

Aus der Abteilung für Prothetik
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Vergleichende Untersuchung zum Einfluss der vertikalen
Position des Brennguts in einem Brennofen
auf die Verbundfestigkeit

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Kathrin Klein

aus Berlin

Datum der Promotion: 07.12.2018

Meinen Eltern gewidmet
in Liebe und Dankbarkeit

Inhaltsangabe

I Zusammenfassung	4
II Abstract	6
1 Einleitung.....	7
2 Literaturübersicht.....	9
2.1 Dentallegierungen.....	9
2.1.1 Einteilung von Dentallegierungen	9
2.1.1.1 Einteilung nach der Legierungsbasis	10
2.1.2 Aufbrennfähige Legierungen.....	11
2.1.2.1 Aufbrennfähige Edelmetall-Legierungen.....	12
2.1.2.2 Aufbrennfähige edelmetallfreie Legierungen	13
2.1.3 Eigenschaften der Legierungen	14
2.2 Dentalkeramiken.....	16
2.2.1 Zusammensetzung der Keramik	16
2.2.1.1 Feldspat.....	17
2.2.1.2 Quarz.....	18
2.2.1.3 Kaolin.....	18
2.2.1.4 Weitere Zusätze.....	18
2.2.2 Einteilung von Keramik	19
2.2.2.1 Verblendkeramiken	19
2.2.3 Eigenschaften der Verblendkeramiken	20
2.2.3.1 Pyroplastisches Verhalten	20
2.2.3.2 Wärmeausdehnungsverhalten	21
2.2.3.3 Mechanische Eigenschaften	21
2.2.3.4 Optische Eigenschaften	23
2.2.3.5 Biologische Verträglichkeit.....	23
2.2.4 Aufbrennen der Keramik	24
2.2.4.1 Das Brenngut.....	24
2.2.4.2 Einfluss der Brenntemperatur und der Temperaturführung.....	28
2.2.5 Der Brennofen.....	31
2.3 Haftmechanismen zwischen Metall und Keramik.....	33
2.3.1 Physikalische Kräfte.....	34
2.3.2 Adhäsion	35

2.3.3 Chemische Kräfte.....	35
2.4 Verfahren zur Prüfung der Verbundfestigkeit.....	35
2.4.1 Drei-Punkt-Biegeversuch nach SCHWICKERATH	36
2.4.2 Scherversuch nach SCHMITZ/SCHULMEYER.....	38
2.4.3 Druckversuch nach VOSS	38
2.4.4 Schlagversuch nach DIN 51155.....	39
2.4.5 Versuch nach SHELL/NIELSON (Zug-Scherversuch).....	39
2.4.6 Versuch nach NALLY/BERTA (Zugversuch).....	40
2.5 Ursachen und Fehler für das Versagen des Metall-Keramik-Verbundes	40
2.6 Lebensdauerwahrscheinlichkeit von Metall-Keramik-Systemen	43
2.6.1 In-vitro-Lebensdauerwahrscheinlichkeit	43
2.6.2 In-vivo-Lebensdauerwahrscheinlichkeit	45
3 Fragestellung.....	48
4 Methodik.....	49
4.1 Prüfkörper	49
4.1.1 Herstellung der Metallgerüste	52
4.1.2 Schichten der Keramik	55
4.1.3 Brennen der Keramik	59
4.2 SCHWICKERATH-Test	66
4.2.1 Aufbau.....	66
4.2.2 Durchführung	66
4.2.3 Auswertung der Messergebnisse	67
4.2.4 Auswertung der visuellen Unterschiede	68
4.3 Statistik	69
5 Ergebnisse.....	72
5.1 Ergebnisse Versuch 1: Einfluss der Positionierung	72
5.1.1 Deskriptive Statistik.....	72
5.1.2 Das ANOVA-Modell	76
5.2 Ergebnisse Versuch 2: Einfluss der Temperatur.....	80
5.2.1 Deskriptive Statistik.....	80
5.2.2 Schließende Statistik.....	83
5.2.2.1 Das ANOVA-Modell	83
5.2.2.2 Das Regressionsmodell	84
5.3 Visuelle Untersuchung aller Prüfkörper	86
6 Diskussion	89

6.1 Fehlerdiskussion.....	89
6.1.1 Materialien	89
6.1.1.1 Legierung.....	89
6.1.1.2 Verblendkeramik	89
6.1.1.3 Chargenkonstanz.....	89
6.1.2 Prüfkörperherstellung.....	90
6.1.2.1 Herstellung der Metallplättchen	90
6.1.2.2 Verblendung mit der Keramik	91
6.1.2.3 Die Lage auf dem Brenngutträger.....	92
6.1.2.4 Brennofen	93
6.1.3 Versuchsaufbau	94
6.1.3.1 SCHWICKERATH-Test.....	94
6.1.3.2 Einstellparameter und Fehler der Messapparatur	94
6.2 Reflektion der gewählten Methode	95
6.3 Diskussion der Ergebnisse	98
6.3.1 Ergebnisdiskussion Teil 1	98
6.3.2 Ergebnisdiskussion Teil 2 – veränderte Brenntemperatur.....	101
6.4 Vergleich der Ergebnisse mit den Literaturwerten	103
6.5 Bedeutung für die Praxis und Schlussfolgerung	103
7 Literaturverzeichnis	106
8 Anhang	118
8.1 Verwendete zusätzliche Materialien und Geräte.....	118
8.2 Eidesstattliche Versicherung.....	119
8.3 Lebenslauf	120
Danksagung	121

I Zusammenfassung

Einleitung: Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es herauszufinden, ob die horizontale und insbesondere vertikale Position der Objekte im Keramikofen Einfluss auf die Verbundfestigkeit hat.

Methodik: Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit wurden hierzu im Keramikbrennofen Programat® EP 3000 auf drei verschiedenen Ebenen (Ebene 1: der Brenngutträger liegt direkt der Aufnahmeplatte auf, Ebene 2 und 3: der Brenngutträger hat einen Abstand von 1,5 bzw. 3 cm zur Aufnahmeplatte) jeweils sechs Gruppen SCHWICKERATH-Plättchen an verschiedenen horizontalen Positionen im Brennofen gebrannt. Sie wurden gemäß ihren Positionen Gruppe links, Gruppe hinten, Gruppe Mitte 1, Gruppe Mitte 2, Gruppe rechts, Gruppe vorne mit der jeweiligen Ebene (1, 2 oder 3) als zusätzliche Bezeichnung benannt. Eine Gruppe bestand aus sieben Prüfkörpern, wobei jeder Prüfkörper stets an seiner festgelegten Position die Brennvorgänge durchlief.

Im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit wurde ein Unter- und Überbrennen simuliert, indem an zwei horizontalen Positionen je sechs Gruppen bei von den Herstellerangaben abweichenden Temperaturen (-20 °C, -50 °C, -100 °C, +20 °C, +50 °C und +100 °C) und je eine Gruppe nach Herstellerangaben als Referenzwert gebrannt wurden. Jede Gruppe bestand auch hier aus sieben Prüfkörpern entsprechend ihrer horizontalen Position und nach der abweichenden Temperatur bzw. als Gruppen GA (nach Gebrauchsanweisung) benannt. Die Brennvorgänge durchliefen die Prüfkörper an ihren festgelegten Positionen (seitlich und mittig), wobei der Brenngutträger der Aufnahmeplatte direkt auflag. Die Verbundfestigkeit wurde mithilfe des SCHWICKERATH-Tests ermittelt [1].

Ergebnisse: Die ermittelten Scherverbundfestigkeitswerte lagen im ersten Versuchsteil oberhalb der Mindestanforderung von 25 MPa (durchschnittliche Werte Ebene 1: 43,93 MPa; Ebene 2: 45,77 MPa; Ebene 3: 44,56 MPa). Die Unterschiede erwiesen sich zu meist als nicht signifikant ($p > 0,05$). Es war kein signifikanter Unterschied zwischen den drei Ebenen bezüglich der Scherverbundfestigkeitswerte festzustellen ($p > 0,05$). Auch visuell waren keine Unterschiede wahrzunehmen. Beim Abweichen von der Gebrauchsanweisung zeigten sich Veränderungen in der Verbundfestigkeit und im Glanzverhalten. Mit Ausnahme der Gruppen, die bei 100 °C erniedrigter Temperatur gesintert wurden lagen alle Verbundfestigkeitswerte oberhalb der Mindestanforderungen von 25

MPa (31,28 MPa-54,29 MPa). Alle Gruppen, die oberhalb der vom Hersteller empfohlenen Temperaturen lagen, zeigten zunehmend höhere Verbundfestigkeitswerte bei steigender Temperatur.

Die unterbrannten Gruppen hatten eine matte Oberfläche und zeigten ein geringes Glanzverhalten. Die überbrannten Gruppen zeigten sich stärker im Glanzverhalten, umso deutlicher je höher die Brenntemperatur war.

Schlussfolgerung: Es lässt sich also folgern, dass die Position im Brennofen, ob horizontal oder vertikal, keinen Einfluss auf die Verbundfestigkeit und das optische Erscheinungsbild hat, sofern nach Herstellerangaben gebrannt wird.

II Abstract

Objectives: The aim of this study was to find out if the horizontal and especially the vertical position of the objects in the ceramic furnace has an effect on the bond strength.

Methods: In the first part of this study, six groups of SCHWICKERATH plates were fired in the Programat® EP 3000 ceramic furnace at three different horizontal levels (level 1: the firing tray lies directly on the base plate, levels 2 and 3: the firing tray has a distance of 1.5 and 3 cm, respectively, from the base plate). They were named for their positions on the respective level, group left, group rear, group middle 1, group middle 2, group right, group front (1, 2, or 3). A group consisted of seven test objects, each test object always went through the firing processes in its prescribed position.

In the second part of this study underfiring and overfiring were simulated. Six groups were fired in two horizontal positions at temperatures deviating from the manufacturers' instructions (-20 °C, -50 °C, -100 °C, +20 °C, +50 °C and +100 °C) and one group each according with the manufacturers' instructions as a reference value. Each group consisted of seven test objects named according to their horizontal position and the deviant temperature or as group GA (manufacturers' instructions). They went through the firing processes in their stipulated positions (side and center).

The bond strength was determined with the aid of the SCHWICKERATH test [1].

Results: In the first part of this study the bond strengths were above the minimum requirement of 25 MPa (average values level 1: 43,93 MPa; level 2: 45,77 MPa; level 3: 44,56 MPa). The differences were primarily insignificant ($p > 0,05$). No significant difference ($p > 0,05$) was noted between the three levels with regard to the bond strength. There were no visible differences. When deviating from the firing conditions, there were differences in bond strength and the level of shine. Except for the groups -100 °C, all bond strength values met the minimum requirements of 25 MPa (31,28 MPa-54,29 MPa). all groups fired above the manufacturers' instructions indicated higher bond strength, the higher the temperature was.

The underfired groups had a matte surface. The overfired groups had more shine the higher the firing temperature was.

Conclusion: The position in the ceramic furnace, horizontal or vertical, has no effect on the bond strength and visual appearance, if fired according to manufacturers' instructions.

1 Einleitung

Bereits in der Mitte des 18. Jahrhunderts wurde angestrebt, den ästhetisch hochwertigen Werkstoff Keramik, der optisch der natürlichen Zahnkrone sehr nahe kommt, klinisch, d. h. für die Patientenbehandlung, nutzbar zu machen. Der Franzose FAUCHARD beschrieb schon 1733 eine Emailletechnik [2]. Seit ihrer Einführung in Deutschland Mitte der 1960er-Jahre [3] sind die Metall-Keramik-Systeme aus dem Praxisalltag nicht mehr wegzudenken.

Im Gegensatz zu mit Kunststoff verblendetem Zahnersatz erzielt die sogenannte Metallkeramik sowohl in der Abrasionsfestigkeit als auch der Farbbeständigkeit beständigere Resultate. Bei Verblendkunststoffen besteht durch endogene und exogene Ursachen die Möglichkeit des Verfärbens, wie etwa durch eine Änderung der chemischen Struktur des Kunststoffs selbst als auch durch die in der Mundhöhle vorkommenden Stoffe (Speichel, Nahrungsfarbstoffe wie z. B. Kaffee und Tabak) [4]. Ein weiterer Nachteil ist die erhöhte Plaqueakkumulation der mit Komposit verblendeten Kronen im Vergleich zu den keramikverblendeten Kronen [5].

Obwohl vollkeramische Restaurationen zunehmend an Popularität gewinnen [6, 7], stellen keramisch verblendete Metallgerüste bei der Erfordernis zahnfarbener festsitzender Restaurationen in der Regel das Mittel der ersten Wahl und bei weitem die häufigste Form zahnfarbener Kronen- und Brückenversorgungen dar [2, 8, 6, 9]. Werden sehr hohe und ästhetische Anforderungen gestellt, z. B. Einzelkronen im Frontzahnbereich, konkurriert der keramisch verblendete Zahnersatz mit vollkeramischen Systemen [2], die aufgrund einer höheren Transluzenz ein natürlicheres Ergebnis erzielen.

Obwohl sich Metall und Keramik im Verbundsystem seit nunmehr bald 50 Jahren als funktionell erfolgreiche Restauration bewährt haben und heute als Standard für zahnfarbenen Zahnersatz angesehen werden [10], kommt es immer wieder zu Misserfolgen. Sprünge und Abplatzungen sind sowohl für den Patienten als auch für den behandelnden Zahnarzt ärgerlich. Traumata, Primärkontakte, Fehler bei der Stumpfabformung, aber auch Verarbeitungsfehler können zu Frakturen in der keramischen Verblendung führen [11]. Zwar ist eine Reparatur von kleineren Defekten mithilfe von geeigneten Kunststoff-Systemen bedingt möglich, jedoch ergaben Untersuchungen mit intraoral angewendeten Reparaturmaterialien geringere Festigkeitswerte als die Scherfestigkeit der keramisch verblendeten Metallgerüste [11]. Auch spricht im Vergleich zur Keramik

die Tendenz dieser Materialien, sich in der Mundhöhle zu verfärben und auszubleichen langfristig gegen dieses Verfahren. Oftmals ist dann nur noch eine Neuanfertigung sinnvoll.

Ein Misserfolg fällt stets auf den Zahnarzt zurück. Er ist für die Auswahl einer geeigneten Legierung und Keramik verantwortlich. Bei allen verlässlichen technischen Daten der Legierung ist und bleibt der Zahnersatz ein individuell angefertigtes Werkstück. Kommt es zu einer Fraktur im Metall-Keramik-Verbund, ist es oft müßig zu eruieren, an welchem Punkt der Herstellung des Zahnersatzes ein Fehler unterlaufen ist. Liegt bereits ein Fehler in Form der Präparation oder der Art der Abformung vor oder ist der Fehler labortechnisch bzw. auf Materialeigenschaften zurückzuführen?

Das Ziel muss es sein, eine Optimierung der Verbundfestigkeit zwischen Metall und Keramik zu erreichen, um ein Frakturrisiko von vornherein so weit wie möglich zu minimieren. In Bezug auf ein Versagen des Metall-Keramik-Verbunds aus zahntechnischer Sicht stellt sich auch die Frage, inwiefern der Keramikofen eine Rolle spielt, wie etwa die Position des Brennguts im Keramikofen zur Verbundfestigkeit beiträgt.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, herauszufinden, ob und inwieweit die vertikale und horizontale Platzierung der Objekte im Keramikofen Einfluss auf die Verbundfestigkeit und das optische Erscheinungsbild nimmt.

2 Literaturübersicht

2.1 Dentallegierungen

Metalle in ihrer reinen Form werden in der Zahntechnik und Zahnmedizin äußerst selten verwendet (Ausnahmen: Gold zur Herstellung von gehämmerten Füllungen, Galvanotechnik, Titan) [12]. Reine Metalle weisen eine nur geringe mechanische Stabilität auf [13]. Auch sind sie meist nicht ausreichend biokompatibel. Für die dentale Anwendung in vivo sind sie daher wenig geeignet.

Im Allgemeinen kommen Legierungen zum Einsatz. Unter Legierungen versteht man Mischungen von Metallen mit anderen Metallen oder Nichtmetallen [12, 14], wobei aber der Hauptbestandteil einer Legierung in jedem Fall ein Metall ist [15]. Legierungen haben auch dann metallische Eigenschaften, wenn sie Nichtmetalle enthalten [12]. Die einzelnen Bestandteile einer Legierung werden als Legierungskomponenten bezeichnet [12], wobei die Legierungsbasis das Metall mit dem höchsten Anteil ist [13]. Nach ihm wird der Legierungstyp benannt [15]. Durch das Legieren von Metallen werden verschiedene Eigenschaften beeinflusst. Dazu zählen das Schmelzintervall, welches die Verarbeitbarkeit der Legierung charakterisiert, der Wärmeausdehnungskoeffizient (WAK), die technische Verarbeitbarkeit, mechanische Eigenschaften wie Härte, Elastizitätsmodul (E-Modul), 0,2 % Dehngrenze und Bruchdehnung [16] sowie das Korrosionsverhalten [13], welches entscheidend für die Mundbeständigkeit ist. Um Dentallegierungen bewerten und indikationsgerecht auswählen zu können, ist es notwendig, diese klinisch relevanten Bewertungskriterien zu berücksichtigen [16].

2.1.1 Einteilung von Dentallegierungen

Dentallegierungen werden üblicherweise nach der Legierungsbasis, der Möglichkeit einer keramischen Verblendung sowie dem Indikationsbereich unterteilt [13]. Bei Letzterem werden sechs Beanspruchungsklassen unterschieden:

- Typ 0: Vorgesehen für festsitzenden Einzelzahnersatz mit geringer Belastung, z. B. kleine verblendete einflächige Inlays und verblendete Kronen;
- Typ 1: Vorgesehen für festsitzenden Einzelzahnersatz mit geringer Belastung, z. B. verblendete oder nicht verblendete einflächige Inlays und verblendete Kronen;

- Typ 2: Vorgesehen für festsitzenden Einzelzahnersatz, z. B. Kronen und Inlays, bei denen die Anzahl der Flächen nicht eingeschränkt wird;
- Typ 3: Vorgesehen für festsitzenden mehrgliedrigen Zahnersatz, z. B. Brücken;
- Typ 4: Vorgesehen für Vorrichtungen mit dünnen Querschnitten, die sehr hohen Belastungen ausgesetzt sind, z. B. herausnehmbaren Teilprothesen, Klammern, verblendete Kronen, große Brücken oder Brücken mit kleinen Querschnitten, Stege, Befestigungen, implantatgetragene Suprakonstruktionen;
- Typ 5: Vorgesehen bei Vorrichtungen, bei denen Teile der Vorrichtung eine Kombination aus hoher Steifigkeit und Festigkeit erfordern, z. B. dünne herausnehmbare Teilprothesen, Teile mit dünnen Querschnitten, Klammern [17].

2.1.1.1 Einteilung nach der Legierungsbasis

Da Dentallegierungen nach ihren Hauptbestandteilen (Legierungsbasis) unterschieden werden, ergeben sich zwei Hauptgruppen. Diese sind die Edelmetalllegierungen (EM-Legierungen) und die Nichtedelmetalllegierungen (NEM-Legierungen). Allerdings steht letztere Abkürzung auch für **Nichteisen-Metalle** [18], jedoch hat sich diese Bezeichnung in der Zahnheilkunde verfestigt.

Die Nichtedelmetalllegierungen können jedoch geringe Mengen an Edelmetallen enthalten [18]. Sind die NEM-Legierungen gänzlich frei von Edelmetallen, so spricht man auch von edelmetallfreien Legierungen (EMF-Legierungen) [15].

Zu den Edelmetalllegierungen zählen solche mit Gold (Au), Palladium (Pd) und, allerdings nur eingeschränkt indiziert, Silber (Ag) als Legierungsbasis. Für die Nichtedelmetalllegierungen eignen sich Eisen (Fe), Nickel (Ni) und Kobalt (Co) als Legierungsbasis mit Chromanteilen zwischen 10 % und 30 % zum Erhalt einer Passivierungsschicht [13]. Die Einteilung der Dentallegierungen nach ihrer Zusammensetzung zeigt Tabelle I. Hierbei sind auch die reinen Metalle Gold und Titan (Ti) aufgeführt. Ersteres findet Verwendung in der Galvano-Technik sowie bei Goldhämmerfüllungen, reines Titan wird für Implantate und als Gerüstmaterial für Kronen und Brücken verwendet.

Tab. I Einteilung der Dentallegierungen nach ihrer Zusammensetzung

EM-Legierungen	EMF-Legierungen
Gold und Goldlegierungen Rein-Gold Hochgoldhaltig Goldreduziert Palladiumlegierungen Kupferhaltig (Cu) Silberhaltig Silberlegierungen Silber-Palladium-Legierungen Silber-Goldlegierungen	Nickellegierungen Nickel-Chrom-Legierungen Nickel-Titan-Legierungen Kobaltlegierungen für die Modellgusstechnik für die Kronen und Brückentechnik Titan und Titanlegierungen Reintitan Titanlegierungen Eisenlegierungen Stähle

2.1.2 Aufbrennfähige Legierungen

Legierungen, die zur Herstellung eines keramisch verblendeten Zahnersatzes geeignet sind, werden als aufbrennfähige Legierungen bezeichnet. Für die Zahnmedizin steht eine Vielzahl an aufbrennfähigen Legierungen zur Verfügung. Diese Legierungsvielzahl und Legierungsvielfalt kommt in den Auflistungen des Dental-Vademekums zum Ausdruck [16]. Das Angebot liegt bei weit über 500 Legierungen, die für eine keramische Verblendung geeignet sind.

Um eine Verformung des Metallgerüsts beim Aufbrennen der Keramik zu vermeiden, ist es erforderlich, dass die Legierung eine ausreichend hohe Solidustemperatur, mindestens 150 °C über der Brenntemperatur der Keramik, aufweist [16, 19].

Voraussetzung für einen optimalen Haftverbund im Metall-Keramiksystem sind aufeinander abgestimmte Schmelzintervalle und die Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) von Metall und Keramik [20]. Auch wird der Haftverbund zwischen Metall und Keramik durch den E-Modul der Legierung beeinflusst. Ein niedriger E-Modul bewirkt, dass die Spannungen an der Verbundfläche ansteigen, was negative Auswirkungen auf den Metall-Keramikverbund hat. Um stabile Gerüste für keramisch verblendeten Zahnersatz herstellen zu können, sollten Legierungen verwendet werden, die einen möglichst hohen E-Modul besitzen. Für chemische Bindungen zwischen Metall und Keramik müssen Haftoxidbildner hinzulegiert werden, die mit der Keramik reagieren [20].

2.1.2.1 Aufbrennfähige Edelmetall-Legierungen

Um für das Aufbrennen der Keramik die erforderliche Solidustemperatur von mehr als 1100 °C zu erreichen, muss Platin (Pt) bzw. Palladium (Pd) hinzulegiert werden. Platin und Palladium beeinflussen auch den WAK der Legierung, sie erhöhen Härte und Dehngrenze. Das Hinzulegiere von Platin bzw. Palladium hat allerdings den Nachteil, dass es beim Erstarren der Schmelze zur Entmischung kommen kann, weshalb der Legierung als Feinkornbildner für die Bildung eines homogenen Gefüges Ruthenium (Ru) und Iridium (Ir) beigemischt werden [16]. Als Haftoxidbildner werden bei den EM-Legierungen Nichtedelmetalle wie z. B. Indium (In), Gallium (Ga), Zinn (Sn), aber auch Eisen (Fe) oder Mangan (Mn) hinzulegiert [20]. Diese unedlen Elemente sind auch für die in Kapitel 2.1.2 erwähnte Bildung einer Haftoxidschicht an der Grenzfläche zur Keramik verantwortlich [16]. Der WAK sollte im Temperaturbereich zwischen 20 °C und 600 °C etwa $14-15 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ betragen [16]. Für hoch expandierende Legierungs-Keramik-Systeme (low fusing ceramic=LFC) liegt der WAK der Legierung bei etwa $16-17 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ [15].

Abb. 1 zeigt übersichtlich die Einteilung aufbrennfähiger Edelmetall-Legierungen.

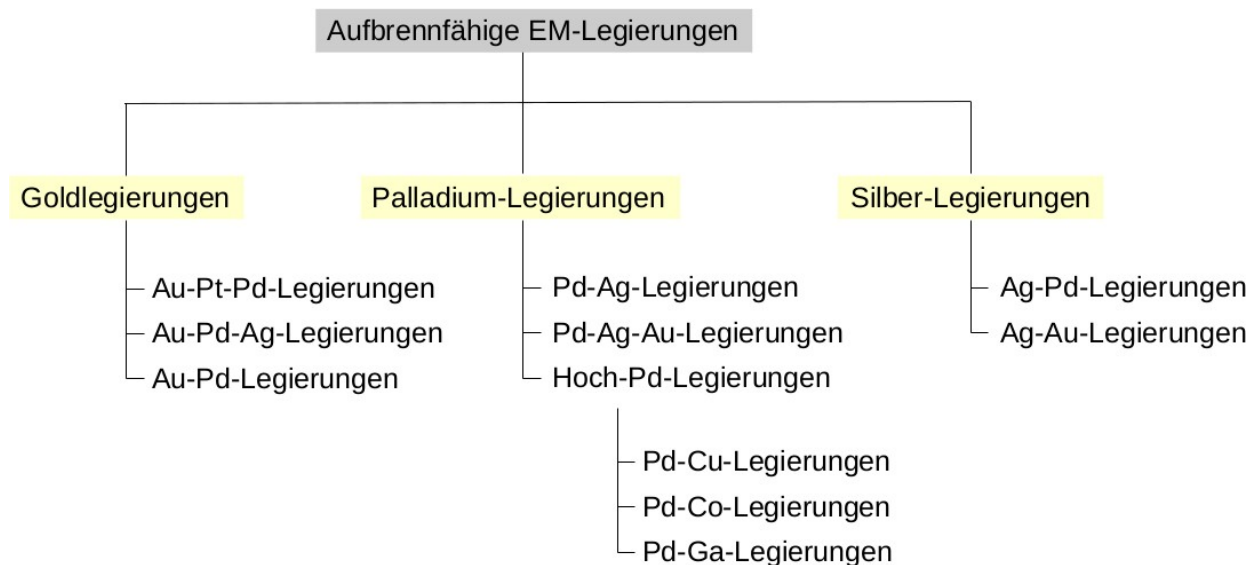


Abb. 1: Übersicht aufbrennfähige EM-Legierungen [19]

2.1.2.2 Aufbrennfähige edelmetallfreie Legierungen

Eine wirtschaftliche Alternative zu den Edelmetall-Legierungen stellen die EMF-Legierungen dar. Aber nicht nur die Kosten für Edelmetall-Legierungen sprechen für die Verwendung von EMF-Legierungen.

EMF-Legierungen haben ausgezeichnete physikalische Eigenschaften [19]. Neben den ökonomischen Aspekten werden EMF-Legierungen aus werkstoffkundlicher Sicht gegenüber den Edelmetall-Legierungen durch ihre höhere Zugfestigkeit, ausgezeichnete Härte, ihren höheren Elastizitätsmodul und ihre höhere Warmfestigkeit (die Formstabilität der Legierung unter Wärmeeinwirkung) als vorteilhaft angesehen [18, 7, 21]. Je höher der E-Modul und je höher die 0,2 % Dehngrenze, desto stärker muss die Kraft sein, der es bedarf, die Gerüstkonstruktion zu deformieren [22]. Der im Vergleich zu den Edelmetall-Legierungen höhere E-Modul der EMF-Legierungen - er ist etwa doppelt so hoch - ermöglicht eine grazilere Gerüstgestaltung [18, 22]. Den aufbrennfähigen EMF-Legierungen ist als Haftoxidbildner Chrom hinzulegiert [20]. Die auch Passivierungsschicht genannte oxidische Deckschicht kommt zustande, indem das Chrom mit dem Sauerstoff an der Oberfläche reagiert [13]. Die EMF-Legierungen oxidieren leichter und stärker als Edelmetall-Legierungen und ihr dunkles Oxid an der Gerüstoberfläche muss durch eine deutlich dickere Opakerschicht als bei den Edelmetall-Legierungen abgedeckt werden [22].

Abb. 2 veranschaulicht die Einteilung aufbrennfähiger EMF-Legierungen.

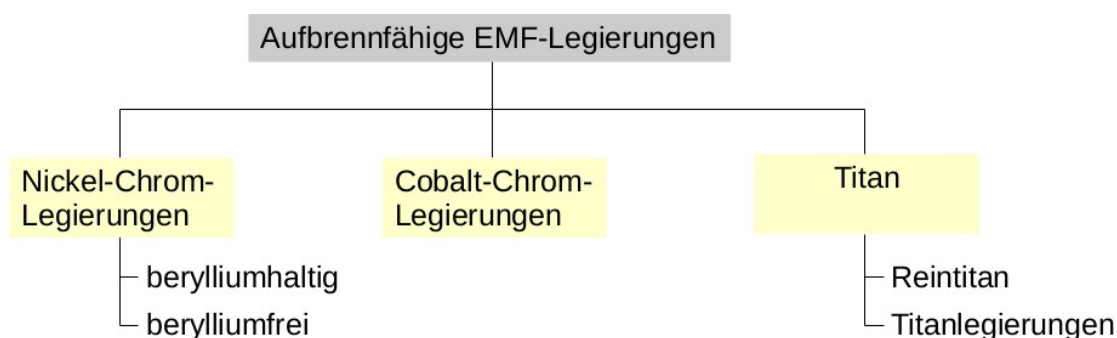


Abb. 2: Übersicht aufbrennfähige EMF-Legierungen [19]

2.1.3 Eigenschaften der Legierungen

Bei den aufbrennfähigen Dentallegierungen wird zwischen physikalischen und chemischen Eigenschaften unterschieden. Zu den physikalischen zählen Schmelzintervall, WAK, Warmfestigkeit, Härte, optische Eigenschaften und mechanische Eigenschaften. Die mechanischen Eigenschaften einer dentalen Gusslegierung werden durch die Härteprüfung nach Vickers und durch Zugversuche bestimmt. Insbesondere aus den Zugversuchen werden die für das klinische Verhalten und klinischen Langzeiterfolg wichtigen Werte des Elastizitätsmoduls und der Dehngrenze ermittelt [23].

Schmelzintervall

Es charakterisiert den Übergang zwischen dem festen und flüssigen Zustand. Diese Grenze wird in der Praxis durch Abkühlkurven bestimmt [15]. Zur Ermittlung der Abkühlkurve wird die Legierung aufgeschmolzen und anschließend die Temperaturabnahme über die Zeit aufgezeichnet [15]. Im Vergleich zu reinen Metallen, bei denen die Liquidustemperatur gleich der Solidustemperatur ist [18], ist bei Legierungen die Solidustemperatur niedriger als die Liquidustemperatur. Das Wissen über das Schmelzintervall der Legierung ist Voraussetzung für die Wahl einer geeigneten Verblendkeramik.

Wärmeausdehnungskoeffizient

Alle Metalle und Legierungen dehnen sich beim Erwärmen aus, wobei das Ausmaß der Vergrößerung durch den Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) physikalisch beschrieben wird [12]. Der lineare WAK gibt an, um wie viel μm sich ein 1 m langer Stab eines Materials bei Erhöhung bzw. Erniedrigung der Temperatur um 1 °C ausdehnt bzw. zusammenzieht [15]. Der WAK des Metalls muss stets höher sein als der der Aufbrennkeramik.

Warmfestigkeit

Die Warmfestigkeit beschreibt die Festigkeit der Legierung bei stark erhöhter Temperatur [13]. Aufbrennfähige Dentallegierungen müssen eine hohe Hochtemperaturfestigkeit aufweisen, um bei hohen Brenntemperaturen im Keramikofen formstabil zu bleiben [13].

Härte

Als Härte ist der Widerstand definiert, den ein Werkstoff einem eindringenden Körper entgegensetzt. U. a. beeinflusst die Härte das Abrasionsverhalten [13].

Bei der Härte handelt es sich um eine reine Oberflächeneigenschaft [15].

Elastizität

Elastizität ist definiert als die Fähigkeit eines Stoffes, nach Wegnahme der verformenden Kräfte in die Ausgangsform zurückzukehren. Sie wird durch den Elastizitätsmodul angegeben [12]. Er gibt an, wie viel Spannung notwendig ist, um einen Draht mit einem Querschnitt von 1 mm auf seine doppelte Ausgangslänge elastisch zu dehnen [12]. Es handelt sich um den Widerstand eines Stoffes gegen seine elastische Verformung. Die Elastizitätsgrenze ist die Grenzspannung, bei der nach einer Entlastung einer Zugprobe noch keine bleibende Formänderung nachweisbar ist [13].

0,2 % Dehngrenze

Die 0,2 % Dehngrenze ist als die Spannung definiert, die erforderlich ist, um am Prüfkörper eine bleibende plastische Verformung von 0,2 % zu erreichen [12]. Sie legt den Übergang zwischen elastischer und plastischer Verformung fest [15]. Unterhalb dieser Dehngrenze stellt sich der Prüfkörper vollständig in seine Ausgangslage zurück. Wird die 0,2 % Dehngrenze überschritten, ist die Restauration irreversibel verformt und damit unbrauchbar [15].

