bei Wirobond C/Vita VM13-Brücken in Prozent

In Abb. 31 sieht man, dass Kronen aus Wirobond C, die mit Vita VM 13 verblendet wurden, insgesamt länger der Temperaturbelastung im Abschrecktest standhalten. Das Temperaturfenster reicht von 135 °C - 175 °C (40 °C). In dieser Breite definiert sich das Temperaturfenster bei den entsprechenden Brücken nicht (Abb. 32; 135 °C - 150 °C; entspricht 15 °C).

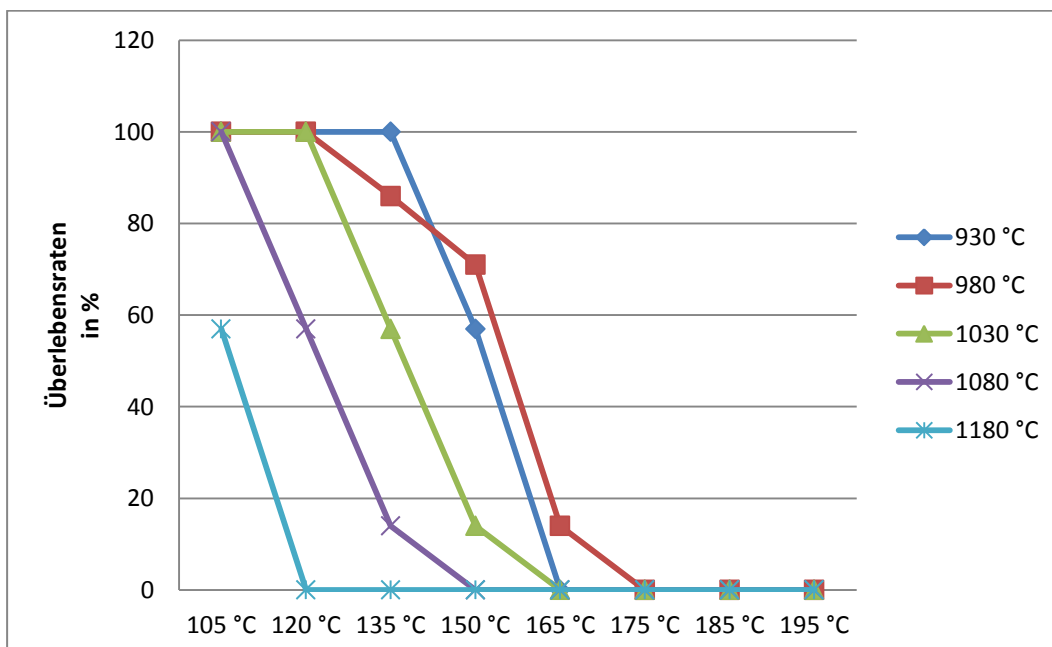


Abb. 33: Überlebensraten im Abschrecktest von Wirobond280/Duceram-Kiss-Kronen in Prozent.

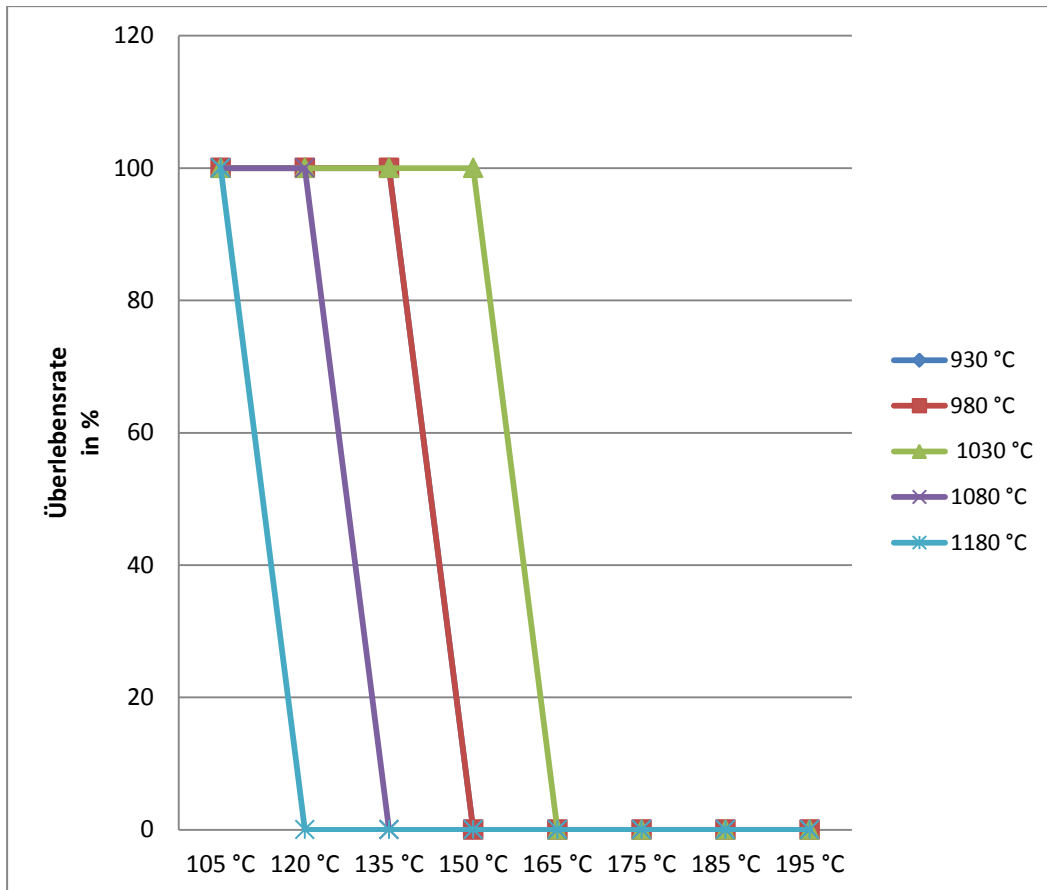


Abb. 34: Überlebensraten im Abschrecktest von Wirobond280/Duceram-Kiss-Brücken in Prozent.

Das Temperaturfenster, in dem Kronen bzw. Brücken aus Wirobond 280, die mit Duceram Kiss verblendet wurden, springen, reicht von 105 °C - 175 °C (70 °C) bzw. 120 °C - 175 °C (55 °C). Zu sehen ist, dass Kronen und Brücken, die mit einer Washbrand-Temperatur von 1180 °C gebrannt wurden, frühzeitig bei 105 °C und 120 °C springen (Abb. 33 und 34).

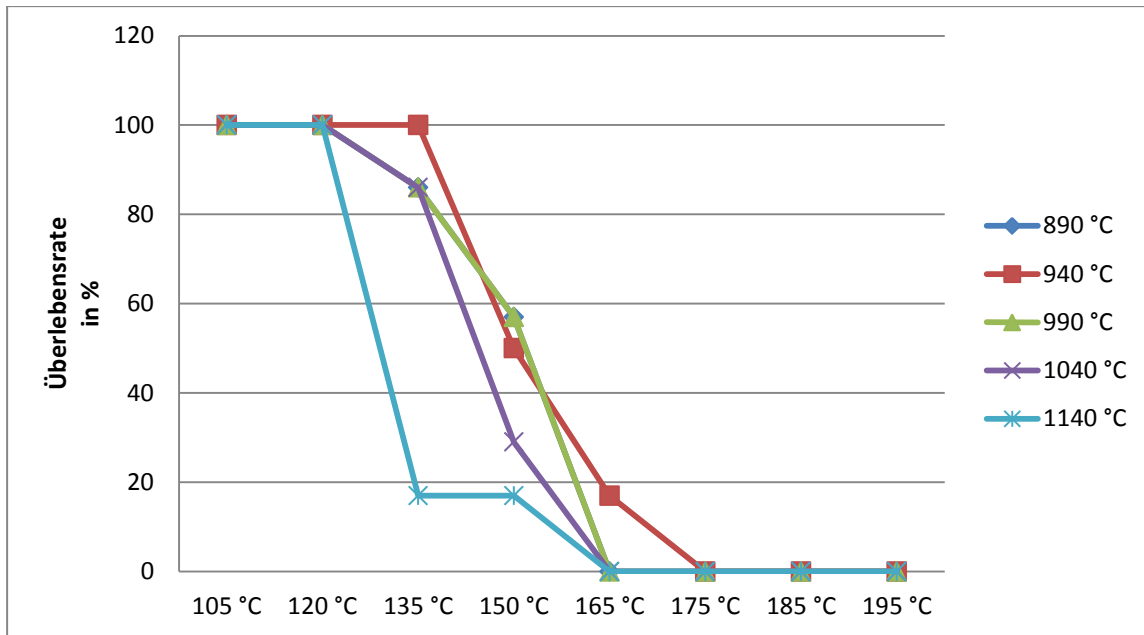


Abb. 35: Überlebensraten im Abschrecktest von Wirobond280/Vita VM13-Kronen in Prozent

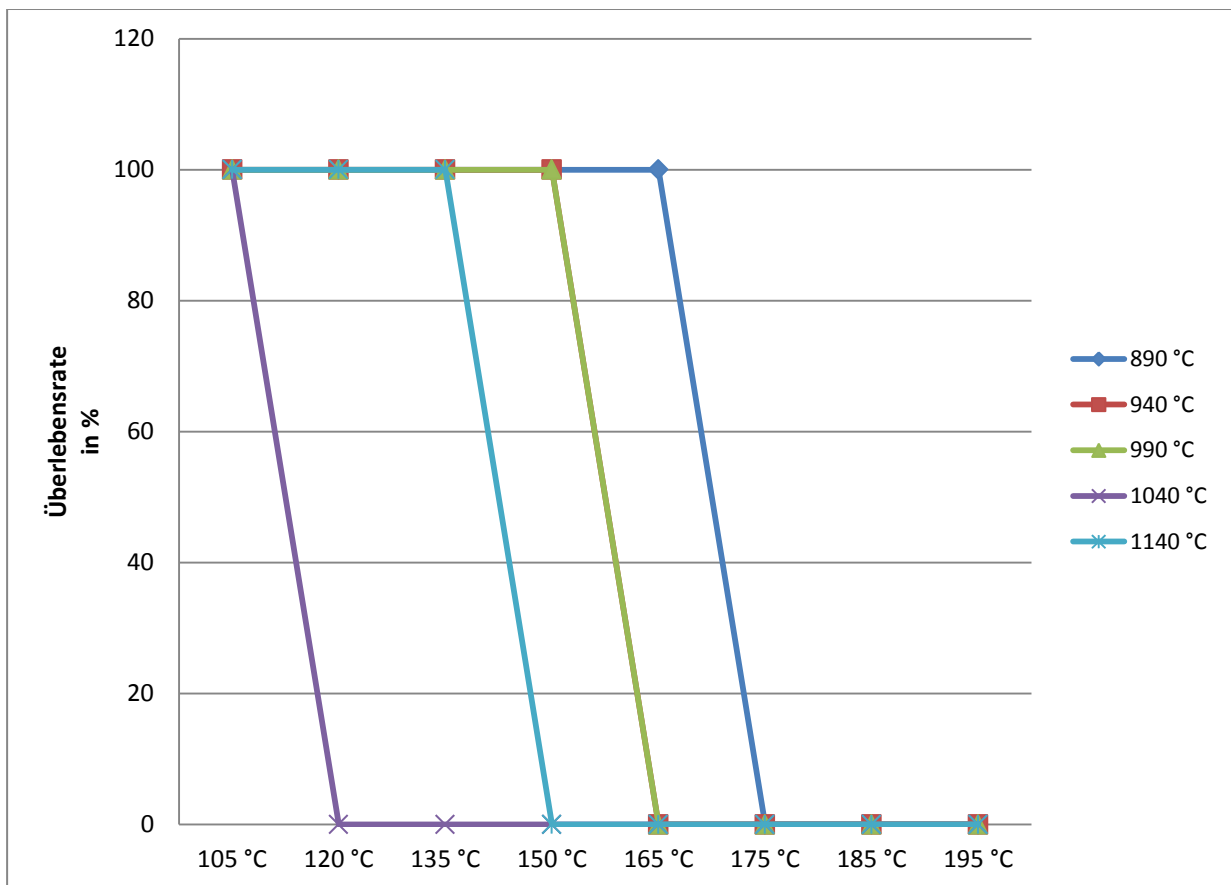


Abb. 36: Überlebensraten im Abschrecktest von Wirobond280/Vita VM13-Brücken in Prozent

Abb. 35 zeigt, dass bei den Kronen aus Wirobond 280, die mit Vita VM 13 verblendet wurden das Temperaturfenster, in dem die Kronen im Abschrecktest versagen. Es reicht von 135 °C – 175 °C und ist damit relativ schmal (40 °C). Anders ist es bei den Brücken. Das Temperaturfenster erstreckt sich hier von 120 °C – 175 °C. Es umfasst also 55 °C (Abb. 36).

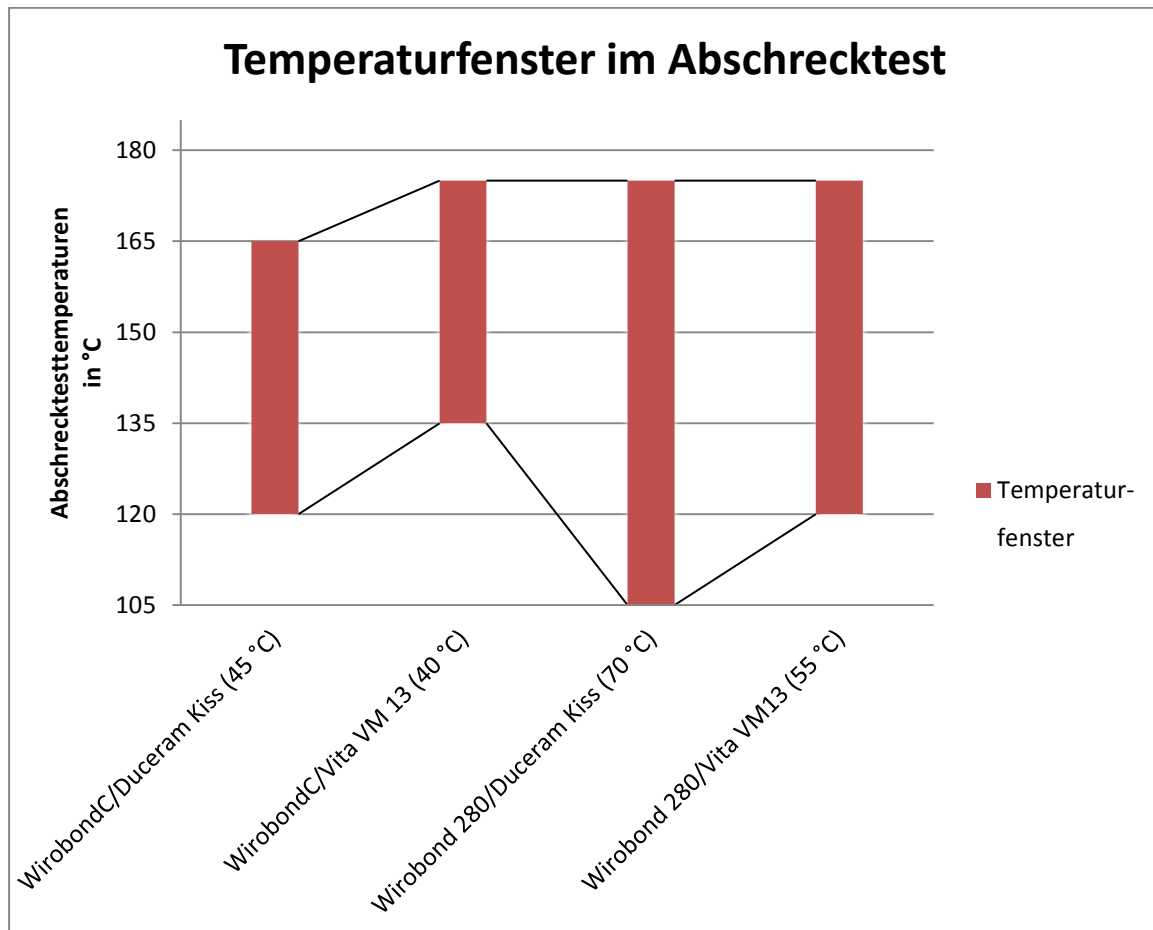


Abb. 37: Darstellung der Temperaturbereiche, in denen im Abschrecktest Kronen und Brücken der einzelnen Legierung/Keramik-Konstellation gesprungen sind.

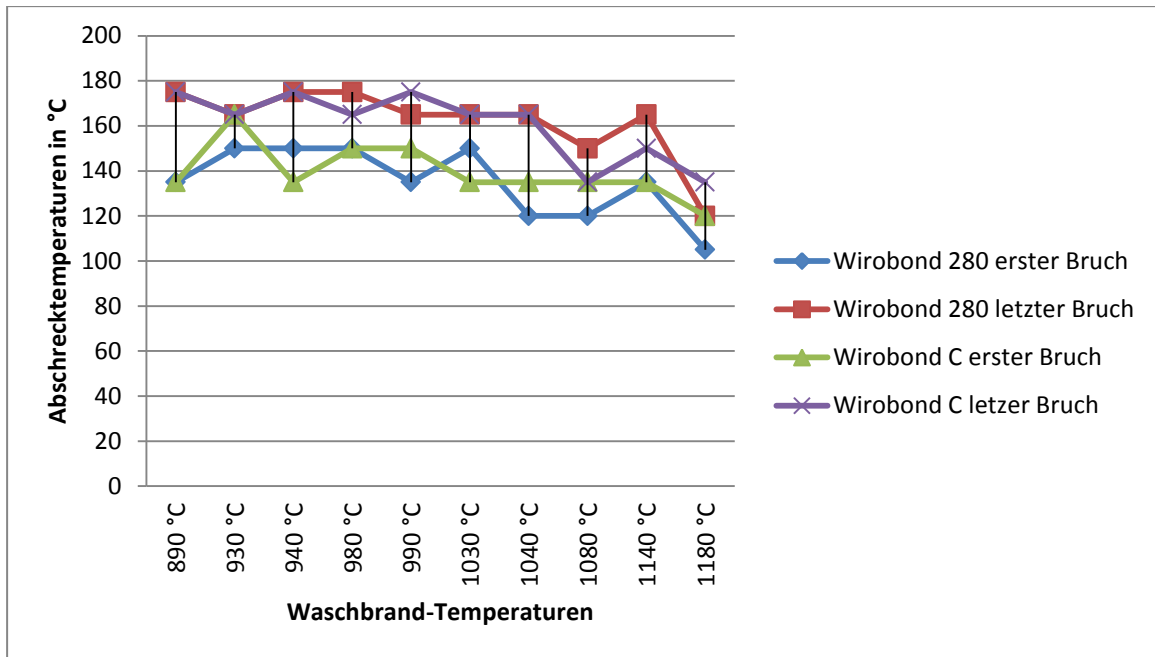


Abb. 38: Temperaturspanne zwischen erster und zu letzt gebrochener Krone/Brücke einer Serie für die entsprechenden Legierungen.

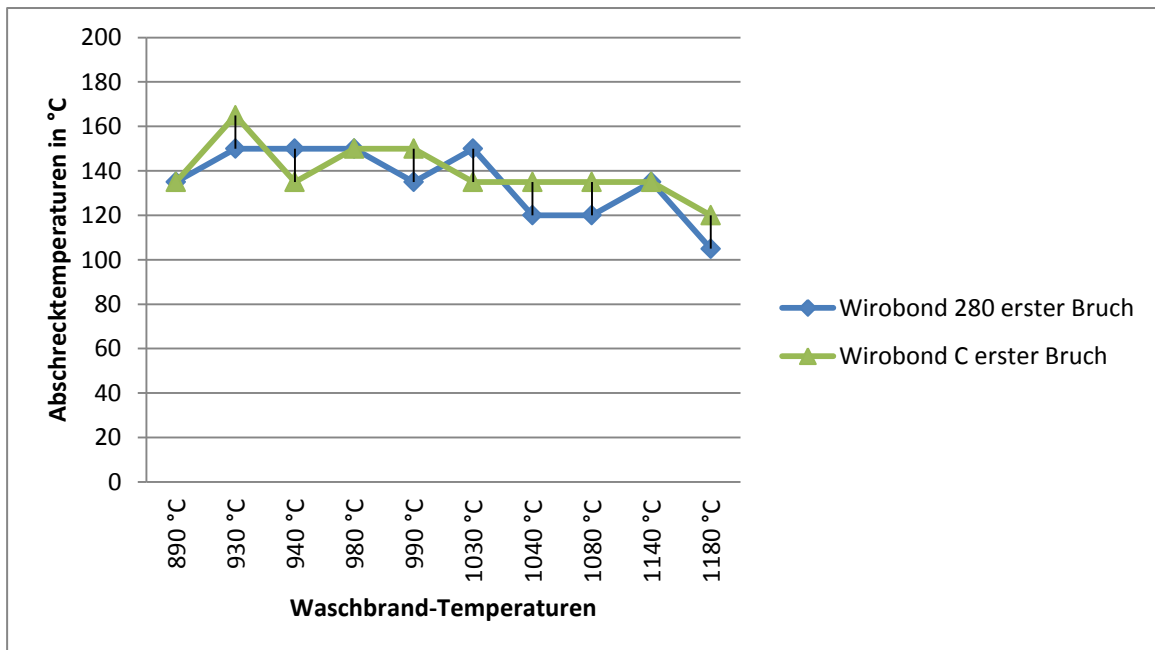


Abb. 39: Temperaturen, bei denen im Abschrecktest die erste Krone/Brücke einer Serie gesprungen ist.

Man erkennt, dass im Mittel nicht gesagt werden kann, dass keine Kronen der einen Legierung früher Sprünge aufweisen, als die anderen. Im Verlauf sieht man, dass im höheren Messbereich eine immer niedrigere Temperatur ausreicht, um die Prüfkörper versagen zu lassen (Abb. 38-40).

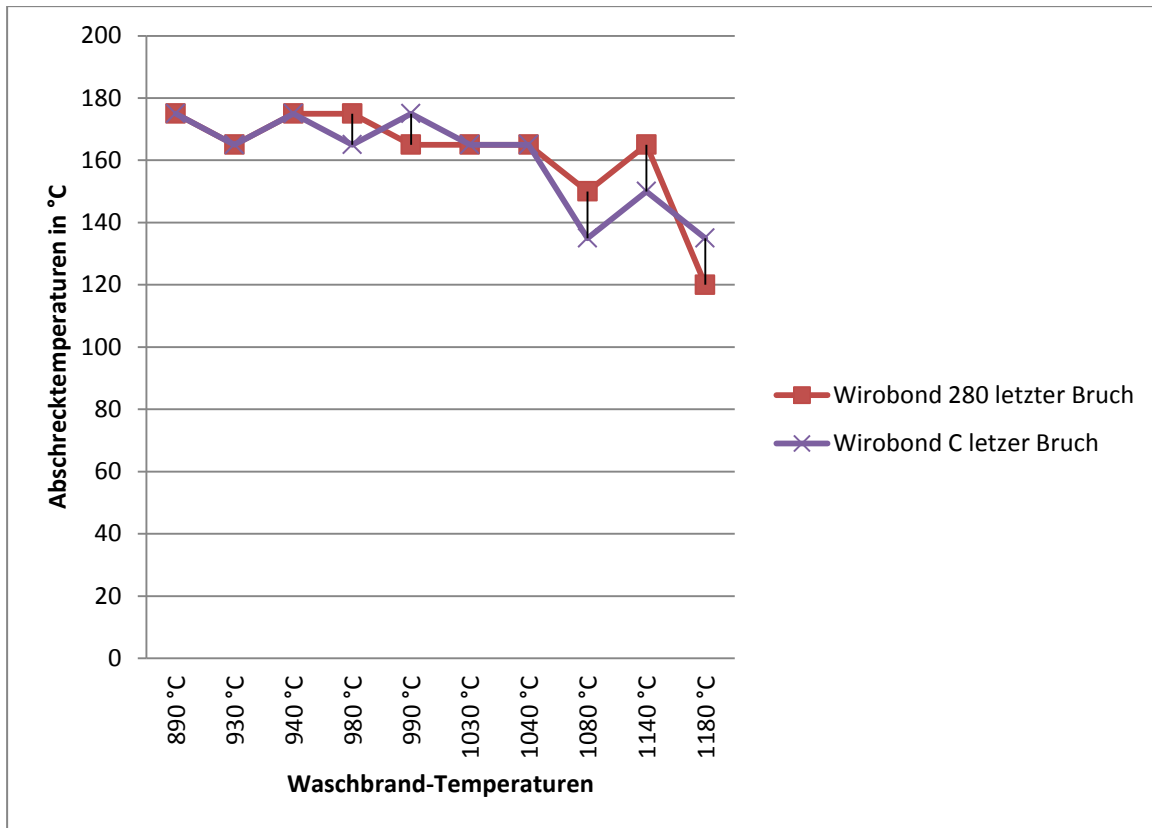


Abb. 40: Temperaturen, bei denen im Abschrecktest die letzten Kronen/Brücken einer Serie gesprungen sind.

Die Werte liegen sehr dicht beieinander. Im höheren Temperaturbereich, ab 1080 °C, divergieren die Werte stärker und die Temperatur, bei denen die Prüfkörper springen, fällt ebenfalls in diesem Messbereich. Prüfkörper, die mit einer Washbrand-Temperatur von bis zu 1040 °C hergestellt wurden, versagen im Abschrecktest erst bei einer Temperatur von 165 - 175 °C. Ab einer Washbrand-Temperatur von 1080 °C sinkt die dafür notwendige Temperatur auf 135 °C (Wirobond C) bzw. 150 °C (Wirobond 280) und bis auf 120 °C für Wirobond 280 bei 1180 °C.