Festigkeit/Zugfestigkeit

Die Festigkeit ist der Widerstand eines Stoffes, den er seiner Zusammenhangstrennung durch mechanische Kräfte entgegensetzt (Trennfestigkeit). Nach der Art der Kräfte, denen ein solcher Widerstand entgegengesetzt wird, unterscheidet man u. a. Zugfestigkeit, Biegefestigkeit, Druckfestigkeit und Dauerbiegefestigkeit. Die Zugfestigkeit gibt die maximale Belastbarkeit eines Werkstoffs an. Die Legierung ist umso stärker belastbar, je höher die Zugfestigkeit ist [24].

Bruchdehnung

Die Bruchdehnung ist das Verhältnis zwischen der Anfangslänge des Prüfkörpers und dessen Verlängerung bei Bruch im Zugversuch. Sie wird in Prozent angegeben [12]. Je höher dieser Wert ist, desto stärker lässt sich das Material dehnen [15].

Korrosion

Als Korrosion wird die Grenzflächenreaktion eines Metalls mit seiner Umgebung (flüssig oder gasförmig) bezeichnet, die eine messbare Veränderung hervorruft und zu einer Beeinträchtigung führt [13, 25]. An der Phasengrenze zwischen einem Metall und einem Elektrolyten treten Wechselwirkungen auf, die mit Ladungstransport verbunden sind [18]. Versuche von SCHWICKERATH haben gezeigt, dass die Freisetzungsraten von Ionen mit zunehmender Einlagerungszeit in einer Korrosionslösung abnimmt [26]. Auf der Oberfläche von Nichtedelmetalllegierungen bilden sich Deckschichten, welche die Löslichkeit herabsetzen. Maßgeblich daran beteiligt ist der Anteil an Chrom und Molybdän. Sie bilden die so genannte Passivierungsschicht [26]. Von geringfügigen ästhetischen Beeinträchtigungen abgesehen, sind das Hauptproblem der Korrosion die Korrosionsprodukte, die gelöst in den Organismus gelangen und lokal-toxische und allergische Reaktionen auslösen können [13]. Deshalb ist zu empfehlen, aufbrennfähige Dentallegerungen zu verwenden, die auch nach längerer Einlagerungszeit nur geringe Löslichkeit zeigen, um das Risiko dieser Reaktionen zu minimieren [27]. Es empfiehlt sich, die erhöhten Korrosionsraten nach dem Keramikbrand durch einen Abtrag von 20 µm und durch eine Politur der nicht von der Keramik bedeckten Bereiche des Zahnersatzes zu vermindern. Um eine exakte Kronenpassung zu erreichen, ist aus diesem Grund eine leichte Übermodellation der Kronenränder notwendig [27].

2.2 Dentalkeramiken

2.2.1 Zusammensetzung der Keramik

Keramische Werkstoffe sind als Silikate Verbindungen der Kieselsäure in einer Vielzahl von Modifikationen und Zusammensetzungen und können zusammensetzungs- und strukturabhängig als Feldspatgläser mit kristallinen Anteilen, Oxidkeramiken und Spezialemaillen bezeichnet werden, da anorganische Festkörper dieser Art auf supramolekularer Strukturebene sowohl kristallin (Keramik-Merkmal) als auch quasiamorph (Glas-Merkmal) aufgebaut sind [18]. Die Hauptbestandteile der dentalkeramischen Massen sind Feldspat und Quarz. Kaolin, das eine der wichtigsten Komponenten der Haushaltsporzellane ist, kommt prozentual nur geringfügig in dentalen Keramikmassen vor [18]. Aufgrund des hohen Anteils an Feldspat und Quarz ist sie den Glaskeramiken zuzuordnen. Die Brenntemperatur kann durch den Glasanteil verringert werden, wobei die

Transluzenz erhöht wird [13]. Eine Übersicht über die Zusammensetzung von Dentalkeramik und Porzellan im Vergleich zeigt Tabelle II.

Tab. II: Zusammensetzung von Dentalkeramik und Porzellan im Vergleich [28]

Anteile	Dentalkeramik Gewichtsprozente	Porzellan Gewichtsprozente
Feldspat	70-80	10-30
Quarz	10-30	15-35
Kaolin	0-5	40-70

Zur Verbesserung der Bruch- und Haftfestigkeit sowie der Farbgebung sind verschiedene Metalloxide beigemischt. Flussmittel wie Kaliumoxid, Natriumoxid und Kalziumoxid sollen die Fließfähigkeit der keramischen Masse erhöhen. Außerdem werden die Schmelzintervalle z. B. des Quarzes gesenkt [15]. All diese Rohstoffe werden gemischt und gebrannt. Es entstehen sogenannte Fritten, die zu einem feinen Pulver gemahlen werden. Durch diese Vorbehandlung wird eine Entmischung der Komponenten während des Transports und der Lagerung des Pulvers sicher vermieden [29].

2.2.1.1 Feldspat

Feldspat ist der Hauptbestandteil dentalkeramischer Massen und ein Mischkristallsystem [18]. Dieses besteht aus:

- Kalifeldspat (Orthoklas), $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6 SiO_2$
- Natronfeldspat (Albit), $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$
- Kalkfeldspat (Anorthit), $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2$

Feldspate sind auf der Erde weit verbreitet und kommen in der Natur als gesteinsbildende Minerale vor [18, 15]. Es handelt sich um Gerüstsilikate, deren dreidimensionale Netzwerke grundsätzlich aus Silikattetraedern bestehen, in deren Zentrum sich ein Siliziumatom befindet und deren Eckpunkte mit Sauerstoffatomen besetzt sind [15]. Kalifeldspat, der die größte Bedeutung zur Herstellung von Verblendkeramiken hat, unterstützt außerdem das Abrasionsverhalten und die chemische Beständigkeit im oralen System [30]. Zudem verleiht er der Dentalkeramik eine hohe Härte und eine geringe Wärmeleitdehnung [31]. Kalifeldspat und Natronfeldspat haben annähernd die gleichen Schmelztemperaturen (1150 °C). Im Gegensatz zu Natronfeldspat, der vollständig

schmilzt, bildet Kalifeldspat in der schmelzflüssigen Phase Leuzitkristalle ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4 SiO_2$) [28]. Bei 1520 °C gehen auch die Leuzitkristalle in Lösung [18]. Leuzit ist für die Standfestigkeit dentalkeramischer Massen verantwortlich. Damit bleibt die Form der Brennobjekte auch bei hohen Temperaturen erhalten, die modellierte Form zerfließt während des Sinterns nicht. Zudem erhöht Leuzit den WAK [15, 18, 30, 31, 32].

2.2.1.2 Quarz

Quarz, chemisch Siliziumdioxid (SiO_2), ist das am häufigsten verbreitete Mineral der Erde [18]. Sein Schmelzpunkt liegt zwischen 1400 und 1600 °C [15]. In keramischen Massen dient Quarz als Magerungsmittel und verringert durch sein thermovolumetrisches Verhalten die Schwindung [18]. Quarz wird den dentalkeramischen Massen hinzu gegeben, um den Anteil an Glasphase und damit die Transparenz zu erhöhen [30].

2.2.1.3 Kaolin

Chemisch gesehen ist Kaolin Aluminiumsilikat ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot H_2O$) und in dentalkeramischen Massen nur noch, im Gegensatz zum Haushaltsporzellan, wenig enthalten. Es verleiht der Porzellanmasse Plastizität und Formbarkeit, indem es mit Wasser ein modellierfähiges System bildet [18]. Die Formbeständigkeit beim Keramikbrand kommt durch den hohen Schmelzpunkt (1750 °C) zustande [18].

2.2.1.4 Weitere Zusätze

Neben den Hauptbestandteilen enthalten dentalkeramische Massen eine Reihe von Nebenbestandteilen. Durch **Flussmittelzusätze** wie Kaliumkarbonat, Natriumkarbonat, Kaliumphosphat, Borax sowie Kalium- und Magnesiumoxid lassen sich erhebliche Verringerungen der Schmelz- und Erweichungstemperaturen erreichen [18]. Um ein natürliches Ergebnis zu erzielen, müssen den dentalkeramischen Massen **Farbzusätze** und **Trübungsmittel** beigemischt sein. Eine Einfärbung erfolgt mithilfe von brennfesten Metalloxiden und Metallsalzen wie z. B. von Eisen (für eine rötliche Färbung), Chrom (für einen grünlichen Farbton) und Kobalt (für eine bläuliche Färbung) [18, 15]. Metalloxide werden außerdem als Trübungsmittel eingesetzt. Auf diese Weise wird gleichermaßen die Transparenz und Opaleszenz eingestellt [30]. **Fluoreszenz** wird in dentalkeramischen Massen durch die Zugabe von Samariumsalzen oder Magnesium-Aluminiumoxid

imitiert. Fluoreszenz ist das Eigenleuchten eines Werkstoffes, wenn er mit elektromagnetischen Wellen angeregt wird [13, 15]. Eine Steigerung der „inneren“ Festigkeit wird vornehmlich durch beigegebene oder induzierte **gefügeverstärkende Kristallite** erreicht. Hierbei werden hochschmelzende feste Oxide des Siliziums, Aluminiums, Magnesiums und des Zirkons, Leuzit, Glimmer und Hydroxylapatit genutzt [18].

2.2.2 Einteilung von Keramik

Dentalkeramiken lassen sich nach verschiedenen Kriterien einteilen (s. Abb. 3). In der Zahntechnik üblich ist die Einteilung nach der Art der Verwendung. Hierbei werden Gerüstkeramiken von den Verblendkeramiken unterschieden [15]. Weitere Einteilungskriterien sind die Art der Zusammensetzung (Metalloxid- oder Silikat-Basis), die Art der Herstellung (Gießen, Pressen, Sintern, CAD/CAM) und die Befestigungsart (adhäsiv oder mit Zement) [15]. Eine Einteilung kann außerdem in hochbrennende (Sintertemperatur: >900 °C), mittelbrennende (Sintertemperatur: 800-900 °C) und niedrigbrennende Keramik (Sintertemperatur: <800 °C) erfolgen [13].



Abb. 3: Einteilung Dentalkeramiken

2.2.2.1 Verblendkeramiken

Dentale Verblendkeramiken werden derzeit in fünf Typen eingeteilt, die sich in der Aufbrenntemperatur und dem WAK unterscheiden. Sie sind in Tab. III zur Übersicht dargestellt [15].

Tab. III: Klassifizierung von Verblendkeramiken nach ihren WAK-Werten [15]

Keramiktyp	WAK
Konventionelle Keramiken (z. B. Response, Omega 900, d. Sign etc.)	14 [$10^{-6} \cdot K^{-1}$]
LFC-Keramiken (z. B. Response, Ducera Gold, Carrara Vincent etc.)	16 [$10^{-6} \cdot K^{-1}$]
Titankeramiken	10 [$10^{-6} \cdot K^{-1}$]
Keramiken für Zirkoniumdioxid	9 [$10^{-6} \cdot K^{-1}$]
Keramiken für Aluminiumoxid	7 [$10^{-6} \cdot K^{-1}$]

2.2.3 Eigenschaften der Verblendkeramiken

Strukturell betrachtet bestehen dentalkeramische Massen aus einer Glasmatrix mit darin eingegliederten kristallinen Strukturen. Die Eigenschaften der dentalkeramischen Massen werden von Art, Anteil, Verteilung, Form und Verbund der Gefügebestandteile bestimmt [18].

Die kristalline Phase beeinflusst vornehmlich die Standfestigkeit der Schmelze, die Wärmeausdehnung, mechanische Parameter und die chemische Konsistenz der Dentalkeramik, die Glasphase, das Fließverhalten, Benetzbarkeit und Transparenz [18].

2.2.3.1 Pyroplastisches Verhalten

Steigt die Temperatur, kommt es bei dentalkeramischen Massen nur sukzessiv zum Erweichen des Materials. Dabei entsteht eine Art zähplastische Masse, deren Viskosität mit ansteigender Temperatur abnimmt [18]. Dentalkeramische Massen besitzen daher keinen Schmelzpunkt, sondern ein breites Schmelzintervall von 100-200 °C. Ursache für die allmähliche Erweichung ist der Umstand, dass die dentalkeramischen Massen eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit besitzen und strukturelle Veränderungen im Vergleich zu Metallen wesentlich langsamer vor sich gehen [18]. Zwischen der Brenndauer und der Brenntemperatur bestehen Abhängigkeiten. So kann eine kürzere Brenndauer bei höherer Temperatur ähnliche Wirkungen erzielen wie eine längere Brenndauer bei einer niedrigeren Brenntemperatur [18]. Mit jedem zusätzlichen Brennvorgang ändern sich Struktur und physikalische Eigenschaften. Die in der Schmelze vorliegenden Leuzitkristalle verleihen den dentalkeramischen Massen ihre hohe Standfestigkeit als Voraussetzung, dass während des Brennvorgangs die modellierte Form erhalten bleibt

[18]. Die Leuzitkristalle erhöhen zusätzlich die Festigkeit der Verblendkeramik, da sie die Rissausbreitung verlangsamen [30].

2.2.3.2 Wärmeausdehnungsverhalten

Die Haftung der Dentalkeramik auf der Legierungsoberfläche ist nur dann gewährleistet, wenn die WAK beider Werkstoffe aufeinander abgestimmt sind. Bei einer Nichtübereinstimmung kann es zu Abplatzungen der Keramik vom Metallgerüst kommen. Der WAK der Keramik sollte für den Temperaturbereich, in dem die Keramik als Festkörper vorliegt (unterhalb des Transformationsbereichs), dem der Legierung entsprechen. So können Spannungen im Metall-Keramik-Verbundsystem minimiert werden und leichte Druckspannungen erzeugt werden [33], um ein Aufschrumpfen auf das Metallgerüst zu gewährleisten. Der WAK der Keramik soll also minimal kleiner sein als der der Legierung. Da die einzelnen Bestandteile der Dentalkeramik Unterschiede in ihrem thermischen Expansionsverhalten aufweisen, kann der WAK dieses Werkstoffs nicht als Konstante angesehen werden [18]. Er verändert sich und ist von verschiedenen Faktoren abhängig [34]:

- Anzahl der Brennzyklen
- Abkühlphase der Brenntemperatur der Keramik auf eine Temperatur von ca. 700 °C
- Chemische Beschaffenheit der Keramik

Je langsamer die Abkühlphase von Brenntemperatur auf ca. 700 °C ist, umso mehr nimmt der Kontraktionswert zu. Dies ist darauf zurückzuführen, dass zunehmend Leuzit entsteht. Je mehr Leuzit als Zerfallsprodukt von Kalium-Feldspat entsteht, umso höher ist der WAK der Dentalkeramik [15]. Jedes Brennen führt bei vorgegebener Keramik und Abkühlphase zur Zunahme des Kontraktionswertes. Allerdings ist diese Zunahme weniger deutlich sichtbar als im Vergleich zur Abkühlphase auf 700 °C [34].

2.2.3.3 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften der Dentalkeramiken werden wesentlich durch den Glascharakter - durch das Grundgerüst aus Siliziumdioxid-Gruppen - bestimmt. Auflockerungen innerhalb dieses Grundgitters durch Metallionen mindern die mechanischen Eigenschaften der keramischen Masse, kristalline Phasen verstärken sie [18]. Die me-

mechanischen Werte konventioneller Keramiken hängen vom Material und der Verarbeitung ab und sind wie in Tab. IV aufgeführt einzuordnen [18].

Tab. IV: Mechanische Werte konventioneller Dentalkeramiken [18]

Eigenschaft	Durchschnittswert in MPa
Druckfestigkeit (sehr hoch)	800-1000
Zugfestigkeit (gering)	40-100
Biegefestigkeit (gering)	100-180
Härte (Vickers) (sehr hoch)	4000-5000
Abrasionsfestigkeit (hoch)	-
E-Modul (unterschiedlich hoch)	60000-130000, Zirkon ~ 250000

Allgemein ist Dentalkeramik nach dem Brand bei hoher Härte und Druckfestigkeit elastisch zu deformieren, allerdings ist sie nicht plastisch verformbar, aus diesem Grund spröde und besitzt eine nur geringe Biege-, Scher- und Zugfestigkeit [18, 35]. Sprödigkeit ist die Eigenschaft eines Werkstoffs, ohne plastische Verformung beim Überschreiten der Proportionalitätsgrenze zu Bruch zu gehen [13]. Sie wird bei einem höheren Glasanteil verstärkt. Je höher die Sprödigkeit, desto höher die Rissanfälligkeit und desto niedriger die Risszähigkeit [36]. Das spröde Verhalten wird durch den Bindungstyp verursacht (stabile Mischbindung aus kovalenter Bindung und Ionenbindung) [37, 13]. Festigkeit und Risszähigkeit sind charakteristisch für das mechanische Verhalten von Dentalkeramiken [36]. Festigkeit ist die mechanische Beanspruchungsgrenze eines Werkstoffs [13, 36], eine Spannung gemessen in Pascal, den der Werkstoff toleriert. In Bezug auf dentalkeramische Massen wird der Begriff Festigkeit als Widerstand des Materials gegenüber Zugspannungen verstanden. Sie wird in Biegeversuchen ermittelt [36]. Die Risszähigkeit ist der Widerstand, den ein Werkstoff einem sich ausbreitenden Riss entgegensetzt. Je größer die Risszähigkeit, desto duktiler ist der Werkstoff [13, 36]. Im Gegensatz zu Metallen, deren einzelne Gitterebenen bei mechanischer Beanspruchung gegeneinander abgleiten können (mikroplastisches Verhalten), woraufhin es zu einer plastischen Verformung kommt, weisen keramische Massen dieses Phänomen nicht auf. Hier erfolgt ein Bruch ohne vorherige mikro- oder auch makroplastische Verformung [36]. Dies macht Keramik empfindlich für minimale Fehler in ihrem Gefüge (Restporen, Inhomogenitäten), die Ausgangspunkte für Risse darstellen [18]. Sprödigkeit und E-Modul bewirken, dass dentalkeramische Massen Druckspannungen optimal abfangen, bei Biege-, Zug- und Scherspannungen allerdings nur in geringem Maße belastbar sind. Druckspannungen können beginnenden Rissen entgegenwirken, Zug- und Scherspan-

nungen fördern hingegen das Risswachstum. Es kommt zur Vertiefung des Risses, was zum plötzlichen Versagen der gesamten Restauration führen kann [18, 37]. Das unterkritische Risswachstum wird durch das feuchtwarme Milieu der Mundhöhle begünstigt [36]. So kommt es zu einer deutlichen Abnahme von ca. 20-50 % der Bruchfestigkeit. Diese Langzeitfestigkeit oder auch Dauerfestigkeit entspricht etwa der halben statischen Festigkeit. Auch die statische Ermüdung unter Kaubelastung beschleunigt das Risswachstum. Bei keramisch verblendeten Restaurationen kommen Korrosionserscheinungen im Grenzbereich zwischen Metall und Keramik hinzu [18].

2.2.3.4 Optische Eigenschaften

Die ausgezeichnete Ästhetik dentalkeramischer Massen wird vor allem durch die glaskeramischen Vertreter erreicht. Durch das Verhältnis von kristallinem und amorphem Anteil (Glasphase) können Opazität und Transluzenz der Charakteristik des natürlichen Zahns nachempfunden werden [36]. Die Lichtdurchlässigkeit dentalkeramischer Materialien wird durch diffuse Reflektion und Lichtbrechung an Strukturgrenzen behindert, wie etwa an Poren und kristallinen Einschlüssen [29]. Dabei ist der Streuverlust umso größer, je zahlreicher und kleiner die optischen Strukturunregelmäßigkeiten sind. Insbesondere Kondensation und Vakuumbrand haben durch Beeinflussung des Porenvolumens Einfluss auf den Transparenzgrad [18]. Die Farbnuancen der keramischen Massen werden durch die bereits erwähnten Farbpigmente erreicht. Die für die Färbung und Opazität verantwortlichen Metalloxide haben eine hohe Dichte und müssen fein verteilt werden [18].

2.2.3.5 Biologische Verträglichkeit

Dentalkeramiken zeichnen sich insbesondere durch ihre hervorragende biologische Verträglichkeit, große chemische Stabilität, nicht toxischen Elementaufbau sowie einer daraus resultierenden hohen Mundbeständigkeit aus. Sie sind nahezu unlöslich - ausgenommen durch Flusssäure - und abrasionsfest [36, 18]. Dies beruht auf den starken Gitterbindungen der Atomgruppen. Maßgebend für das positive biologische Verhalten von Keramiken ist ferner ihre harte und nach dem Glanzbrand glatte Oberfläche, was eine Adhäsion von Plaque und Mikroorganismen wesentlich verhindert [18]. Die Verträglichkeit wird bei den Metall-Keramik-Systemen als gegeben angesehen, da die in

den dentalkeramischen Massen vorhandenen Metall- und Siliziumoxide, die möglicherweise durch chemische oder abrasive Prozesse herausgelöst werden könnten, unter den Bedingungen der Mundhöhle chemisch sehr stabil und biologisch inert sind [16].

2.2.4 Aufbrennen der Keramik

2.2.4.1 Das Brenngut

Verbundpartner

Die mechanischen Eigenschaften von EMF-Legierungen werden von den legierungsspezifischen Gussbedingungen beeinflusst. Ein Überhitzen der Schmelze führt zu 0,2 %-Grenzwerten und E-Modul-Werten, die bei Kobalt-Chrom-Legierungen legierungsabhängig bis zu 25 % unter denen mit korrekter Temperaturführung liegen [38].

Es ist unabdingbar für einen optimalen Verbund im Metall-Keramik-System, dass beide Verbundpartner aufeinander abgestimmt sind. Für den klinischen Erfolg ist die Kompatibilität zwischen Legierung und Keramik, vornehmlich die Wärmeausdehnungskoeffizienten, die E-Module, Zusammensetzung der Keramik, Transformationstemperatur der Keramik sowie die chemische Reaktion der beiden Materialien an der Grenzfläche essentiell [39]. Andernfalls können Spannungen und ein Versagen des Verbundes die Folge sein [2]. Gemeinhin sollte der WAK der Legierung geringfügig größer als der der Keramik sein [28, 22, 40]. Somit ist eine optimale Festigkeit des Verbundes zwischen Legierung und Keramik gewährleistet, da die Keramik durch die stärkere Kontraktion des Metalls bei der Abkühlung unter eine leichte Druckspannung gesetzt wird [2]. Ist der WAK der Legierung sehr viel niedriger als der WAK der Verblendkeramik, so kommt es zu einer Erhöhung der tangentialen Zugspannungen, wodurch radial nach außen verlaufende Risse entstehen. Dies kann zu Spätsprüngen führen. Ist der WAK der Legierung sehr viel höher als der WAK der Verblendkeramik, so erhöhen sich die tangentialen Druckspannungen und erzeugen parallel zum Gerüst verlaufende Sprünge, die zu späteren Abplatzungen führen können [41].

Die Brenntemperatur sollte etwa 100-150 °C unterhalb der Solidustemperatur der Legierung liegen, um eine Formänderung des Metallgerüsts zu vermeiden [2].

Für einen optimalen Verbund zwischen Legierung und Verblendkeramik spielen auch die Gussbedingungen der Legierung eine entscheidende Rolle. Ein Wiedervergießen, wie es beispielsweise bei Edelmetalllegierungen im zahntechnischen Routinebetrieb

aus wirtschaftlichen Gründen praktiziert wird, kann bei Nichtelegierungen zu ungünstigen Eigenschaften führen [42, 43, 21]. Bei jedem Schmelzvorgang gehen Anteile unedler und niedrig schmelzender Metallzusätze durch Verdampfen und Oxidation verloren [42]. Die Abnahme des Gehaltes von Legierungselementen kann zu einer stärkeren Korrosion der Legierung führen, die keramische Haftung beeinflussen und das Schmelzintervall verändern [44]. Ein Wiedervergießen bzw. ein Zusatz von bereits vergossener Legierung führt zu einer Abnahme der Haftverbundfestigkeit zwischen Keramik und Legierung [21, 43]. Dies ist auf einen Anstieg der Häufigkeit von Grenzflächenfehlstellen zurückzuführen [21, 43]. Werden Goldlegierungen verwendet, ist die Zugabe von bis zu 50 % Restlegierung akzeptabel [21].

Größe und Form des zu brennenden Objekts

Für die Haltbarkeit eines keramisch verblendeten Zahnersatzes spielt neben dem Legierungstyp mit darauf abgestimmter Keramik auch die Objektgröße und -form, die Gerüstgestaltung und -dimension eine große Rolle.

Bereits bei der Modellation des Metallgerüsts können Fehler gemacht werden, die Konsequenzen nach sich ziehen. Das Metallgerüst muss die meisten Kräfte abfangen, daher muss es ausreichend stark modelliert werden. Bei EMF-Legierungen darf die Wandstärke des Gerüsts nach dem Ausarbeiten nicht unter 0,3 mm liegen, bei Edelmetalllegierungen sogar nicht dünner als 0,5 mm [20]. Die Masse der Restauration muss aus Metall bestehen, andernfalls kann es zu Sprüngen und Rissen in der Keramik kommen, bei der Gestaltung der Verbinder und Brückenglieder ist auf das T-Träger-Prinzip zu achten (die Höhe ist für die Stabilität wichtiger als die Breite) [20, 45, 46]. Zu befürworten ist eine längliche und runde Querschnittsform, da ihre Zug- und Druckfestigkeit im Wesentlichen gleich ist. Mit einer doppelten Höhe und einfachen Breite erreicht der Verbinder bereits achtfache Stabilität [47]. Entscheidend für die Stabilität des Zahnersatzes ist, dass der Querschnitt des Gerüsts vor allem in Richtung der Beanspruchung ausreichend dimensioniert ist [47]. Um den auftretenden Kräften zu widerstehen, ist ein ausreichend starker Aufbau des Gerüsts im Bereich der Verbindungsstellen zwischen einem Brückenglied und dem Pfeilerzahn von großer Bedeutung [48]. Verbindungsstellen sollten soweit wie möglich bis zu den Okklusalfächen hingezogen werden [47]. Das Gerüst im Randbereich der Restauration muss brennstabil sein. Scharfe Kanten des Gerüsts erhöhen die Gefahr von Rissbildungen und sind aus diesem Grund zu vermeiden [20]. Übergangsbereiche zwischen Gerüst und Keramik sind

konvex zu konturieren [48]. Das Gerüst sollte in seiner Form prinzipiell bereits vor dem Verblenden die verkleinerte Zahnform wiedergeben [48, 2, 46], um eine gleichmäßige Stärke der Verblendkeramikschiicht gewährleisten zu können [48]. Das größte Volumen der Restauration sollte immer vom Gerüstmaterial eingenommen werden [46]. Legierungsgerüste mit geringen physikalischen Werten werden durch modellierte Girlanden verstärkt. Dies hat neben der größeren Stabilität auch den Vorteil, dass massive Brückenglieder gleichmäßiger auskühlen [22, 47].

Brennvorgang

Unter Brennen wird das Sintern von Keramiken und Metallen durch Hitzeeinfluss verstanden [13]. Die Brenntemperaturen keramischer Massen liegen allgemein unterhalb ihrer Schmelztemperatur. Da es sich bei dentalkeramischen Massen um ein Gemisch aus chemisch unterschiedlichen Ausgangskomponenten bzw. unterschiedlichen Phasen handelt, liegt die Brenntemperatur oberhalb der Schmelztemperatur der am niedrigsten schmelzenden Phase, die bei traditionellen Keramiken überwiegend von ihrem Hauptbestandteil (der durch Fritten verglaste) Feldspat bestimmt wird [18]. Oberhalb der Glasübergangstemperatur beginnt die Glasphase des Feldspats bei 800-900 °C zu erweichen, der Glasanteil schmilzt und schließt nicht geschmolzene kristalline Bestandteile ein [18, 13]. Der Schmelzvorgang beginnt an der Oberfläche der Partikelkörner, die nach und nach zusammensintern, wobei die geschmolzenen Bereiche ineinander fließen und eine Matrix bilden, die höher schmelzende Bestandteile einschließt [18]. Das Sintern ist mit einer erheblichen Volumenschrumpfung von 20-40 Vol.-% verbunden, da die Grenzflächen zwischen den einzelnen Partikeln verschwinden und die Zwischenräume kleiner werden. Die Triebkraft des Sinterungsprozesses ist die Verringerung der Oberflächenenergie [18, 13].

Für eine verbesserte Verbundfestigkeit zwischen Dentallegierung und Verblendkeramik ist eine vor dem ersten Brand stattfindende Oberflächenbehandlung der verwendeten Legierung unabdingbar. Durch ein Abschleifen werden Defekte wie kleine Porositäten, feine Risse und ein ungleicher Oxidfilm beseitigt [49]. Die Oberflächenbehandlung erfolgt mit Hartmetallfräsen oder mittels keramisch gebundenen Schleifkörpern und durch anschließendes Abstrahlen mit Aluminiumoxid (Al_2O_3 , Korund) für EM-Legierungen der Körnung 110 μm und für EMF-Legierungen 250 μm [49, 20, 44, 46, 50, 2].

Bei Edelmetalllegierungen sollte das Abstrahlen bei 2 bar erfolgen, der Strahlendruck bei EMF-Legierungen sollte 3-4 bar nicht überschreiten, um ein Deformieren des Metallge-

rüstes zu vermeiden. Hierbei ist darauf zu achten, dass der Abstrahlwinkel bei ca. 45° liegt, die Strahlzeit von ca. 30 s pro Einheit ist einzuhalten [20]. Beim Abstrahlen bekommt die Oberfläche das typisch matte Aussehen (Schaffung von Mikroretention) [51]. Die kinetische Energie der Strahlpartikel wird in Wärme und Deformationsenergie umgewandelt, wodurch die Oberflächenenergie erhöht wird [20]. Diese Erhöhung hängt wesentlich von der Masse und der Geschwindigkeit sowie der Zusammensetzung der auftreffenden Partikel ab [52]. Nach dem Abstrahlprozess muss die keramische Verblendung ohne Zeitverzögerung erfolgen, um die erhöhte Oberflächenenergie zu nutzen. Durch eine zu lange Lagerungszeit nach dem Abstrahlen kann der Keramikschlicker die Oberfläche nicht effektiv benetzen, was eine Verminderung der Verbundfestigkeit nach sich zieht [20]. Ein Verbund zwischen Metall und Keramik ist nur nach vorangegangenem Aufrauen der Metalloberfläche möglich. Das Aufbrennen auf eine polierte Oberfläche führt unweigerlich zu Misserfolgen [46].

Vor jedem Brand wird das Metallgerüst mit Hilfe eines Dampfstrahlers gesäubert. Im Gegensatz zu EMF-Legierungen, die keinen Oxidbrand benötigen, erfolgt bei Edelmetalllegierungen das Oxidglühen bei Temperaturen zwischen 780 und 980 °C und zwar atmosphärisch, d. h. unter Anwesenheit von Luftsauerstoff. Der Oxidbrand bei EM-Legierungen hat zudem den Vorteil, dass eventuelle organische Rückstände auf der Oberfläche verbrannt werden [2].

Es folgt das zweizeitige Auftragen der Grundmasse (Opaker), die das Oxid nach dem Brennen vollständig zur sicheren Haftung und optisch abdeckt. Bei konventionellen Verblendkeramiken liegt die Brenntemperatur etwa bei 930-980 °C [2]. Anschließend erfolgt der tatsächliche Aufbau der Zahnform mit Dentin- und Schmelzmasse. Hierbei darf eine Mindeststärke der Keramik von 0,8 mm nicht unterschritten werden [22, 2]. Es ist zu beachten, dass die Sinterschwindung von 20-40 Vol.-% bei der Größe der Modellation einkalkuliert wird [2, 13]. Eine prothetische Krone beispielsweise muss daher größer modelliert werden, als es der zu ersetzenden Zahnkrone entspricht, um die Schrumpfung der Massen auszugleichen [53]. Beim Brennen der Keramik schrumpft diese nicht nur durch Sinterschrumpfung, sondern auch durch Wasserverlust [15].

Die manuell mit einem Pinsel aufgetragene Masse muss ausreichend mechanisch kondensiert werden (z. B. durch Riffel mit dem Le Cron-Instrument oder durch Rütteln und Vibrieren mit Hilfe von Ultraschall). Auf diese Weise wird die Keramikmasse vor dem Brand verdichtet und die Schrumpfung kann herabgesetzt werden [54, 18]. Die an der Oberfläche austretende Flüssigkeit wird mit Fließpapier oder Zellstoff behutsam abge-

saugt [18, 53]. Durch das Kondensieren wird der Anteil der Flüssigkeit zwischen den Körnern verringert. Weniger Bläschen in der Dentalkeramik sind die Folge. Damit einher geht eine verbesserte Transparenz, Farbwirkung und Festigkeit [54]. Je mehr kondensiert wird, umso geringer fällt die Brennschrumpfung aus [55].

Die Dentin- und Schmelzmassen konventioneller hochschmelzender Feldspatkeramiken werden in einem Hauptvakuumbrand bei ungefähr 900-950 °C gebrannt. Anschließend wird die gebrannte Keramik mit diamantierten rotierenden Instrumenten beschliffen [2]. Untersuchungen von FISCHER et al. ergaben, dass bei der sog. abtragenden Bearbeitung durch Fräsen und Bohren Mikrorisse in der Keramik entstehen können [56]. Dies ist darauf zurückzuführen, dass beim Bearbeiten des spröden Materials Keramik Partikel herausgeschlagen werden, was in der Bearbeitungszone extreme Zugspannungen induziert. Sobald diese eine kritische Größe überschreiten, wird das keramische Bauteil geschwächt [56].