Zusammenfassend ist in der folgenden Tabelle (Tab. 22) dargestellt, welche Washbrand-Temperatur zur höchsten Festigkeit im Verbund zwischen Metall und Keramik geführt hat. Es zeigt sich nicht eindeutig, dass allein die vom Hersteller vorgegebene Washbrand-Temperatur die besten Ergebnisse bringt, noch dass immer etwas höhere oder niedrigere Temperaturen beim Washbrand einen scheinbar stabileren Verbund zwischen Metall und Keramik bedingen.

	Washbrand-Temperatur, die zur höchsten Festigkeit führen	Grad Celsius abweichend der Vorgabe des Herstellers
Wirobond C/Duceram Kiss - Kronen	930 °C	-50 °C
Wirobond C/Duceram Kiss - Brücke	930 °C - 1030°C	0 °C
Wirobond C/Vita VM 13 - Kronen	990°C	+50 °C
Wirobond C/Vita VM 13 - Brücke	890 °C - 990°C	0 °C
Wirobond 280/Duceram Kiss - Kronen	930 °C	-50 °C
Wirobond 280/Duceram Kiss - Brücke	1030 °C	+50 °C
Wirobond 280/Vita VM 13 - Kronen	940 °C	0 °C
Wirobond 280/Vita VM 13 - Brücke	890 °C	-50 °C

Tab. 22: Die Washbrand-Temperatur, die zur höchsten Festigkeit der untersuchten Kronen und Brücken führte.

5 Diskussion

Bei der vorliegenden Untersuchung des Verbundes zwischen Metall und Keramik können sowohl in der Herstellung der Prüfkörper als auch im Versuchsablauf Fehler auftreten. Die keramische Verblendung eines Metallgerüstes setzt sich aus vielen Einzelschritten zusammen, die alle genauestens aufeinander abgestimmt sein müssen. Anderenfalls kann es bei späteren Messungen, in welcher Form auch immer, zu Ungenauigkeiten kommen.

Dieses Fehlerpotential soll im Folgenden von Beginn der Prüfkörperherstellung über die Versuchsdurchführung bis hin zu den Messwerten an sich und deren Interpretation diskutiert werden.

5.1 Fehlerdiskussion

5.1.1 Herstellung der Gerüste

Von den 120 Kronen- und 20 Brückengerüsten wurde jeweils die eine Hälfte in Wirobond C und die andere Hälfte in Wirobond 280 gegossen. Die Wachsmodellation ist jedoch bei allen Gerüsten gleich. Sie findet auf reproduzierbaren Gipsstümpfen statt, so dass immer die gleiche Stumpfform vorgegeben ist. Damit besitzen alle Kronen fast identische Geometrien. Doublierte Gipsmodelle wurden regelmäßig gewechselt, da sie durch die Bearbeitung nach einiger Zeit nicht mehr exakt der Ursprungsform entsprachen. Die Modellation muss, damit im Anschluss eine Vergleichbarkeit möglich sein kann, absolut denselben Vorgaben entsprechen, so dass die Wachsmodellation eine Dicke von ca. 0,4 mm hat. Die geforderte Schichtstärke von 0,3 mm im Metall kann so nach dem Gießen gewährleistet werden. Schon bei der Modellation muss die Schichtdicke ausreichend und gleichmäßig sein, damit im Metall möglichst wenig nachgearbeitet werden muss. Die Schichtdicken müssen auch nach dem Anstiften der Wachsmodellation noch einmal kontrolliert werden.

Beim Einbetten der Wachsmodellation wird auf ein sauberes und gleichmäßiges Einfüllen der Einbettmasse geachtet, da es ansonsten zu Luftblasen und somit nach dem Guss zu positiven Gussperlen kommen kann, die eine ausdauernde Nachbearbeitung des Metallgerüstes erfordern würden. Gewährleistet wird das durch einen Rüttler, der die feine Einbettmasse gleichmäßig verteilt, was wiederum der visuellen Kontrolle unterliegt. Die Kroneninnenseiten werden mittels eines Pinsels mit Einbettmasse bestrichen, damit auch diese Flächen ohne Luftblasen bedeckt sind. Es ist nach dem vollständigen Befüllen der Muffel darauf zu achten, dass diese für 10 Min. im Drucktopf stehen, damit dort die Masse unter geforderten Bedingungen expandieren kann. Die Einbettmasse muss vor dem Hintergrund des zu vergießenden Metalls und des Kontraktionsverhaltens seiner Schmelze in Bezug auf ihre

Expansion ausgewählt werden. Wenn die Ausdehnung der Einbettmasse und die Kontraktion der Metallschmelze nicht aufeinander abgestimmt sind, kann keine vorhersagbare Schichtdicke im Metall garantiert werden.

Die Muffeln wurden über Nacht in einen 900 °C heißen Ofen gestellt und am Morgen des Folgetages wurde gegossen. Der Guss erfolgte als vollautomatischer Vakuum-Druckguss im Guss-Ofen „Nautilus CC Plus“ der Firma BEGO. Ein Überhitzen der Schmelze ist hierbei nicht möglich. Die Gießtemperatur der beiden Metalle wird mit 1500 °C angegeben. Die tatsächliche Gießtemperatur laut Gieß-Protokoll lag bei 1500 °C - 1507 °C. Der Bildung einer übermäßigen Oxidschicht in der Schmelze, konnte so vorgebeugt werden. Anderenfalls würde die erhöhte Oxidschicht eventuell zu Poren, Rissen oder Lunkern im Metallgerüst führen, wodurch die physikalischen Eigenschaften des Metalls negativ beeinflusst und fehlerhafte Messergebnisse resultieren würden.

Um eine absolute Vergleichbarkeit zu gewährleisten, müsste man alle Prüfkörper in einem Gussverfahren gießen. Da das labor- und gusstechnisch jedoch nicht realisierbar ist, hat man darauf geachtet, dass zumindest die 6 Kronen und eine Brücke einer Serie zusammen gegossen wurden. So konnte ein Fehler im Guss innerhalb einer Serie ausgeschlossen werden und eine Vergleichbarkeit ist möglich.

Beziehungsweise, wäre ein Fehler im Guss bei allen Prüfkörpern einer Serie aufgetreten und so deutlicher zu erkennen gewesen.

Nach mindestens einer halben Stunde Abkühl- und Entspannungsphase konnte der Rohguss ausgebettet werden. Einen Fehlguss hat es keinen gegeben. Nach Abtrennen der Gusskanäle wurden die Gerüste mit einer Hartmetallfräse ausgearbeitet. Dabei wurde sichergestellt, dass immer mit scharfen Fräsen gearbeitet wird. Anderenfalls könnten Metallreste in Unebenheiten des Metallgefüges eingepresst werden und würden keine saubere Oberfläche ergeben. Es soll bei dieser Ausarbeitung schon die geforderte Schichtdicke von 0,3 mm erreicht werden. Insbesondere an der Stelle des ehemaligen Gusskanals muss darauf geachtet werden. Ferner wurden für die beiden Legierungen getrennte Fräsen verwendet, damit Metallreste der einen Legierung, keine Verunreinigungen beim Ausarbeiten der anderen Legierung, verursachen.

Nach dem Ausarbeiten der Außenfläche werden die Gerüste auf den Gipsstumpf aufgepasst. Dazu werden kleinere Gussperlen im Inneren ebenfalls mit einer Hartmetallfräse entfernt, um sicherzustellen, dass das Gerüst auf dem Stumpf bis zur Präparationsgrenze herunter zu bekommen ist. Eine gute Passung ist auch im Experiment wichtig, da sich bei der keramischen Verblendung an den Nachbarzähnen orientiert wird. Würde das Gerüst nun nicht vollständig auf der Präparationsgrenze zu liegen kommen, wäre auch die Keramikschrift inzisal bzw. okklusal unterhalb der geforderten Schichtstärke und ein Vergleich mit den anderen Kronen wäre nicht möglich.

Das Abstrahlen der ausgearbeiteten Gerüste erfolgt mit Aluminiumoxid in einer Körnung von 250 µm und bei einem Druck von 3 bar. Es ist wichtig, dass die Oberfläche gleichmäßig im richtigen Winkel abgestrahlt wird. Das Abstrahlen muss stetig und gleichmäßig sein, da bei dem geforderten Druck ein zu langes Abstrahlen an einer Stelle durchaus dazu führen könnte, dass

das Metallgerüst an der entsprechenden Stelle tiefe Riefen zeigt, die Mindeststärke unterschreitet oder im Extremfall sogar zerstört werden könnte [158].

Hiernach muss darauf geachtet werden, dass die Metallflächen nicht beschmutzt und somit auch nicht mehr mit den Fingern angefasst werden. Dazu werden die Gerüste nunmehr nur noch mit einer Klemme gefasst und abschließend mit Wasserdampf abgestrahlt.

5.1.2 Verblendung der Gerüste

Die Verblendung des Metallgerüsts beginnt mit dem Auftragen eines Opakerschlickers, dem Washopaker. Der Verbund zwischen Metall und Keramik entsteht genau in dieser Verbundzone und stellt bei dieser Untersuchung auch den Fokus dar.

Der Washopaker wurde bei jeweils einer Serie der 4 Metall-Keramik-Kombinationen, entsprechend der Herstellerangaben, bei geforderter Temperatur durchgeführt. Bei den anderen Serien hat man die Temperatur des Washbrandes willkürlich um 50 °C gesenkt und um 50 °C, 100 °C und 200 °C erhöht. Das Temperaturfenster von 50 °C - 100 °C hätte man nach dieser Versuchsdurchführung noch einmal für den Bereich enger wählen können, der im Abschrecktest auf eine höhere Festigkeit des Metall-Keramik-Verbundes hindeutet.

Im Gegensatz zum eigentlichen Opaker hat der Wash-Opaker nicht die Aufgabe, das Metall optisch abzudecken, sondern eine Verbundschicht zum Metall herzustellen. Daher ist es wichtig, dass die Metalloberfläche gleichmäßig mit dem Opakerschlicker bedeckt ist. Durch das beschriebene Riffeln wird das Gerüst in Vibration versetzt und man kann so gewährleisten, dass es zu einer vollständigen Benetzung des Metalls kommt. Wenn dem nicht so ist und Luft zwischen Metall und Keramik eingeschlossen bleibt, kann es beim Brennen der Keramik zu sogenannten „Froschaugen“, also Luftblasen kommen, die die Keramik aufreißen und zerstören.

Auch beim weiteren Auftragen des Opakers und der Dentinmassen, müssen Lufteinschlüsse ausgeschlossen werden. Es wurden in diesem Fall aus Gründen der Vereinfachung nur Dentinmassen verarbeitet. Eine Schmelzmasse kam nicht zum Einsatz. Das hat für die Ergebnisse der Untersuchung aber keine Relevanz. Nach der Wash-Opaker- und Opakerschicht folgten zwei Dentinbrände und ein Glanzbrand. Der Glanzbrand diente allerdings nur dazu, um in der Herstellungsphase der klinischen Situation zu entsprechen und eine klinische Übertragbarkeit gewährleisten zu können.

Opaker- und Dentinmassen sollen wieder nach Herstellerangaben gebrannt werden. Dabei ist immer auf eine ausreichend lange Abkühlphase der Kronen zu achten, damit es durch zu schnelles Abkühlen oder sogar Abschrecken nicht zu Spannungen zwischen Metall und Keramik kommt.

Beim Schichten der Keramik muss aber wesentlich berücksichtigt werden, dass das ein sehr sensibles Verfahren ist und nur von ausgebildeten Technikern durchgeführt werden sollte und es selbst dann vom Talent und der Fähigkeit des Technikers abhängt, wie ein Metallgerüst

verblendet wird. In der vorliegenden Arbeit wurden die Kronen und Brücken nicht von einem Techniker, sondern von einem Zahnarzt verblendet. Diese Tatsache führt dazu, dass die Qualität der Verblendung evtl. kritisch zu bewerten ist und die Untersuchung andere Ergebnisse haben könnte, wenn die Verblendung durch einen erfahrenen Techniker durchgeführt worden wäre. Das gibt Anlass für eine vergleichbare Untersuchung mit gleichen technischen Vorgaben mit einem erfahreneren Techniker.

5.1.3 Versuchsaufbau- und durchführung

Wie bei der Herstellung der Prüfkörper müssen auch die Versuchsanordnung und die Versuchsdurchführung einheitlich gestaltet, somit reproduzierbar sein. Aber nicht nur innerhalb dieser Versuchsreihe müssen die Einstellungen für den Abschrecktest für alle Serien gleich sein. Damit die Messwerte mit denen der vorliegenden Literatur zu vergleichen sind, muss der Versuchsaufbau entsprechend sein.