Zum Ausgleich der Sinterschrumpfung und zur Formkorrektur wird mit den entsprechenden Massen (Dentin-, Schneiden- oder Transparenzmassen) nachgeschichtet und im 2. Vakuumbrand gebrannt [49].

Im Zuge des Glanzbrands, der eine glatte Oberfläche der Keramik erzeugt, kann die Verblendung mit Hilfe von keramischen Malfarben noch individuell farblich charakterisiert werden [49].

2.2.4.2 Einfluss der Brenntemperatur und der Temperaturführung

Die Brennführung und -temperatur beim Keramikbrand haben großen Einfluss auf die Festigkeit der Keramik und auf die Verbundfestigkeit zwischen Legierung und Verblendkeramik, da sie das Legierungsgefüge beeinflussen [57]. Des Weiteren werden Objektform, Porositäten, Rissbildung sowie Ästhetik und Farbe der keramisch verblendeten Restauration beeinflusst.

Festigkeit und Verbundfestigkeit

Die Brennbedingungen sind von besonderer Bedeutung, sie beeinflussen den Schwundwert. Schwundwertreduzierende Porositäten innerhalb der Keramik müssen aus Gründen der mechanischen Belastbarkeit vermieden werden. Je größer deren Zahl und deren Volumen sind, desto geringer ist die Festigkeit [18].

Der WAK der Keramik ist entscheidend für die Festigkeit der Keramik per se sowie für die Verbundfestigkeit und hängt im Wesentlichen von der Brandführung ab (d. h. von der Anzahl der Brennzyklen und der Abkühlphase). Da die für die Bindung zwischen Metall und Keramik wichtigen Diffusions- und Oxidationsvorgänge (s. a. Kapitel 2.3.3) nahezu nur bei hohen Temperaturen stattfinden, lässt sich vermuten, dass eine verlängerte Brenndauer bzw. wiederholte Brennvorgänge nicht ohne Einfluss auf die Haftung bleiben. Bereits in einer korrekt hergestellten keramisch verblendeten Krone wirken Spannungen erster Art (zwischen Metall und Keramik aufgrund verschiedener WAK der beiden Werkstoffe), zweiter Art (in der Keramik aufgrund verschiedener WAK von Glas- und Kristallphase) und dritter Art (in Metall und Keramik durch Einlagerung von Fremdatomen in die Kristallgitter). Es ist ersichtlich dass sich der Betrag dieser Spannungen über die bereits erwähnten Mechanismen ändern kann [58]. Aus diesem Grund ist die Anzahl der Keramikbrände gering zu halten [20, 29, 59]. Mehrfaches Brennen kann zu einer Erhöhung des WAK um 0,2 % bei jedem Brand führen [28]. Doch zeigen inzwischen speziell einige der neuen Verblendkeramiken einen über mehrere Brände hinweg kaum veränderbaren WAK-Wert [60]. Untersuchungen über das Festigkeitsverhalten von verschiedenen Keramiken bei Mehrfachbränden zeigten eine Abnahme der Biegefestigkeitswerte mit zunehmender Anzahl der Brände [61]. Ähnliche Versuche ergaben beim Schlagtest eine Minderung der Kraftwerte, die auf einen Festigkeitsverlust sowohl in der Keramikmasse als auch im Metall-Keramik-Verbund zurückzuführen sind [61]. Der Ausdehnungskoeffizient von Dentalkeramiken kann durch eine verzögerte Abkühlung von der Brenntemperatur angehoben werden. Daraus resultiert eine Verminderung der Spannungen in der Keramik [3].

Laut SCHWICKERATH ergaben Prüfungen, dass die Festigkeitswerte bei einem schnellen Anstieg der Aufheiztemperatur gering ausfielen. In den meisten Fällen waren die höchsten Festigkeitswerte bei der längsten Aufheizzeit festzustellen [62]. Es zeigten sich verminderte Festigkeitswerte innerhalb der Keramik bei Abweichungen in der Brandführung (schnelles Aufheizen, erhöhte Anzahl der Brände) [62]. Bei zu hoher Aufheizrate oder Brenntemperatur kann es zudem zu Blasenbildungen kommen [54].

Die Abkühlzeit ist für den thermischen Ausdehnungskoeffizienten von besonderer Bedeutung [54]. Es konnte festgestellt werden, dass bei Langzeitabkühlung geringere Festigkeitswerte als bei Kurzzeitabkühlung die Folge waren [62]. Beim Brennen befinden sich Legierung und Verblendkeramik in unterschiedlichen Aggregatzuständen (Keramik ist plastisch, Metall ist fest). Beim Abkühlen beginnt sich innerhalb der Keramik eine

Druckspannung aufzubauen, wodurch die Keramik verfestigt wird. Die eigentliche kritische Phase der Abkühlung beginnt bei konventionellen Verblendkeramiken im Temperaturbereich zwischen 600 °C und 550 °C. Da die Keramik nun stärker kontrahiert als das Metall, wird sie vorübergehend einer Zugspannung ausgesetzt. Der Durchgang durch diesen kritischen Temperaturbereich sollte daher so schnell wie möglich erfolgen [49].

Form, Porositäten, Rissbildung und Sprünge

Wird bei zu hohen Temperaturen gebrannt, kann es dazu kommen, dass die Konturen nach und nach verfließen. Die Modellation verliert ihre Form [54]. Werden die vorgeschriebene Temperatur oder die Brenndauer überschritten, ziehen sich die verglasten Massen zum dicksten Teil hin. Die Oberflächengestaltung geht dabei verloren, da der Schmelzprozess voranschreitet. Das Brennobjekt bekommt einen erhöhten Glanz und nimmt Kugelform an [18].

Bei zu hohen Temperaturen, zu schnellen Aufheizraten und zu langem Brennen kann es zu Porositäten sowohl an der Oberfläche als auch in der Keramik kommen [18, 54]. Diese Porositäten stellen Gefügedefekte dar und können Anreize für eine Anrissbildung darstellen, die bei Rissfortbildung, etwa unter dem Einfluss der Mastikation in Kombination mit dem Eindringen von Speichel, zum Versagen der Restauration führt [63, 64].

Bei zu schnellem und hohem Brennen geben schmelzende Silikate Gase ab, es entstehen Blasen. Ein zu hohes Vakuum lässt diese Blasen zusätzlich anwachsen [55]. Ein weiterer Grund für eine Rissbildung ist die Verteilung der Leuzitkristalle innerhalb der Keramik. Liegen die Leuzitkristalle traubenförmig gebündelt in größeren Ansammlungen vor, wobei andere Bereiche in der Keramik frei von Leuzit sind, kommt es während des Abkühlungsprozesses nach dem Brand zu der Ausbildung von Mikrorissen [2].

Ästhetik und Farbe

Bei ansteigender Brenntemperatur schreitet der Sinterprozess fort, bis er mehr und mehr in einen Schmelzprozess übergeht. Dabei nimmt die Sinterphase ab und der Glasphasenanteil zu. Transparenz und Farbe hängen vom Anteil der Glasphase ab. Beide werden mit zunehmendem Glasphasenanteil intensiver [54, 30]. Die höhere Farbintensität erklärt sich dadurch, dass bei höheren Temperaturen durch ein weiteres Aufschmelzen der Farbfritteteilchen deren Farbwirkung durch ein Verfließen in die angrenzende Schmelzphase der farblosen Masseanteile weitergegeben wird [30].

Mit längeren Aufheizzeiten wird ebenfalls mehr Transparenz erzielt. Bei kürzeren Aufheizzeiten hat die interkristalline Luft weniger Zeit zu entweichen, verbleibt in Form kleinster Bläschen im Gefüge und trägt durch erhöhte Lichtbrechung zu einer Trübung bei [54, 30]. Die Ästhetik wird beeinträchtigt. Eine zu schnell aufgeheizte oder ungenügend vorgetrocknete Verblendkeramik kann zwar den gewünschten Glanz äußerlich zeigen, innerlich jedoch möglicherweise unterbrannt sein. Erkennbar ist dies sowohl an einer zu geringen Transparenz und Farbbrillanz als auch an einer möglichen Farbabweichung [30].

2.2.5 Der Brennofen

Brennöfen (Sinteröfen) sind elektrisch beheizbare Geräte, die beim Brennen von Keramik zum Einsatz kommen [13]. In der Regel besteht der Keramikofen aus einer Brennkammer, einer Brenngut-Ablageplatte, auf welcher der Brenngutträger zu liegen kommt, und einer Steuerelektronik. Über letztere können die Bereitschaftstemperatur, Trocknung, Schließen der Brennkammer, Aufheizrate, Haltezeit bei Sintertemperatur, Evakuierung, Abkühlung und das Öffnen des Ofens kontrolliert werden [13]. Die verschiedenen Modelle unterscheiden sich u. a. in der Art des Öffnungsprinzips, aber auch in der Lage der Thermoelemente [13, 30]. Erhältlich sind Modelle mit Frontöffnung, Liftführung (hierbei befindet sich der Brennsockel auf einem Lift, der vertikal nach oben in die Brennkammer hinein oder nach unten aus der Brennkammer hinaus fährt) und Schließdeckelmechanismus (hierbei schließt der Ofen, indem sich der Ofenkopf sukzessiv über dem Brenntisch schließt) [13]. Dem Brennofen ist eine Vakuumpumpe angeschlossen, die ein Evakuieren der Brennkammer ermöglicht [13, 65]. Die verschiedenen Programme ermöglichen sowohl das Brennen unter Vakuum als auch das atmosphärische Brennen.

Das Vortrocknen muss langsam erfolgen, da es sonst zu Rissen und Blasen innerhalb der Keramik kommen kann. Dabei werden die Vorwärm- und Vortrockentemperatur so hoch gewählt, dass die Abstrahlwärme der Brennkammer die Keramikbeschichtung trocknet, d. h. die zugeführte Modellierflüssigkeit verdampft, ohne dass die Feuchtigkeit zu sieden beginnt [49, 66, 54]. Die Vortrockenzeit wird durch den Umfang des Brenngutes und durch die Modellierflüssigkeit bestimmt. Während der Vorwärmzeit soll das Brenngut thermisch homogenisiert werden; eine gleichmäßige Erwärmung gewährleistet eine gleichmäßige Versinterung [49].

Die Aufheizzeit schließt sich an, wobei nach vorgegebener Zeit eine festgelegte maximale Temperaturhöhe erreicht wird [54]. Die Temperatur in der Brennkammer soll schnell gesteigert werden, außerdem soll das Brenngut ohne Temperaturerhöhung unter Vakuum gesetzt werden können, um eine Blasenbildung zu verhindern [66]. Die Hitze sollte gleichmäßig verteilt sein, der Zeit-Temperaturzyklus sollte automatisch gesteuert werden und das Brennprogramm während des Zyklus unterbrochen werden können [66]. Während des Ablaufs des Brennprogramms sollte die Vakuumpumpe manuell auszuschalten sein, ohne den Ablauf des Programms zu beeinflussen. Unabhängig vom Alter der Heizelemente sollten die Temperaturen immer steuerbar bleiben [66]. Ist nach der Aufheizzeit die festgelegte maximale Temperaturhöhe erreicht, beginnt die Haltezeit für einen für die entsprechende Keramik vorgegebenen Zeitraum und die Brennkammer öffnet sich wieder. Insbesondere das Vakuum in den ersten Minuten der Haltezeit verbessert die Farbintensität [54]. Es unterstützt den Sinterprozess. Die Hohlräume zwischen den Keramikpartikeln werden schneller und vollständiger geschlossen [49]. Ohne das Vakuum bliebe die Dentalkeramik trüb und porös [54, 49]. Der Glanzbrand erfolgt ohne Vakuum.

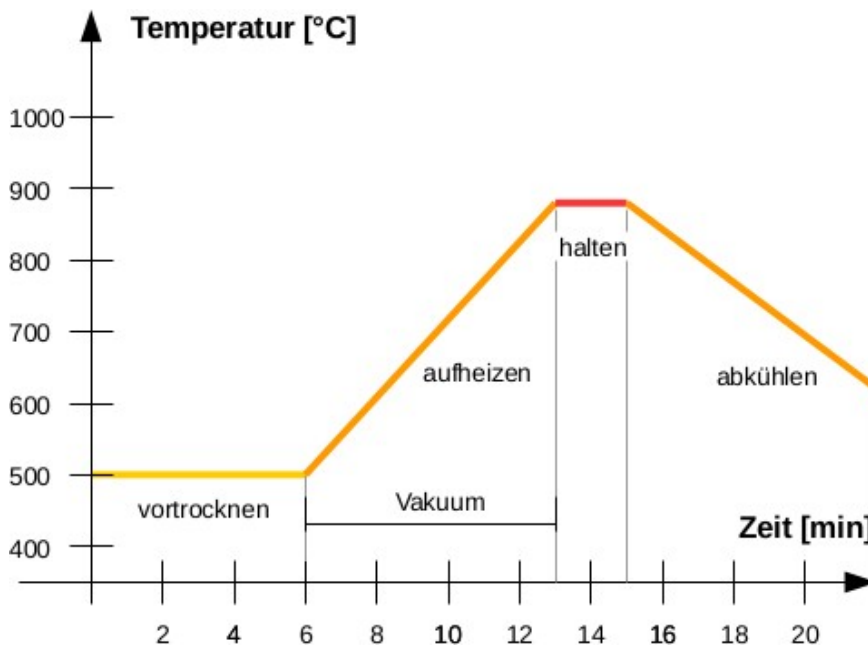


Abb. 4: Schematische Darstellung einer Brennkurve [30]

Zahntechnische Brennöfen sind vom Hersteller in Bezug auf Vakuumführung und Brenntemperatur kalibriert [13]. Um eine exakte Brennführung gewährleisten zu können, müssen sie regelmäßig in der Temperaturführung kalibriert werden [13, 22]. Eine re-

regelmäßige Kontrolle des Zeit-Temperatur-Zyklus ist dringend erforderlich, um ein Unterbrennen oder Überbrennen der Keramik zu vermeiden [13, 22].

Mit Reinsilberfolie, deren Schmelzpunkt nach der internationalen Temperaturskala bei 961,63 °C liegt, kann der Brennofen und die Temperaturanzeige kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert werden. Dabei wird im Wesentlichen der Temperatureinstellungspunkt bestimmt, bei dem die Folie schmilzt, und der Brennofen entsprechend kalibriert [66]. Eine präzisere Methode zur Kalibrierung des Keramikofens stellen automatische Temperaturkontrollsets dar. Hierbei findet die gleichzeitige Kalibrierung in zwei ausgesuchten Punkten statt (Doppelbereich-Kalibration), den Schmelzpunkt des Reinaluminiums bei 660,4 °C und den Schmelzpunkt des Reinsilbers bei 991,63 °C [67], wonach der Ofen kalibriert wird. Auch mit Hilfe des Brenngradtests kann der zum Einsatz kommende Keramikofen kontrolliert und auftretende Probleme behoben werden [30, 68].

Der Brennofen sollte einen geeigneten ebenen Standort, genügend Platz für die Luftzirkulation haben und nicht in der Nähe von Heizkörpern und Fenstern oder anderen thermischen Quellen stehen, um Temperaturschwankungen zu vermeiden [69].

In regelmäßigen Abständen muss überprüft werden, ob der Dichtrand Verunreinigungen oder Beschädigungen aufweist. Ebenfalls sollte die Isolation auf eventuelle Risse oder Abnutzungen kontrolliert werden. Verschleißteile wie Heizmuffel oder Isolationsmaterial sind bei Alterung zu ersetzen.

Der oben erwähnte Brenngutträger dient der Aufnahme des Brennguts. Hierfür sind Modelle aus verschiedenen Materialien und verschiedenen Formen im Dentalhandel erhältlich. Auch der Brenngutträger kann in Abhängigkeit seiner Wärmeaufnahme das Brennergebnis stark beeinflussen [70]. So reflektiert und leitet ein weißer Wabenbrennträger die Wärme anders als ein schwarzer Keramikbrennträger [30].

2.3 Haftmechanismen zwischen Metall und Keramik

Die primäre Voraussetzung für eine erfolgreiche Metall-Keramik-Restauration ist eine dauerhafte Bindung zwischen Keramik und Legierung [9]. Der Haftmechanismus im Metall-Keramik-Verbund wurde zwar schon in zahlreichen Studien erprobt und erforscht, ist aber bislang nicht vollständig geklärt. Er kann bei verschiedenen Materialkombinationen auf unterschiedlichen Grundlagen beruhen [2, 28]. Eine Übersicht über die für den Metall-Keramik-Verbund verantwortlichen Kräfte gibt Tab V [20, 15].

Tab. V Verantwortliche Kräfte für den Metall-Keramik-Verbund [20, 15, 9]

Kräfte/Mechanismus	Erklärung
physikalisch	<ul style="list-style-type: none"> • Aufschumpfen der Keramik auf das Metallgerüst während des Sinterprozesses • Wärmeausdehnungskoeffizienten • mechanische Retention
adhäsiv (Van der Waals'sche Kräfte)	<ul style="list-style-type: none"> • Dipol-Wechselwirkungen • Wasserstoffbrückenbindungen
chemisch	Reaktion der Haftoxidbildner mit der Keramik

2.3.1 Physikalische Kräfte

Beim Brennen kommt es durch das Verdampfen der flüssigen Bestandteile des aufgetragenen Keramikschlickers wie auch durch Sinterungsprozesse zu einem Aufschumpfen der Keramik auf das Metallgerüst [15].

Bei der Kompatibilität zwischen Legierung und Verblendkeramik ist die Abstimmung der WAK beider Materialien von größter Wichtigkeit. Aufgrund dessen, dass der WAK der kompatiblen Keramik etwas kleiner als der WAK der Legierung ist, wird die Keramik bei Abkühlung durch die stärkere Kontraktion des Metalls unter eine leichte Druckspannung gesetzt [2, 15] und die mechanische Bindung zwischen Metall und Keramik erhöht sich (s. a. Kapitel 2.2.4.1) [2, 51].

Wesentlich für die Verbundfestigkeit zwischen Metall und Keramik ist die Rauigkeit der Metalloberfläche. Zum einen erreicht man dies durch Bearbeiten der Metalloberfläche mit geeigneten Schleifkörpern (aus Edelmetall mit keramischer Bindung), zum anderen durch die Schaffung einer Mikroretention (durch Abstrahlen mit Aluminiumoxid) [28], in die sich die Keramik mechanisch festkrallen kann [20]. Aufgeraute Metalloberflächen bewirken eine signifikant optimierte Haftfestigkeit im Vergleich zu glatten bzw. polierten Oberflächen, da es zu einer Vergrößerung der Kontaktfläche kommt und daraus resultierend zur Möglichkeit einer entsprechend größeren Zahl von Bindungen zwischen Legierung und Grundmasse [71]. Die Rautiefe ist abhängig von der Körnung des Strahlmittels, der Härte der Legierung und dem Druck mit dem das Abstrahlmittel aufgebracht wird [28].

Es sei darauf hingewiesen, dass auf Makroretentionen, wie sie bei der Verblendung mit Kompositen hilfreich und erforderlich sind, bei der keramischen Verblendung verzichtet

werden muss. Der Keramikslicker könnte nicht ausreichend eindringen; die Folge wären Hohlräume, die sich bei den keramischen Bränden ausdehnen könnten mit Abplatzungen direkt nach dem Brand oder später als Resultat [20].

2.3.2 Adhäsion

Prozentual gesehen spielen die adhäsiven Kräfte beim Metall-Keramik-Verbund zwar nur eine kleine Rolle, haben aber eine große Bedeutung beim Auftragen des Slickers. Dazu zählen die Dipol-Wechselwirkungen und die Wasserstoffbrückenbindungen [15].

2.3.3 Chemische Kräfte

Die Bildung einer Passivierungsschicht bei den EMF-Legierungen und der Haftoxidschicht bei den Edelmetalllegierungen ist von großer Bedeutung für die chemische Bindung zwischen Legierung und Verblendkeramik [15, 2]. Die chemische Bindung kommt zustande, indem in der Schmelzphase Metalloxid-Ionen von der Keramik teilweise aufgelöst werden und in diese diffundieren [28]. Als treibende Kraft dieser Diffusionsvorgänge (s. a. Kapitel 2.2.4.2) sind die vorliegenden Konzentrationsgradienten anzusehen [72]. Dabei geht man davon aus, dass ein Sauerstoffatom eine Bindung sowohl zum Haftoxidbildner als auch mit einem Silizium- oder Aluminiumatom aus der Keramik eingeht. Es werden sogenannte Sauerstoffbrücken gebildet. Voraussetzung für den chemischen Verbund ist zum einen die Fähigkeit der dentalkeramischen Schmelzphase, Metallionen aufzunehmen, andererseits die Fähigkeit Haftoxide bildender Legierungsbestandteile, in der Schmelzphase der Keramik löslich zu sein und dennoch nicht den Kontakt zur Grundstruktur des Metalls zu verlieren [72, 15, 28].

2.4 Verfahren zur Prüfung der Verbundfestigkeit

Die Bestimmung der Haftfestigkeit dentaler Metall-Keramik-Verbundsysteme kann durch zahlreiche Druck-, Zug-, Scher- und Biegeversuche erfolgen. Bei all diesen Versuchen müssen wichtige Bedingungen erfüllt werden. So müssen die Prüfkörperherstellung und die Prüfanordnung eine möglichst genaue quantitative Beurteilung der Verbundfestigkeit erlauben, die Prüfkörper sollten bestmöglich genau reproduzierbar sein

und in der Herstellung nicht zu kompliziert sein. Darüber hinaus müssen die Prüfergebnisse innerhalb einer Toleranz von weniger als 10 % liegen [73].

Um Aussagen über die klinische Einsetzbarkeit eines Verbundsystems machen zu können, wird zudem ein klinisch relevanter Bewertungsmaßstab benötigt, mit dem die Messwerte kritisch beurteilt werden können [42]. Die Verbundfläche zwischen Legierung und Verblendkeramik ist insbesondere anfällig gegenüber Scherspannungen. Dies wird bei vielen Verfahren zur Prüfung der Verbundfestigkeit berücksichtigt [2].

2.4.1 Drei-Punkt-Biegeversuch nach SCHWICKERATH

Die mechanischen Eigenschaften des Metall-Keramik-Verbundes werden u. a. nach der Norm DIN EN ISO 9693 [1] durch den Drei-Punkt-Biegeversuch nach SCHWICKERATH ermittelt. Die in dieser Norm festgelegte Bezeichnung „Ablöse/Rissbeginn-Festigkeit“ entspricht dem in früheren Normausgaben verwendeten Begriff „Scherverbundfestigkeit“ [74]. Auf ein Metallplättchen von 0,5 mm Stärke, 3 mm Breite und 25 mm Länge wird mittig eine 1 mm dicke und 8 mm lange Keramikschicht (unter Verwendung von Grund- und Dentinmasse) aufgebrannt. Die Verbundprüfung wird in einer Universalprüfmaschine durchgeführt, die Auflagen haben einen Abstand von 20 mm [2, 75, 42, 39, 1, 76]. Die Biegebelastung erfolgt mittig auf der unverblendeten Seite des Prüfkörpers durch einen dünnen keilförmigen Druckstempel mit einem Krümmungsradius von 1 mm und mit einer Querhauptgeschwindigkeit von $1,5 \pm 0,5$ mm. Die Keramik befindet sich in der Zugzone. Dabei wird die Bruchkraft F bei beginnender Ablösung der Keramik registriert [39, 2, 75, 1]. Es sollte ein Mindestwert der Verbundfestigkeit von 25 MPa erreicht werden [39].

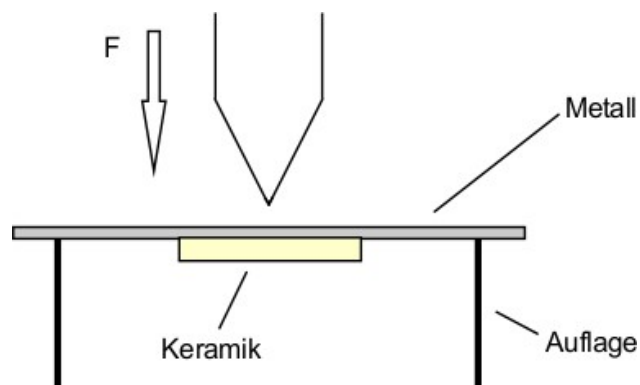


Abb. 5: Drei-Punkt-Biegeversuch nach SCHWICKERATH

Die Bruchkraft berechnet sich wie folgt:

$$F = 4 \cdot E \cdot b \cdot f \cdot d^3 / L^3$$

F: gemessene Bruchkraft in N

b: Breite des Prüfkörpers in mm

f: Durchbiegung des Prüfkörpers in mm

E: Elastizitätsmodul in MPa

d: Dicke des Prüfkörpers in mm

L: Auflagenweite in mm

Sowohl die Dicke des Prüfkörpers als auch die Auflagenweite gehen in der dritten Potenz in die Formel zur Berechnung der Bruchkraft ein. Sie sind somit die Haupteinflussfaktoren. Die exakte Dicke des Prüfkörpers ist abzumessen und vor jeder Prüfung muss die Auflagenweite überprüft werden. Aus einem Diagramm [1] (s. Kapitel 4.2.3, Abb. 30) wird ein Koeffizient κ als Funktion der Dicke des Metallgerüsts und des Elastizitätsmoduls der Legierung nach ISO 22674 abgelesen [1, 2]. Die Bruchkraft F muss mit diesem Koeffizienten multipliziert werden [1].

Somit wird die Scher-Verbundfestigkeit bzw. Ablöse/Rissbeginn-Festigkeit wie folgt berechnet:

$$\tau = \kappa \cdot F$$

τ : Scherverbundfestigkeit in MPa

κ : Kappa-Koeffizient in mm^{-2}

F: Bruchkraft in N

Anhand der Messergebnisse lässt sich prognostizieren, wie groß das Risiko für Keramikabplatzungen vom Metallgerüst ist. Darüber hinaus gibt der SCHWICKERATH-Test Aufschluss darüber, inwieweit sich Oberflächenbehandlungen wie Schleifen, Abstrahlen, Polieren, Oxidieren auf die Verbundfestigkeit auswirken [42].

2.4.2 Scherversuch nach SCHMITZ/SCHULMEYER

Bei dieser Versuchsanordnung wird ein quaderförmiger Keramikprüfkörper mit den Maßen $3 \times 3 \times 6 \text{ mm}^3$ von einem Metallwürfel mit etwa 6 mm Kantenlänge abgeschert. Die maximale Scherspannung wird schließlich als Quotient aus dem Kraftwert bei der Bruchbelastung und der Haftfläche des Metall-Keramik-Verbundes ermittelt (Abb. 6) [42, 75].

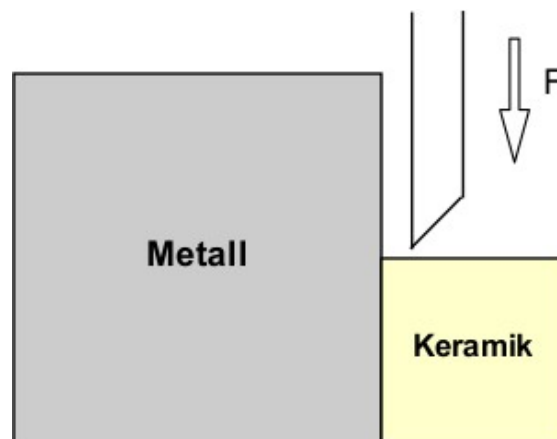


Abb. 6: Scherversuch nach SCHMITZ/SCHULMEYER

Ein wichtiger Aspekt bei diesem Versuch ist, dass das elastische und plastische Verhalten des Metalls das Messergebnis nicht beeinflusst. Der Scherversuch simuliert eine entsprechende Belastung in der Mundhöhle (Krafteinwirkung antagonistischer Arbeitshöcker bei Lateralbewegung) [42].

2.4.3 Druckversuch nach VOSS

Bei der Prüfmethode nach VOSS wird ein keramisch verblendeter oberer Eckzahn unter 45° zur Achse des Stumpfes mit einer Druckfinne auf der Inzisalkante bis zum Bruch belastet [75, 42]. Für den Versuch werden die keramisch verblendeten Kronen auf zuvor polierte Metallstümpfe zementiert und nach einer Wartezeit von 24 Stunden mit dem Sockel in die Halterung einer Zwick-Universal-Prüfmaschine eingespannt [75].

Abb. 7 zeigt eine schematische Darstellung.

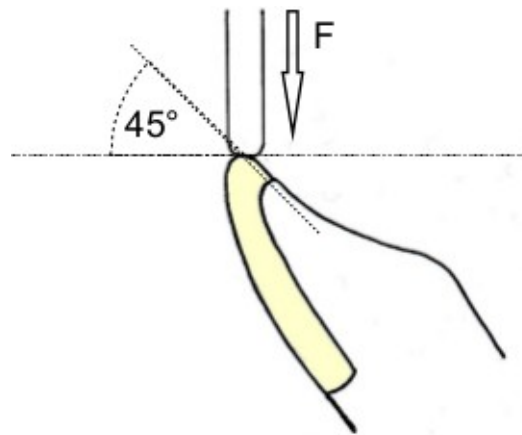


Abb. 7: Druckversuch nach VOSS

Allerdings kann die Bruchbelastung aufgrund der unregelmäßigen Prüfkörpergeometrie nicht auf eine präzise Haftfläche bezogen werden. Als Vergleichszahl für verschiedene Verbundsysteme wird der Kraftaufwand (in N gemessen) bis zum Versagen des Haftverbundes herangezogen [42]. Physiologisch können solche Belastungen durchaus unter Eckzahnführung auftreten [42].

2.4.4 Schlagversuch nach DIN 51155

Keramisch verblendete Metallplättchen mit den Maßen $15 \cdot 15 \cdot 1,3$ mm werden mit einer Schlagpistole nach DIN 51155 auf Schlagfestigkeit geprüft [42]. Allerdings kommen solche Belastungen unter physiologischen Bedingungen in der Mundhöhle nicht vor. Lediglich Gewalteinwirkung oder das Fallen eines herausnehmbaren Zahnersatzes auf den Boden könnte zu einem Versagen des Haftverbundes zwischen Metall und Keramik im Sinne einer Schlagbelastung führen [42].

2.4.5 Versuch nach SHELL/NIELSON (Zug-Scherversuch)

Bei diesem Verfahren wird ein metallischer Rundstab mit einem Durchmesser von 1,63 mm mit Grund- und Dentinmasse verblendet (in einer Tiefe von etwa 2,5 mm) und anschließend auf Zug beansprucht, indem der Stab axial herausgezogen wird (s. Abb. 8). Dabei wird die Spannung gemessen, die aufgewendet werden muss, um den Stab herauszuziehen [73, 77].

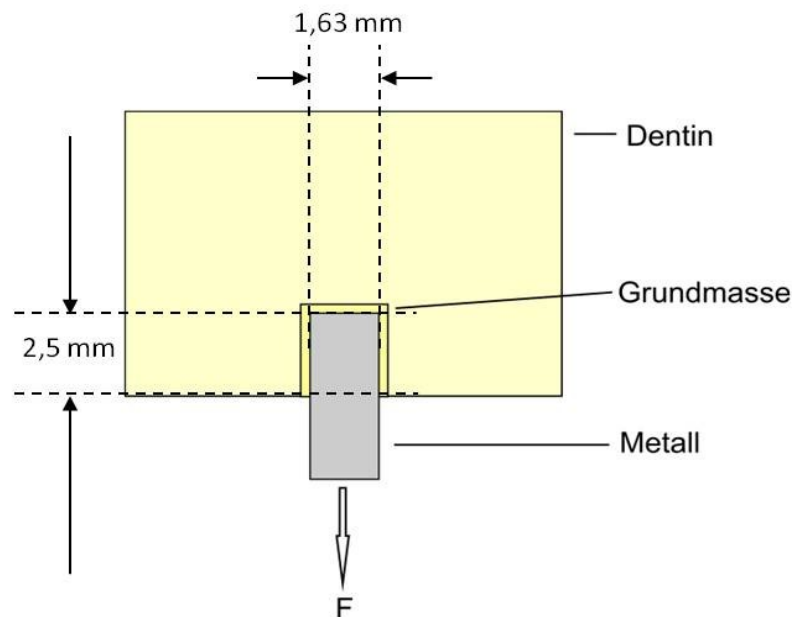


Abb. 8: Zug-Scherversuch nach SHELL/NIELSON

2.4.6 Versuch nach NALLY/BERTA (Zugversuch)

Bei diesem Verfahren werden zwei an den Stirnflächen mit Grundmasse zusammen gebrannte metallische Rundstäbe auf Zug beansprucht (s. Abb. 9). Das Versuchsergebnis wird über die maximale Zugkraft bis zum Versagen des Haftverbundes definiert [73].

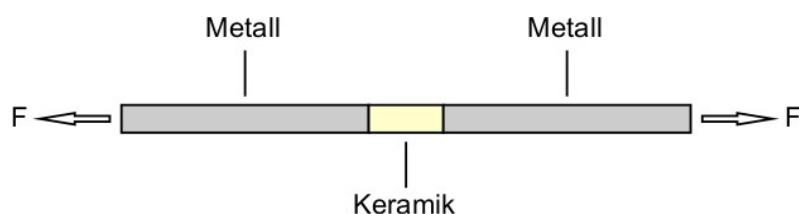


Abb. 9: Versuch nach NALLY/BERTA

2.5 Ursachen und Fehler für das Versagen des Metall-Keramik-Verbundes

Das Versagen des Metall-Keramik-Verbundes und Defekte in der Keramik können unterschiedliche Ursachen haben.

Hierbei kann zwischen feinsten Haarrissen innerhalb der Keramik, die durch Lichteinfall auf die Keramikoberfläche optisch wahrzunehmen sind, Abplatzungen der Keramik,

muschelförmigen Aussprengungen am marginalen Kronenrand sowie Abplatzungen der Keramik, bei denen das Metallgerüst sichtbar wird, unterschieden werden [78, 79].

Defekte und Fehler keramisch verblendeter Restaurationen können ihren Ursprung sowohl in einer fehlerhaften Herstellung im Dentallabor, als auch klinisch bei der Arbeit des Zahnarztes am Patienten haben. In Kapitel 2.2.4.1 und 2.2.4.2 wurde bereits auf mögliche labortechnische Fehler als Ursachen für das Versagen von Metall-Keramik-Restaurationen eingegangen, z. B. unsachgemäße Schmelz- und/oder Gussbedingungen der Gerüstlegierung, die Verarbeitung von Legierungen und Verblendkeramiken mit nicht aufeinander abgestimmten WAK, Fehler bei der Modellation und beim Abstrahlen des Gerüsts sowie bei der Keramiksichtung und Brandführung. Beim Ausarbeiten der keramischen Verblendung mit rotierenden Schleifkörpern kann es ebenfalls zu Mikrorissen in der Keramik kommen (s. a. Kapitel 6.1.2.2).

Auch bei der klinischen Arbeit des Zahnarztes können zu unterschiedlichen Zeitpunkten Fehler gemacht werden, die zum Versagen des Metall-Keramik-Verbundes führen. So kann beispielsweise im Rahmen der Zahnersatzplanung ein bestehender Bruxismus unbeachtet bleiben, wodurch die Wahrscheinlichkeit für Defekte in der Metall-Keramik-Restauration erhöht wird [80, 81, 6]. Vorangehende Untersuchungen eines möglichen Bruxismus können bei der klinischen Entscheidungsfindung zwischen keramisch verblendeten und unverblendeten Metallrestaurationen hilfreich sein [6].

Der Zahnarzt muss sich vergewissern, ob für einen keramisch verblendeten Zahnersatz das vertikale Platzangebot ausreichend ist. Gerade bei kurzen klinischen Kronen oder im juvenilen Gebiss bei größerem Pulpenkavum kann oftmals nicht ausreichend Zahnhartsubstanz für eine keramische Verblendung entfernt werden, ohne dass der behandelnde Zahnarzt Gefahr läuft, die Pulpa langfristig zu schädigen. Dies muss bei der Planung berücksichtigt werden. Auch die Art des Zahnhartsubstanzabtrags ist ein wesentliches Kriterium für die Dauerhaftigkeit von keramisch verblendeten Kronen und Brückenrestaurationen [82], worauf weiter unten eingegangen wird. Ein ausreichender Abtrag der Zahnhartsubstanz ist notwendig, um das Versagensrisiko des Metall-Keramik-Verbundes zu minimieren [83]. Eine fehlerhafte Präparationsform kann zur Minderung der Verbundfestigkeit im Metall-Keramik-System führen. Wird eine Tangentialpräparation statt der notwendigen Stufen- oder Hohlkehlpäparation gewählt, muss der Metallrand des Gerüsts zwangsläufig dünn gestaltet werden und wird damit weniger widerstandsfähig. Die Temperatur beim Brennprozess, insbesondere beim Abkühlen des Brennguts, wirkt sich auf den Metallrand aus. Die notwendigerweise dünn aus-

laufende Keramikschiicht kann der Metallkontraktion nicht folgen, wodurch eine Längsfraktur in der Keramikverblendung entsteht [84]. Durch den beim Probearbeiten oder Zementieren entstehenden Innendruck kann es dann zu Schäden in der keramischen Verblendung kommen, wie z. B. muschelförmige Aussprengungen am Kronenrand [84]. Nur durch eine ausreichende Präparation mit genügend Platz zu Nachbarzähnen, Antagonisten sowie vestibulär und oral kann die Grundlage für eine hinreichend stabile und ästhetische Restauration geschaffen werden [82].

Der keramisch verblendete Zahnersatz ist vom Zahnarzt auf Passgenauigkeit zu überprüfen. Wird eine Passgenauigkeit gerade im Bereich des Kronenrandes übersehen oder ignoriert, kann es beim Zementieren durch den mit dem Finger ausgeübten Druck oder beim Zubeißen im Molarenbereich zu einer Verformung der Kronenwand und ein Aufbiegen des Kronenrandes kommen, was ein Abplatzen der Keramik in Situ zur Folge hätte [85]. Die auf die Okklusalfäche der Krone einwirkende Kraft wird je nach Steigung des Konuswinkels, der Größe der aufliegenden Fläche sowie beim Einzementieren in Abhängigkeit von der Fließfähigkeit des Zements einen Druck im Inneren der Krone ausüben [85]. Dieser Druck kann zu einer bereits erwähnten Verformung der Kronenwand führen, deren Größe auch von der Form und den Abmessungen der Krone sowie den Materialeigenschaften des Verbundsystems abhängig ist [85].

Auch bei der zahnärztlichen Abformung können Fehler unterlaufen. Eine präzise und dimensionsgetreue Abformung ist ausschlaggebend für einen hochwertigen Zahnersatz. Kleinste Mängel und Fehler wie eine ungenaue Darstellung der Präparationsgrenze werden auf das Arbeitsmodell übertragen und können die definitive Adaptation der Restauration gefährden [86]. Bei der so genannten Korrekturabformung handelt es sich um ein zweizeitiges Verfahren, bei dem zunächst mit einem zähplastischen Material eine Situationsabformung über die gesamte Zahnreihe genommen wird. Anschließend werden alle unterschneidenden Bereiche entfernt und die Erstabformung mit einem dünnflüssigen Material korrigiert, wobei das Zweitmaterial durch das Zurücksetzen der Erstabformung zu einer dünnen Schicht ausgepresst wird. Dabei ist es durchaus möglich, dass das unter Druck ausfließende dünnflüssige Korrekturmaterial die Erstabformung deformiert und so aushärtet. Wird die Abformung aus der Mundhöhle entnommen, stellt sich das zähere Material zwangsläufig zurück und verdrängt das nachgiebigere Korrekturmaterial geringfügig in das Abdrucklumen hinein, wodurch sich zu enge Abdrucklumina mit der Folge zu schmaler Modellstümpfe ergeben [87]. Zu enge Kronenlumina sind die Folge. Die daraus resultierende Passgenauigkeit kann wie be-

reits erwähnt bei Nichterkennen oder Ignorieren zu einer Minderung der Verbundfestigkeit im Metall-Keramik-System führen. Dieser Fehler kann vermieden werden, indem in die Pfeilerlumina kleine Abflusrrillen eingeschnitten werden, über die überschüssiges Korrekturmaterial abfließen kann, und die Zweitabformung mit ausreichend, um das dünnflüssige Material zu verdrängen, aber nicht zu viel Druck genommen wird.

Ein Belassen von okklusalen Vorkontakten führt zu einer Überbelastung und ist eine häufige Ursache für ein Versagen des Metall-Keramik-Systems [2].

2.6 Lebensdauerwahrscheinlichkeit von Metall-Keramik-Systemen

Die Langlebigkeit von Metall-Keramik-Restaurationen hängt von der zuverlässigen Bindung zwischen dem Metall und der Keramik ab [7]. Um über die Lebensdauerwahrscheinlichkeit von Metall-Keramik-Restaurationen Aussagen treffen zu können, werden In-vitro- und In-vivo-Studien herangezogen.

Die Haltbarkeit ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Die Resistenz einer prothetischen Arbeit gegenüber in der Mundhöhle auftretenden Kräften und Belastungen wird bestimmt durch die Festigkeit der Keramik und der Haftfestigkeit des Metall-Keramik-Systems. Mögliche Fehler, sowohl zahntechnischer als auch klinischer Art, führen oft erst in Kombination miteinander zu einem Versagen der Restauration. Sie können oftmals einzeln vom Metall-Keramik-System toleriert werden [45].

2.6.1 In-vitro-Lebensdauerwahrscheinlichkeit

In Kapitel 2.4 wurden bereits mögliche Testverfahren, die für ein Prüfen der Verbundfestigkeit zwischen Metall und Keramik Anwendung finden, erläutert. Je nachdem, aus welchen Komponenten ein Metall-Keramik-Verbundsystem besteht und welches Testverfahren angewandt wird, ergeben sich unterschiedliche Verbundfestigkeitswerte. Verschiedene Autoren haben durch Einlagerung von Prüfkörpern in Korrosionslösungen oder Temperaturwechselbäder die Verhältnisse innerhalb der Mundhöhle simuliert. Allgemein konnte eine verminderte Verbundfestigkeit zwischen Metall und Keramik festgestellt werden. Korrosionslösungen und Temperaturschwankungen zeigen sich also als bedeutende Einflussgröße [88].

In Tab. VI sind durchschnittliche Verbundfestigkeitswerte von verschiedenen Autoren für verschiedene Systeme übersichtlich dargestellt.

Tab. VI: In-vitro-Verbundfestigkeiten von Metall-Keramik-Restaurationen

Legierung/ Metall	Prüfverfahren	Ergebnisse	Quelle
Hochgoldhaltige Legierung	Verbundfestigkeits- Prüfung nach DIN 13927	47,2 MPa (trocken), 41,6 MPa (nach 90 d in Korrosionslösung)	[89]
Titan, gefräst	Verbundfestigkeits- Prüfung nach DIN 13927	32,6 MPa (trocken), 29,6 MPa (nach 90 d in Korrosi- onslösung)	[89]
Titan, gegossen	Verbundfestigkeits- Prüfung nach DIN 13927	33,0 MPa (trocken), 27,3 MPa (nach 90 d in Korrosi- onslösung)	[89]
Palladiumfreie Goldlegierung	Verbundfestigkeits- Prüfung Nach DIN 13927	41,6 MPa (trocken), 24,1 MPa (nach 90 d In Korrosi- onslösung) 39,3 MPa (Wechselbad 5 °/55 °C)	[90]
Gold-Platin- Indium	SCHWICKERATH-Test	64 MPa	[39]
Hochgoldhaltige Legierung	SCHWICKERATH-Test	47-65 MPa	[91]
Goldreduzierte Legierung	SCHWICKERATH-Test	47-60 MPa	[91]
Palladiumbasis- Legierung	SCHWICKERATH-Test	49-70 MPa	[91]
Nickel- und Kobaltbasis- Legierung	SCHWICKERATH-Test	41-44 MPa	[91]
Kobalt-Chrom- Legierung	SCHWICKERATH-Test	36,1 MPa	[8]
Nickel-Chrom- Legierung	SCHWICKERATH-Test	31 MPa	[92]
Titan	SCHWICKERATH-Test	35-51 MPa	[93]

Der Zahnersatz ist in der Mundhöhle bei der Kautätigkeit, Leermastikation, aber auch bei Parafunktionen einer Schwellenbeanspruchung ausgesetzt. Bei diesen Dauer-schwellbeanspruchungen kann nach einiger Zeit ein Versagen des Metall-Keramik-Verbundes auftreten, wobei hier die Höhe des Lastwertes unter dem Wert liegt, bei welchem bei einmaliger stetig steigender Kraft das Versagen eingetreten wäre. Klinisch bezogen bedeutet dies, dass in der Mundhöhle oftmals erst nach einer längeren Tragezeit Risse und Abplatzungen zu verzeichnen sind, die nur äußerst selten auf eine Überbelastung zurückzuführen sind [94]. Dauerbiegeversuche haben ergeben, dass die Dauerbiegefestigkeit etwa 55 % der Biegefestigkeit bei einmaliger Belastung beträgt [94].

2.6.2 In-vivo-Lebensdauerwahrscheinlichkeit

Von klinischem Interesse für die Funktionsfähigkeit einer keramisch verblendeten Restauration ist das Risiko einer Fraktur während der Funktionsperiode [95].

Eine notwendige Neuanfertigung eines keramisch verblendeten Zahnersatzes kann verschiedene Gründe haben. Unterschieden werden muss, ob ein Zahnersatz aufgrund des Versagens des Metall-Keramik-Verbundes im Sinne von Rissen, Abplatzungen und Frakturen erneuert werden muss oder ob die Gründe für eine Neuanfertigung bei den Pfeilerzähnen (Sekundärkaries, endo- oder parodontale Probleme) zu suchen sind. Auch kann eine unzureichende Ästhetik des Zahnersatzes Grund für eine Neuanfertigung sein [96]. Zu bemerken ist, dass Frakturen besonders häufig in den ersten paar Monaten nach Eingliederung zu verzeichnen sind. Dies kann verschiedene Gründe haben wie z. B. Fehler bei der Herstellung, klinische Fehler (s. Kapitel 2.5), aber auch lokale Überbelastungen [97, 98].

Risikofaktoren anatomisch-topographischer, konstruktiver und individueller Art nehmen Einfluss auf die Verweildauer der Restaurationen im Munde. Klinische Studien zeigten, dass die Größe der Brücke, das Alter des Patienten, die Lokalisation und die Konstruktion (Endpfeiler- oder Freidendbrücke) einen signifikanten Einfluss auf die Lebensdauer des Ersatzes nehmen [99, 96]. Aber auch der Kariesstatus, Mundhygiene und Geschlecht des Patienten sowie sozioökonomische Aspekte beeinflussen die Langlebigkeit des Zahnersatzes [96].

Mit zunehmendem Alter des Patienten steigt das Verlustrisiko bis auf das Fünffache an [99]. Es ist davon auszugehen, dass parodontale Probleme und Sekundärkaries, begründet in der im Alter nachlassenden manuellen Geschicklichkeit und einer daraus resultierenden unzureichenden Mundhygiene, die Ursache sind.

Brücken mit nur einem Pfeilerzahn sind mehr als doppelt so stark gefährdet wie eine Standardbrücke mit zwei Pfeilerzähnen. Freidendbrücken haben ein 40 % höheres Verlustrisiko im Vergleich zu Endpfeilerbrücken. Auch haben mehrspannige Brücken ein zu 50 % höheres Risiko in Relation zu einspannigen Brücken. Im Vergleich zu im Unterkiefer lokalisierten Brücken sind Oberkieferbrücken um ein Drittel risikoreicher [89]. Im Vergleich zu einer Frontzahnkrone steigt das Risiko bei einer Eckzahnrestauration um mehr als 30 %, Prämolaren- und Molarenrestorationen haben ein geringeres Verlustrisiko [99]. Unterschiede in der Langlebigkeit zeigen sich auch zwischen Einzelkronen und Kronen, die Teil eines kombiniert festsitzend-herausnehmbaren Zahnersatzes sind.

Studien von REITEMEIER zeigten, dass Kronen, die als Halterung für gegossene Klammern oder Geschiebe hinzugezogen werden, eine kürzere Lebensdauer aufweisen [6]. Dies ist auf die höhere Anfälligkeit sowohl für biologische als auch mechanische Komplikationen zurückzuführen [6].

Bruxismus ist als Risikofaktor für Defekte in keramisch verblendeten Restaurationen anzusehen (s. Kapitel 2.5) [6]. Es zeigt sich, dass ein Bruxismus insbesondere in Zusammenhang mit der Lokalisation auf der rechten Kieferseite mit einer höheren Wahrscheinlichkeit von Defekten im Metall-Keramik-Verbundsystem assoziiert ist [80].

In Abb. 10, 11 und 12 sind in Form von Diagrammen in der Literatur erwähnte Lebensdauerwahrscheinlichkeiten übersichtlich dargestellt.

Gold- und Palladium-Legierung

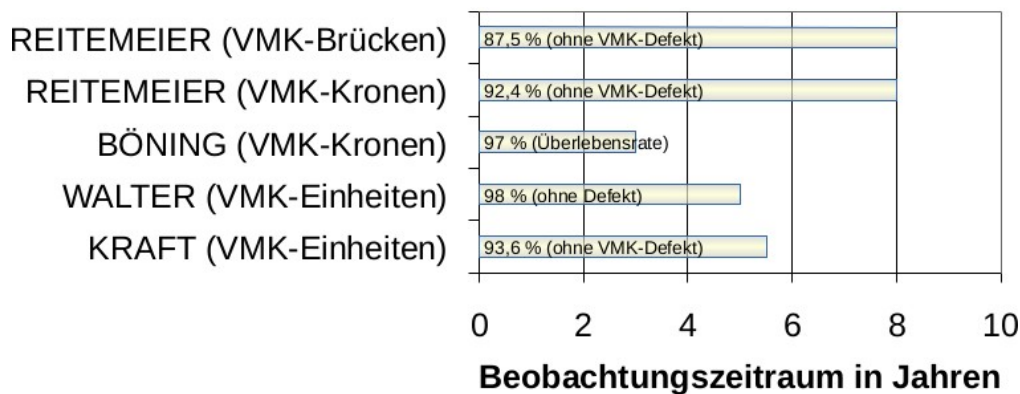


Abb. 10: In-vivo-Lebensdauerwahrscheinlichkeit von keramisch verblendeten Kronen und Brücken mit einem Metallgerüst aus einer Gold-Palladium-Legierung [100, 80, 101, 102, 11]

Titan-Legierung

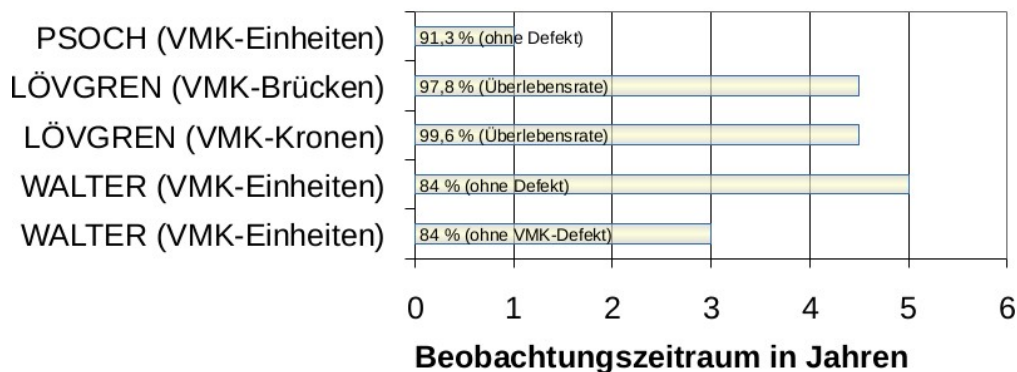


Abb. 11: In-vivo-Lebensdauerwahrscheinlichkeit von keramisch verblendeten Kronen und Brücken mit einem Metallgerüst aus Titan [100, 79, 103, 102]

Ohne Angabe der Legierung

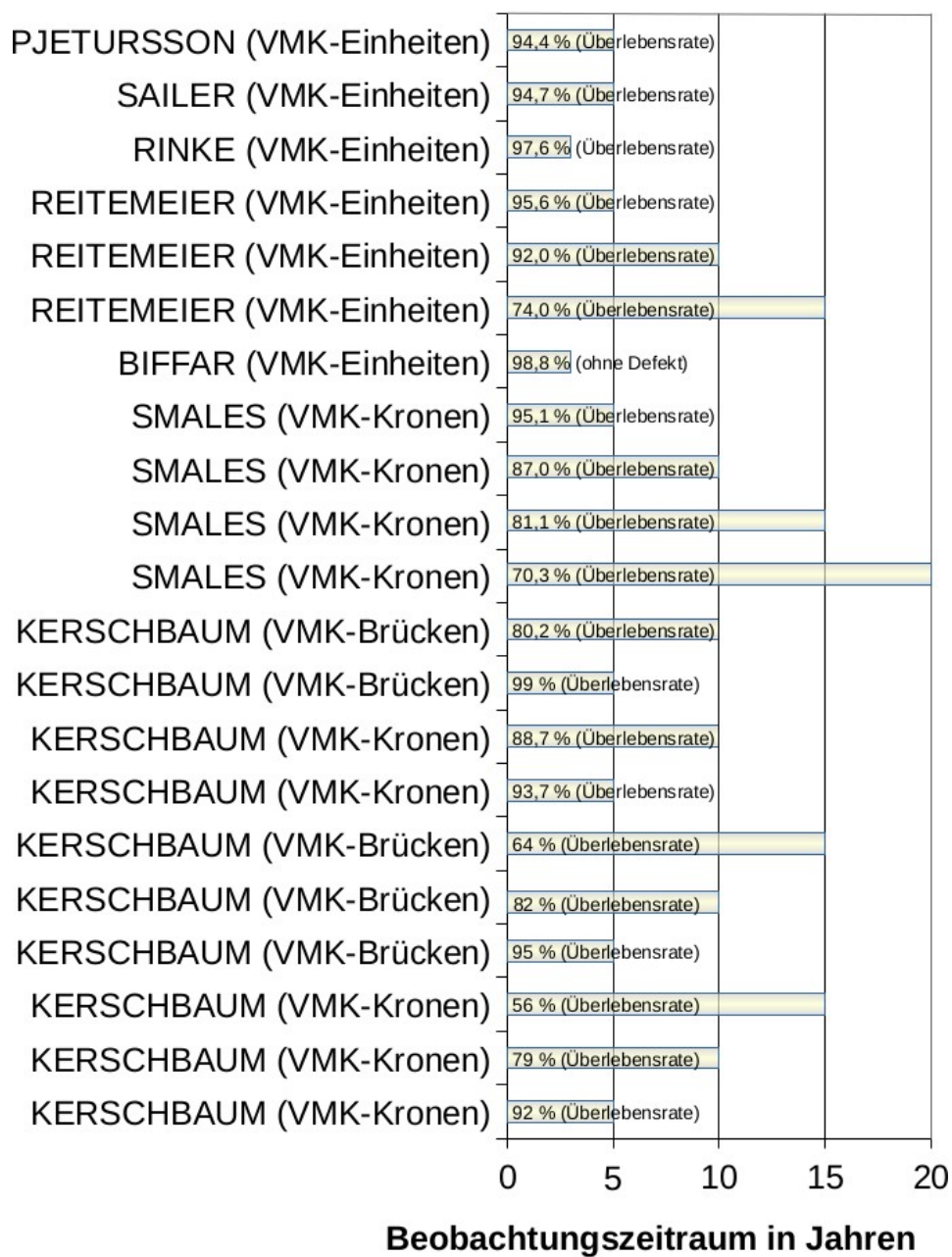


Abb. 12: In-vivo-Lebensdauerwahrscheinlichkeit von keramisch verblendeten Brücken und Kronen ohne Angabe der für das Metallgerüst verwendeten Legierung [104, 105, 106, 6, 95, 107, 99, 108]

3 Fragestellung

1. In der vorliegenden Studie wurde untersucht, ob die horizontale und insbesondere die vertikale Position des Brennguts im Keramikofen Einfluss auf die Verbundfestigkeit zwischen Legierung und Verblendkeramik haben.
2. Führen bei unterschiedlichen horizontalen und vertikalen Positionierungen eventuelle Temperaturgradienten innerhalb der Brennkammer zu unterschiedlichen Verbundfestigkeitswerten und optischen Unterschieden?
3. Welchen Einfluss haben Abweichungen von den vorgeschriebenen Brenntemperaturen auf die Verbundfestigkeit und das optische Erscheinungsbild?

4 Methodik

4.1 Prüfkörper

Es wurden 224 Prüfkörper (gruppiert in 32 Gruppen à 7 Prüfkörper) nach DIN EN ISO 9693 [1] hergestellt (s. Abb. 16).

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit wurden alle Prüfkörper (SCHWICKERATH-Plättchen) unter identischen Brennbedingungen angefertigt, allerdings wurde sowohl die Brennposition auf dem Brenngutträger (Wabe) variiert, als auch die vertikale Position des Brenngutträgers im Keramikofen.

Für die drei gewählten vertikalen Positionen des Brenngutträgers ergab sich eine Probenanzahl von 126:

Ebene 1

Die Wabe liegt direkt auf der Aufnahmeplatte des Programat® EP 3000

Ebene 2

Die Wabe hat einen vertikalen Abstand von 1,5 cm zur Aufnahmeplatte

Ebene 3

Die Wabe hat einen vertikalen Abstand von 3 cm zur Aufnahmeplatte (Abb. 13)

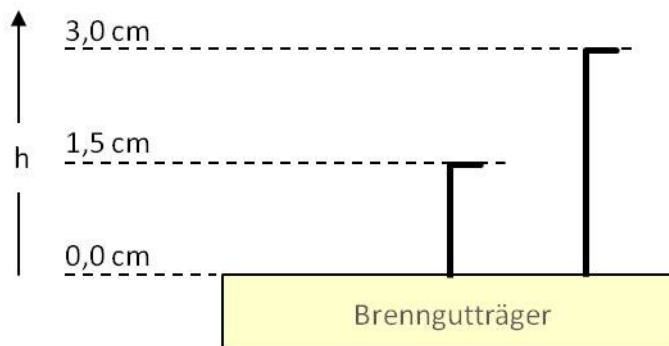


Abb. 13: Schematische Darstellung vertikale Brennpositionen

Es wurden 6 horizontale Positionen (Gruppen) auf dem Brenngutträger gewählt: Vorne, links, hinten, rechts, Mitte 1, Mitte 2 (Abb. 14). Für jede Gruppe wurden 7 Prüfkörper angefertigt.

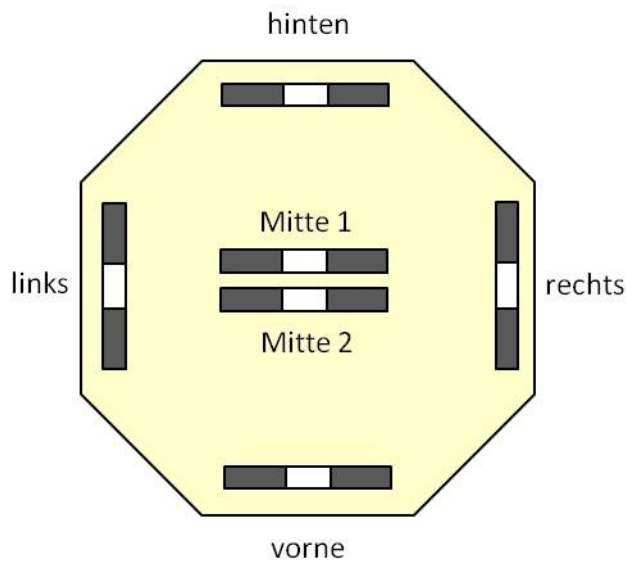


Abb. 14: Schematische Darstellung horizontale Positionen auf dem Brenngutträger

Im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit wurden 98 Prüfkörper in 14 Gruppen geprüft, die an zwei unterschiedlichen horizontalen Positionen (seitlich und mittig, Abb. 15) in der Brennkammer platziert wurden. Darüber hinaus wurde je 6 x bei abweichenden Temperaturen und je 1 x nach Gebrauchsanweisung gebrannt. Auf diese Art und Weise sollte ein Unter- und Überbrennen simuliert werden.

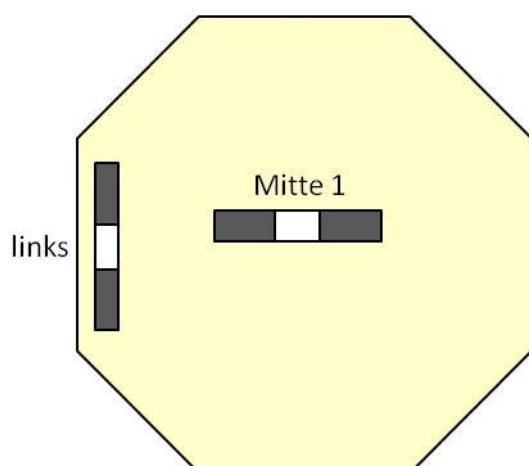


Abb. 15 : Schematische Darstellung seitliche und mittige Position

In Abb. 16 ist der Versuchsaufbau übersichtlich dargestellt. Sie zeigt die 126 Prüfkörper, die nach Herstellerangaben auf den oben beschriebenen Ebenen 1, 2 und 3 gebrannt wurden sowie die 98 Prüfkörper, die bei abweichenden Temperaturen gebrannt wurden. Alle 224 Prüfkörper wurden im Anschluss hinsichtlich visueller Unterschiede überprüft, ausgewertet und ihre Scherverbundfestigkeit im SCHWICKERATH-Test bestimmt. Die Versuchsergebnisse wurden statistisch ausgewertet.

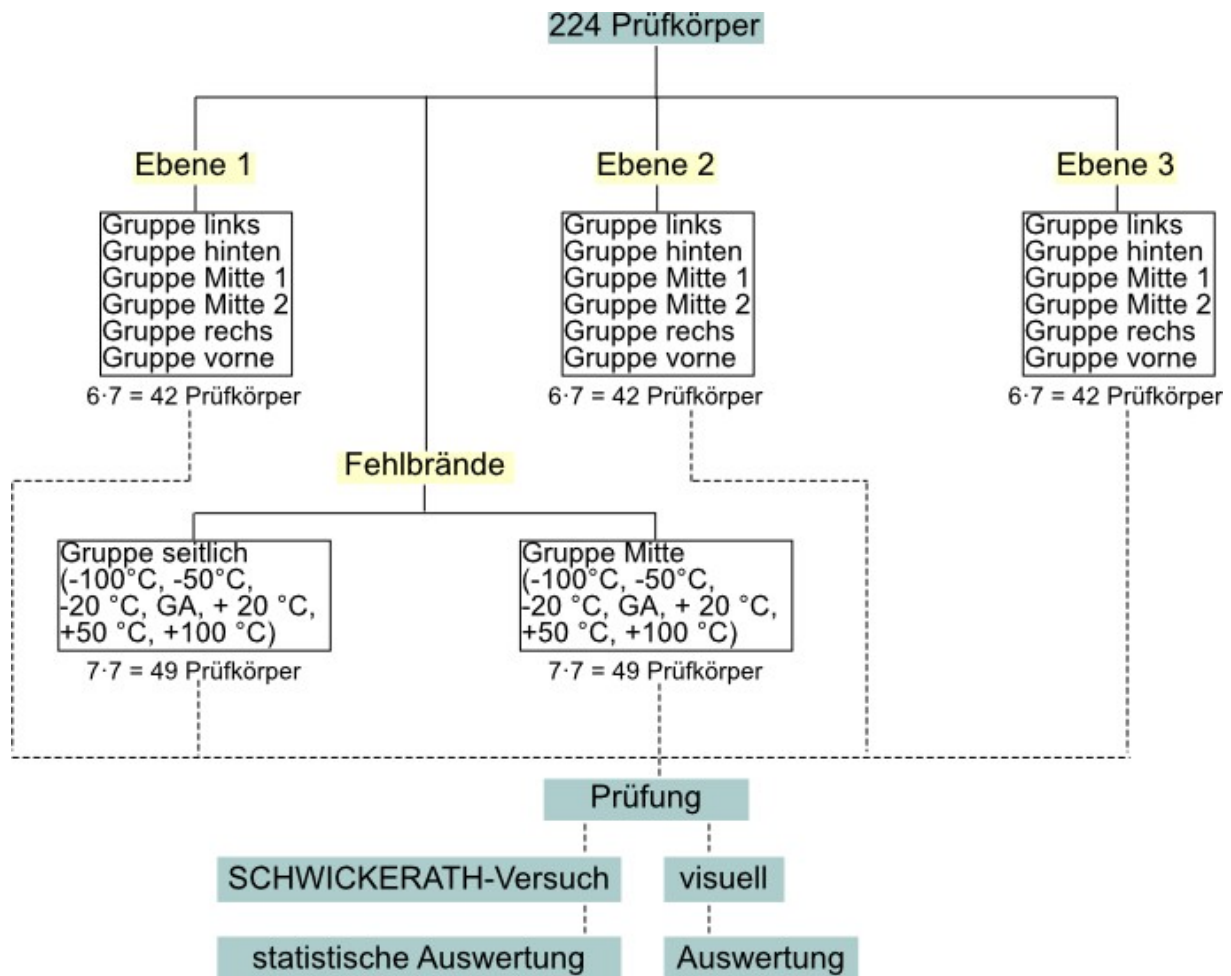


Abb. 16: Versuchsaufbau im Überblick



Abb. 17: Übersicht Prüfkörperherstellung

4.1.1 Herstellung der Metallgerüste

Abb. 17 zeigt übersichtlich die Prüfkörperherstellung.