5.1.3.1 Temperatur im Versuchsofen

Die Kronen sollen im ersten Durchlauf für eine halbe Stunde bei 105 °C im Ofen verweilen. Diese Temperatur muss von Beginn an gegeben sein und gehalten werden. Der Versuchsofen war kalibriert und man hat sich auf die Anzeige verlassen. Nachdem der Ofen angestellt wurde, hat man eine halbe Stunde gewartet, damit sich die geforderte Temperatur eingestellt und stabilisiert hat. Dann wurden die Kronen und Brücken einer Serie hineingestellt, ohne dass der Ofen dabei unnötig lange offen blieb. Die Kronen wurden für eine halbe Stunde im Ofen belassen. Die Temperatur war laut Anzeige stabil und schwankte nur um +/- 1 °C, was aber vernachlässigbar ist.

Nach dem Abschreckversuch wurde der Ofen dann um weitere 15 °C auf die nächste Stufe erhitzt. Wenn diese Temperatur erreicht wurde und sich stabilisiert hat, wurde schon eine Parallelserie eingestellt, um Zeit zu sparen. Derweil trocknete die vorherige Serie und konnte entsprechend auf Sprünge untersucht werden.

5.1.3.2 Temperatur im Wasserbad

Ebenso wie im Versuchsofen, muss auch die Temperatur im Wasserbad konstant gehalten werden, damit eine Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit garantiert werden kann. Sie soll bei 5 °C liegen. Das Wasserbad mit den Eiswürfeln befindet sich im Kühlschrank und wird

während des gesamten Versuches mit einem Thermometer kontrolliert. Durch sehr genaue Kontrolle konnte die Temperatur auf $5\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ gehalten werden. Im Wasserglas befand sich ein eingehängter Plastikbehälter, der garantierte, dass die Kronen und Brücken beim Eintauchen in das Wasser nicht an die Glaswand oder auf den Boden schlugen und aufgrund dessen beschädigt wurden. Dieser Behälter befand sich schon während der ganzen Zeit im Wasserglas, so dass die Temperatur auch mit dem Plastikbehälter stabil bei 5 °C lag. Nach der Entnahme der Kronen nach 30 Sekunden, wurde das Wasserglas unmittelbar wieder in den Kühlschrank gestellt.

5.1.4 Auswertung und Beurteilung der Sprünge

5.1.4.1 Direkte Sprünge im Versuch

Nachdem die Prüfkörper in das Wasserbad gegeben und dort 30 Sekunden verblieben sind, werden sie herausgenommen und 15 Min. an der Luft getrocknet. Danach unterzieht man alle Prüfkörper einer Serie einer visuellen und einer mikroskopischen Kontrolle. Zunächst werden die Kronen und Brücken unter einer einfachen Neon-Leuchtstoffröhre visuell auf Sprünge innerhalb der Keramik hin untersucht. Volle Sehfähigkeit des Untersuchers muss und kann vorausgesetzt werden. Zusätzlich werden sie dann unter einem Stereomikroskop begutachtet. Es zeigt sich aber, dass hier Sprünge in der Keramik schwieriger und manchmal gar nicht zu erkennen sind, auch wenn die einfache visuelle Kontrolle einen Sprung deutlich macht.

Diejenigen Prüfkörper, die einen Sprung in der Keramik aufweisen, werden nummeriert und aussortiert. Alle anderen nehmen weiterhin am Versuch für die nächste Temperaturstufe teil. In einer Tabelle werden die Kronen und die Temperaturen vermerkt, bei denen die Keramik im Versuch gesprungen ist. Ebenso wird der Verlauf des oder der Sprünge in einer Graphik dargestellt, damit diese Sprünge von etwaigen Spätsprüngen zu unterscheiden sind.

Bei keinem der Prüfkörper ist die keramische Verblendung vollständig abgeplatzt, was ein Versagen des Haftverbundes zwischen Metall und Keramik bedeutet hätte.

5.1.4.2 Spätsprünge einen Tag nach dem Versuch

Einen Tag nachdem der Versuch einer Serie abgeschlossen ist, werden die Prüfkörper noch einmal kontrolliert - wieder visuell und mikroskopisch. Da der Abschrecktest in dieser Untersuchung so lange durchgeführt wurde, bis alle Kronen und Brücken defekte keramische Verblendungen aufweisen, müssen am Folgetag alle Prüfkörper auf Spätsprünge hin untersucht werden. Dabei zeigt sich, dass sich viele Spätsprünge als Verlängerung der unmittelbaren Sprünge darstellen. Es kann nicht geklärt werden, ob diese als „Spätsprünge“ definierten Risse

auch schon am Vortag existierten, dort aber so fein und somit nicht zu erkennen waren, oder ob sich die Sprünge in der Keramik weiterentwickelt haben. Darüber hinaus zeigen sich aber auch Spätsprünge, die nicht mit Sprüngen des Vortages in Verbindung zu bringen sind.

5.1.4.3 Eignung des Testverfahrens

Der Abschrecktest eignet sich dafür, Spannungen innerhalb eines metall-keramischen Systems aufzudecken. Solche Spannungen entstehen, wenn der WAK vom Metall und Keramik nicht aufeinander abgestimmt ist und es so in den Brennzyklen zu Druck- und/oder Zugspannungen kommen kann [48, 146, 155]. Dabei steht nicht der direkte Verbund zwischen Metall und Keramik im Fokus. Dieser findet sich direkt zwischen Oxidschicht des Metalls und dem Opaker. Würde diese Verbundzone unzureichend sein, käme es im Abschrecktest zu Abplatzungen ganzer Keramikscherben bis auf das Metallgerüst. Das ist nicht geschehen und wurde auch nicht erwartet. Diese Verbundzone steht eher beim Bruchlastversuch nach SCHWICKERATH im Mittelpunkt. In der vorliegenden Arbeit wurde sich auf die Gesamtfestigkeit des metall-keramischen Systems konzentriert. Dazu ist der Abschrecktest gut geeignet.

5.2 Diskussion der Messwerte

Der Abschrecktest ist nicht genormt und es gibt auch keine verbindlichen Werte, die zu erfüllen sind, damit ein Test als bestanden gilt. Man orientiert sich also an Vorgaben der Industrie und an vergleichbare „Literaturwerte“. Die VITA Zahnfabrik fordert, dass nach einem Abschreck-Zyklus mit 165 °C noch 8 von 10 Kronen intakt sein müssen [123]. Da diese Testreihe jedoch häufig modifiziert wurde, gibt es kein einheitlich festgelegtes Maß, welches angewendet werden kann, um zu sagen, dass der Test bestanden ist.

Bei allen Prüfkörpern dieser Testreihe gab es ausschließlich Sprünge innerhalb der Keramik. Abplatzungen gab es in keinem Fall. Inwieweit sich die Sprünge bis in den Bereich des metall-keramischen Haftverbundes ausgebreitet haben, kann mit diesem Versuch nicht dargestellt werden.

5.2.1 Wirobond C mit Duceram Kiss

Mit Duceram Kiss verblendete Wirobond C-Kronen überstehen den Abschrecktest mit einer Washbrand-Temperatur von 980 °C mit einem akzeptablen Ergebnis. Verglichen mit

Literaturwerten und der Vorgabe der Industrie, liegt das vorliegende Ergebnis im unteren Feld dieses Akzeptanzbereiches [48, 145-146, 159]. Der Versuch kann aber als bestanden gewertet werden. Entgegen der Erwartung zeigt sich im Versuch ein besseres Ergebnis mit einer um 50 °C niedrigeren Washbrand-Temperatur, als mit einer entsprechend erhöhten Temperatur. Wie erwartet springt die Keramik aber bei immer niedrigeren Temperaturen, umso höher die Washbrand-Temperatur gewählt wurde. Hier scheint demnach ein Zusammenhang zu bestehen, da der Versuchsablauf und alle anderen Parameter unverändert sind.

Die Bruchverläufe bei den Kronen zeigen, dass es kaum, zumindest nicht ins Gewicht fallende rein zentrale Sprünge gibt. Da mit steigender Washbrand-Temperatur die Anzahl der rein peripheren Sprünge abnimmt und die, der gemischt Verlaufenden leicht zunimmt, wird vermutet, dass die Festigkeit des metall-keramischen Systems bei niedrigeren Temperaturen höher ist, als bei höheren Washbrand-Temperaturen. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass sich bei einem stabilen Metall-Keramik-Komplex die Restspannungen eher auf die Bereiche beschränken, die weiter von dieser Verbundzone entfernt sind und somit die Keramik in den Außenbereichen instabiler ist und sich die Sprünge daher eher in der Peripherie ausbilden. Angenommen, dieser Verbund bildet sich bei höheren Washbrand-Temperaturen unzureichend aus, treten die Restspannungen auch schon dichter an diesem Verbund auf, und so könnten sich die Sprünge auch bis in den zentralen Bereich ausbreiten. Es scheint aber so, dass die Sprünge sich eher in der Peripherie bilden und sich dann weiter zentral ausbreiten.

Für die Brücken gilt, dass die reguläre Serie den Test sehr gut bestanden hat. Sowohl die Brücken mit einer Washbrand-Temperatur von 980 °C, als auch die mit 930 °C und 1030 °C, springen erst bei 165 °C. Deutlich eher und wie zu erwarten, springen die Brücken bei 1080 °C und 1180 °C früher und zwar bei 135 °C.

Bei den Brücken verhält sich der Bruchverlauf im Verlauf der Washbrand-Temperaturen nicht so eindeutig, wie bei den Kronen. Hier zeigen sich auch rein zentrale Bruchverläufe mit einem Maximum bei 1180 °C, was allerdings auf die Gerüstform zurückzuführen ist. Bei der Brückenform gibt es weniger als peripher zu definierende Verblendareale.

Bei dieser Gerüstform gibt es mehr Areale, die mit Opaker bedeckt sind. Der Opaker hat einen WAK von 13,6 - 14,0. Er ist dem WAK der Legierung (14,2) näher, als der WAK der keramischen Dentin-Masse. Dieser liegt bei 13,1 - 13,6. Es scheinen sich, wenn wie bei der Brücke weniger Dentinmasse verarbeitet wurde, weniger Druckspannungen aufzubauen. Da bei der Brücke mehr Opaker mit einem scheinbar besser passenden WAK verarbeitet wird, scheinen sich im Rahmen der Brennzyklen weniger Spannungen im metall-keramischen Gefüge aufzubauen.

5.2.2 Wirobond C mit Vita VM 13

Mit Vita VM 13 verblendete Kronen aus Wirobond C und einer regulären Washbrand-Temperatur von 940 °C, bestehen den Test im Verlauf mit den höchsten Werten. Das Ergebnis

befindet sich aber insgesamt im untersten Bereich, verglichen mit den Literaturwerten [145-146, 159].

Auch hier ist zu erkennen, dass mit sehr hohen Washbrand-Temperaturen auch ein früheres Versagen der Keramik beim Abschreck-Test einhergeht. Allerdings zeigen sich in den unteren Washbrand-Temperaturen keine Unterschiede zwischen den Serien der 890 °C-, 940 °C- und 990 °C-Washbrand-Temperaturen. Die Abhängigkeit von der Washbrand-Temperatur ist bei der Vita-VM 13-Verblendung nicht so deutlich zu erkennen.

Bei den Bruchverläufen zeigt sich, dass bei dieser Kombination mehr rein zentrale Bruchverläufe zu registrieren sind. Zudem erkennt man, dass auch hier die rein peripheren Bruchverläufe mit steigender Washbrand-Temperatur abnehmen. In Abb. 23 ist erkennbar, dass die Werte für die Washbrand-Temperatur von 940 °C etwas auffallen. In der Serie sind mehr zentral-periphere Bruchverläufe zu erkennen, als rein periphere. Die hierfür verantwortlichen Parameter bleiben zu erörtern.

Beim Vergleich mit den Kronen wird auch in diesem Fall für die Brücken deutlich, dass hier mehr rein zentrale Bruchverläufe zu registrieren sind. Es zeigt sich hier nur ein Maximum bereits bei 940 °C und die Anzahl der rein zentralen Verläufe nimmt mit steigender Washbrand-Temperatur ab, wohingegen die peripheren und zentral-peripher verlaufenden Brüche mit steigender Temperatur zunehmen. Hier scheinen Restspannungen in der Keramik besonders noch bei unteren Temperaturen vorzuliegen. Um die Annahme aus Kapitel 5.2.1 aufzunehmen, könnte das ein Zeichen dafür sein, dass der metall-keramische Verbund in dieser Kombination instabiler ist, so dass sich die Sprünge weiter zentral oder nach zentral ausbreiten können.

5.2.3 Wirobond C - Duceram Kiss vs. Vita VM 13

An den Kronenprüfkörpern wird der Unterschied zwischen den beiden Verblendkeramiken am deutlichsten. Es zeigen sich bei mit Duceram Kiss verblendeten Prüfkörpern deutlich weniger zentrale Bruchverläufe als bei der Vita VM 13-Keramik. Daher könnte man darauf schließen, dass es im Gefüge aus Wirobond C und Duceram Kiss weniger große Restspannungen zu geben scheint, als das für Wirobond C und Vita VM 13 der Fall ist (Vgl. Abb. 21 und 23).

Bei den Kronen mit Duceram Kiss-Verblendung zeigt sich im Abschrecktest zwar ein höherer Wert für eine verminderte Washbrand-Temperatur von 930 °C. Für die Brücken zeigt es sich nicht, dass zumindest eine Änderung der Washbrand-Temperatur um +/- 50 °C eine höhere Stabilität des metall-keramischen Systems bringt.

Mit Vita VM 13 verblendete Kronen zeigen bei um 50 °C erhöhter Washbrand-Temperatur erkennbar höhere Werte im Abschrecktest. Bei den Brücken ist auch bei hohen Washbrand-Temperaturen nicht deutlich zu erkennen, dass es zu einer Erhöhung oder Reduktion von Restspannungen und somit einer Änderung des metall-keramischen Gefüges durch die Veränderung der Washbrand-Temperatur kommt.

Ein Zusammenhang zwischen Washbrand-Temperatur und Widerstandskraft des Metall-Keramik-Komplexes ist vor dem Hintergrund der Wirobond C-Gerüste eher für die Duceram Kiss-Keramik zu erkennen.

5.2.4 Wirobond 280 mit Duceram Kiss

Bei den Kronen aus Wirobond 280, die mit Duceram Kiss verblendet wurden, kann bei der Serie mit regulärer Washbrand-Temperatur, im Vergleich mit der Serie mit verminderter Washbrand-Temperatur, nicht von einem signifikant höheren Testergebnis gesprochen werden. Zwar besteht die Serie mit 980 °C den Abschrecktest einen Zyklus länger, bis auch hier die letzte Krone gesprungen ist. Aber auf der anderen Seite springt die erste Krone dafür auch bereits bei 135 °C.

Deutlich ist allerdings zu erkennen, dass die ersten Sprünge mit steigender Washbrand-Temperatur immer früher, also bei immer niedrigeren Abschrecktemperaturen auftreten und die Kronen der Serien mit höherer Washbrand-Temperatur immer schneller und deutlicher versagen.

Es lässt sich hier also ein Zusammenhang zwischen Washbrand-Temperatur und Widerstandskraft des metall-keramischen Gefüges erkennen. Allerdings zeigt sich auch hier nicht, dass eine Erhöhung der Washbrand-Temperatur eine Verbesserung des metall-keramischen Verbundes bedingt.

Bei den Brücken hält die Brücke mit um 50 °C erhöhter Washbrand-Temperatur einen Abschrecktest-Zyklus länger, als die beiden vorherigen Serien mit niedrigerer Washbrand-Temperatur. Als signifikant kann dieses Ergebnis zwar nicht gewertet werden. Allerdings erkennt man im Vergleich der Serien, dass die Widerstandskraft des metall-keramischen Gefüges im Abschrecktest mit steigender Washbrand-Temperatur abnimmt und so wieder ein Zusammenhang zwischen Washbrand-Temperatur und metall-keramischen Verbund besteht. Entgegen der Erwartung zeigt sich aber auch hier, dass eine Erhöhung der Washbrand-Temperatur kein eindeutig positives Ergebnis bringt.

Bei Betrachtung der Bruchverläufe ist bei den Kronen wieder zu erkennen, dass es, mit Ausnahme bei der Serie mit einer Washbrand-Temperatur von 1180 °C, kaum bis keine rein zentralen Bruchverläufe gibt. Auch die rein peripheren Verläufe nehmen von 930 °C - 1180 °C signifikant ab. Diese Testergebnisse sind vergleichbar mit den Ergebnissen der Wirobond C/Duceram Kiss-Kombination.

Für die Brücken gilt, dass hier die Bruchverläufe etwas eindeutiger sind, als sie es für die Wirobond C/Duceram Kiss-Brücken sind. Deutlich ist, dass es wieder wesentlich mehr zentrale als periphere Bruchverläufe gibt. Dafür stehen bereits besprochene Gründe, bezogen auf die Gerüstform (Kap. 5.2.1). Bei der Serie mit regulärer Washbrand-Temperatur erkennt man, dass hier nur gemischt zentral-periphere Bruchverläufe zu erkennen sind. Hier muss davon ausgegangen werden, dass die Einteilung in zentrale und periphere Bruchverläufe keine

definiert klare Grenzen ziehen kann und in diesem Fall die Verläufe Grenzscheidungen zu Gunsten der gemischt verlaufenden Bruchverläufe waren.

5.2.5 Wirobond 280 mit Vita VM 13

Ähnlich, wie mit Duceram Kiss verhalten sich im Abschrecktest die Wirobond 280-Kronen, die mit Vita VM 13 verblendet wurden. Auch hier bestehen die Kronen der Serie mit der regulären Washbrand-Temperatur den Test am längsten. Ein deutlich positiveres Ergebnis, als die Serien mit um 50 °C verminderter oder erhöhter Temperatur, kann aber nicht erzielt werden. Allerdings ist auch hier auffällig, dass die Kronen mit steigender Washbrand-Temperatur auch wieder vorzeitig im Test versagen. Ein Zusammenhang zwischen Washbrand-Temperatur und Widerstandskraft des Gefüges aus Metall und Keramik kann somit auch hier vor dem Hintergrund der sich nicht ändernden Parameter dargestellt werden.

Die mit Vita VM 13 verblendeten Brücken bestehen den Test sehr gut. Das beste Ergebnis erzielt die Brücke mit leicht verminderter Washbrand-Temperatur. Sie versagt erst bei einer Abschrecktemperatur von 175 °C. Dass die strukturelle Resistenz gegenüber dem thermischen Reiz mit zunehmender Washbrand-Temperatur geringer wird, ist in dieser Metall-Keramik-Kombination nicht eindeutig nachzuweisen. Zwar versagt die Brücke mit einer Washbrand-Temperatur von 1040 °C schon bei 120 °C. Allerdings hält die nächste Brücke mit 1140 °C Waschbrand-Temperatur wieder bis 150 °C.

Ein schwaches Abschneiden der Brücke mit 1040 °C kann auch bei Wirobond C beobachtet werden. Eine Erklärung dafür muss man an dieser Stelle schuldig bleiben.

Um hier klarere Ergebnisse zu erhalten, müsste die Anzahl der Prüfkörper erhöht werden.

Die Bruchverläufe sind in dieser Kombination derart, dass die rein zentralen Verläufe ohne große Schwankungen in der Anzahl gleich bleiben. Die rein peripheren Verläufe überwiegen und haben ein Maximum bei 990 °C, zeigen ansonsten eine eher gleichmäßige Verteilung. Die gemischt zentral-peripheren Verläufe nehmen mit zunehmender Washbrand-Temperatur signifikant ab. Diese Verläufe könnten dafür sprechen, dass das Gefüge aus Wirobond 280 und Vita VM 13 so stabil ist, dass wenn sich Sprünge ergeben, sich diese im peripheren Bereich der Verblendung bilden und sich nicht wesentlich in Richtung zentral und somit Metall-Keramik-Verbund ausbreiten können.

Das scheint allerdings nur für die Kronenform zu gelten. Bei den Brücken ist die Verteilung der Brüche eine deutlich andere. Hier sind viele, wie auch bei den anderen Brücken bereits zuvor zu erkennen war, zentrale Bruchverläufe. Die Verteilung der Brüche ist aber auch hier wieder nicht einheitlich. Man muss davon ausgehen, dass dafür die komplexere Gerüstform verantwortlich ist. Die Druck- und Zugspannungen, die sich beim Brennen der Keramik und beim anschließenden Abkühlen ergeben, scheinen hoch zu sein und bedingen größere Restspannungen als bei den Kronen. Somit ergeben sich insgesamt die häufigeren zentralen Verläufe aber auch eben die peripheren und gemischt verlaufenden Brüche.

5.2.6 Wirobond 280 - Duceram Kiss vs. Vita VM 13

Kronen und Brücken aus Wirobond 280 und Duceram Kiss weisen häufiger Sprünge auf, als die Prüfkörper, die mit Vita VM 13 verblendet wurden (Vgl. Abb. 7 und 8).

Sowohl die Kronen, die mit Duceram Kiss, als auch die, die mit Vita VM 13 verblendet wurden, zeigen die höchsten Werte beim Abschrecktest mit der regulär vom Hersteller vorgegebenen Washbrand-Temperatur (Vgl. Tab. 17 und 19). Bei den Kronen kann man für Duceram Kiss in Verbindung mit Wirobond 280 einen deutlicheren Zusammenhang zwischen Washbrand-Temperatur und Abschneiden im Abschrecktest erkennen. Für Vita VM 13-Kronen und die Brücken ist diese Tendenz nicht so deutlich (Vgl. Tab. 19 + 20).

Bei Betrachtung der Bruchverläufe erkennt man, dass es bei mit Duceram Kiss verblendeten Kronen deutlich mehr periphere Bruchverläufe gibt, als mit Vita VM 13 verblendete Kronen. Man kann daraus schließen, dass, wenn es Restspannungen in der Keramik gibt, die dann im Abschrecktest zu Sprüngen führen, diese bei Duceram Kiss eher in der äußeren Keramikmasse zu finden sind, als in Richtung metall-keramischer Verbundzone. Das bedeutet, dass der metall-keramische Verbund zwischen Wirobond 280 und Duceram Kiss widerstandsfähiger und intensiver ist, als der Verbund zwischen Wirobond 280 und Vita VM 13. Denn hier zeigen sich in der gesamten Testreihe auch deutlich zentrale Bruchverläufe (Vgl. Abb. 25 - 28).

Neben den möglichen Auswirkungen von unterschiedlichen WAK, die zu ungünstigen inneren Spannungen führen können, ist auch zu diskutieren, in wie weit die Eigenfestigkeiten der jeweiligen Verblendkeramiken verantwortlich sein können. Hier gibt es eine Anzahl von möglichen Einflussnahmen:

- Zusammensetzung der Verblendkeramiken (kann nur durch den Hersteller beeinflusst werden)
- Verarbeitung (wird durch den Zahntechniker beeinflusst; s. Kap. 2.3.5.2)
 - Mischungsverhältnis
 - Trocknung
 - Brenn-/Temperaturführung

Je schwächer die Verblendkeramik ist, desto gravierender wirken sich die inneren Spannungen aus. Bei Einwirkung von Kräften und/oder Temperaturänderungen werden die schwächeren Verblendkeramiken eher versagen. Folgt man dieser Argumentation, scheint die Vita VM13 die stabilere Verblendkeramik zu sein.

5.2.7 Vergleich Wirobond C und Wirobond 280

Die vorliegende Testreihe lässt keine Unterschiede zwischen den beiden Legierungen Wirobond C und Wirobond 280 erkennen. Bei Betrachtung der Abbildungen 38 - 40 wird deutlich, dass die Temperaturen, die zum Springen der Keramik notwendig sind, im Verlauf keine große Streuung aufweisen. In der Darstellung des Temperaturfensters in Abb. 37 kann dahingegen deutlicher gesehen werden, dass die Kronen und Brücken aus Wirobond C innerhalb eines kleineren Temperaturbereichs versagen, als die entsprechenden Prüfkörper aus Wirobond 280. Diese Tatsache spricht für ein in geringen Maßen stabileres und sicherer reproduzierbares Verbundsystem von Wirobond C und den beiden Verblendkeramiken, als es das für Wirobond 280 zu sein scheint. Dieser Eindruck wird verstärkt durch Abb. 7, aus der hervorgeht, dass es zumindest bei den Kronen aus Wirobond C geringfügig weniger Sprünge zu vermerken gibt, als bei den Kronen aus Wirobond 280. Bei den Brücken ist das Verhältnis gleich. Vor dem Hintergrund der zugrunde liegenden Fragestellung, hat diese Erkenntnis allerdings keine Relevanz.

5.3 Klinische Bedeutung

In der zahnmedizinischen Kronen- und Brückenprothetik gilt es ständig, den Verbund zwischen Metall und Keramik zu verbessern. Dazu müssen diese Werkstoffe ideal aufeinander abgestimmt sein, um den Belastungen im Mund standzuhalten. Das sind mechanische, chemische und thermische Belastungen.

Im Abschrecktest können Restspannungen dargestellt werden, die im Mund unter Belastung zu einem Versagen der metall-keramischen Restauration führen können. Zwar werden die Prüfkörper im Abschrecktest ausschließlich einer thermischen Extremsituation ausgesetzt. Jedoch können die Restspannungen, die dadurch aufgedeckt werden, auch bei mechanischer Belastung zum Springen der Keramik führen. Extremsituationen stellen die Temperaturen im Versuch deswegen dar, da Temperaturen von 105 °C - 165 °C und noch höher, im Mund nicht auftreten.