Eine Polyamidfolie von 0,5 mm Stärke wurde in etwa 3,1 mm breite Streifen geschnitten. Die Streifen wurden von der Schutzfolie, die vor eventuellen Kratzern oder Riefen auf der Polyamidoberfläche schützen sollte, befreit und anschließend mit einem Skalpell auf eine Länge von 28 mm zugeschnitten. Mit Hilfe von Schleifpapier wurden eventuelle durch das Skalpell verursachte Grate entfernt und die Polyamidstreifen für das Einbetten vorbereitet. Zunächst wurden die Polyamidstreifen mit einem sauberen Pinsel von Schleifstaub befreit und anschließend an einen Wachsring (zu einem Kreis geformten Wachsdraht von 4 mm Stärke, BEGO) angestiftet, der an einen 6er Gusstrichterformer angewachst wurde. Dabei wurde auf einen weichen Übergang geachtet, scharfe Kanten vermieden, um einen „Abriss“ der phosphatgebundenen Einbettmasse zu verhindern. Die Polyamidplättchen standen dabei nicht senkrecht, sondern leicht schräg nach außen. Auf diese Weise erstarrte das Gussobjekt von der Peripherie aus zum Hitzezentrum hin; somit konnten eventuelle Schwundvakuolen im Gussobjekt vermieden werden.

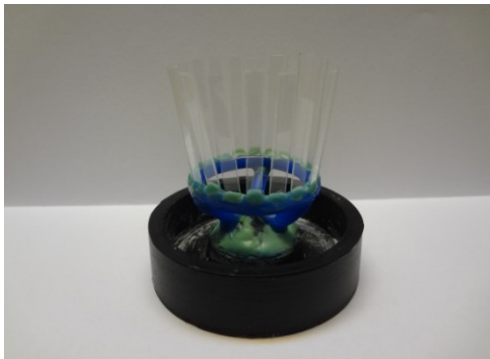


Abb. 18: Gusstrichterformer mit angestifteten Streifen

Der 6er Gusstrichterformer wurde mit einem laborüblichen Muffelring (HERAEUS) kombiniert, wobei er zuvor mit Vaseline bestrichen und der Muffelring mit einer dünnen Lage hitzebeständigen Vlieses (HERAEUS) ausgekleidet wurde, um die Expansion der Einbettmasse zu kompensieren. Anschließend wurde die phosphatgebundene Einbettmasse angemischt. Dafür wurde die Flüssigkeit BegoSol® HE (BEGO) mit destilliertem Wasser 40 %ig verdünnt, anschließend 50 ml der verdünnten Lösung mit 200 g Belavest® SH (BEGO) zunächst manuell 15 s in einem sauberen, nur für Einbettmasse zu verwendenden Vakuumanmischbecher durchgerührt. Danach wurde die Einbettmasse im Vakuumanmischgerät Multivac® 4 (DEGUSSA) 60 s durchgerührt und anschließend 30 s unter Vakuum belassen. Für ein optimales Fließverhalten der Einbettmasse und blasenfreies Einbetten des zu gießenden Objekts wurde die 6er Muffel auf feinsten Stufe auf dem Rüttler KV-38 (Wassermann) befüllt. Nach der Aushärtezeit von 40 min wurde der Gusstrichterformer entfernt und die Muffel zum Austreiben des Wachses und Verbrennen der Polyamidfolie in den Vorwärmofen Nabertherm Program Controller S27 (NABERTHERM) unter Berücksichtigung der Herstellerangaben gestellt.

Tab. VII: Vorwärmtablette für das konventionelle Aufheizen von Wirobond® 280 [109]

Abbindezeit nach dem Einbetten	mind. 30 min
Einlegetemperatur	Raumtemperatur
Haltestufe	250 °C (mit 5 °C/min)
Endtemperatur	900 °C (mit 7 °C/min)
Haltezeiten für Haltestufe und Endtemperatur	30-60 min (je nach Größe und Anzahl der Muffeln)

Zum Gießen wurde die edelmetall-, nickel- und berylliumfreie Kobalt-Chrom-Aufbrennlegierung Wirobond® 280 (BEGO) verwendet (Chargen-Nummer 12799).

Tab. VIII und Tab. IX zeigen übersichtlich ihre Zusammensetzung und Eigenschaften.

Tab. VIII: Richtanalyse in Masse-% von Wirobond® 280 [109]

Element	Masse-%
Kobalt (Co)	60,2
Chrom (Cr)	25,0
Molybdän (Mo)	4,8
Wolfram (W)	6,2
Gallium (Ga)	2,9
Silizium (Si)	in Spuren
Mangan (Mn)	in Spuren

Tab. IX: Merkmale der Legierung Wirobond® 280 [109]

Legierungsmerkmale	Richtwerte
Dichte [g/cm^3]	8,5
WAK [10^{-6}K^{-1}] bei 25-500 °C	14,0
WAK [10^{-6}K^{-1}] bei 20-600 °C	14,2
Vorwärmtemperatur [°C]	900-1000
Gießtemperatur [°C]	ca. 1500
Schmelztemperatur [°C]	1360-1400
Elastizitätsmodul [GPa]	ca. 220
Dehngrenze ($R_{p0,2}$) [MPa]	540
Zugfestigkeit (R_m) [MPa]	680
Bruchdehnung (A_5) [%]	14
Vickershärte (HV 10)	280

Nach Entnahme aus dem Vorwärmofen wurde die Muffel zum Gießen in den Gussautomaten Multiherz Senior (SAED-PINEROLO) eingelegt. Wie vom Hersteller empfohlen wurde die Legierung ohne Schmelzpulver geschmolzen, wobei nach jedem Gussvorgang der Keramikgusstiegel auf eventuelle Rückstände untersucht und gegebenenfalls von solchen befreit wurde. Nach Abkühlung auf Raumtemperatur wurde der Muffelring entfernt und das Gussobjekt mit Hilfe einer Ausbettzange zuerst grob von der Einbettmasse befreit. Anschließend wurde mit Korox® 250 μm abgestrahlt; zunächst im Umlaufstrahler D-H 22 (Harnisch und Rieth) und dann per Hand, um die noch verbliebenen Einbettmassereste zu entfernen. Mit Hilfe einer Trennscheibe wurden die Metallplättchen vom Gusskanal abgetrennt und jene aussortiert, die Schwundvakuolen bzw. Porositäten aufwiesen; sie wurden nicht für die Versuche verwendet und verworfen.

Die Metallplättchen wurden mit einem elektronischen und kalibrierten Messschieber und einer fein verzahnten Hartmetallfräse (KOMET) auf die für SCHWICKERATH-Plättchen vorgesehenen Maße von $(3 \pm 0,1 \text{ mm}) \times (25 \pm 1 \text{ mm}) \times (0,5 \pm 0,05 \text{ mm})$ gebracht, wobei die verbliebene Oxidschicht ebenfalls entfernt werden konnte.

4.1.2 Schichten der Keramik

Bevor die Metallplättchen beschichtet werden konnten, mussten sie kurz vor der Schichtung zunächst mit Korox® 250 µm bei 4 bar per Hand im Einweggriffelstrahler Basic quattro (RENFERT) abgestrahlt werden; so wurde eine Mikroretention geschaffen und die Oberflächenenergie erhöht. Da nur ein Teil des Plättchens beschichtet werden sollte, wurde der zu beschichtende Bereich vorher in der Keramikschichthilfe mit einer Anreißnadel markiert.

Beim Abstrahlen jedes Plättchens wurde auf eine hohe Reinheit Wert gelegt. Deshalb wurde das Plättchen zuvor bei über 65 °C und 3 bar mit dem Triton SL abgedampft (BEGO), im Anschluss wie schon erwähnt bei 4 bar per Griffelstrahler mit Korox® 250 µm abgestrahlt und danach nochmals abgedampft. Nach dem Abdampfen waren höchstens 20 min Zeit für den nächsten Arbeitsschritt, um die nach dem Abstrahlvorgang erhöhte Oberflächenenergie optimal zu nutzen. Um die oben erwähnte Reinheit zu gewährleisten, durfte das Plättchen anschließend nur noch mit der Arterienklemme gehalten werden, eine Berührung mit den Händen wurde vermieden. Abb. 19 zeigt schematisch die einzelnen Arbeitsschritte zur Herstellung der keramischen Verblendung.

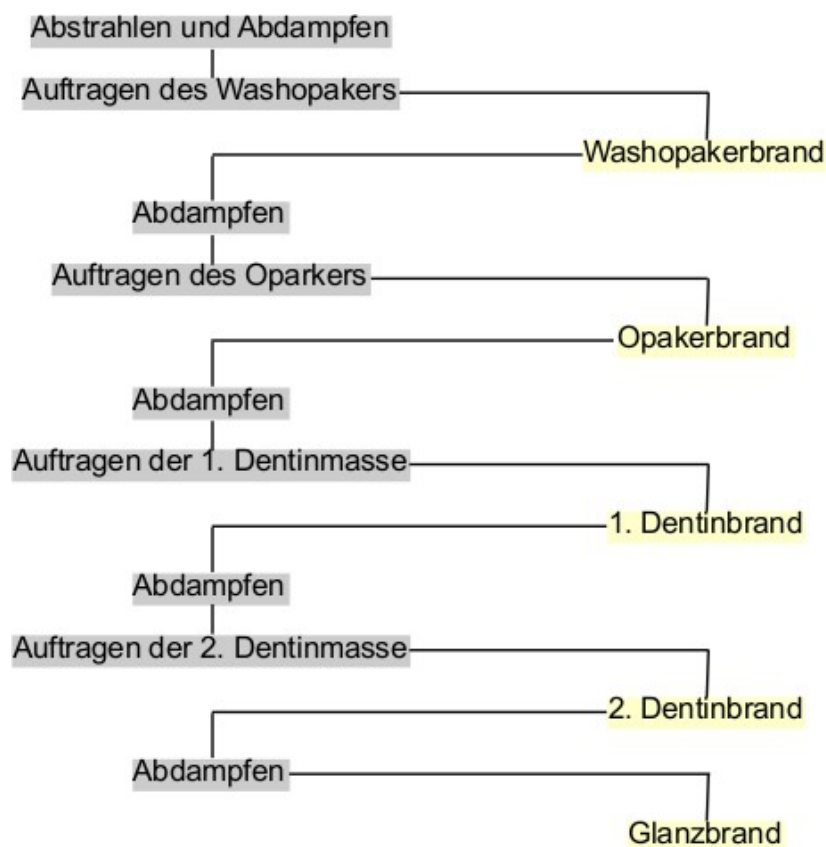


Abb. 19: Übersicht Herstellung der keramischen Verblendung

Für alle Prüfkörper wurde die Keramik VITA VM® 13 (VITA) verarbeitet (Chargen-Nummer 30400). Ihre Zusammensetzung und physikalischen Eigenschaften sind in Tab. X und Tab. XI übersichtlich dargestellt.

Tab. X: Chemische Zusammensetzung von VITA VM® 13 [41]

Oxide	Opaker in Masse-%	Dentin in Masse-%
SiO ₂	40-44	59-63
Al ₂ O ₃	11-14	13-16
K ₂ O	7-10	9-11
Na ₂ O	4-6	4-6
TiO ₂	4-7	<0,5
CeO ₂	13-16	<0,5
ZrO ₂	3-5	<0,5
CaO	1-2	1-3
B ₂ O ₃	3-4	3-4
BaO	0-1	0-1
SnO ₂	<0,5	<0,5
Mg-, Fe-, P-Ox.	<1	<1

Tab. XI: Physikalische Eigenschaften von VITA VM® 13 [41]

Physikalische Eigenschaften [Einheit]	Richtwerte
WAK (bei 25-500 °C) OPAQUE [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	13,6-14,0
Transformationspunkt OPAQUE [°C]	ca. 570/577
WAK (bei 25-500 °C) BASE DENTINE [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	13,1-13,6
Erweichungspunkt BASE DENTINE [°C]	ca. 635
Transformationspunkt BASE DENTINE [°C]	ca. 560/565
Löslichkeit BASE DENTINE [µg/cm ³]	ca. 12
Dichte BASE DENTINE [g/cm ³]	ca. 2,5
3-Punkt-Biegeversuch BASE DENTINE [MPa]	ca. 120
Mittlere Korngröße BASE DENTINE [µm]	ca. 12
Verbundfestigkeitsprüfung (nach ISO 9693) BASE DENTINE [MPa]	ca. 43

Zunächst erfolgte das Auftragen/Einmassieren des Washopakers WASH OPAQUE PASTE VITA VM® 13 (Chargen-Nummer 12100) mit einem Naturhaarpinsel und ein Verdichten mit dem Ceramo Sonic Condenser (SHOFU) sowie der anschließende Washopakerbrand im Brennofen Programat® EP 3000 (IVOCLAR).

Nach erneutem Abdampfen mit dem Triton SL erfolgte mit gereinigtem Pinsel das vollständig deckende Auftragen des Opakers OPAQUE PASTE VITA VM® 13 (VITA, Chargen-Nummer 12260), der ebenfalls auf dem Ceramo Sonic Condenser verdichtet und anschließend gebrannt wurde.

Nach dem Opakerbrand wurde das Plättchen wiederholt abgedampft und die Dentinmasse aufgebrannt. Dafür wurde aus der Dentinmasse BASE DENTINE VITA VM® 13 (VITA) und der Anmischflüssigkeit MODELLING LIQUID (VITA, Chargennummer 10370) eine gut zu schichtende und mit dem Pinsel formbare Paste hergestellt. Das Auftragen der Dentinmasse erfolgte in der Keramikschichthilfe (s. Abb. 20); das Metallplättchen wurde in die Keramikschichthilfe eingelegt und die Dentinmasse mit Hilfe eines zur Schippe geformten, ausschließlich für diese Keramikmasse vorgesehenen und vor jedem neuen Arbeitsgang gereinigten und getrockneten Naturhaarpinsels aufgetragen (s. Abb. 21).



Abb. 20: Keramikschichthilfe



Abb. 21: Auftragen der Keramikmasse

Die Masse wurde durch Riffeln des Plättchens mit einem Le Cron-Instrument verdichtet, es folgte der erste Dentinbrand im Keramikofen. Nach Abkühlen wurde die aufgebrannte Keramikmasse mit einem diamantierten Schleifkörper angeraut, das Plättchen nochmals abgedampft und die zweite Dentinschicht in der Keramikschichthilfe aufgetragen, verdichtet und im Keramikofen gesintert.

Vor dem Glanzbrand mussten die Prüfkörper eingeschliffen werden, die Maße der Keramik waren dabei $1,00 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ (Höhe), $8,00 \pm 0,01 \text{ mm}$ (Länge), die Höhe insgesamt mit Metallplättchen ($1,5 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

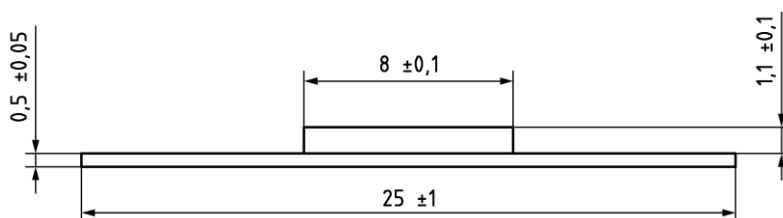


Abb. 22: Maße des SCHWICKERATH-Plättchens [1]

Dafür wurde ein jeder Prüfkörper auf einen waagerechten Schleifblock gelegt, mit einer Pinzette fixiert und dann mit einer im Parallelfräsgerät 2501 BIENNE (CENDRES & METAUX S.A.) eingespannte diamantierte Trennscheibe (KOMET) durch behutsames, vorsichtiges Absenken bei einer Drehzahl von 5000/min bearbeitet, bis er in der Höhe die richtigen Maße aufwies (s. Abb. 23, 24 und 25).



Abb. 23: Parallelfräsgerät

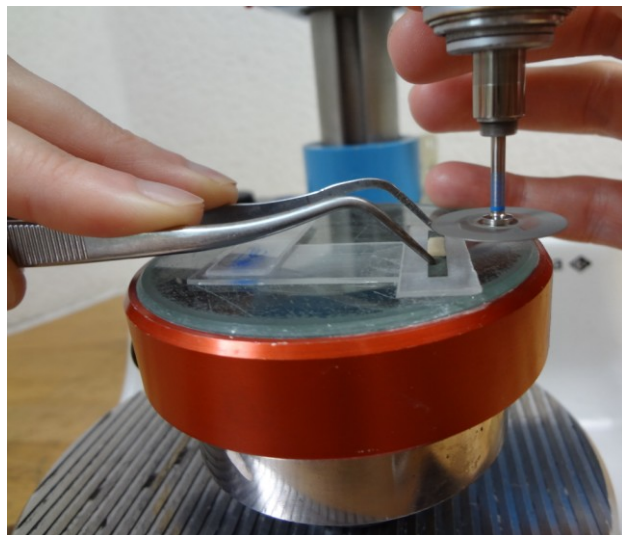


Abb. 24: Fixiertes SCHWICKERATH-Plättchen

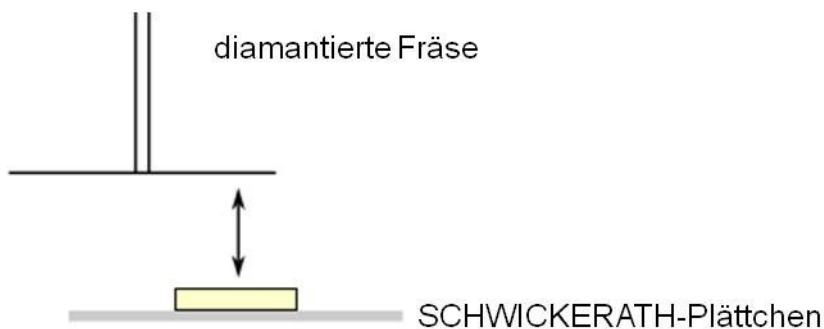


Abb. 24: Schematische Darstellung des Schleifvorgangs

Das Einschleifen der Keramikblockseiten erfolgte durch eine im Handstück eingespannte diamantierte Fräse und Trennscheibe. Hierbei wurde Reibungswärme vermieden, in-

dem die Drehzahl von Scheibe und Fräse max. 5000 Umdrehungen/min betrug und das Objekt bei gleichzeitiger Absaugung mit Luft gekühlt wurde.

Nachdem die beschliffenen Prüfkörper abermals abgedampft wurden, konnte der Glanzbrand im Keramikofen erfolgen (s. Abb. 26).



Abb. 26: Fertiges SCHWICKERATH-Plättchen nach Glanzbrand

4.1.3 Brennen der Keramik

Das Herstellungsverfahren war bei allen SCHWICKERATH-Prüfkörpern identisch, mit Ausnahme der Brennposition als einzige Variable (6 verschiedene horizontale Positionen auf dem Brenngutträger und 3 verschiedene vertikale Höhen im Keramikofen). Eine schematische Darstellung zeigt Abb. 27. Die Prüfkörper wurden auf dem Brenngutträger hinten, rechts, vorne, links positioniert, zwei weitere Prüfkörper wurden mittig platziert (Mitte1 und Mitte 2) und nach Herstellerangaben gebrannt (s. Abb. 28). Es wurde präzise darauf geachtet, dass jedes Plättchen die Brennvorgänge von Washbrand bis hin zum Glanzbrand an immer derselben Brennposition durchlief.

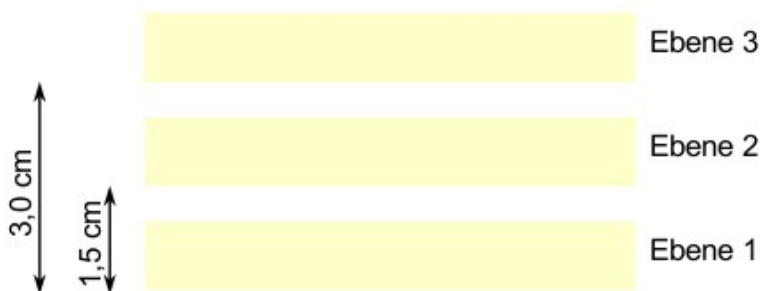


Abb. 27: Schematische Darstellung der drei vertikalen Brennpositionen

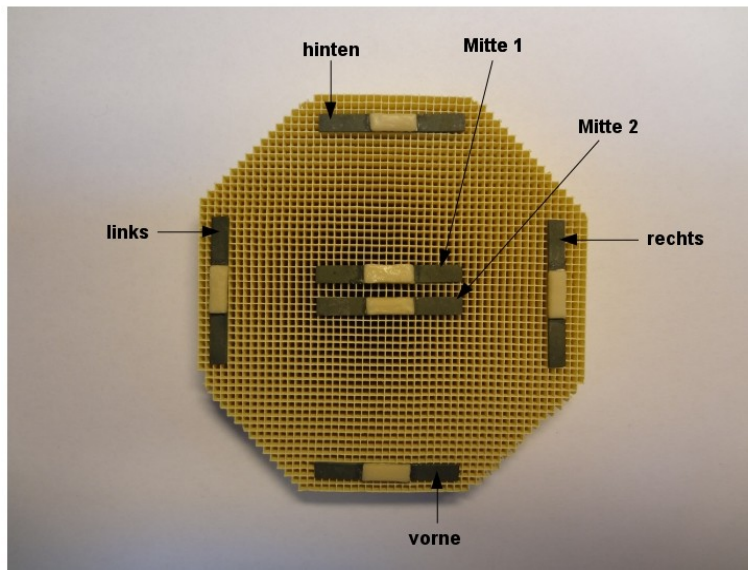


Abb. 28: Horizontale Positionen auf dem Brenngutträger Wabe

In Hinsicht auf die Brandführung wurde sich im ersten Teil der vorliegenden Arbeit nach den Herstellerangaben gerichtet (s. Tab. XII)

Tab. XII: Brenntabelle nach Herstellerangaben für VITA VM® 13 [41]

	Starttemperatur	Vortrockenzeit, Schließzeit	Aufheizzeit	Temperaturanstieg	Endtemperatur	Haltezeit für Endtemperatur	Vakuum Haltezeit
Washbrand	500 °C	4 min	5,12 min	75 °C/min	890 °C	2 min	5,12 min
Opakerbrand	500 °C	4 min	5,12 min	75 °C/min	890 °C	1 min	5,12 min
1. Dentinbrand	500 °C	6 min	6,55 min	55 °C/min	880 °C	1 min	6,55 min
2. Dentinbrand	500 °C	6 min	6,44 min	55 °C/min	870 °C	1 min	6,44 min
Glanzbrand	500 °C	0 min	4,45 min	80 °C/min	880 °C	2 min	kein Vakuum

Der im Rahmen dieser Studie verwendete Keramikofen Programat® EP 3000 (Abb. 29 und Tab. XIII) besteht aus einem Ofenkopf, in dem sich auch die Brennkammer mit einer Höhe von 4,8 cm befindet und der sich über dem Ofenunterteil mit dem Brenntisch inklusive der Brenngut-Ablageplatte schließt. Das Gerät ist über Netzkabel und Schlauch an eine Vakuumpumpe angeschlossen. Es können alle Parameter der individuellen Brennprogramme frei programmiert werden. Im Programat® EP 3000 kann Keramik nicht nur gebrannt, sondern auch gepresst werden. Hierbei können die individuellen Pressprogramme ebenfalls frei programmiert werden.

Um eine exakt reproduzierbare Brennführung zu gewährleisten, wurde eine regelmäßige Wartung und Kalibrierung des Programat® EP 3000 durchgeführt. Es wurde bei der Wahl des Standortes auf einen luftzugfreien Platz ohne direkte Sonneneinstrahlung, Nähe zu einem Heizkörper oder Fenster geachtet. Es blieb genügend Platz für die Luftzirkulation. Auch die vom Hersteller empfohlene regelmäßige Reinigung des Gerätes wurde mit Hilfe von trockenen, weichen Lappen und Reinigungspinseln durchgeführt. Zusätzlich verfügt der Programat® EP 3000 über sogenannte Sonderprogramme. Dazu zählen ein Vakuum-Testprogramm zur automatischen Überprüfung der Vakuumleistung, ein Heizungs-Testprogramm zur Überprüfung der Heizmuffelqualität, ein Reinigungsprogramm der Heizmuffel und ein Entfeuchtungsprogramm (Kondenswasserbildung in der Isolierung der Brennkammer und der Vakuumpumpe führt zu einem geringeren Vakuum in der Brennkammer und einem daraus resultierenden mangelhaften Brennergebnis [69]). Aufgrund dieser Aufheizprogramme wurde diesem Keramikofen für die vorliegende Untersuchung der Vorzug gegeben. Über das Display des Programat® EP 3000 konnte die aktuelle Netzspannung angezeigt werden und somit ein ungestörter Ablauf der Brennzyklen gesichert werden [69].

Tab. XIII: Technische Daten Programat® EP 3000 [69]

Höhe	565 mm
Tiefe	430 mm
Breite	305 mm
Gewicht (Unterteil)	12,0 kg
Gewicht (Oberteil)	7,0 kg
Netzanschluss	220 V/50 Hz
max. Stromaufnahme	8,5 A bei 220 V
Brennraum Durchmesser	80 mm
Brennraum Höhe	48 mm
max. Brenntemperatur	1200 °C

Als Brenngutträger wurde die Wabe verwendet. Dabei wurden wie oben beschrieben sechs horizontale Positionen gewählt: Hinten, rechts, vorne, links und zweimal mittig (s. Abb. 14 und 28).

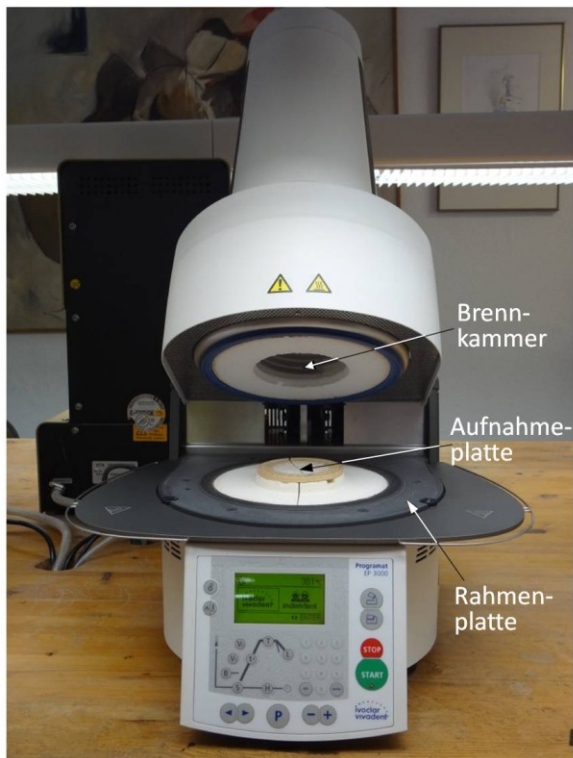


Abb. 29: Programat® EP 3000 (IVOCLAR)

Für die veränderte vertikale Position des Brenngutträgers wurden an der Unterseite der Wabe in einem separaten Brennvorgang drei aus Draht gebogene Abstandhalter (s. Abb. 30 und 31) mit Dentinmasse eingebrannt, die einen Abstand der Wabe zur Aufnahmeplatte von 1,5 cm bzw. 3 cm gewährleisteten. Es wurde äußerst sorgfältig auf korrekte Maße der Abstandhalter geachtet.

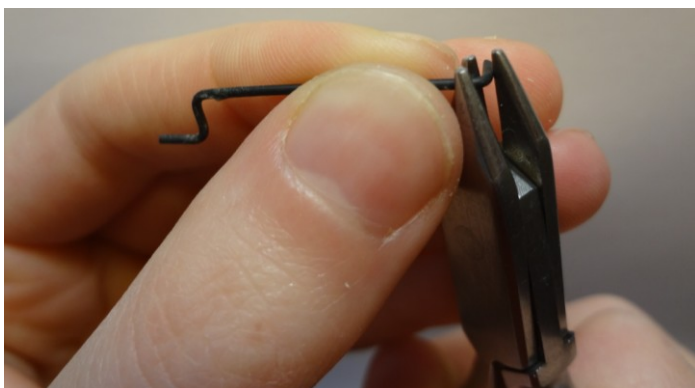


Abb. 30: Biegen eines Abstandhalters

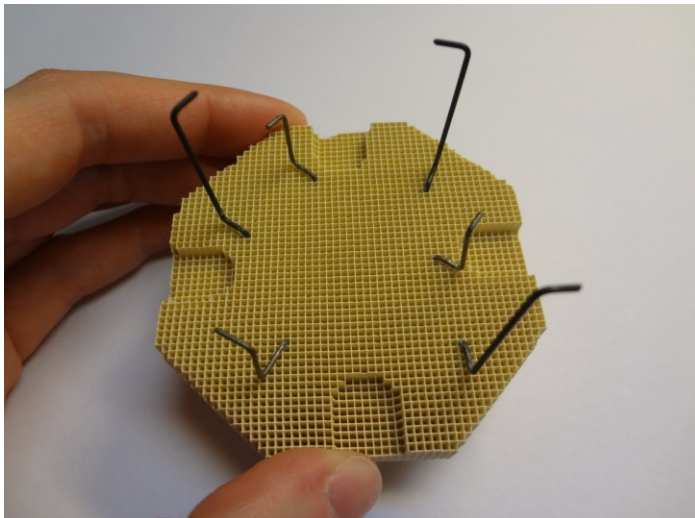


Abb. 31: Wabe von unten mit Abstandhaltern

Für den Brennvorgang auf Ebene 1 war kein Abstandhalter notwendig, hier lag der Brenngutträger auf der Aufnahmeplatte. Es musste darauf geachtet werden, dass die sechs gebogenen Abstandhalter alle Brennvorgänge in den drei Ebenen stets mit durchliefen, um einen immer identischen Inhalt der Brennkammer zu gewährleisten. Ansonsten hätte sich eine Veränderung im Abkühlungsverhalten zeigen können, was sich negativ auf die Genauigkeit der Versuchsergebnisse ausgewirkt hätte.

Um herauszufinden, inwieweit sich der Haftverbund zwischen Metallgerüst und Verblendkeramik bei Abweichungen von den Herstellerangaben verändert, wurden im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit zwei weitere Gruppen an Position Mitte 1 und links angefertigt, die bei von den Herstellerangaben abweichenden Temperaturen (Über- und Unterbrennen) gebrannt wurden. Für das Brennen im Keramikofen wurden hierbei keine Abstandhalter benötigt. Hier lag der Brenngutträger Wabe direkt auf der Aufnahmeplatte. Die Temperaturen der Brennzyklen wurden individuell so eingestellt, dass sich für die Washbrände, Opakerbrände, 1. und 2. Dentinbrand sowie Glanzbrand eine Erhöhung um +20 °C, +50 °C und +100 °C sowie eine Erniedrigung um -20 °C, -50 °C und -100 °C ergaben. Die vom Hersteller geforderten Zeiten wurden hingegen eingehalten.

Die Brenntemperaturen der über- bzw. unterbrannten Prüfkörper zeigen Tab. XIV bis Tab. XIX.

Tab. XIV: Brenntabelle bei 20 °C erhöhter Temperatur

	Starttemperatur	Vortrockenzeit, Schließzeit	Temperaturanstieg	Endtemperatur	Haltezeit für Endtemperatur	Vakuum Haltezeit
Washbrand	500 °C	4 min	75 °C/min	910 °C	2 min	5,12 min
Opakerbrand	500 °C	4 min	75 °C/min	910 °C	1 min	5,12 min
1. Dentinbrand	500 °C	6 min	55 °C/min	900 °C	1 min	6,55 min
2. Dentinbrand	500 °C	6 min	55 °C/min	890 °C	1 min	6,44 min
Glanzbrand	500 °C	0 min	80 °C/min	900 °C	2 min	kein Vakuum

Tab. XV: Brenntabelle bei 50 °C erhöhter Temperatur

	Starttemperatur	Vortrockenzeit, Schließzeit	Temperaturanstieg	Endtemperatur	Haltezeit für Endtemperatur	Vakuum Haltezeit
Washbrand	500 °C	4 min	75 °C/min	940 °C	2 min	5,12 min
Opakerbrand	500 °C	4 min	75 °C/min	940 °C	1 min	5,12 min
1. Dentinbrand	500 °C	6 min	55 °C/min	930 °C	1 min	6,55 min
2. Dentinbrand	500 °C	6 min	55 °C/min	920 °C	1 min	6,44 min
Glanzbrand	500 °C	0 min	80 °C/min	930 °C	2 min	Kein Vakuum

Tab. XVI: Brenntabelle bei 100 °C erhöhter Temperatur

	Starttemperatur	Vortrockenzeit, Schließzeit	Temperaturanstieg	Endtemperatur	Haltezeit für Endtemperatur	Vakuum Haltezeit
Washbrand	500 °C	4 min	75 °C/min	990 °C	2 min	5,12 min
Opakerbrand	500 °C	4 min	75 °C/min	990 °C	1 min	5,12 min
1. Dentinbrand	500 °C	6 min	55 °C/min	980 °C	1 min	6,55 min
2. Dentinbrand	500 °C	6 min	55 °C/min	970 °C	1 min	6,44 min
Glanzbrand	500 °C	0 min	80 °C/min	980 °C	2 min	kein Vakuum

Tab. XVII: Brenntabelle bei 20 °C erniedrigter Temperatur

	Starttemperatur	Vortrockenzeit, Schließzeit	Temperaturanstieg	Endtemperatur	Haltezeit für Endtemperatur	Vakuum Haltezeit
Washbrand	500 °C	4 min	75 °C/min	870 °C	2 min	5,12 min
Opakerbrand	500 °C	4 min	75 °C/min	870 °C	1 min	5,12 min
1. Dentinbrand	500 °C	6 min	55 °C/min	860 °C	1 min	6,55 min
2. Dentinbrand	500 °C	6 min	55 °C/min	850 °C	1 min	6,44 min
Glanzbrand	500 °C	0 min	80 °C/min	860 °C	2 min	kein Vakuum

Tab. XVIII: Brenntabelle bei 50 °C erniedrigter Temperatur

	Starttemperatur	Vortrockenzeit, Schließzeit	Temperaturanstieg	Endtemperatur	Haltezeit für Endtemperatur	Vakuum Haltezeit
Washbrand	500 °C	4 min	75 °C/min	840 °C	2 min	5,12 min
Opakerbrand	500 °C	4 min	75 °C/min	840 °C	1 min	5,12 min
1. Dentinbrand	500 °C	6 min	55 °C/min	830 °C	1 min	6,55 min
2. Dentinbrand	500 °C	6 min	55 °C/min	820 °C	1 min	6,44 min
Glanzbrand	500 °C	0 min	80 °C/min	830 °C	2 min	kein Vakuum

Tab. XIX: Brenntabelle bei 100 °C erniedrigter Temperatur

	Starttemperatur	Vortrockenzeit, Schließzeit	Temperaturanstieg	Endtemperatur	Haltezeit für Endtemperatur	Vakuum Haltezeit
Washbrand	500 °C	4 min	75 °C/min	790 °C	2 min	5,12 min
Opakerbrand	500 °C	4 min	75 °C/min	790 °C	1 min	5,12 min
1. Dentinbrand	500 °C	6 min	55 °C/min	780 °C	1 min	6,55 min
2. Dentinbrand	500 °C	6 min	55 °C/min	770 °C	1 min	6,44 min
Glanzbrand	500 °C	0 min	80 °C/min	780 °C	2 min	kein Vakuum

4.2 SCHWICKERATH-Test

4.2.1 Aufbau

Der SCHWICKERATH-Test nach DIN EN ISO 9693 [1] wurde bei BEGO (Bremen) mit der Universalprüfmaschine Zwick Z010® (Zwick GmbH & Co) durchgeführt.