Der Abschrecktest spiegelt also keine praxisnahe Belastungssituation wieder. Er ist jedoch gut geeignet, um Materialkombination zu testen, die bei Bestehen des Tests auch den Belastungen des klinischen Alltages standhalten können.

Vor dem Hintergrund der Fragestellung, die darauf abzielt, herauszufinden, ob die Erhöhung der Washbrand-Temperatur eine Verbesserung des Verbundes zwischen Metall und Keramik bewirkt, bietet sich als erste Wahl der Bruchlastversuch nach SCHWICKERATH an. Eine entsprechende Testreihe ist damit aber bereits durchgeführt worden. Darin konnte nicht nachgewiesen werden, dass eine Veränderung der Washbrand-Temperatur zu einem stabileren Verbund zwischen Metall und Keramik führt.

Eine verbindliche Aussage kann nie ausgehend von nur einem Versuch und einer Testreihe erfolgen. Dazu müssen verschiedene Testmethoden herangezogen werden, die verschiedene Blickwinkel auf die Fragestellung zulassen.

Ausgehend von der vorliegenden Untersuchung lässt sich somit keine neue Empfehlung für die Praxis ableiten, was das Verändern der Washbrand-Temperatur angeht, um einen besseren Verbund zwischen einer Cobalt-Chrom-Legierung und einer Verblendkeramik zu erhalten.

Wohl aber dienen solche Untersuchungen dazu, weitere Testreihen zu entwickeln, weitere Erkenntnisse zu gewinnen und Fehler in der Versuchsdurchführung zu eliminieren.

6 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, zu untersuchen, ob die Festigkeit der Metall-Keramik-Systeme durch Veränderung der Washbrand-Temperatur zu verbessern ist und dies durch den Abschrecktest dargestellt werden kann.

Für den Abschrecktest wurden 20 Serien aus je sechs Einzelzahnkronen und je einer dreigliedrigen Frontzahnbrücke hergestellt, von denen die eine Hälfte mit Wirobond C und die andere Hälfte mit Wirobond 280 gegossen wurde. Davon wurde wieder je die eine Hälfte mit VITA VM 13 keramisch verblendet, die andere Hälfte mit Duceram KISS von der Fa. Degudent. So entstehen insgesamt 120 Kronen und 20 Brücken in vier verschiedenen Materialkombinationen. Durch anfängliche Probleme in der Modellation ergab es sich, dass einige Serien, die mit Duceram Kiss verblendet wurden, neu angefertigt werden mussten und dabei die Anzahl der Kronen in diesen Serien auf sieben erhöht wurde. Das muss bei der Betrachtung der Ergebnisse berücksichtigt werden, hat aber keinen nennenswerten Einfluss auf das Ergebnis.

Der Abschrecktest ist nicht standardisiert und wurde für die vorliegende Arbeit in so fern modifiziert, als dass er nicht, wie häufig in der Literatur beschrieben, bei 165 °C endet, sondern so lange weitergeführt wird, bis alle Prüfkörper Schäden in Form von Rissen und Sprüngen aufweisen.

Die Prüfkörper, die entsprechend der Herstellerangaben erstellt wurden, versagen in der vorliegenden Versuchsreihe in einem Temperaturfenster von 135 °C - 175 °C und liegen somit in einem Bereich, der auch in der Literatur bei anderen Abschreckversuchen zu finden ist. Man kann also davon ausgehen, dass der Versuch ordnungsgemäß erfolgt ist.

Bei Prüfkörpern, die mit verringerter und auch deutlich erhöhter Washbrand-Temperatur hergestellt wurden, liegt die Versagenstemperatur im Abschrecktest mit ab 105 °C auch unterhalb des Normbereichs.

Deutlich ist zu sehen, dass es scheinbar höhere Restspannungen innerhalb des metall-keramischen Verbundes zu geben scheint, umso höher die Washbrand-Temperatur gewählt wurde. Dass eine leicht erhöhte Washbrand-Temperatur - verglichen mit den Herstellervorgaben - zu einem besseren Ergebnis im Abschrecktest führt und darauf deutet, dass weniger Restspannungen und somit ein stabileres Materialgefüge resultiert, kann mit der vorliegenden Arbeit nicht dargestellt werden.

Unter Berücksichtigung der Bruchverläufe sowohl bei den Kronen als auch bei den Brücken, ist erkennbar, dass sich diese mit Zunahme der Washbrand-Temperatur verändern. Im Raum steht nun die Vermutung aus Kapitel 5, dass der mehr zentrale Sprungverlauf bei Prüfkörpern mit hoher Washbrand-Temperatur auf einen geringeren metall-keramischen Haftverbund hindeutet.

Dieses zu untersuchen, war allerdings nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit und kann mit dem Abschrecktest auch nicht nachgewiesen werden, da mit dem Abschrecktest nur thermische Restspannungen innerhalb eines Materialgefüges aufgedeckt werden können. Dadurch wird deutlich, dass es nicht ausreicht, präklinische Materialtestungen nur durch ein einzelnes Testverfahren darzustellen. Jedes Testverfahren verfolgt eine bestimmte Fragestellung und eine verlässliche Aussage kann man nur bei Betrachtung eines breiten Spektrums an Untersuchungen erhalten.

6.1 Summary

The intention of this doctoral thesis was to examine if the stability of a metal-ceramic-system is improved through modification of the Washbrand temperature and to show this in a thermal shock test.

For this thermal shock test 20 series consisting of six single dental crowns each and trinomial front teeth bridges were produced. Half of them were cast with Wirobond C and the other half with Wirobond 280. Thereof one half was ceramic blended with VITA VM 13 and on the other half Duceram KISS of the company Degudent was used. Accordingly, 120 crowns and 20 bridges accrued in four different material combinations.

Through problems at the beginning of the modulation, it occurred that some series which were blinded with Duceram Kiss had to be produced again. This is why the number of crowns in these series was raised to seven. Looking at the outcome, this has to be kept in mind; however this has no noteworthy effect on the results.

The thermal shock test is not standardized, so for this thesis it was modified insofar that it does not end at 165 °C, which is often described in literature, but rather is continued until every test phantom shows damage in forms of tears and cracks.

The test phantoms, which were constructed as specified by the manufacturer, malfunction in the present test series in a temperature window of 135 °C - 175 °C and hence reside in an area which is also found in literature in other thermal shock tests. On account of this it is to be assumed that the experiment was held correctly. With test phantoms which were produced with decreased or considerably increased Washbrand temperature, the malfunction temperature in the thermal shock test is starting at 105 °C still below standard.

It is evident that there are seemingly higher residual tensions within the metal-ceramic compounds, the higher the Washbrand temperature was chosen.

In this thesis it cannot be constituted that a lightly increased Washbrand temperature compared to the manufacturer guidelines leads to a better result in the thermal shock test which then indicates less residual tensions and therefore more stable material structures.

Whilst taking into account the fractures with the dental crowns and the pontics, it is visible that these change with an increase of the Washbrand temperature. The assumption stated in chapter 5 that the central crack progression in test phantoms with a high Washbrand temperature indicates a lower metal-ceramic bond is still unresolved.

Nevertheless this was not the subject of this thesis and cannot be verified with a thermal shock test because with such a test only thermal residual tensions within a material structure can be detected.

This makes it clear that it is not enough to demonstrate pre-clinical material tests through only one single test procedure. Every test procedure pursues a particular problem and a reliable assertion can be received only with looking at a wide spectrum of experimental studies.

7 Literaturverzeichnis

1. Krumbholz, K., *Stand und Entwicklung von Dentalkeramiken*, in ZWR. 1996. p. 193-199
2. Strub, J.R., *Vollkeramische Systeme*. Deutsche Zahnärztliche Zeitung, 1992(47): p. 566-571.
3. Claus, H., *Viele Faktoren haben Einfluß auf die Haftung der Dentalkeramik*. dental labor, 1985. XXXIII(07/85): p. 897-900.
4. Kerschbaum, T., *Metallkeramik - ein halbes Jahrhundert im Dienste der Patienten*. Zahnärztliche Mitteilungen, 2006. 96: p. 2716-2722.
5. Raabe, J.L.M., *Zur Abstimmung der Wärmeausdehnungskoeffizienten von Legierung, Dentin und Opaquer*. Dent Labor, 1998(46/11): p. 1795-1801.
6. V, A.S.S.
7. Derfert, B., *Vergleichende Untersuchungen zur Verbundfestigkeit von verschiedenen Metall-Keramik-Kombinationen auf der Basis von EM- und NEM-Legierungen in Verbindung mit herkömmlicher und niedrigschmelzender Keramik*. Med Diss; Medizinische Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin, 2003: p. 113-114.
8. Ozcan, M., *Fracture reasons in ceramic-fused-to-metal restorations*. J Oral Rehabil, 2003. 30(3): p. 265-9.
9. Groll, W., *Dental-Edelmetalllegierungen - ein werkstoffkundlicher Überblick*. Quintessence Zahntechnik 1992. 18: p. 519-543.
10. Claus, H., *Werkstoffkundliche Grundlagen der Dentalkeramik*. Dental labor, 1980. XXVIII(Heft 10/80): p. 1743-1750.
11. Lynch, C.D., *Pierre Fauchard and his role in the development of obturators*. British Dental Journal, 2005. vol. 99(no.9): p. 603-605.
12. Schwebke, K., *Investigations of bonding strength of three all-ceramic-systems*. Med. Diss. Berlin, 2002.
13. Krumbholz, K., *Stand und Entwicklung der Dentalkeramiken*. ZWR, 1996 3: p. 193-199.
14. Breustedt, A., *Geschichte und Entwicklung der zahnärztlichen Keramik*. Breustedt, A.: Zahnärztliche Keramik, 1968. 2. Auflage(VEB Verlag Volk und Gesundheit, Berlin).
15. Gehre, G., *Keramische Werkstoffe*. Eichner, K. Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung, 2005. Band 1(8. Auflage, Thieme Verlag, Stuttgart).
16. Körber, K.L., K, *Einführung in die Metallkunde - Legierungen*. Zahnärztliche Werkstoffkunde und Technologie, 1993. 2. Auflage: p. s. 27-28.
17. Strietzel, R., *Kobalt-Chrom-Legierungen in Millionen ZE-Einheiten*. DZW Zahntechnik, 2005. 10/05: p. 20-2.
18. Bossow, N., *Eine Alternative zu Gold, die ästhetisch keine Wünsche offenlässt*. DZW Zahntechnik, 2007. 01-02/07: p. 31-3.
19. Strietzel, R., *aufbrennfähige Cobald-Chrom-Legierungen*. Dent Lab 2001. Band 2: p. 205-12.
20. Geis-Gerstdorfer, J., *Keramische Werkstoffe*. In: Eichner K. (Hrsg). *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung; Heidelberg: Hütig*. 1, 2000: p. 119-64.
21. Janda, R., *Gläser, Glaskeramiken und Keramiken*. Quintessence Zahntechnik, 2006. 32: p. 1264-1273.
22. Hickel R.; Kunzelmann, K.H., *Keramikinlays und Veneers*. Carl Hanser Verlag, München Wien, 1997.
23. Rosenblum, M.A.S., A.: , *A Review of All-Ceramic Restorations*. JADA, 1997. 128: p. 297-307.
24. Bieniek, K.W.S., H.: , *Innovative Vollkeramische Kronen- und Brückensysteme - Eine kritische Bewertung*. Quintessenz Verlag, Berlin, 1993. 44: p. 529-542 689-697.
25. Garber, D.A.A., P.; Goldstein, R.E., Salama, H.: , *Auf der Suche nach der perfekten Vollkeramikkrone*. Quintessence Zahntechnik, 2000. 26: p. 595-603.

26. Lüthy, H.P., N.; Sisera, M.; Wohlwend, A.; Loeffle, O.; *White esthetics*. Schweiz Monatschr Zahnmed, 1996. 106: p. 897-904.
27. Tinschert, J., et al., *Lifetime of alumina- and zirconia ceramics used for crown and bridge restorations*. J Biomed Mater Res B Appl Biomater, 2007. 80(2): p. 317-21.
28. Groten, M., *Complete esthetic and functional rehabilitation with adhesively luted all-ceramic restorations--case report over 4.5 years*. Quintessence Int, 2007. 38(9): p. 723-31.
29. Schwalbe, N., *Vergleichende Untersuchungen zum SCHWICKERATH-Versuch, VOSS-Versuch und Abschrecktest*. Med. Diss. Berlin, 2008: p. Seite 15.
30. Hahnel, S., et al., *Investigation of mechanical properties of modern dental composites after artificial aging for one year*. Oper Dent, 2010. 35(4): p. 412-9.
31. Ardu, S., et al., *A long-term laboratory test on staining susceptibility of esthetic composite resin materials*. Quintessence Int, 2010. 41(8): p. 695-702.
32. Ernst, C.P., *Eine aktuelle Standortbestimmung zahnärztlicher Füllungskomposite*. zm 2003. 93: p. 790-800.
33. Rzanny, A.G.R.K., H., *Neueste Verblendkunststoffe- eine werkstoffkundliche Studie*. Quintessence Zahntechnik, 2006. 32: p. 1296-1310.
34. Körber, K.L., K., *Zahnärztliche Werkstoffkunde und Technologie*. 1982. 2. Auflage: p. S. 146-147.
35. Ondracek, G., *Werkstoffkunde - Leitfaden für Studium und Praxis*. Expert-Verlag, Renningen, 1994. 4. Auflage.
36. Kappert, H.F., *Keramische Verblendmassen*. Meiners, H.; Lehmann, K.M.: Klinische Materialkunde für Zahnärzte, 1998. 1. Auflage(Hanser Verlag, München).
37. Strietzel, R., *Die Werkstoffkunde der Metall-Keramik-Systeme*. 2005. 1. Auflage(Neuer Merkur, München).
38. Tauber, M., *Die Verbundfestigkeit von Metall und KEramik*. Quintessence Zahntechnik, 2006. 32: p. 1052-1061.
39. Graham, J.D.J., A.; Wildgoose, D.G.; Shareef, M.Y.; Cannavina, G. , *The effect of surface treatments on bond strength of a nonprecious alloy-ceramic interface*. Int. J Prosthof, 1999. 12: p. 330-334.
40. Körber, K.L., K., *Zahnärztliche Werkstoffkunde und Technologie*. Thieme Verlag, 1982. 2. Auflage: p. S. 390.
41. Gelinas, G., *Zauberwort "Metallkeramiksysteme"*. DZW Zahntechnik, 2000. 11/00: p. 35-36.
42. Eichner, K., *Über die Bindung von keramischen Massen und Edelmetall-Legierungen - Theorien und optische sowie elektronenmikroskopische Untersuchungen*. Deutsche Zahnärztliche Zeitung, 1968. 23: p. 373-382.
43. Eichner, K., *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung*. Heidelberg: Hüthig, 1985.
44. Strietzel, R., *Die Werkstoffkunde der Metall-Keramik-Systeme; Der Metall.Keramik-Verbund*. Neuer Verlag Merkur GmbH, 2004. 1. Auflage: p. Seite 101.
45. Strietzel, R., *Die Werkstoffkunde der Metall-Keramik-Systeme*. Verlag Neuer Merkur GmbH, 2005. 1. Auflage: p. S. 87-88.
46. Schwickerath, H., *Der Einfluss unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten auf das Verhalten metallkeramischer Konstruktionen* Deutsche Zahnärztliche Zeitung, 1983. 38: p. 554-556.
47. Böhm, U., *Der Metall-Keramik-Verbund - eine sehr komplexe Einheit*. Deutsches Zahnärztliches Wochenschriften, 2001. 41: p. 15.
48. Lei, Y.C., *The influence of different thermal expansion coefficient (TEC) between ceramic and metal on thermal stability of porcelain-fused-to metal (PFM) crown*. Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi, 1991. 26: p. 329-332.
49. Tauber, M., *Physikalische Hinweise zur Grüstgestaltung*. Quintessence Zahntechnik, 2006. 32(384-392).
50. Strietzel, R., *Die Werkstoffkunde der Metall-KERamik-Systeme*. Neuer Verlag Merkur GmbH, 2005. 1. Auflage: p. 15-16.

51. Kuga, M., *Verarbeitungsfehler und deren Lösungen in der Metallkeramik*. Quintessence Zahntechnik, 2006. 32: p. 9729-81.
52. Strietzel, R., *Der Metall-Keramik-Verbund. Fehler bei der Verarbeitung*. Quintessence Zahntechnik, 2002. 28: p. 1412-1421.
53. Falbe, J., ; Regitz, M., *Römpp Chemie Lexikon*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1995.
54. Tholey, M.J., *Haftverbundmechanismen in dentalen Schichtsystemen*. Quintessence Zahntechnik, 2007. 33: p. 160-168.
55. Strietzel, R., *Die Werkstoffkunde der Metall-Keramik-Systeme*. Neuer Verlag Merkur GmbH, 2004. 1. Auflage: p. S. 102.
56. Zeeck, A.G., S.; Papastavrou, I. , *Erscheinungsformen der Materie*. In: Chemie für Mediziner, 2006. 6.Auflage(Urban und Fischer, Bad Elsevier).
57. Ludwig, K., *Lexikon der Zahnmedizinischen Werkstoffkunde* Quintessenz Verlag, Berlin, 2005. 1. Auflage.
58. Siebert, G.K.Q., A.; , *Elementarverteilung des Verbundes Metall-Keramik im Bereich der Grenzschicht bei NEM- und EM-Legierungen*. Deutsche Zahnärztliche Zeitung, 1985. 40: p. 1163-1168.
59. Strietzel, R., *Haftoxide sind für den guten Verbund wichtig, aber nicht unproblematisch*. Dtsche Zahnärztl Wochenschr Spezial, 1999. 1: p. 25-27.
60. Schierano, G.B., F.; Audenino, G.; Pera, P.; Carossa, S. , *Bond between gold alloy and ceramic in relation to the thickness of the oxide layer*. Minerva Stomatol, 1999. 48: p. 577-583.
61. Henning, G., *Die Metall-Keramik-Bindung*. Dent Labor, 1976. 8: p. 1065-1071.
62. Yoshizawa, K., *Oberflächenbearbeitung von Gerüsten in der Metallkeramik*. Quintessence Zahntechnik, 2006. 32: p. 984-991.
63. Eichner, K., *Methodische und systemische Ursachen von Fehlern in der Metallkeramik*. Dent Labor, 2000. 48: p. 535-543.
64. Xin HT, M.X., Li YL, Xu F, Guo WG., *The study of viscoelastic residual stresses of ceramic-metal bond*. Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi, 2004. 22: p. 463-465.
65. Böhm, U., *Der Metall-Keramik-Verbund - eine sehr komplexe Einheit*. DZW 2001. 41: p. 15.
66. Smith, T.B.K., J.R.; Tesk, J.A. , *In vitro fracture behaviour of ceramic and metal-ceramic restorations*. J Posthodont, 1994. 3: p. 138-144.
67. Craig, R.G.P., J.M.; Wataha, J.C., *Zahnärztliche Werkstoffe, Eigenschaften und Verarbeitung*. Urban & Fischer Verlag, München, 2006.
68. Wataha, J.C., *Alloys for postodontic restorations*. J Prosthet Dent, 2002. 87: p. 351-363.
69. Wataha, J.C., *Castings alloys*. Dent Clin North Am, 2004. 48: p. 499-512.
70. Rudolph, T., *Lohnt sich die billige Legierung*. DZW Spezial, 1999. 01/99: p. 34-36.
71. Körber, K.L., K., *Zahnärztliche Werkstoffe und Technologie*. Thieme Verlag, Stuttgart, 1993.
72. Koinig, H., *Metallkeramik*. Verlag Neuer Merkur GmbH, München, 2003.
73. Hofstede, T.M.e., C; Graser, G.N.; Tallents, R.H.; Moss, M.E.; Zero, D.T., *Influence of metal surface finishing on porcelain porosity and beam failure loads at the metal-ceramic interface*. J Prosthet Dent, 2000. 84: p. 309-317.
74. Johnson, T.v.N., R.; Stokes, C.W., *Surface analysis of porcelain fused to metal systems*. Dent Mater, 2006. 22: p. 330-337.
75. Marxkors, R.M., H., *Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde*. Hanser; München, 2001.
76. Wulfes, H., *Kobalt-Chrom-Basislegierungen bestimmen den edelmetallfreien Trend bei Aufbrennlegierungen*
DZW Zahntechnik, 2000. 11/00: p. 43-46.
77. Körber, K.L., K., *Maximale Kaukraft als Berechnungsfaktor zahntechnischer Konstruktionen*. Dent Labor, 1983. 31: p. 55-60.
78. Tauber, M., *Statik der Gerüstgestaltung*. Quintessence Zahntechnik, 2006. 32: p. 172-180.
79. Craig, R.G., *Restorative Dental Materials*. 8th ed. St. Louis, 1989.
80. Yu, C.Y., *Role of occlusion in endodontic management: report of two cases*. Aust Endod J, 2004. 30(3): p. 110-5.

81. DeLong, R.S., R.L.; Douglas, W.H.; Pintado; M.R., *The wear of dental amalgam in an artificial mouth: a clinical correlation*. Dent Mater, 1985. 1: p. 238-242.
82. Kappert, H., *Zur Festigkeit von Dentalkeramiken*. Zahnärztliche Mitteilungen, 2003. 93: p. 802-806.
83. Balzer, A.K.-J., V., *Die Beurteilung von Kaukräften*. Quintessence Zahntechnik, 2002. 28: p. 982-998.
84. Kappert, H., *Metall-Keramik-Verbundfestigkeit*. In: Siebert GK (Hrsg), *Dentallegierungen in der zahnärztlichen Praxis*. München: Hanser, 1989: p. 149-158.
85. Uhlig, H., *Die Kaukraft*. Dtsch Zahnärztl Z, 1953. 8: p. 30-45.
86. Coca, I.S., H., *Zur Beanspruchung von Kronen im Frontzahnbereich*. Dtsch Zahnärztl Z, 1987. 42: p. 338-41.
87. Bakke, M.H., B.; Jensen, B.L.; Michler, L.; Möller, E., *Unilateral; isometric bite force in 8-68 year-old women and men related to occlusal factors*. Scand J Dent Res, 1990. 98: p. 149-58.
88. Calderon, P.K., E.M.; Lauris, J.R.P.; Conti, P.C.R., *The influence of gender and bruxism on the human maximum bite force*. J Appl Oral Sci, 2006. 14: p. 448-53.
89. Ferrario, V.F.S., C.; Serraro, G.; Deliaiva, C; Tartaglia, G.M. , *Single tooth forces in healthy young adults*. J Oral Rehabil, 2004. 31: p. 18-22.
90. Waltimo, A.K., M.; , *a novel bite force recorder and maximal isometric bite force values for healthy young adults*. Scand J Dent Res, 1993. 101: p. 171-5.
91. Balzer, A.K.-J., V., *Die Beurteilung von Kaukräften*. Quintessenz Zahntechnik, 2002. 28: p. 982-98.
92. Helmkin, E.I., B., *Bite force and functional state of the masticatory system in young men*. Swed Dent J, 1978. 71: p. 167-75.
93. Körber, K.H.L., K., *Maximale Kaukraft als Berechnungsfaktor zahntechnischer Konstruktionen*. Dent Lab, 1983. 31: p. 55-60.
94. Lenz, J.K., S., *Thermal stresses in metal-ceramic-specimens for the ISO crack initiation test (three-point flexure bond test)*. Dent Mater, 1998. 14: p. 277-80.
95. Papazoglou, E.B., W.A., *Porcelain adherence vy force to failure for palladium-gallium alloys: a critique of metal-ceramic bond testing*. Dent Mater, 1998. 14: p. 112-9.
96. Gräf, W., *Die thermische Belastung der Zähne beim Verzehr von extrem heißer und kalter Speisen*. Dtsch Zahnärztl Z, 1960. 15: p. 30-34.
97. Pfeiffer, P.M., R., *Temperaturbelastung von Adhäsivbrücken und ihre Auswirkung auf die Verbundfestigkeit der Klebeverbinding*. Schweiz Monatsschr Zahnmed, 1989. 99: p. 782-6.
98. Krejci, I.R., T.; Lutz, F.; Albertoni, M., *In-vitro-Testverfahren zur Evaluation dentaler Restaurationssysteme*. Schweiz Monatsschr Zahnmed, 1990. 100: p. 953-60.
99. Rosentritt, M.L.A.L., R.; Behr, M.; Scharnagel, P.; Handel, G., *Apparatur zur Simulation des Kauorgans (Regensburger Kausimulation)*. Materialprüfung, 1997. 39: p. 77-80.
100. Stappert, C.F.A., W.; Gerds, T.; Strub J.R. , *Fracture resistance of different partial coverage ceramic molar restorations*. J Am Dent Assoc, 2006. 137: p. 514-522.
101. Palmer, T.S.B., M.T.; Billy, E.J., *Temperature extremes produces orally by hot and cold liquids*. J Prosthet Dent, 1992. 67((3)): p. 325-27.
102. Rothwell, P.S., *Investigation into temperature changes on the surface of human teeth enamel*. Nature 1958. 181: p. 1805.
103. Schwickerath, H., *Werkstoffkunde der Vollkeramiksysteme ; In: Kappert H.F.: (HRSG) Vollkeramik - Werkstoffkunde - Zahntechnik - klinische Erfahrung* Quintessenz Verlag, Berlin, 1996: p. 87-102.
104. Coca, I.S., H., *Zur Beanspruchung von Kronen im Frontzahnbereich*. Deutsche Zahnärztliche Zeitung, 1987. 42: p. 338-41.
105. Hohmann, W., *Spaltbildung an kunststoffverblendetem Zahnersatz durch Temperaturstwechsel*. Deutsche Zahnärztliche Zeitung, 1983. 38: p. 1053-55.
106. Kappert, H.F., *IPS Empress-Brücke/in-vitro-Studie*. Untersuchungsbericht an Ivoclar AG/Schaan, 1998.