Tab. XX: Einstellparameter der Zwick Z010®

Vorkraft	0,1 N
Vorkraft-Geschwindigkeit	1 mm/min
Vorkraft Haltezeitmodus	Keine Haltezeit
Prüfgeschwindigkeit	lagegeregelt, 1,5 mm/min
Verzögerung bei Geschwindigkeitsschaltung	0,1
Kraftabschaltschwelle	15 % Fmax
Kraftschwelle für Bruchuntersuchung	0,1 % Fnom
Maximale Längenänderung	Dehnung, 3 mm
Auflage	20 m

4.2.2 Durchführung

Die fertigen Prüfkörper wurden beschriftet und einzeln nacheinander in die Universalprüfmaschine Zwick Z010® eingelegt. Hierbei wurde das Plättchen mit der Keramikbeschichteten Seite nach unten im rechten Winkel auf die 20 mm breite Auflage gelegt. Die Belastung fand mittig auf der Metallseite des Prüfkörpers statt (s. Abb. 32). Anschließend wurde durch Aktivierung der Zwick Z010® der Prüfstempel abgesenkt (Vorschubgeschwindigkeit: Konstant 1,5 mm/min), bis es zum Versagen des Prüfkörpers kam. Dabei wurde der Kraftverlauf gemessen und aufgezeichnet. Beim Erreichen der Bruchkraft K , die Kraft, bei der es zu einem Versagen des Metall-Keramik-Verbundes kommt, war akustisch ein leises Knacken wahrzunehmen, jedoch verblieb die Keramik nach dem Bruch auf dem Metallplättchen, es gab keine sichtbaren Abplatzungen.

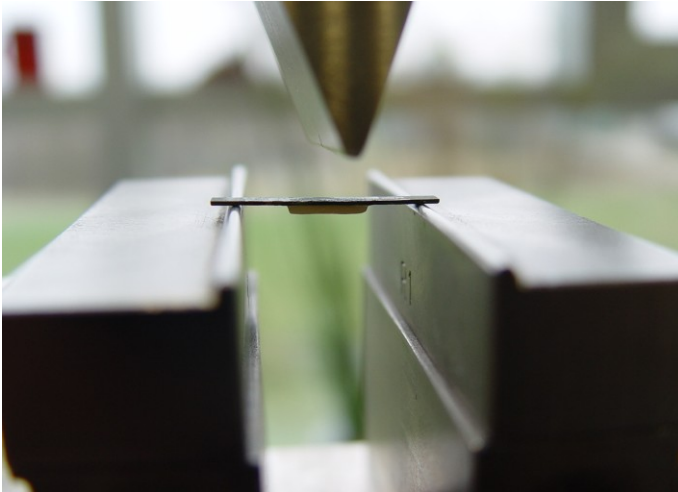


Abb. 32: SCHWICKERATH-Test (Auflage mit Prüfkörper und Prüfstempel)

4.2.3 Auswertung der Messergebnisse

Die Bruchkraft F muss mit einem Koeffizienten κ multipliziert werden, der eine Funktion der Dicke des Metallgerüsts d und des Elastizitätsmoduls E der verwendeten Legierung ist [1]. Um den Wert κ für eine bestimmte Dicke d abzulesen, wird die Kurve aus dem in Abb. 33 dargestellten Diagramm für den zugehörigen Elastizitätsmodul ausgewählt und dann von dieser Kurve der Wert κ für die Dicke d abgelesen [1, 100]. In der vorliegenden Untersuchung wurde die EMF-Legierung Wirobond® 280 verwendet bei einer Prüfkörperdicke von $0,5 \pm 0.05$ mm. Bei bekanntem Elastizitätsmodul von Wirobond® 280 (ca. 220 GPa) ergibt sich für κ 3,70.

Die Ablöse-/Rissbeginn-Festigkeit (Scherverbundfestigkeit) wird nach der folgenden Gleichung berechnet (s. a. Kap. 2.4.1) [1, 100, 110]:

$$\text{Verbundfestigkeit } T_m \text{ [MPa]} = \kappa \text{ [mm}^{-2}\text{]} \times F \text{ [N]}.$$

Der SCHWICKERATH-Test wurde an allen Prüfkörpern unter identischen Bedingungen durchgeführt.

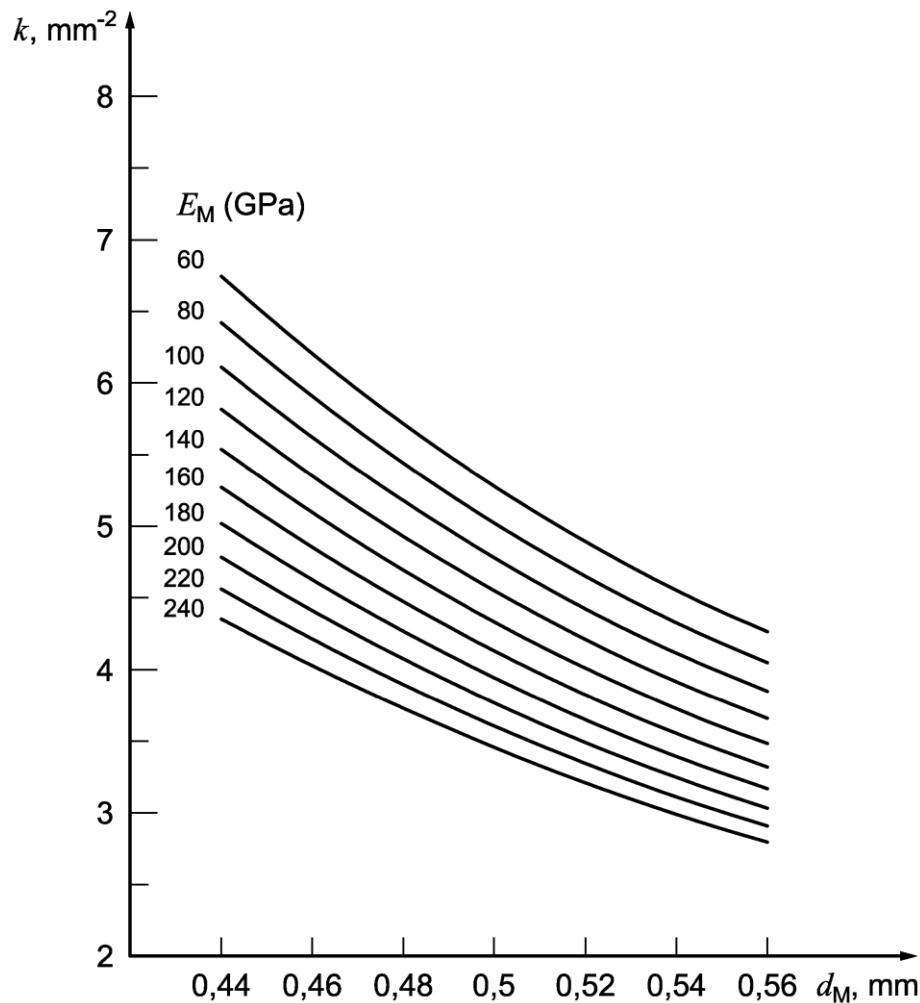


Abb. 33: Diagramm zur Ermittlung des κ -Faktors [1]

4.2.4 Auswertung der visuellen Unterschiede

Alle Prüfkörper wurden wie in Kapitel 4.1 erwähnt hinsichtlich der in Abb. 34 übersichtlich dargestellten Bewertungskriterien zunächst mit bloßem Auge, dann unter einem Lichtmikroskop mit 10facher Vergrößerung auf visuelle Unterschiede überprüft und diese in Kapitel 5.4 tabellarisch ausgewertet. Im Vergleich galten dabei in der zweiten Versuchsreihe die nach Herstellerangaben gebrannten Gruppen den über- und unterbrannten Gruppen als Referenzwert.

Des Weiteren wurden aus den einzelnen Gruppen des zweiten Teils der vorliegenden Arbeit Fotografien der Prüfkörper zur Dokumentation der visuellen Unterschiede exemplarisch dargestellt (s. Kapitel 5.4). Es wurde sich hierbei für eine 30fache Vergrößerung entschieden. Verwendet wurde das Forschungsmikroskop Keyence® (BEGO).

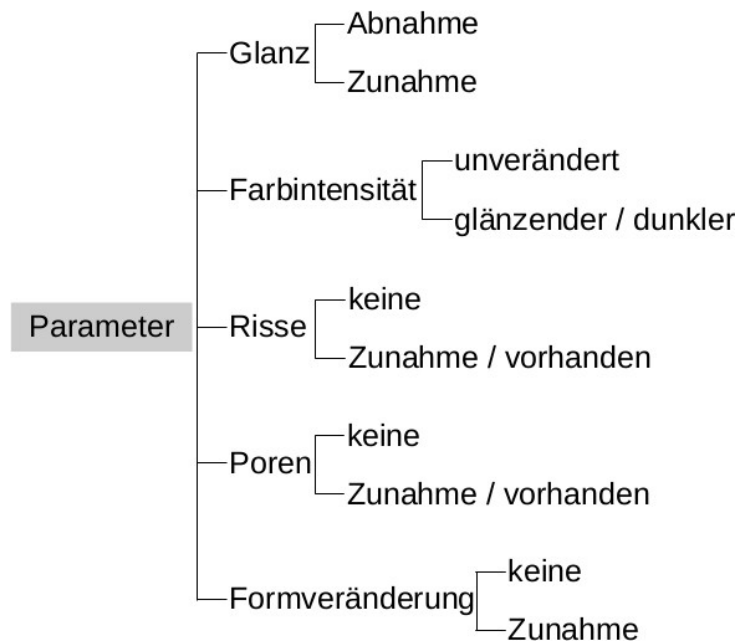


Abb. 34: Bewertungskriterien

4.3 Statistik

Die statistische Auswertung beider Teile der vorliegenden Arbeit erfolgte mit Methoden der beschreibenden (deskriptiven) und schließenden Statistik. In beiden Fällen handelt es sich um geplante Versuche mit einem balancierten Versuchsdesign. Die metrische Zielgröße ist in beiden Versuchen die Scherverbundfestigkeit, gemessen in MPa.

Die zwei Einflussfaktoren im **ersten Teil** betreffen die Lage im Brennofen und weisen ein nominales Skalenniveau auf. Der erste Faktor „Ebene“ hat 3 Stufen (Ebene 1, 2 und 3), der zweite Faktor „ horizontale Position“ hat 6 Stufen (links, hinten, Mitte 1, Mitte 2, rechts und vorne). Durch das Versuchsdesign ergeben sich in der Kombination der Faktorstufen Versuchsgruppen. Die beschreibenden Statistiken wurden für jede Gruppe, für einzelne Faktorstufen und gesamt berechnet. Als beschreibende Verteilungsparameter werden arithmetisches Mittel, der Standardfehler, die Standardabweichung, der Median, Minimum und Maximum berechnet und tabellarisch sowie graphisch dargestellt. Fehlerbalkendiagramme (Mittelwerte mit 95% Konfidenzintervallen) geben Hinweise auf das Vorliegen oder Nichtvorliegen signifikanter Unterschiede zwischen den Mittelwerten. Das 95% Konfidenzintervall zeigt einen Bereich, in dem mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% der wahre Mittelwert liegen wird, d. h., die Wahrscheinlichkeit, dass der wahre Mittelwert unterhalb der unteren Grenzen bzw. oberhalb der oberen Grenze liegen wird, beträgt jeweils 2,5% [111].

Mit Methoden der schließenden Statistik wurden die Mittelwertunterschiede bezüglich der Positionierung der Prüfkörper (horizontal und vertikal) auf statistische Signifikanz mit Hilfe einer zweifaktoriellen ANOVA (Analysis of variance) getestet. Hierbei ist der erste Faktor die Ebene, der zweite Faktor die horizontale Position (s. o.). Zur berechtigten Anwendung der ANOVA müssen zwei statistische Voraussetzungen erfüllt sein. Die erste Voraussetzung ist die Annahme der Gleichheit der Fehlervarianz in den Gruppen (Varianzhomogenität). Die zweite Voraussetzung ist die Normalverteilung der Residuen [111, 112]. Als Residuen sind die Differenzen zwischen den tatsächlich gemessenen Werten und der Prognose aus dem ANOVA-Modell definiert [111, 112]. Mithilfe des LEVENE-Tests wurde die Varianzhomogenität geprüft. Um die Residuen auf das Vorliegen einer Normalverteilung zu testen, wurden der KOLMOGOROV-SMIRNOV-Test und der SHAPIRO-WILK-Test angewendet. Die Signifikanz sollte in beiden Fällen größer als 0,05 sein, damit die Voraussetzungen in beiden Fällen als nicht verletzt gelten [111, 112].

Das Problem der Fehlerkumulation beim Mehrfachtesten wurde bei den Gruppenvergleichen durch die Anwendung des TUKEY-HSD-Tests (eine Methode zur α -Adjustierung) berücksichtigt. Dieser eröffnet die Möglichkeit, einzelne Gruppen einer Untersuchung paarweise miteinander zu vergleichen, ohne dass der α -Fehler kumuliert oder die Teststärke abnimmt [112]. So wurden zum detaillierten Gruppenvergleich multiple Post Hoc-Paarvergleiche durchgeführt. Bei 6 Gruppen ergaben sich 15 Paarvergleiche.

Der zweifaktoriellen ANOVA im **ersten Teil** liegt folgendes statistische Modell zugrunde:

$$T_m [\text{MPa}]_{ijk} = C + E_i + hP_j + EhP_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

C: Konstante des Modells

E mit dem Index i 1 bis 3: Effekt der Ebene

hP mit dem Index j 1 bis 6: Effekt der horizontalen Position

EhP: Wechselwirkung zwischen Ebene und horizontaler Position

ε mit dem zusätzlichen Index k 1 bis 7 (Prüfkörperzahl je Gruppe): Fehler (Residuen), die sich als Differenz zwischen den beobachteten Werten und der Prognose aus dem Modell für jeden einzelnen Messwert ergeben.

Die statistische Voraussetzung für dieses Modell ist die Normalverteilung von ε_{ijk} , die statistische Unabhängigkeit und die Homogenität der Varianzen für alle i, j und k.

Im **zweiten Versuchsteil** liegen ebenfalls zwei kontrollierte Einflüsse (Faktoren) vor. Der Faktor „horizontale Position“ hat 2 Stufen (seitlich, mittig), der Faktor „Temperaturabweichung von der Herstellerempfehlung“ hat insgesamt sieben Stufen (-100 °C, -50 °C, -20 °C, GA bzw. 0 °C, +20 °C, +50 °C, +100 °C). Der zweite Versuch entspricht demnach auch dem Design einer zweifaktoriellen ANOVA, jedoch weist der Faktor „Temperaturabweichung von der Herstellerempfehlung“ ein metrisches Skalenniveau auf, was bei der Analyse zusätzlich berücksichtigt wurde. Vorwegnehmend wird erwähnt, dass die horizontale Position (seitlich, mittig) bei dieser Versuchsanordnung keinen signifikanten Einfluss auf die Scherverbundfestigkeit hat. Deshalb reduziert sich die ANOVA auf ein einfaches Regressionsmodell. Auch hier waren die Voraussetzungen der Varianzhomogenität und der Normalverteilung der Residuen zu prüfen. Das Ergebnis der angewandten Regressionsanalyse ist ein funktionaler Zusammenhang zwischen Temperaturdifferenz und Scherverbundfestigkeit, sodass Paarvergleiche hier als redundant anzusehen sind. Für die Regressionsanalyse wurde folgendes Modell verwendet:

$$T_m \text{ [MPa]}_{ij} = C + b_1 T_i + b_2 T_i^2 + \varepsilon_{ij}$$

C: Konstante des Modells

T mit dem Index i 1-7: Stufen der Temperaturen

ε : Fehler (Residuen), die sich als Differenz zwischen den beobachteten Werten und der Prognose aus dem Modell für jeden einzelnen Messwert ergeben

b_1 und b_2 : zu bestimmende Regressionskoeffizienten des Modells

Index j 1 bis 14 (seitlich und mittig je 7 Werte): Anzahl der Wiederholungen pro Stufe.

Der Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz und der Scherverbundfestigkeit folgt keinem linearen Verlauf. Deshalb wurde hier ein quadratischer Term in die Gleichung aufgenommen, mit dem der Zusammenhang im beobachteten Temperaturbereich hinreichend gut abgebildet wird. Für dieses Modell ist die statistische Voraussetzung die Normalverteilung von ε_{ij} , die statistische Unabhängigkeit und die Homogenität der Varianzen für alle i und j. Generell wird ein statistisches Prüfergebnis als signifikant angesehen, wenn die beobachtete Signifikanz $p < 0,05$ ist [111].

Alle Ergebnisse wurden in Tabellenform dargestellt und graphisch veranschaulicht. Die Analysen und Graphiken wurden unter Nutzung des Statistik-Programmes IBM SPSS Statistics, Version 22 (IBM Deutschland GmbH, Ehningen) erstellt [111].

5 Ergebnisse

5.1 Ergebnisse Versuch 1: Einfluss der Positionierung

5.1.1 Deskriptive Statistik

Tab. XXI: Deskriptive Statistik für die Scherverbundfestigkeit [MPa]

Ebene	Ort	N	MW T_m [MPa]	Std Abw. [MPa]	S.E. MW [MPa]	Median [MPa]	Min [MPa]	Max [MPa]
E1	hinten	7	44,39	7,40	2,80	45,34	29,21	53,12
	links	7	44,38	5,11	1,93	46,19	37,02	48,83
	Mitte1	7	43,50	1,28	,48	43,05	42,22	45,58
	Mitte2	7	39,54	6,70	2,53	39,67	28,16	47,06
	rechts	7	47,90	4,76	1,80	47,73	43,75	57,32
	vorne	7	43,89	4,35	1,64	45,19	34,57	46,92
	gesamt	42	43,93	5,55	,86	45,03	28,16	57,32
E2	hinten	7	47,99	4,27	1,61	47,60	42,25	53,44
	links	7	45,97	3,40	1,28	45,18	41,95	51,50
	Mitte1	7	43,10	5,66	2,14	42,58	31,97	49,00
	Mitte2	7	44,52	3,48	1,31	43,15	41,73	50,29
	rechts	7	44,87	3,26	1,23	43,81	40,55	49,66
	vorne	7	48,16	5,23	1,98	48,10	41,64	54,41
	Gesamt	42	45,77	4,45	,69	45,00	31,97	54,41
E3	hinten	7	45,75	5,82	2,20	46,62	38,48	55,64
	links	7	44,65	5,20	1,97	47,45	35,01	49,90
	Mitte1	7	41,95	4,71	1,78	39,51	37,82	49,17
	Mitte2	7	43,67	5,76	2,18	46,48	34,84	49,15
	rechts	7	46,47	4,97	1,88	48,46	38,54	51,80
	vorne	7	44,87	4,97	1,88	44,73	37,58	50,89
	Gesamt	42	44,56	5,14	,79	45,88	34,84	55,64
Gesamt	hinten	21	46,04	5,86	1,28	46,62	29,21	55,64
	links	21	45,00	4,46	,97	45,61	35,01	51,50
	Mitte1	21	42,85	4,15	,90	43,02	31,97	49,17
	Mitte2	21	42,58	5,66	1,23	43,15	28,16	50,29
	rechts	21	46,41	4,36	,95	45,58	38,54	57,32
	vorne	21	45,64	4,98	1,09	45,19	34,57	54,41
	Gesamt	126	44,75	5,09	,45	45,18	28,16	57,32

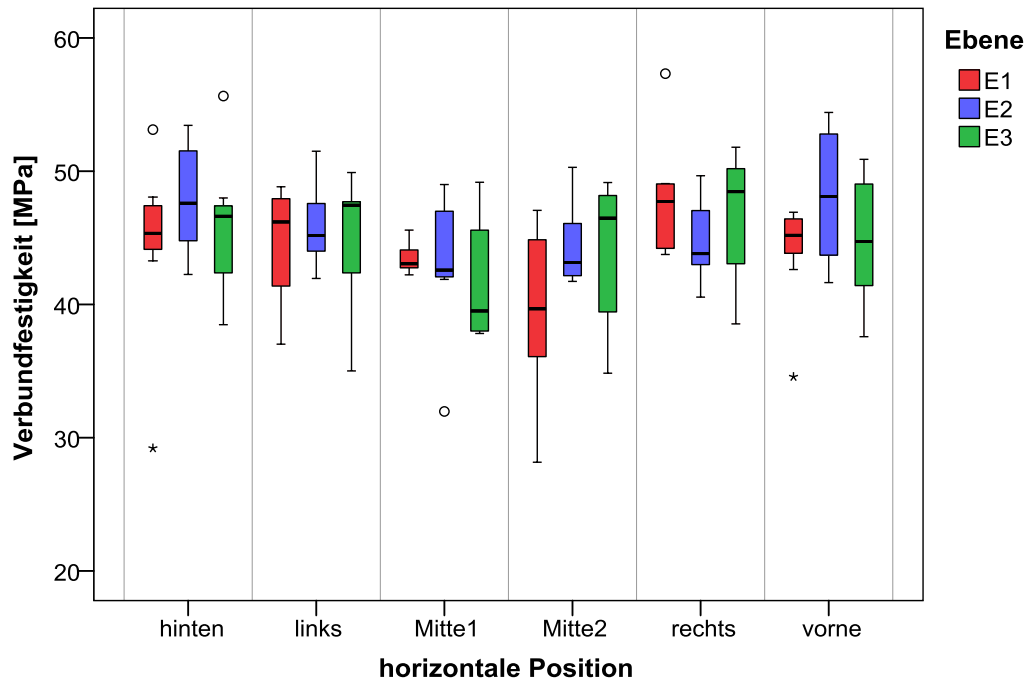


Abb. 35: Boxplot für alle gemessenen Werte der Scherverbundfestigkeit

In Tabelle XXI sind alle Scherverbundfestigkeitsmittelwerte (MW T_m) der geprüften SCHWICKERATH-Plättchen zusammengefasst. Alle Werte lagen über den von DIN EN ISO 9693 geforderten Werten von 25 MPa. Des Weiteren sind in der Tabelle Standardabweichung (Std Abw.), Standardfehler (S.E.), Median, Minimal- und Maximalwert dargestellt. Der Standardfehler wird später bei der Berechnung der Konfidenzintervalle verwendet.

Die Boxplots in Abb. 35 zeigen die Verteilungen der Verbundfestigkeit in allen Gruppen, dargestellt jeweils in einem Kasten (Box). Die drei Ebenen sind farblich unterschiedlich voneinander dargestellt. Der horizontale Strich im Kasten zeigt den Median an, unterer und oberer Kastenrand bilden das untere bzw. obere Quartil. Oberhalb bzw. unterhalb derer liegen noch jeweils ein Viertel aller Werte. Die Schwänze enden im letzten Wert, der kein Ausreißer ist. Ausreißer (o) und extreme Werte (*) sind gesondert dargestellt. Unterschiede in der Lage und Streuung der statistischen Verteilungen sind erkennbar. Auch gibt es einige ungewöhnliche Fälle (Ausreißer und extreme Werte, insbesondere bei Ebene 1: Vier Ausreißer bzw. extreme Werte).

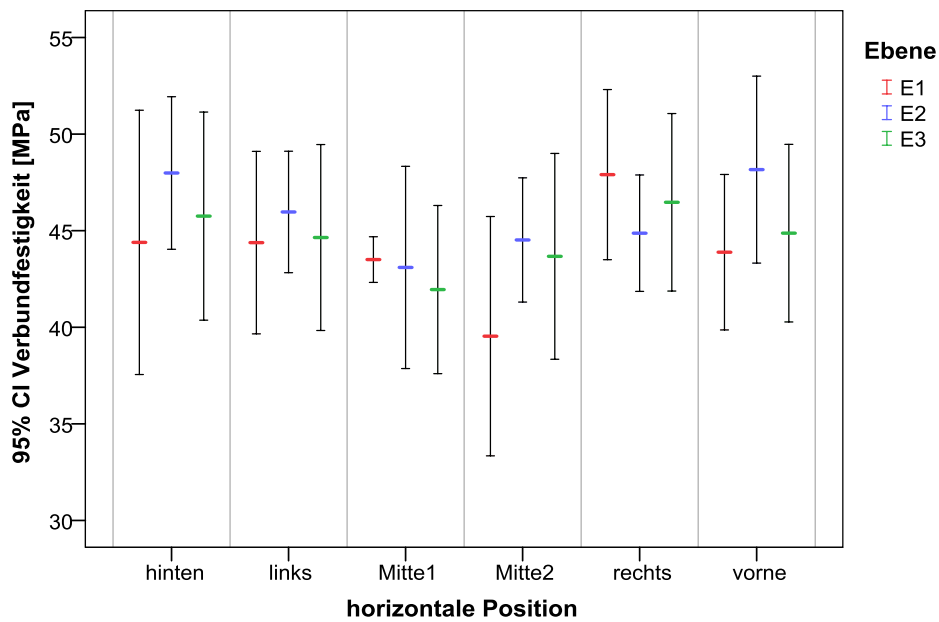


Abb. 36: Fehlerbalkenplot für die Mittelwerte aller Versuchsgruppen

In Abb. 36 zeigen die Fehlerbalken die arithmetischen Mittelwerte in jeder Versuchsgruppe mit eingezeichneten 95% Konfidenzintervallen (s. Kapitel 4.3). Die Breite der Konfidenzintervalle hängt vom Standardfehler ab, der hier bei immer gleicher Fallzahl in jeder Gruppe nur durch die Größe der Standardabweichung bestimmt wird.

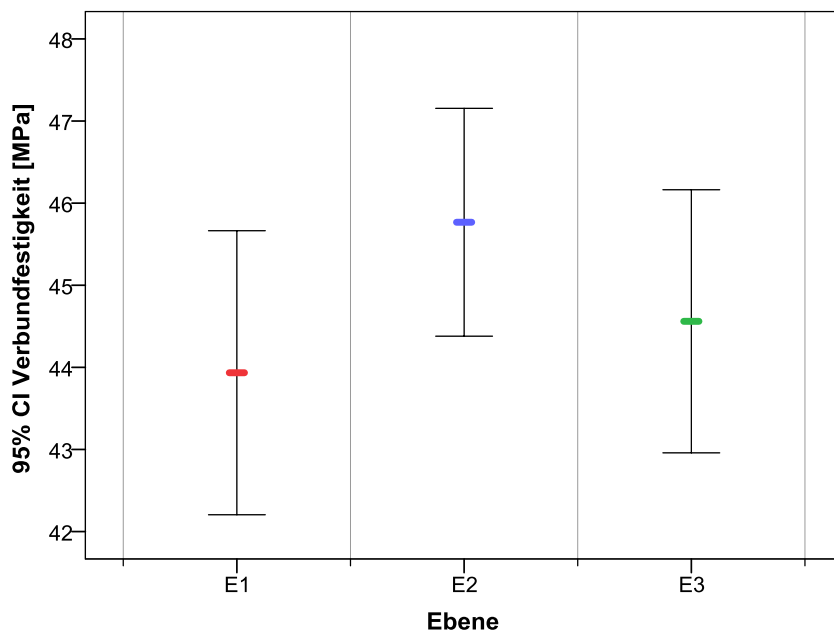


Abb. 37: Fehlerbalkenplot für die Mittelwerte in den drei Ebenen

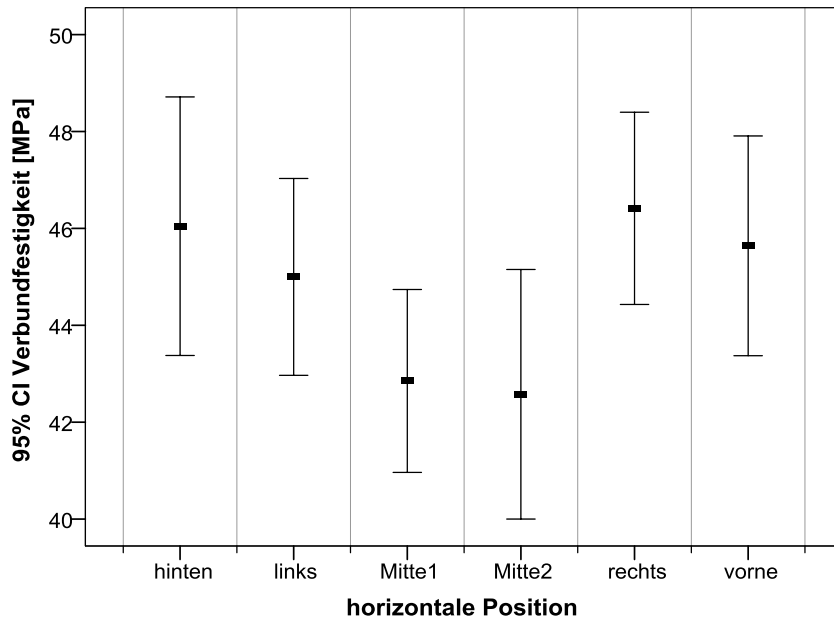


Abb. 38: Fehlerbalkenplot für die Mittelwerte der horizontalen Positionen

Abb. 37 zeigt die mittleren Scherverbundfestigkeiten getrennt für die vertikalen Positionen gemittelt über die horizontalen Positionen. Es sind keine diskussionswürdigen Unterschiede zwischen den Mittelwerten der drei Ebenen festzustellen. Abb. 38 zeigt die horizontalen Positionen über die drei Ebenen gemittelt. In den mittigen Positionen sind die mittleren Scherverbundfestigkeiten tendenziell am geringsten. Ob sich diese Unterschiede zufällig ergaben oder statistisch signifikant sind, wird im nächsten Abschnitt mit der zweifaktoriellen ANOVA überprüft.

Dem Diagramm ist anhand der Konfidenzintervalle zu entnehmen, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5% (s. Kapitel 4.3) der wahre Mittelwert im ungünstigsten Fall (Mitte 2) nicht kleiner als 40 MPa sein wird, aber immer noch weit über der Mindestanforderung von 25 MPa liegt.

5.1.2 Das ANOVA-Modell

Zunächst wurde getestet, ob eine Wechselwirkung zwischen den 3 Ebenen und den 6 horizontalen Positionen besteht. Die Tabellen zeigen den originalen Output des SPSS-Programms.

Tab. XXII: Test des ANOVA-Modells mit Wechselwirkung

Abhängige Variable: Scherverbundfestigkeit T_m [MPa]					
Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df*	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Korrigiertes Modell	553,22 ^a	17	32,54	1,31	,199
Konstanter Term	252368,52	1	252368,52	10173,23	,000
Ebene	72,90	2	36,45	1,47	,235
horizontale Position	286,18	5	57,24	2,31	,049
Ebene * hP	194,14	10	19,41	,78	,645
Fehler	2679,17	108	24,81		
Gesamt	255600,91	126			
Korrigierte Gesamtvariation	3232,39	125			
a. R-Quadrat = ,171 (korrigiertes R-Quadrat = ,041)					
* df : Degrees of freedom (Freiheitsgrade)					
hP: horizontale Position					

Eine signifikante Wechselwirkung zwischen der Ebene und der horizontalen Position konnte nicht nachgewiesen werden (s. Tab XXII, $p=0,645$). Deshalb wird im Folgenden das ANOVA-Modell ohne Wechselwirkungen aufgebaut und dargestellt.