107. Ritter, J.E., Jr.; Laporte, R.P., *Effect of test environments on stress-corrosion susceptibility glass*. J Am Ceram Soc, 1975 58((7-8)): p. 265-67.
108. Fässler, P.W., *Untersuchungen zur Bruch- und Dauerfestigkeit der Dentalkeramiken Zirkonoxid-TZP und In-Ceram*. Zahnmedizinische Dissertation, Universität Tübingen 1999.
109. Hellwig, E.K., J.; Attin, T., *Einführung in die Zahnerhaltung*. Urban & Fischer Verlag, München, 2003.
110. Rincic, N., et al., *Corrosion behaviour of the Co-Cr-Mo dental alloy in solutions of different composition and different pH values*. Coll Antropol, 2003. 27 Suppl 2: p. 99-106.
111. Su, R.G., C.H. Li, and Y. Qian, [Study on the corrosion resistance of Cr alloy in the artificial saliva with different pH value]. Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi, 2010. 28(1): p. 34-7.
112. Strietzel, R., *Chemische Eigenschaften*; In: *Die Werkstoffkunde der Metall-Keramik-Systeme*. Verlag Neuer Merkur GmbH, 2004: p. 27-30.
113. Bayramoglu, G.A., T; Kedici, S.; Aksüt, A.A. , *The effect of pH on the corrosion of dental metal alloys*. J Oral Rehabil, 2000. 27(563-75).
114. Geis-Gerstendorfer, J.R., F.; Scheideler, L., *Korrosionsprüfung-eine wichtige Basis für die Materialauswahl*. Quintessenz Zahntechnik, 2005. 31: p. 1343-48.
115. Kedici, S.P.A., A.A.; Kilicarslan, M.A.; Bayramoglu, G.; Gökdemir, K., *Corrosion behaviour of dental metal alloys in different media*. J Oral Rehabil, 1998. 25: p. 800-8.
116. Lenz, E., *Dentallegierungen*. In: Meiners H, Lehmann KM. *Klinische Materialkunde für Zahnärzte*: München, 1998: p. 71-118.
117. Scheutzel, P.T., T; Marega, V., *Zur Korrosionsbeständigkeit zahnärztlichverwendeter Legierungen gegenüber säurehaltiger Getränken*. Deutsche Zahnärztliche Zeitung, 1998. 53: p. 204-10.
118. *Medizinproduktegesetz, EG-Richtlinie 93/42/EWG*. 14.06.1993.
119. Voss, R., *Die Festigkeit metallkeramischer Kronen* Dtsch Zahnärztl Z, 1969. 24: p. 726-31.
120. Lenz, J.S., S.; Schwickerath, H.; Sperner, F.; Schäfer, A., *Bond strength of metal-ceramic systems in three-point flexure bond test*. J Appl Biomater, 1995. 6(1): p. 55-64.
121. Shell, J.S.N., J. P., *Study of the bond between gold, alloys and porcelain*. J Dent Res, 1962. 41: p. 1425.
122. Püchner, J., *Der Einfluss der Brenntemperatur auf die Haftfestigkeit von zahnärztlichen metallkeramischen Verbindungen*. Med. Diss. Berlin, 1971.
123. VITA Zahnfabrik, H.R.G.C.K., *Interne Vorgabe der Firma VITA Zahnfabrik, Bad Säckingen*. 2006.
124. Sörgel, M., *Analysis of compound stability between two unprecious-metal-alloys after usage differently surface-condition-technics and application differently composit-adhesives*. Med. Diss. Berlin, 2002.
125. Schuller, R.D., R.J.; Danzer, R. , *Der Einfluss von Wärmebehandlungen auf das Bruch- und Thermoschockverhalten von plasmagespritztem Aluminiumoxid*. Z. Metallkd., 1999. 90/8: p. 615-20.
126. 8891, D.E.I., *Dental casting alloys with noble metal content of at least 25 % but less than 75 %*. Beuth-Verlag, Berlin, 2000.
127. 09/90), D.E., *Metall-Keramik-Systeme - Anforderungen, Prüfung*. Beuth Verlag, Berlin, 1990.
128. 9693, D.E.I., *Dentale restaurative Metallkeramiksysteme*. Beuth Verlag, Berlin, 2001.
129. Voss, R., *Untersuchung über die Verblendkrone und ihre mechanische Widerstandsfähigkeit*. Zahnärztl Rdsch, 1957. 66: p. 265-68.
130. Voss, R., *Die Festigkeit metallkeramischer Kronen* Dtsch Zahnärztl Z, 1969. 24: p. 726-31.
131. Lenz, J.S., S.; Schwickerath, H.; Sperner, F.; Schäfer, A. , *Bond strength of metal-ceramic systems in three-point flexure bond test*. J Appl Biomater, 1995. 6: p. 55-64.
132. Dörfler, B.F., P. W.; Fischer, J., *Prüfung dentaler Edelmetall-Gusslegierungen* Quintessenz Zahntechnik, 1995. 21: p. 813-24.
133. Schwarz, S.L., J.; Schwickerath, H., *Zur Festigkeit des metallkeramischen Verbundes bei der Biegeprüfung*. Dtsch Zahnärztl Z, 1988. 43: p. 1152-58.
134. Schwickerath, H., *Dauerfestigkeit von Keramik*. Dtsch Zahnärztl Z, 1986. 41: p. 266.

135. Schwickerath, H., *Prüfung der Verbundfestigkeit Metall-Keramik*. Dtsch Zahnärztl Z, 1983. 38: p. 21-25.
136. Schwickerath, H.M., M.A., *Grundlagen zur Prüfung des Verbundes Metall-Keramik*. Dtsch Zahnärztl Z, 1983. 38: p. 949-52.
137. Schmitz, K.S., H. , *Bestimmung der Haftfestigkeit dentaler merallkeramischer Verbundsysteme*. Dent Lab, 1975. 23: p. 1416-20.
138. Schwebke, K., *Investigations of bonding strength of three all-ceramic-systems*. Med.-Diss., Berlin, 2002.
139. Püchner, J., *Der Einfluss der Brenntemperatur auf die Haftfestigkeit von zahnärztlichen merallkeramischen Verbindungen*. . Med.-Diss., Berlin, 1971.
140. ISO, D.E., *Dentistry - Polymer-based crown and bridge materials*. Beuth-Verlag, Berlin, 2004.
141. Fischer, J., *Zirkoniumdioxid und Titan: zwei Gerüstwerkstoffe - eine Verblendkeramik*. DZW Zahntechnik, 2006. 12/06: p. 20-2.
142. Lei, Y.C., *The influence of different thermal expansion coefficient (TEC) between ceramic and metal on thermal stability of porcelain-fused-to metal (PFM) crown*. Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi, 1991. 26: p. 329-32.
143. Mora, G.P.O.B., W., *Thermal shock resistance of core reinforced all-ceramic crown systems*. J Biomed Mater, 1994. 28: p. 189-94.
144. Schnettger, A.Z., I-M; Kappert, H.F. , *Prüfung der Verbundfestigkeit metall-keramischer Systeme*. Quintessenz Zahntechnik, 2006. 36: p. 732-8.
145. Mora, G.P. and W.J. O'Brien, *Thermal shock resistance of core reinforced all-ceramic crown systems*. J Biomed Mater Res, 1994. 28(2): p. 189-94.
146. Anusavice, K.J., et al., *A thermal shock test for porcelain-metal systems*. J Dent Res, 1981. 60(9): p. 1686-91.
147. Eichler, J., *Thermoschockverhalten von Glas*. . Praktikum der Materialwissenschaft I, 1963: p. 1-12.
148. Marx, H., *Zur Frage der Festigkeitsprüfung des Metall-Kunststoff-Verbundes*. Dtsch Zahnärztl Z, 1988. 43: p. 229-36.
149. Dörfler, B.F., P.W.; Fischer, J., *Prüfung dentaler Edelmetall-Gußlegierungen*. Quintessenz Zahntechnik, 1995. 21: p. 813-24.
150. Kappert, H.F.R., W.; Weymann, J., *Eine vergleichende Studie von drei Methoden zur Untersuchung des Metall-Keramik-Verbundes bei NEM-Legierungen*. Dtsch Zahnärztl Z, 1985. 40: p. 1179-86.
151. Voss, R.E., K., *Orientierende Untersuchungen über die Festigkeit merallkeramischer Kronen aus neuen Werkstoffen*. Dtsch Zahnärztl Z, 1978. 33: p. 456-60.
152. Duyck, J.D.C., M.; Puers, R.; Vander Slot, J.; Naert, I., *Threedimensional force measurements on oral implants: a methodological study*. J Oral Rehabil, 2000. 27(29): p. 744-53.
153. Eichner, K., *Messung von Kauvorgängen*. Dtsch Zahnärztl Z, 1963. 18(915-24).
154. Pinheiro, C., *Comparative in vivo an in vitro studies on the biomechanics of maxillary partial dentures. A methodological an d experimental study*. Med-Diss., Lund University Malmö, 1998.
155. Krah, M.t., M., *Thermoschock für Metallkeramiksysteme*. DZW Zahntechnik, 2004. 08-09/04: p. 28-29.
156. VITA Zahnfabrik, H.R.G.C.K., *Arbeitsanweisung Vita VM13*. 2009.
157. DeguDent, *Arbeitsanweisung Duceram Kiss*. 2009.
158. Freesmeyer, W.B.L., W., *Verbundfestigkeit zwischen keramischen Massen und Nichtedelmetallegerungen in Abhängigkeit von der Vorbehandlung des Metallgerüsts* Dtsch Zahnärztl Z, 1982. 37: p. 288-291.
159. Mietko, M., *Vergleich verschiedener Prüfmethode zur Bestimmung der Verbundfestigkeit zwischen einer Kobalt-Chrom-Legierung und einer Verblendkeramik*. Med. Diss. Berlin, 2008.

8 Anhang

8.1 Werkstoffverzeichnis

Werkstoff	Chargennummer
Wirobond C	3368
Wirobond 280	12631
Duceram NE-Bonder	71277
Duceram Liquid NE-Bonder	69948
Duceram Pastenopaker A3	75576
Duceram Kiss Verblendkeramik	71082
Duceram Liquid Modellierflüssigkeit	70632
Vita VM 13 Washopaker	14460
Vita VM13 Pastenopaker	15230
Vita VM 13 Verblendkeramik	21230
Vita Modellierflüssigkeit	29830
Bellavest SH Einbettmasse	0068099

8.2 Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ca.	circa
CAD	Computer added design
CAM	Computer added manufacturing
cm ³	Kubikzentimeter
EG	Europäische Gemeinschaft
E-Modul	Elastizitäts-Modul
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
Fa.	Firma
G	Gramm
GPa	Gigapascal (Einheit des Elastizitätsmoduls)
°C	Grad Celsius
HV10	Vickers-Härte mit einer Prüfkraft von 10 Kilopond
ISO	Internationale Organisation für Normung
K	Einheitenzeichen für Kelvin (Temperaturangabe)
LFC	low fusing ceramic
lt.	laut
m%	Massenprozent
Min.	Minute
Mm	Millimeter
µg/cm ²	Mikrogramm/Quadratzenimeter
µm	Mikrometer
NEM	Nichtedelmetall
MPa	Megapascal
S	Sekunde
Tab.	Tabelle
v. Chr.	vor Christus
Vt°C	Vorwärmtemperatur
WAK	Wärmeausdehnungskoeffizient
z.B.	zum Beispiel

Danksagung

Mein größter Dank geht an Herrn PD Dr. Strietzel, der mir das Thema zur Bearbeitung überlassen hat und der mich in den vergangenen zwei Jahren sehr bei der Erstellung dieser Dissertation unterstützt und geführt hat.

Ich weiß, dass eine solch tolle Betreuung keine Selbstverständlichkeit ist. Vielen Dank!

Desweiteren geht mein Dank an die Firma BEGO. Danke für die Bereitstellung der Materialien und des Laborplatzes. Gleichmaßen bedanke ich mich bei den geduldigen und netten Technikern der Firma BEGO, die mir immer mit offenen Ohren zur Seite standen und mich gut in die Zahntechnik eingeführt haben.

Persönlich bedanke ich mich bei meinem Lebensgefährten Hendrik, der mich privat so viele Stunden entbehren musste, damit diese Arbeit fertiggestellt werden konnte.

Lebenslauf

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

Selbständigkeitserklärung

Ich, Thorsten Hoopmann, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema „Einfluss der Washbrand-Temperatur auf das Temperatur-Wechselastverhalten aufbrennfähiger Cobalt-Chrom-Legierungen“ selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopie anderer Arbeiten dargestellt habe.

Bremen, den 26.08.2012

Thorsten Hoopmann