Tab. XXIII: LEVENE-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen

Abhängige Variable: Scherverbundfestigkeit [MPa]			
F	df1	df2	Sig.
,800	17	108	,690
a. Design: Konstanter Term + Ebene + Ort			

Mithilfe des LEVENE-Tests (Tab. XXIII) wurde die Nullhypothese geprüft, dass die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über die Gruppen hinweg gleich ist. Bei $p=0,69$ konnte keine Abweichung von der Varianzhomogenität nachgewiesen werden, womit

die erste Voraussetzung zur Anwendung der ANOVA als erfüllt angesehen werden kann.

Tab. XXIV: Tests auf Normalverteilung

	KOLMOGOROV-SMIRNOV			SHAPIRO-WILK		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Residuum für T_m [Mpa]	,059	126	,200*	,980	126	,063
* Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.						

Tab. XXIV zeigt, dass bei einer Signifikanz von $p > 0,2$ nach KOLMOGOROV-SMIRNOV und von $p = 0,063$ nach SHAPIRO-WILK eine Normalverteilung der Residuen nicht ausgeschlossen wurde, womit auch die zweite Voraussetzung zur Anwendung der Varianzanalyse als erfüllt angesehen werden kann.

Die nachstehende Tabelle XXV zeigt den originalen Output des SPSS-Programms als aussagekräftigstes Ergebnis der zweifaktoriellen ANOVA bezüglich der Fragestellung, ob vertikale und horizontale Position Einfluss auf die Scherverbundfestigkeit haben. Tabelle XXV ist zu entnehmen, dass beim Test der Haupteffekte lediglich die horizontale Position mit $p = 0,045$ einen signifikanten Einfluss auf die Scherverbundfestigkeitswerte hat. Allerdings wurde die Signifikanzschwelle ($p = 0,05$) nur geringfügig unterschritten. Für die vertikale Ebene trifft dies nicht zu ($p = 0,228$).

Tab. XXV: Test der Haupteffekte

Abhängige Variable: Scherverbundfestigkeit T_m [MPa]					
Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Korrigiertes Modell	359,08 ^a	7	51,30	2,11	,048
Konstanter Term	252368,52	1	252368,52	10364,17	,000
Ebene	72,90	2	36,45	1,50	,228
horizontale Position	286,18	5	57,24	2,35	,045
Fehler	2873,31	118	24,35		
Gesamt	255600,91	126			
Korrigierte Gesamtvariation	3232,39	125			
a. R-Quadrat = ,111 (korrigiertes R-Quadrat = ,058)					

Tab. XXVI: Aus dem Modell berechnete Randmittel für die vertikale Position

Abhängige Variable: T_m Scherverbundfestigkeit [MPa]				
Ebene	Mittelwert	Standardfehler	95%-Konfidenzintervall	
			Untergrenze	Obergrenze
E1	43,93	,761	42,43	45,44
E2	45,77	,761	44,26	47,28
E3	44,56	,761	43,02	46,07

Tabelle XXVI enthält die nach der horizontalen Position adjustierten Mittelwerte für die drei Ebenen, wie sie aus dem ANOVA-Modell ohne Wechselwirkungen geschätzt werden. Ebene 2 führt zur höchsten Scherverbundfestigkeit, Ebene 1 zur niedrigsten. Jedoch sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Ebenen bei der vorliegenden Fallzahl nicht signifikant (s. a. Tab. XXV). Mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5 % (s. Kapitel 4.3) liegen die gemittelten Scherverbundfestigkeitswerte aller horizontalen Positionen auf Ebene 1 oberhalb von 42,43 MPa.

Tab. XXVII: Aus dem Modell berechnete Randmittel für die horizontalen Positionen

Abhängige Variable: T_m Scherverbundfestigkeit [MPa]				
horizontale Position	Mittelwert	Standardfehler	95%-Konfidenzintervall	
			Untergrenze	Obergrenze
1 hinten	46,05	1,077	43,91	48,18
2 links	44,999	1,077	42,87	47,13
3 Mitte1	42,85	1,077	40,72	44,98
4 Mitte2	42,58	1,077	40,44	44,71
5 rechts	46,41	1,077	44,28	48,55
6 vorne	45,64	1,077	43,51	47,77

Tabelle XXVII zeigt die im Rahmen des ANOVA-Modells berechneten Randmittelwerte der horizontalen Positionen mit 95% Konfidenzintervallen. Hier zeigt sich, dass die Scherverbundfestigkeitswerte der mittleren Positionen (Mitte 1 und Mitte 2) am geringsten sind. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 97,5% liegen die mittleren Scherverbundfestigkeitswerte für die horizontalen Positionen oberhalb von 40,44 MPa (untere Grenze des 95% Konfidenzintervalls bei Mitte 2).

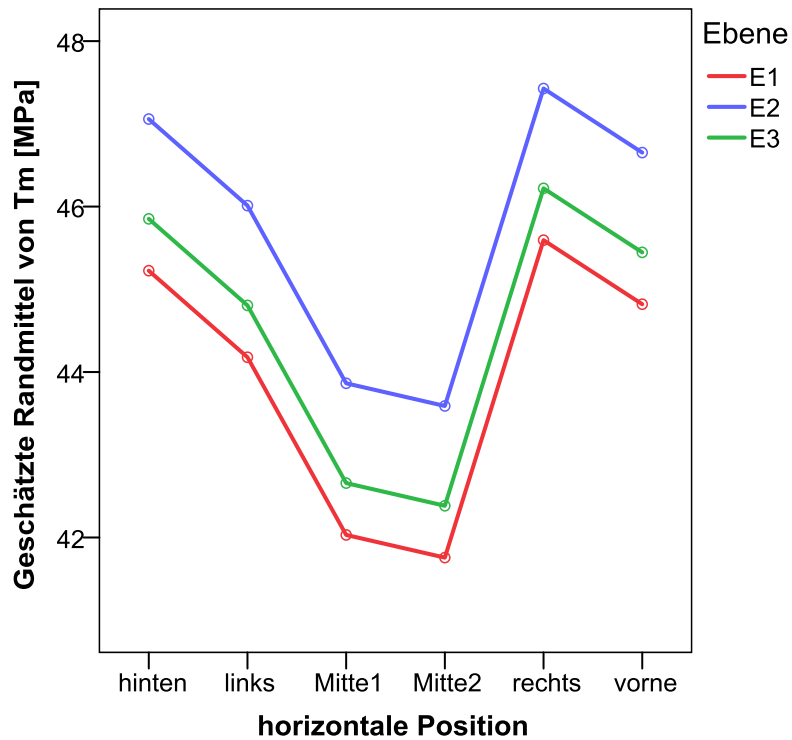


Abb. 39: Mittelwertprofile der geschätzten Randmittel nach dem ANOVA-Modell

Tab XXVIII: Post Hoc-Paarvergleiche nach TUKEY-HSD

Abhängige Variable: Scherverbundfestigkeit T_m [MPa]						
(I)horizontale Position	(J)horizontale Position	Mittl. Diff. (I-J)	S.E.	Sig.	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1 hinten	2 links	1,05	1,52	,983	-3,37	5,46
	3 Mitte1	3,19	1,52	,296	-1,22	7,61
	4 Mitte2	3,47	1,52	,212	-,94	7,88
	5 rechts	-,37	1,52	1,000	-4,78	4,04
	6 vorne	,41	1,52	1,000	-4,007	4,82
2 links	1 hinten	-1,05	1,52	,983	-5,46	3,37
	3 Mitte1	2,15	1,52	,721	-2,26	6,56
	4 Mitte2	2,42	1,52	,606	-1,99	6,83
	5 rechts	-1,42	1,52	,938	-5,83	2,997
	6 vorne	-,64	1,52	,998	-5,05	3,77
3 Mitte1	1 hinten	-3,19	1,52	,296	-7,61	1,22
	2 links	-2,15	1,52	,721	-6,56	2,26
	4 Mitte2	,27	1,52	1,000	-4,14	4,69
	5 rechts	-3,56	1,52	,187	-7,98	,85
	6 vorne	-2,79	1,52	,450	-7,20	1,62

Abhängige Variable: Scherverbundfestigkeit T_m [MPa]						
(I)horizontale Position	(J)horizontale Position	Mittl. Diff. (I-J)	S.E.	Sig.	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
4 Mitte2	1 hinten	-3,47	1,52	,212	-7,88	,94
	2 links	-2,42	1,52	,606	-6,83	1,99
	3 Mitte1	-,27	1,52	1,000	-4,69	4,14
	5 rechts	-3,84	1,52	,127	-8,25	,58
	6 vorne	-3,06	1,52	,342	-7,48	1,35
5 rechts	1 hinten	,37	1,52	1,000	-4,04	4,78
	2 links	1,42	1,52	,938	-2,997	5,83
	3 Mitte1	3,56	1,52	,187	-,85	7,98
	4 Mitte2	3,84	1,52	,127	-,58	8,25
	6 vorne	,77	1,52	,996	-3,64	5,19
6 vorne	1 hinten	-,41	1,52	1,000	-4,82	4,01
	2 links	,64	1,52	,998	-3,77	5,05
	3 Mitte1	2,79	1,52	,450	-1,62	7,20
	4 Mitte2	3,06	1,52	,342	-1,35	7,48
	5 rechts	-,77	1,52	,996	-5,19	3,64

Beim Paarvergleich der Gruppen zeigten sich durch die erforderliche α -Adjustierung nach TUKEY-HSD keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen. Die mittleren Scherverbundfestigkeitswerte der einzelnen Gruppen unterschieden sich also nicht signifikant. ($p > 0,05$).

5.2 Ergebnisse Versuch 2: Einfluss der Temperatur

5.2.1 Deskriptive Statistik

In Tabelle XXIX sind alle Scherverbundfestigkeitsmittelwerte (MW T_m) der geprüften SCHWICKERATH-Plättchen zusammengefasst. Des Weiteren sind in der Tabelle Standardabweichung (Std Abw.), Standardfehler (S.E.), Median, Minimal- und Maximalwert dargestellt. Es zeigt sich, dass die Gruppen, die bei um 100 °C erniedrigter Temperatur gebrannt wurden, den Mindestanforderungen von 25 MPa nicht gerecht werden. Die Ergebnisse aller anderen Gruppen lagen oberhalb der geforderten 25 MPa.

Tab. XXIX: Deskriptive Statistik der mittleren und seitlichen Position

Scherverbundfestigkeit T_m [MPa]								
horizontale Position	Temp.-Abw.	N	MW T_m [MPa]	Std Abw. [MPa]	S.E. MW [MPa]	Median [MPa]	Min [MPa]	Max [MPa]
Mitte	-100	7	24,24	2,73	1,03	23,53	21,46	28,22
	-50	7	29,09	2,92	1,10	29,60	23,94	32,99
	-20	7	39,07	5,41	2,04	39,34	33,10	48,03
	0	7	49,64	3,43	1,30	48,10	46,47	56,47
	20	7	45,30	7,74	2,92	47,45	30,51	52,53
	50	7	51,24	2,00	,75	51,44	48,42	53,44
	100	7	54,35	6,41	2,42	52,91	45,91	63,71
	gesamt	49	41,85	11,69	1,67	47,23	21,46	63,71
seitlich	-100	7	24,58	2,49	,94	24,08	22,57	29,59
	-50	7	33,47	1,29	,49	33,61	31,59	35,34
	-20	7	41,90	5,18	1,96	43,62	34,74	47,08
	0	7	48,14	8,52	3,22	47,43	36,29	61,60
	20	7	47,37	5,20	1,97	46,67	39,58	55,98
	50	7	46,53	6,36	2,40	47,82	37,19	56,50
	100	7	54,24	8,86	3,35	55,60	40,48	67,74
	gesamt	49	42,32	11,00	1,57	44,49	22,57	67,74
gesamt	-100	14	24,41	2,52	,67	23,81	21,46	29,59
	-50	14	31,28	3,14	,84	31,81	23,94	35,34
	-20	14	40,48	5,29	1,41	39,91	33,10	48,03
	0	14	48,89	6,29	1,68	47,86	36,29	61,60
	20	14	46,34	6,43	1,72	46,95	30,51	55,98
	50	14	48,89	5,15	1,38	48,83	37,19	56,50
	100	14	54,29	7,43	1,99	54,99	40,48	67,74
	gesamt	98	42,08	11,29	1,14	45,99	21,46	67,74

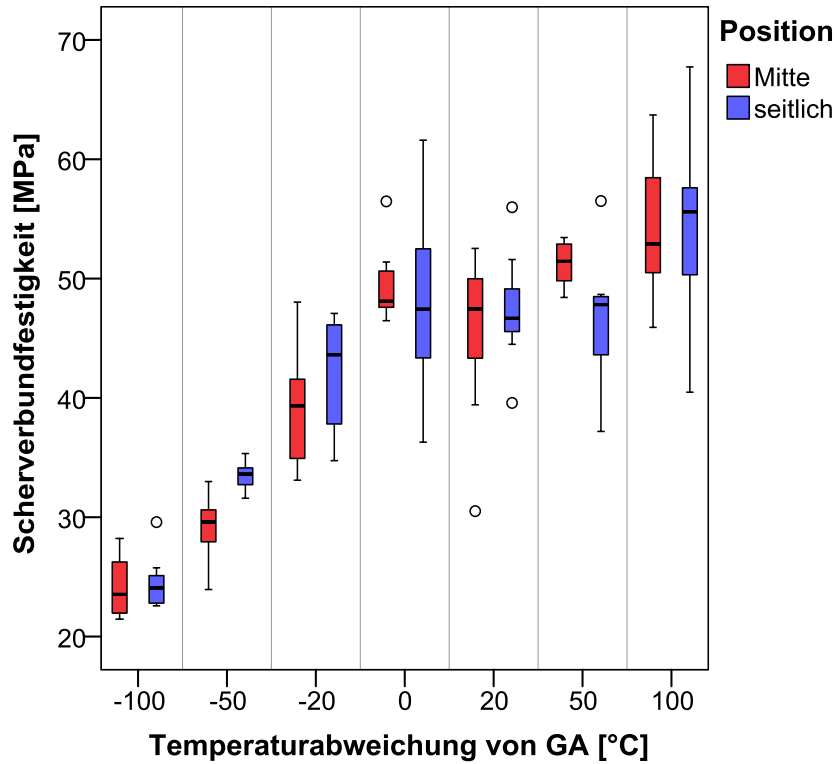


Abb. 40: Boxplot für alle gemessenen Scherverbundfestigkeitswerte

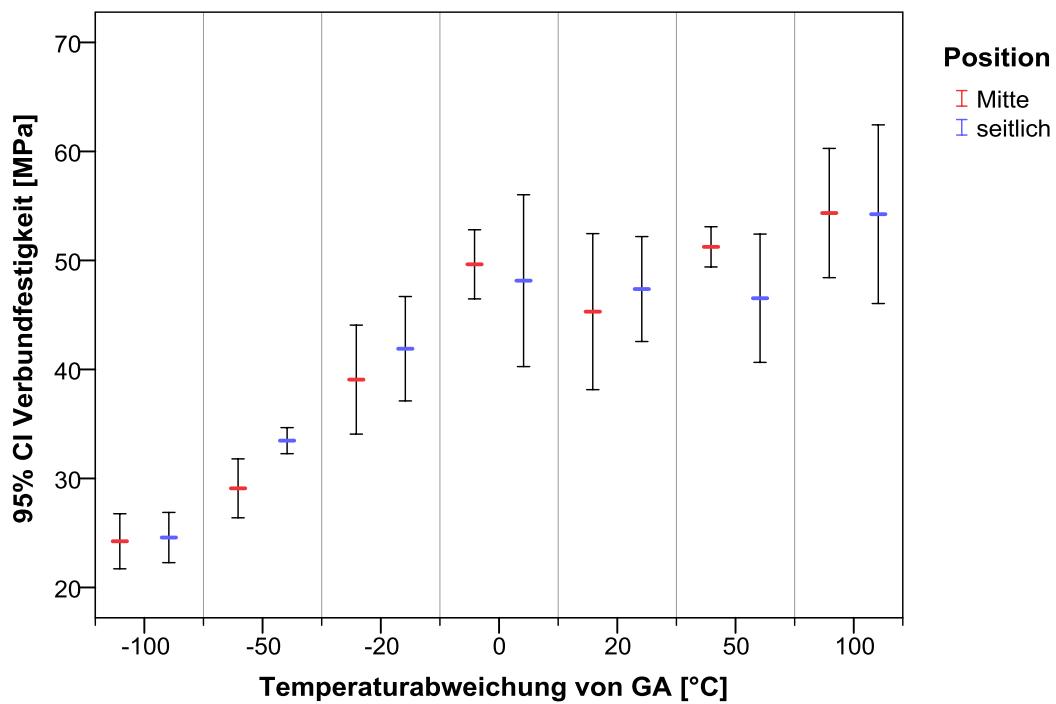


Abb. 41: Fehlerbalkenplot für alle Versuchsgruppen

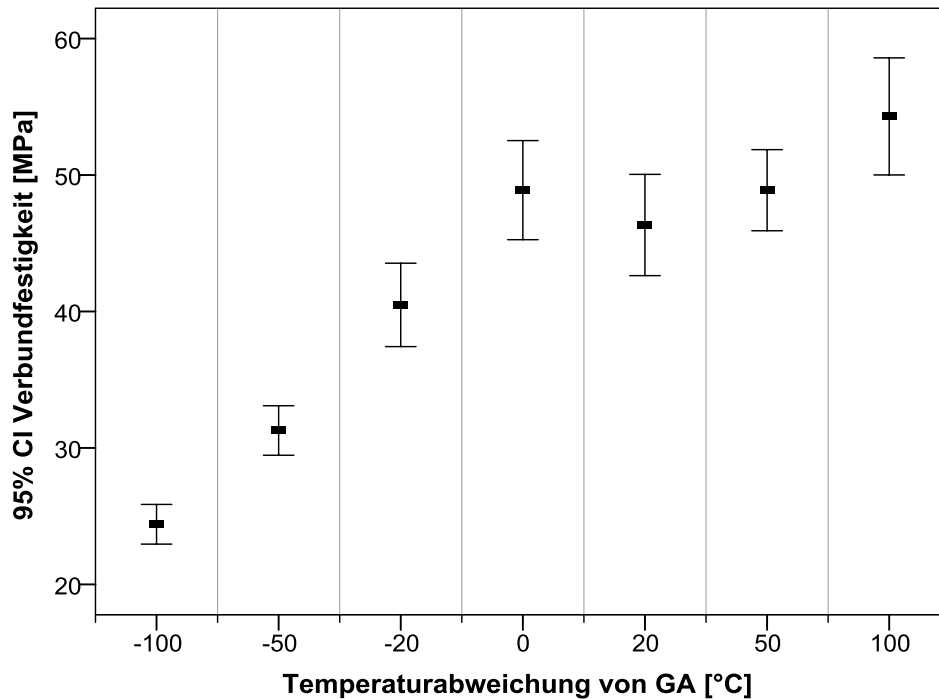


Abb. 42: Fehlerbalkenplot für die Mittelwerte aller Temperaturabweichungen

5.2.2 Schließende Statistik

5.2.2.1 Das ANOVA-Modell

Tab. XXX: Tests des ANOVA-Modells mit Wechselwirkung

Abhängige Variable: Scherverbundfestigkeit T_m [MPa]					
Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Korrigiertes Modell	9878,47 ^a	13	759,88	25,61	,000
Konstanter Term	173555,59	1	173555,59	5850,11	,000
TA	9682,25	6	1613,71	54,39	,000
horizontale Position	5,47	1	5,47	,184	,669
TA * hP	190,75	6	31,79	1,07	,386
Fehler	2492,03	84	29,67		
Gesamt	185926,09	98			
Korrigierte Gesamtvariation	12370,50	97			

a. R-Quadrat = ,799 (korrigiertes R-Quadrat = ,767); TA = Temperaturabweichung; hP = horizontale Position

Wie in Kapitel 4.3 vermerkt wurde, konnte keine signifikante Wechselwirkung zwischen der Temperatur und der horizontalen Position nachgewiesen werden. Auch die horizontale Position hat keinen signifikanten Effekt ($p=0,669$ für die horizontale Position, $p=0,389$ für den Einfluss der Wechselwirkung), weshalb das Modell im Folgenden vereinfacht werden kann. Da die Temperatur als Einflussgröße ein metrisches Skalenniveau aufweist, bietet sich als Modell ein einfaches Regressionsmodell mit „Temperaturabweichung“ als unabhängiger und der „Scherverbundfestigkeit“ als abhängiger Variable an (s. Kap. 4.3).

5.2.2.2 Das Regressionsmodell

Mithilfe des LEVENE-Tests (Tab. XXXI) konnte keine Verletzung der Varianzhomogenität nachgewiesen werden ($p=0,093$). Auch die Normalverteilung der Residuen wurde durch den KOLMOGOROV-SMIRNOV-Test ($p>0,2$) und den SHAIRO-WILK-Test (Tab. XXXII) nicht abgelehnt ($p=0,497$), womit die Voraussetzungen für das verwendete Regressionsmodell als erfüllt angesehen werden können.

Tab XXXI.: Test der Homogenität der Varianzen

LEVENE-Statistik	df1	df2	Signifikanz
1,880	6	91	,093

Tab. XXXII: Test auf Normalverteilung der Residuen

	KOLMOGOROV-SMIRNOV			SHAPIRO-WILK		
	Statistik	df	Signifikanz	Statistik	df	Signifikanz
Residuum	,071	98	,200*	,988	98	,497

*. Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

Tab. XXXIII: Modellzusammenfassung der einfachen Regression

R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
,86	,74	,73	5,87

Die unabhängige Variable ist „Temperaturabweichung“.

Eine wichtige Größe in der Regressionsanalyse ist das Bestimmtheitsmaß (R-Quadrat). Dieses zeigt den durch die Einflussgröße erklärten Anteil der Variation der abhängigen

Variablen. Hier können durch die unterschiedlichen Temperaturstufen 74% der Unterschiede in den gemessenen Scherverbundfestigkeiten erklärt werden.

Tab. XXXIV: ANOVA/Globaler Test des Regressionsmodells

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Regression	9103,065	2	4551,532	132,335	,000
Residuen	3267,433	95	34,394		
Gesamt	12370,497	97			
Die unabhängige Variable ist „Temperaturabweichung“.					

Ähnlich der Varianzanalyse wird im Ergebnis der Regression eine ANOVA-Tabelle ausgegeben (Tab. XXXIV). Diese zeigt, ob das hier gewählte Modell generell die abhängige Variable signifikant erklären kann. Dies ist hier hochgradig gegeben ($p < 0,0001$ s. o.). Wie weiter unten in Abb. 43 dargestellt wäre ein lineares Regressionsmodell in der vorliegenden Arbeit eher ungeeignet, da im höheren Temperaturbereich die Scherverbundfestigkeit nicht gleichmäßig ansteigt, sondern eher ein Zenit erreicht wird, wie später in Kapitel 6.3.2 ausführlich erläutert wird. Hierbei handelt es sich um eine versehentlich zu hoch eingestellte Brenntemperatur (+150 °C statt +100 °C). Aus diesem Grund wurde ein quadratischer Regressionsansatz gewählt. Die Parameterschätzungen sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tab. XXXV: Koeffizienten

	Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	t	Sig.
	B	Standardfehler	Beta		
Temp.abw.	,15450	,010	,835	15,833	,000
Temp.abw. ²	-,00054	,000	-,197	-3,739	,000
(Konstante)	44,074	,797		55,333	,000

Der T-Wert ist der Quotient aus B und Standardfehler, er wird zum Testen auf Signifikanz verwendet (Nullhypothese: $B=0$). Die Konstante 44,074 entspricht der Temperatur GA. Sowohl linearer als auch quadratischer Term sind hoch signifikant von Null verschieden. T-Werte jenseits von ± 2 führen bei der vorliegenden Fallzahl zu einer Signifikanz [111]. Nach unten stehender Formel könnte für jede Temperaturabweichung von GA ein Scherverbundfestigkeitswert prognostiziert werden.

$$T_m = 44,074 + 0,1545 \times \text{Temperaturabweichung} - 0,00054 \times \text{Temperaturabweichung}^2$$

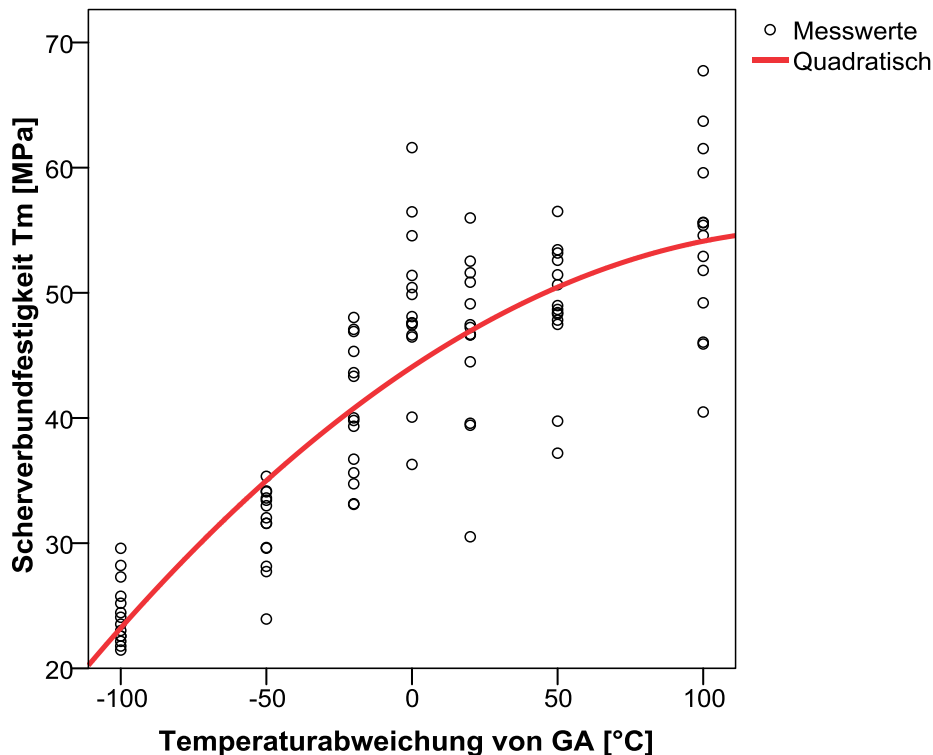


Abb. 43: Punktestreudiagramm der originalen Messwerte mit angepasster Regressionskurve

5.3 Visuelle Untersuchung aller Prüfkörper

Nach der Bestimmung der Scherverbundfestigkeit im SCHWICKERATH-Versuch wurden alle Prüfkörper zunächst unter einem Lichtmikroskop mit einer 10-fachen Vergrößerung visuell begutachtet. Dabei wurden die Prüfkörper auf eventuelle Veränderungen im Farb-, und Glanzverhalten sowie auf Sprünge, Risse und Formveränderungen untersucht (s. Kapitel 4.3).

Bei allen Prüfkörpern, die nach Herstellerangaben hergestellt wurden, unabhängig von ihrer vertikalen Lage im Brennofen und ihrer horizontalen Lage auf dem Brenngutträger, ergab die visuelle Untersuchung keine Unterschiede in den oben genannten Kriterien, weshalb hier auf eine Fotodokumentation verzichtet wurde.

Bei der visuellen Begutachtung der Gruppen, die bei Temperaturen +20 °C, +50 °C, +100 °C, -20 °C, -50 °C und -100 °C abweichend von den Herstellerangaben gebrannt wurden, ergaben sich Unterschiede im Glanz- und Farbverhalten unabhängig von ihrer

horizontalen Lage auf dem Brenngutträger (seitliche Position und Position Mitte). Auch zeigten sich Änderungen in der Formbeständigkeit. Im Vergleich zu den nach Herstellerangaben angefertigten Prüfkörpern zeigten die Prüfkörper, die 20 °C unterhalb der vom Hersteller empfohlenen Temperatur gebrannt wurden eine weniger glänzende Oberfläche. Bei 50 °C unterhalb der empfohlenen Temperatur war dieses Phänomen noch deutlicher. Auch zeigte sich hier eine Änderung im Farbverhalten. Die bei zu niedriger Temperatur gebrannten Prüfkörper waren heller. Die Prüfkörper, die 100 °C unterhalb der empfohlenen Temperatur gebrannt wurden, wiesen eine spröde und poröse Oberfläche ohne Glanz auf. Im Vergleich zu den nach Herstellerangaben gebrannten Prüfkörpern waren sie gänzlich heller. Auch die Prüfkörper, die oberhalb der empfohlenen Temperaturen gebrannt wurden, zeigten Veränderungen. Je höher die Temperatur, desto deutlicher waren diese optisch wahrzunehmen, sowohl mit dem Mikroskop als auch mit bloßem Auge. Es zeigten sich ein zunehmender Oberflächenglanz und eine zunehmende Formveränderung. Wiesen die bei einer um 20 °C erhöhten Temperatur gebrannten Prüfkörper Kanten auf, die im Vergleich zu denen der nach Herstellerangaben gebrannten Prüfkörper abgerundet waren, so zeigten die Keramikblöcke bei den um 100 °C erhöht gebrannten Prüfkörpern eine gänzliche Formveränderung auf. Die Form war nicht mehr rechtwinklig, sondern deutlich verlaufen. Bei den um 100 °C höher gebrannten Prüfkörpern waren Risse nach dem SCHWICKERATH-Versuch innerhalb der Keramik sichtbar. Bei dem Prüfkörper 2 der seitlichen Gruppe +100 °C war die Keramik nach durchgeführtem SCHWICKERATH-Versuch vom Metallgerüst abgeplatzt. Die bei erhöhten Temperaturen gebrannten Prüfkörper waren relativ dunkler zu den nach Herstellerangaben gebrannten Prüfkörpern. Im Vergleich zu der Gruppe -100 °C war dieser Unterschied besonders groß.

Da es sich um eine visuelle Begutachtung handelt, sind in Abb. 44 bis 51 Fotografien der über- und unterbrannten Prüfkörper bei 30-facher Vergrößerung im Vergleich zu einem nach Herstellerangaben gebrannten Prüfkörper in Aufsicht exemplarisch dargestellt. Die bei 100 °C erhöhter Temperatur gebrannten Prüfkörper wurden zusätzlich exemplarisch durch eine Aufnahme bei 200-facher Vergrößerung im Profil dargestellt, da sich entstandene Risse nur bei dieser Gruppe zeigten und diese auch nur aus dieser Perspektive sichtbar waren. Die Auswahl der fotografierten Prüfkörper erfolgte rein zufällig.

Tabelle XXXVI zeigt zum besseren Verständnis der oben beschriebenen Phänomene eine Auswertung der in Kapitel 4.2.4 genannten Bewertungskriterien (s. Abb. 34).

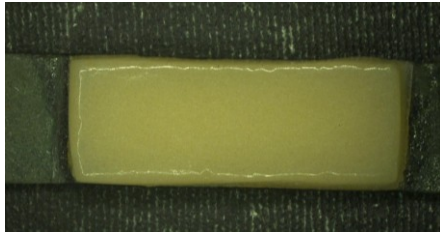


Abb. 44: Gruppe GA

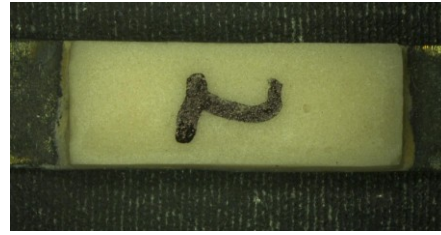


Abb. 45: Gruppe -100 °C

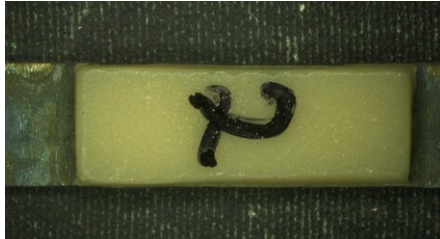


Abb. 46: Gruppe -50 °C



Abb. 47: Gruppe -20 °C

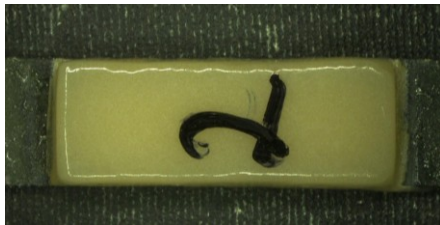


Abb. 48: Gruppe +20 °C



Abb. 48: Gruppe +20 °C



Abb. 50: Gruppe +100 °C (Aufsicht)

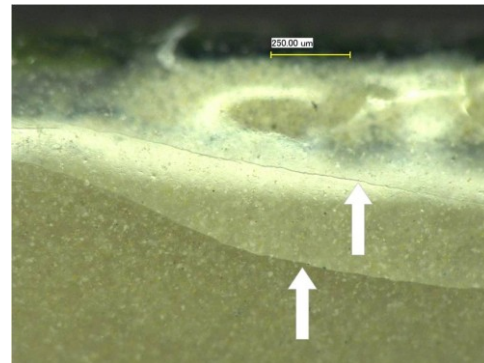


Abb. 51: Gruppe +100 °C (im Profil)

Tab. XXXVI: Auswertung der Bewertungskriterien

Gruppe	Glanz	Farbintensität	Risse	Poren	Formveränderung
-100 °C	---	---	keine	+++	keine
-50 °C	--	--	keine	++	keine
-20 °C	-	-	keine	+	keine
+20 °C	+	+	keine	keine	+
+50 °C	++	++	keine	keine	++
+100 °C	+++	+++	+	keine	+++

-: Abnahme; +: Zunahme im Vergleich zur Gruppe GA

6 Diskussion

6.1 Fehlerdiskussion

6.1.1 Materialien

6.1.1.1 Legierung

Zur Prüfkörperherstellung wurde die EMF-Legierung Wirobond® 280 (BEGO) verwendet mit einem WAK von $14,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bei 25-500 °C und $14,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bei 20-600 °C. Es handelt sich hierbei um eine handelsübliche, aufbrennfähige Kobalt-Chrom-Legierung, die stellvertretend für viele aufbrennfähige EMF-Legierungen anzusehen ist. Sie wurde nach Herstellerangaben verarbeitet, um Fehler, die zu verfälschten Ergebnissen führen könnten, zu vermeiden.

6.1.1.2 Verblendkeramik

Als Verblendkeramik wurde VITA VM® 13 (VITA) verwendet. Es handelt sich hier um eine handelsübliche Aufbrennkeramik mit einem WAK von $13,1-13,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bei 25-500 °C. Sie ist als kompatibel mit der verwendeten Legierung Wirobond® 280 anzusehen. Auch sie wurde nach Herstellerangaben verarbeitet, alle relevanten Schritte (s. Kapitel 2.2.4.1), die eine hohe Stabilität der Verblendung gewährleisten, wurden durchgeführt.

6.1.1.3 Chargenkonstanz

In der vorliegenden Arbeit wurden ausschließlich Materialien der gleichen Charge verwendet, um gleiche Voraussetzungen bei den durchgeführten Versuchen zu gewährleisten. Es kann auf diese Weise von einer Einheitlichkeit in der Zusammensetzung und von einheitlichen Herstellungsparametern der Materialien ausgegangen werden. Abweichungen der Messwerte aufgrund der Legierung oder der verwendeten Verblendkeramik können demnach vernachlässigt werden.

6.1.2 Prüfkörperherstellung

6.1.2.1 Herstellung der Metallplättchen

Zur Herstellung der Metallgerüste wurden die Polyamidplättchen auf die vorläufigen Maße von 0,5 mm x 3,1 mm x 28 mm gebracht. Die durch Einbettmasseexpansion und Abkühlwindung entstehenden Toleranzen wurden durch manuelles Bearbeiten des Gussobjektes kompensiert. Die Maße wurden mittels eines elektronischen, geeichten Messschiebers überprüft. Eventuelle durch das Schneiden mit dem Skalpell verursachte Grate wurden mit Hilfe von Schleifpapier entfernt. Verunreinigungen wurden vor dem Einbetten vermieden. Die Polyamidplättchen wurden mit Hilfe eines sauberen Pinsels von Schleifstaub befreit und anschließend zum Einbetten vorbereitet. Die Oberfläche der Polyamidplättchen wurde mit einer geeigneten alkoholhaltigen Lösung zum Entfetten (eventuelle Rückstände nach direktem Kontakt mit der Hand) besprüht. So konnte auch die Oberflächenspannung herabgesetzt werden, was ein vollständiges Benetzen der Polyamidplättchen mit Einbettmasse ermöglicht. Beim Befüllen der Muffel mit Einbettmasse wurde mit einem Rüttler für ein optimales Fließverhalten gesorgt. Auf diese Weise wurde verhindert, dass sich Blasen auf der Polyamidoberfläche bilden, die nach dem Guss zu Perlen auf der Gerüstoberfläche geführt hätten. Die Muffel wurde vorgewärmt und nach dem Guss langsam auf Raumtemperatur abgekühlt. Dieses Vorgehen sowie die beschriebene Ausrichtung der Polyamidplättchen (s. Kapitel 4.1.1) wirken einer Lunker- und Mikroporositätenbildung entgegen.

Bereits beim Guss der Metallgerüste können Fehler gemacht werden. Es wurde darauf geachtet, das Vorwärmen und Gießen der Legierung nach Herstellerangaben durchzuführen. Da wie in Kapitel 2.2.4.1 erwähnt u. a. der E-Modul der Legierung von den Gussbedingungen beeinflusst wird und dieses in die Formel zur Errechnung der Scherverbundfestigkeit mit eingeht (s. Kapitel 2.4.1) und somit einen großen Einfluss auf das Ergebnis des SCHWICKERATH-Versuchs hat, wird aus dem Ergebnis der vorliegenden Arbeit ersichtlich, wie wichtig eine korrekte Temperaturführung war.

Nach dem Guss wurden die in Metall überführten Plättchen visuell auf eventuelle Fehler überprüft. Fehlerhafte Gussobjekte wurden aussortiert und in der vorliegenden Arbeit nicht verwendet. Die in Kapitel 2.2.4.1 beschriebenen Aspekte wurden insofern berücksichtigt, als dass bereits gegossene Legierungsreste in der vorliegenden Arbeit nicht verwendet wurden, um die Verbundfestigkeit nicht negativ zu beeinflussen.

Das Ausarbeiten der Plättchen erfolgte unter identischen Bedingungen, da die Beschaffenheit der Metalloberfläche sich auf den Haftverbund zwischen Metall und Keramik auswirken kann [52, 20, 55]. Da wie bereits in Kapitel 2.4.1 erklärt die Dicke des Prüfkörpers in der dritten Potenz in die Berechnung der Scherverbundfestigkeit eingeht und demnach ein Variieren der Plättchendicke zu Ungenauigkeiten der Interpretation der Messergebnisse führt, wurde in besonderem Maße auf das Einhalten der geforderten Plättchenmaße geachtet. Die korrekten Maße von $(3 \pm 0,1 \text{ mm}) \times (25 \pm 1 \text{ mm}) \times (0,5 \pm 0,05 \text{ mm})$ wurden durch Bearbeiten mittels Hartmetallfräsen erreicht und mit einer elektronischen, geeichten Schiebelehre kontrolliert. Metallplättchen mit fehlerhaften Maßen wurden verworfen und nicht verblendet.

Bei der anschließenden Oberflächenbearbeitung wurden alle Prüfkörper mit demselben Korund bearbeitet. Hierbei wurde auf einen möglichst identischen Strahlwinkel und Druck geachtet sowie eine gleiche Dauer des Abstrahlens eingehalten, um eine gleiche Oberflächengüte der Metallplättchen zu gewährleisten. Das Abdampfen des Metallplättchens vor dem Verblenden sorgte für eine Reinigung und Entfettung der Oberfläche. Auf diese Weise konnte der Opaker das Metall gleichmäßig benetzen und Lufteinschlüsse, aus denen Entgasungsblasen resultieren und die den Haftverbund zwischen Metall und Verblendkeramik beeinträchtigen würden, konnten vermieden werden. Einer erneuten möglichen Verunreinigung durch die Berührung mit der Hand wurde vorgebeugt, indem das Werkstück mit Klemmpinzetten bzw. Objekthaltern fixiert wurde.

6.1.2.2 Verblendung mit der Keramik

Wie in Kapitel 2.2.4 beschrieben können bei der Verblendung von Metallgerüsten mit Keramik Fehler gemacht werden, die sich negativ auf den Metall-Keramik-Verbund ausüben. Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Arbeit darauf geachtet, Fehler zu vermeiden. Die einzige Variable bestand in der horizontalen und vertikalen Position im Brennofen, die Herstellerangaben wurden ansonsten strikt befolgt.

Wie von STRIETZEL [20] empfohlen, wurden die Metallplättchen nach dem Abstrahlen im Einwegstrahler und Abdampfen ohne Zeitverzögerung keramisch verblendet, um die erhöhte Oberflächenenergie nach dem Abstrahlprozess optimal zu nutzen. Vor jedem neuen Keramikauftrag wurde das zu verblendende Metallplättchen durch Abdampfen gereinigt, um eine Blasenbildung innerhalb der Keramik zu vermeiden. Beim Anmischen der Keramik wurden keine Luftblasen eingeschlossen und auf das korrekte Mischungs-

verhältnis von Pulver und Anmischflüssigkeit geachtet. Wäre der Keramikschlicker zu flüssig hergestellt worden, wäre es aufgrund des explosionsartigen Verdampfens der Flüssigkeit zu Porositäten, Rissen bis hin zu Blasen im Keramikblock gekommen. Eine zu trocken angemischte Keramikmasse hätte an der Oberfläche Mikroporositäten aufgewiesen, die sich nach dem Brand als Risse hätten darstellen können mit der Folge von Keramikabplatzungen.

Beim Schichten und Modellieren wurde insbesondere die beim Brennen auftretende Schrumpfung der keramischen Masse (s. Kapitel 2.2.4.1) berücksichtigt. Es wurde bei allen Prüfkörpern darauf geachtet, nach jedem Keramikauftrag korrekt zu kondensieren. Die überschüssige Flüssigkeit wurde mit einem sauberen Zellstofftuch aufgesaugt. Der Wichtigkeit der Maße konnte auch Rechnung getragen werden, indem alle Prüfkörper in derselben Keramikschichthilfe hergestellt wurden. Um die geforderten Maße einhalten zu können, war es erforderlich, die Keramikblöcke nach dem 2. Dentinbrand mit rotierenden Schleifkörpern nachzuarbeiten. Einer Ungleichheit der einzelnen Prüfkörper konnte entgegengewirkt werden, indem wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben die Oberfläche mit einer sich absenkenden diamantierten Trennscheibe im Parallelfräsgerät bearbeitet wurde. Die korrekten Maße der Keramikblockseiten wurden dagegen wegen der praktischeren Handhabung durch Bearbeiten mit einer diamantierten Fräse und Trennscheibe per Hand erreicht.

Da beim Ausarbeiten keine Prüfkörper frühzeitig zu Bruch gingen, kann davon ausgegangen werden, dass der Arbeitsschritt des Kondensierens korrekt durchgeführt wurde. Aber auch die Technik des Ausarbeitens ist unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.2.4.1 beschriebenen Aspekte als adäquat zu bewerten.

Die Tatsache, dass Abweichungen in der Brandführung, wie eine höhere Anzahl von Bränden und eine veränderte Temperaturführung, zu einer Minderung der Verbundfestigkeit führen können, wurde berücksichtigt. Alle 7 Prüfkörper einer Gruppe wurden in der gleichen Art und Weise gebrannt. Die Brandführung erfolgte mit Ausnahme des zweiten Versuchs, bei dem die Wirkung abweichender Temperaturen getestet wurde, streng nach Herstellerangaben.

6.1.2.3 Die Lage auf dem Brenngutträger

Das Ziel dieser Arbeit war es herauszufinden, ob die Positionen der Brennobjekte einen Einfluss auf die Verbundfestigkeit haben. Hierfür wurde als Brenngutträger die Wabe

gewählt. Die Prüfkörper wurden darauf ohne Verwendung von Pins oder anderen Halteelementen mit der Metallseite nach unten auf den Brenngutträger gelegt. Demnach hatten alle Prüfkörper einen direkten Kontakt mit der Wabe. Sie durchliefen wie in Kapitel 4 erläutert alle Brennzyklen an festgelegten und immer wieder denselben horizontalen Positionen auf dem Brenngutträger: Vorne, links, hinten, rechts, Mitte 1, Mitte 2. Variiert wurde auch die vertikale Lage des Brenngutträgers mithilfe von Abstandhaltern (s. Kapitel 4.1.3). Somit war die horizontale und vertikale Lage eines jeden Prüfkörpers stets reproduzierbar, die Vergleichbarkeit der Prüfkörper untereinander blieb gewährleistet.

6.1.2.4 Brennofen

Sämtliche in der vorliegenden Arbeit untersuchten Prüfkörper wurden im identischen Brennofen Programat® EP 3000 gebrannt (s. Kapitel 4.1.3). Auf die Konstruktion des hier gewählten Ofens wurde bereits in den Kapiteln Literaturübersicht und Methodik eingegangen.

Es ist in feststehenden zeitlichen Intervallen zu kontrollieren, ob sowohl das Heizsystem als auch die Temperaturkontrolle des digitalen Keramikofens fehlerfrei funktionieren, um eine konstante Temperatur zu gewährleisten und den Temperaturgradienten möglichst gering ausfallen zu lassen. Diese Kontrolle war im Sinne einer regelmäßigen Kalibrierung mit dem herstellereigenen Kalibrierungsset (Feinsilberprobe) gegeben. Sind Heizsystem und Temperaturkontrolle defekt, stimmt die tatsächliche Temperatur in der Brennkammer nicht mit der eingestellten Temperatur überein.

In der vorliegenden Arbeit wurden die in Kapitel 2.2.5 erläuterten Einstellparameter des Keramikofens nach Herstellerangaben eingehalten (Einstellung der Temperatur, Zeit und Vakuum), mit Ausnahme der bewusst bei -100 °C , -50 °C und -20 °C unter- und der bei $+20\text{ °C}$, $+50\text{ °C}$ und $+100\text{ °C}$ überbrannten Gruppen. Ein Über- bzw. Unterbrennen kann bei falscher Temperatureinstellung, überschießender Temperatur oder bei ungleichmäßiger Temperaturverteilung innerhalb des zu brennenden Objektes auftreten. Aussagen von KLINKE et al. [113] bestätigen dies. Versehentlich wurden sechs Prüfkörper zu stark überbrannt (bei $+150\text{ °C}$, s. Kapitel 6.3.2). Sie wurden verworfen, der SCHWICKERATH-Test wurde an ihnen nicht durchgeführt. Da es sich um genormte Prüfkörper mit nach DIN EN ISO 9693 [1] exakt festgelegten Maßen handelte, kann eine ungleichmäßige Temperaturverteilung innerhalb des Prüfkörpers ausgeschlossen

werden. Genau wie bei der Temperatureinstellung wurde auch die vom Hersteller vorgegebene Trockenzeit, Schließzeit, Aufheizzeit, Halte- und Öffnungszeit eingehalten, denn auch diese Zeiten haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Verbundfestigkeit (s. Kapitel 2.2.4.2). Auch das Vakuum wurde nach Herstellerangaben eingestellt, um eine Minderung der Verbundfestigkeit durch Blasenbildung zu vermeiden (s. Kapitel 2.2.4.2). Alle von innen und außen wirkenden Faktoren (s. Kapitel 4.1.3) wurden exakt eingehalten. Dadurch wurden Bedingungen geschaffen, die eine Beeinflussung der Messergebnisse ausschließen.

6.1.3 Versuchsaufbau

6.1.3.1 SCHWICKERATH-Test

In Kapitel 2.4 wurden verschiedene Verfahren zur Beurteilung der Verbundfestigkeit genannt. Da die Verbundfläche im Metall-Keramik-System insbesondere gegenüber Scherspannungen anfällig ist, bietet sich der Drei-Punkt-Biegeversuch nach SCHWICKERATH an [85]. Er ist zur Prüfung des Metall-Keramik-Verbundes als geeignete Prüfmethode anerkannt und in der DIN EN ISO 9693 verankert [39].

Der SCHWICKERATH-Test ist durch seinen einfachen Versuchsaufbau leicht durchzuführen, zeichnet sich durch einen geringen Materialaufwand aus und liefert reproduzierbare Resultate. Dennoch zeigen sich bei den verschiedenen Autoren erhebliche Unterschiede in den Messresultaten. Sicherlich sind diese teilweise auf die Herstellung der Prüfkörper zurückzuführen. Untersuchungen von DÖRFLER et al. bestätigen das [39]. In der vorliegenden Arbeit wurde aus diesem Grund großen Wert auf Genauigkeit bei der Herstellung der Prüfkörper gelegt (s. Kapitel 6.1.2).

6.1.3.2 Einstellparameter und Fehler der Messapparatur

Die Einstellparameter der Universalprüfmaschine sind in der DIN EN ISO 9693 exakt festgelegt und beeinflussen das Ergebnis des SCHWICKERATH-Tests. Wie in der DIN EN ISO 9693 beschrieben soll die Spannweite zwischen den Auflagen 20 mm betragen. Die Prüfkörper wurden unter Zuhilfenahme einer Messlehre auf den Metallaufgaben genau ausgerichtet, sodass die Krafteinwirkung mittig erfolgen und eine einseitige übermäßige Belastung im Randbereich der Keramikverblendung vermieden werden konnte.

Der Abstand wurde zur Sicherheit mehrfach überprüft. Der Radius der Druckfinne muss 1 mm betragen, die Vorschubgeschwindigkeit laut DIN EN ISO 9693 beträgt $1,5 \pm 0,5$ mm/min (in der vorliegenden Arbeit wurde eine Vorschubgeschwindigkeit von 1,5 mm/min festgelegt). Die Kraft wird mit dieser konstanten Rate aufgebracht und bis zum Versagen des Metall-Keramik-Verbundsystems aufgezeichnet. Auch die Kraftabschalt-schwelle hat einen Einfluss auf das Ergebnis. Sie soll zwischen 5 % und 30 % liegen [1] und wurde in der vorliegenden Arbeit auf 15 % festgelegt.

Kritisch gesehen werden muss, dass der κ -Wert lediglich graphisch annäherungsweise ermittelt wurde und somit von einem systematischen Fehler von 5 % bis 10 % [114] ausgegangen werden muss.

6.2 Reflektion der gewählten Methode

Herstellung der Metallplättchen

In der vorliegenden Arbeit wurden die Metallplättchen im konventionellen Gussverfahren hergestellt. Dies ganz bewusst, um die klassische analoge Laborsituation zu simulieren, zumal das Thema „Metall-Keramik“ über Jahrzehnte durch gegossene Metallgerüste geprägt war und entsprechend zahlreiche Untersuchungen auf Basis gegossener Metallgerüste vorliegen. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Digitalisierung der Zahntechnik wäre es mit Sicherheit interessant, frästechnisch hergestellte Metallplättchen als Gerüstmaterial zu untersuchen.

Die Lage auf dem Brenngutträger

Der Einfluss der Höhe wurde durch den Versuchsaufbau berücksichtigt. Somit konnte vor dem Hintergrund unterschiedlicher Temperaturbereiche innerhalb der Brennkammer wie von KLINKE et al. [113] zumindest an einem Ofen exemplarisch festgestellt eine Aussage darüber getroffen werden, ob sich Temperaturgradienten auf die Verbundfestigkeit zwischen Metall und Keramik auswirken. Denkbar ist, dass unterschiedliche Temperaturen innerhalb der Brennkammer das Brennergebnis einer keramisch verblendeten Krone beeinflussen können. Beim eventuellen Vorliegen eines starken Temperaturgradienten können beispielsweise verschiedene Bereiche einer Krone unter- und überbrannt sein, was zu Spannungen mit daraus resultierenden Sprüngen, Rissen und Abplatzungen der Keramik führen könnte.

Es ist darauf hinzuweisen, dass im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur ein einziger Brenngutträgertyp (Wabe) verwendet wurde. Folglich kann keine allgemeingültige Aussage in Bezug auf eine generelle Gültigkeit der Ergebnisse formuliert werden. Ein möglicher Einfluss unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Brenngutträger wie in Kapitel 2.2.5 beschrieben wurde nicht berücksichtigt. Hier wären weitere Studien erforderlich.

Brennofen

Es ist denkbar, dass es aufgrund des beschriebenen Öffnungsprinzips zu Luftverwirbelungen beim Öffnen und Schließen kommen kann, sodass ein größerer Temperaturgradient zwischen den horizontal und vertikal unterschiedlich angeordneten Prüfkörpern zu erwarten wäre. Es ist möglich, dass in einem Dentallabor mit unterschiedlichen Ofenmodellen bei gleichen Brennparametern Ergebnisse mit unterschiedlichen Brenngraden geliefert werden. Das kann sich in den Verbundfestigkeitswerten, aber auch in Divergenzen in der Farbwirkung widerspiegeln. Der Grund für einen unterschiedlichen Brenngrad kann darin gesehen werden, dass die Konstruktionsunterschiede und somit die Lage der Thermolemente einen Einfluss auf die Brenntemperatur haben können. Aber auch bei Öfen eines Typs können Unterschiede in den Brenngraden durch unterschiedliche Chargen oder das Alter der Brennelemente verursacht werden. Wie bereits erwähnt wurde nur in einem einzigen Keramikofen gebrannt. Ein Vergleich mit Ergebnissen aus anderen Keramiköfen wäre methodisch nicht zu legitimieren. Es wäre zu diskutieren, inwieweit das Öffnungs- bzw. Konstruktionsprinzip eines einzelnen Ofens Einfluss auf das Brennergebnis hat. Diese Überlegung stimmt mit Aussagen von THOLEY und THIEL [30] überein.

SCHWICKERATH-Test

Die Belastbarkeit eines Prüfkörpers im Biegeversuch nach SCHWICKERATH ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Sie wird u. a. beeinflusst vom E-Modul der Legierung. Je höher der E-Modul ist, desto mehr Kraft muss aufgewandt werden, um die Keramik vom Metallgerüst abzulösen. Die Oberflächenbehandlung des Gerüsts übt einen entscheidenden Einfluss auf die Verbundfestigkeit zwischen dem Metall und der Verblendkeramik aus.

Kritisch betrachtet werden muss, dass aus dem Ergebnis des SCHWICKERATH-Tests nicht nachvollzogen werden kann, inwieweit dieses durch den Haftverbund zwischen

Metall und Keramik, durch die Ungenauigkeiten der geometrischen Abmessungen der Prüfkörper und durch den E-Modul der Legierung im Einzelnen beeinflusst wurde.

Aussagen von KAPPERT et al. [115] bestätigen dies. Darüber hinaus wenden sowohl KAPPERT et al. als auch SCHWARZ et al. [116] ein, dass der Messwert für die Kraft beim Abplatzen der Keramik vom Metallgerüst maßgeblich von der Biegesteifigkeit des Metallplättchens abhängig ist. Nach KAPPERT et al. ist das Abplatzen der Keramik weniger dem Haftverbund zwischen Metall und Keramik zuzuschreiben.

Nach SIEBERT lassen sich durch den SCHWICKERATH-Test Aussagen über die Qualität eines Verbundsystems unter Biegebelastung treffen. Die Steifigkeit des Metallkörpers und des Keramikanteils sowie die Haftung beider Werkstoffe setzen dieser Biegebelastung einen Widerstand entgegen [42]. Es besteht die Möglichkeit, dass ein Metallprüfkörper mit größerer Steifigkeit (z. B. aus einer edelmetallfreien Legierung) bei geringerer Haftung zur Keramik im Biegeversuch ein höheres Ergebnis erzielt als beispielsweise eine edelmetallhaltige Legierung. Demnach kann es sein, dass die Haftung der Keramik auf einer edelmetallfreien Legierung geringer ist als auf einer edelmetallhaltigen Legierung, dass aber die Resultate des Metall-Keramik-Verbundsystems auf EMF-Basis dennoch günstiger ausfallen als die auf Edelmetallbasis [42]. Untersuchungen von KAPPERT et al. [115] bestätigen dies. In der vorliegenden Arbeit wurde ausschließlich eine EMF-Legierung verwendet. Wie bemerkt besitzen EMF-Legierungen eine höhere Steifigkeit. Deshalb können im Rahmen dieser Untersuchung keine Vergleiche zu anderen Legierungen gezogen werden. Lediglich konnten die Ergebnisse der einzelnen Prüfkörper bei gleichem E-Modul untereinander verglichen werden. Hierbei erweist sich der SCHWICKERATH-Test als geeignete Methode.

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, ob unterschiedliche horizontale und vertikale Brennpositionen der Prüfkörper durch mögliche Temperaturgradienten innerhalb der Brennkammer Einfluss auf die Verbundfestigkeit im Metall-Keramik-System haben. Da der SCHWICKERATH-Test mögliche Veränderungen des WAK der Keramik durch die erwähnten eventuellen Temperaturgradienten in der Brennkammer nicht berücksichtigt, muss diskutiert werden, ob noch weitere Scherversuche nach SCHMITZ/SCHULMEYER durchgeführt werden sollten wie auch von KAPPERT [75] vorgeschlagen. Dennoch ist der SCHWICKERATH-Test, was die Fragestellung dieser Arbeit angeht, ein angemessenes Verfahren, denn er kann kleinste Unterschiede in der Verbundfestigkeit nachweisen. Kritisch gesehen werden muss, dass es sich bei diesem Test um eine einachsige Belastung handelt, im Gegensatz zu den Kräften bei funktio-

neller und parafunktioneller Belastung in der Mundhöhle. Auch die tatsächliche Technologie zur Herstellung einer keramisch verblendeten Krone im Dentallabor (z. B. variierende Schichtstärken der keramischen Verblendung) wird nicht berücksichtigt.

Visuelle Begutachtung

Die Prüfkörper wurden nach dem Testen der Verbundfestigkeit visuell, sowohl mit bloßem Auge als auch unter einem Lichtmikroskop, auf Unterschiede im Glanzverhalten, in der Oberflächenbeschaffenheit und auf mögliche Risse, Sprünge oder Veränderungen im Farbverhalten hin untersucht. Es sollte so festgestellt werden, ob die horizontale und vertikale Lage des Prüfkörpers sowie Abweichungen in der Brenntemperatur einen optischen Einfluss haben. Der Umstand, dass es sich um eine rein subjektive Wahrnehmung handelt, die von Betrachter zu Betrachter variabel ist, muss kritisch bewertet werden.

6.3 Diskussion der Ergebnisse

In der Norm DIN EN ISO 9693 wird ein Mindestwert von 25 MPa gefordert. Dieser Wert konnte bei allen Prüfkörpern, die im ersten Teil dieser Arbeit nach Herstellerangaben gebrannt wurden, erreicht und deutlich überschritten werden. Es wurde eine durchschnittliche Verbundfestigkeit von 44,75 MPa erreicht. Der geringste Wert betrug 28,16 MPa, der höchste Wert 57,32 MPa. Die Standardabweichung lag bei den einzelnen Gruppen zwischen 1,28 MPa und 7,40 MPa (s. Kapitel 5.1.1, Tab. XXI) und fiel somit niedrig aus. Die Standardabweichung ist ein Maß für die Streubreite der Ergebnisse. Somit ist mit der vorliegenden Studie eine hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gegeben. Es kann demnach zum einen von einer hohen Genauigkeit der Versuche ausgegangen werden. Zum anderen werden konstante Bedingungen während der Prüfkörperherstellung bestätigt.

6.3.1 Ergebnisdiskussion Teil 1

Ergebnisse des SCHWICKERATH-Tests

Mit Hilfe der Varianzanalyse mit anschließendem Post Hoc-Paarvergleich konnten beim Vergleich der Scherverbundfestigkeitswerte der nach Herstellerangaben gebrannten Prüfkörper sowohl bezüglich der horizontalen als auch vertikalen Position keine signifi-

kanten Unterschiede festgestellt werden. Der Mittelwert von T_m der auf Ebene 1 gebrannten Prüfkörper lag bei 43,93 MPa, der Ebene 2 bei 45,77 MPa und der Ebene 3 bei 44,56 MPa. Die Standardabweichungen lagen bei 5,55 MPa für Ebene 1, 4,45 MPa für Ebene 2 und 5,14 MPa für Ebene 3 (s. Kapitel 5.2.1, Tab. XXI).

In vorangegangenen Arbeiten (z. B. von ZIMNY 2010) ist bereits geprüft worden, ob und inwieweit sich unterschiedliche horizontale Positionen der SCHWICKERATH-Prüfkörper auf die Verbundfestigkeitswerte zwischen Metall und Verblendkeramik auswirken. In der vorliegenden Arbeit wurde diese Fragestellung erweitert. Es sollte nicht nur die Auswirkung der horizontalen Position beurteilt werden, sondern auch die vertikale Position. Aufgrund der dicht beieinander liegenden Verbundfestigkeitswerte und der nicht signifikanten Unterschiede zwischen den Werten der drei Ebenen untereinander, kann davon ausgegangen werden, dass sich die vertikale Lage bzw. die Höhe des Brennobjektes in der Brennkammer nicht auf die Verbundfestigkeit auswirkt. Die geringsten durchschnittlichen Werte wurden bei den Prüfkörpern der Ebene 1 erreicht. Zu bemerken ist auch, dass, verglichen mit den anderen Ebenen, zwei Werte der Ebene 1 (Mitte 2 und hinten) niedrig ausfielen (28,16 MPa und 29,21 MPa). Der zu Beginn der Varianzanalyse festgestellte knapp signifikante Einfluss der horizontalen Position (s. Tab. XXV, $p=0,045$) wird im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt (s. Kapitel 6.3.2). Hier zeigte sich kein signifikanter Einfluss der horizontalen Position (s. Tab. XXX, $p=0,386$). Es muss also eher davon ausgegangen werden, dass der geringere Mittelwert und insbesondere die geringsten Werte (s. o.) der Ebene 1 (im ersten Versuch) mit den zu Beginn der Prüfkörperherstellung wenig routinierten zahntechnischen Fertigkeiten zusammenhängen, sodass sich ein knapp signifikanter Einfluss der horizontalen Position ergab. Mit der Zeit wurden die Abläufe der Keramikschichtung deutlich routinierter. Aussagen von ZIMNY [100] unterstützen diese Hypothese. Es ist anzunehmen, dass der niedrigere Mittelwert in keinem kausalen Zusammenhang mit der Tatsache steht, dass er auf der untersten Ebene ermittelt wurde. Dennoch müssen die Möglichkeiten eines auf das Versuchsergebnis Einfluss nehmenden Temperaturgradienten sowie die zwischen den drei Ebenen ggf. variierenden bzw. verfälschten Brennzeiten diskutiert werden. Die Hypothese aber, dass z. B. die Solltemperatur in verschiedenen Bereichen der Brennkammer zu geringfügig unterschiedlichen Zeiten erreicht wird und somit die Haltezeit des Brennguts auf Solltemperatur geringfügig variiert und nicht konstant ist, wird durch das optische Ergebnis und die Ergebnisse des SCHWICKERATH-Tests in der vorliegenden Arbeit nicht verifiziert und kann somit vernachlässigt werden.

Zu Beginn der Untersuchungen wurde angenommen, dass es aufgrund des Konstruktionsprinzips des Progamat® EP 3000 beim Öffnen der Brennkammer zu Luftverwirbelungen kommen könnte, die sich auf die Verbundfestigkeit auswirken. Auch diese Hypothese wird aufgrund der Ergebnisse der Varianzanalyse (s. Kapitel 5.1.2, Tab. XXV, die vertikale Ebene hat keinen signifikanten Einfluss auf die Verbundfestigkeit) und der Ergebnisse der Post Hoc-Paarvergleiche nach TUKEY-HSD (Tab. XXVIII, keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen) nicht verifiziert und kann vernachlässigt werden. Ebenso kann die Bedeutung einer möglichen Luftbewegung beim Evakuieren der Brennkammer vernachlässigt werden, da das zum Brennen benötigte „Vakuum“ innerhalb eines Temperaturbereichs entsteht, bei welchem die Sinterung noch gar nicht begonnen hat.

Die aus der Ergebnisdiskussion gewonnenen Erkenntnisse beziehen sich hierbei allerdings nur auf einen einzigen Brennofen. Um Aussagen über mögliche Auswirkungen unterschiedlich konstruierter Brennöfen auf die Verbundfestigkeit machen zu können, wären weitere Studien erforderlich (s. a. Kapitel 6.2). Bei genauerer Betrachtung der Messwerte konnten in den mittleren Messpositionen tendenziell geringere Werte beobachtet werden als in den peripheren (s. Abb. 38 und Abb. 39). Dies deckt sich mit Untersuchungen von KLINKE [113], der in Brennöfen unterschiedliche Temperaturbereiche feststellte. Die leicht höheren Werte in der Peripherie lassen sich evtl. durch die geringeren Abstände der Brennobjekte zur Heizspirale erklären. Dadurch kommen sie schneller auf die Endtemperatur und die Sinterzeit erhöht sich dadurch geringfügig. Das für die statistische Auswertung im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit angewendete Regressionsmodell erläutert eben jenen funktionalen Zusammenhang zwischen Temperatur und Verbundfestigkeit und kann somit zum einen die oben erwähnten Beobachtungen erklären und zum anderen die Theorie von KLINKE [113] bestätigen. Die Verbundfestigkeitswerte aus dem ersten Versuch unterschieden sich allerdings bei den anschließenden paarweisen Gruppenvergleichen mit dem Post Hoc-Test nach TUKEY-HSD nicht signifikant ($p > 0,05$). Die Unterschiede könnten also rein zufällig entstanden sein, ihre Erörterung ist redundant, weshalb eine weitere Diskussion entfällt.

Visuelle Begutachtung

Beim Betrachten der Prüfkörper mit bloßem Auge und unter dem Lichtmikroskop bei 10-facher Vergrößerung waren subjektiv keine Unterschiede im Erscheinungsbild der Keramikverblendung wahrzunehmen. Es ist anzunehmen, dass die horizontale Position

des Prüfkörpers auf dem Brenngutträger keinen Einfluss auf das optische Erscheinen hat, da es offenkundig keinen Einfluss nehmenden Temperaturgradienten auf einer horizontalen Ebene gibt. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Ofen bei konstanter Temperatur im thermischen Gleichgewicht befindet. Auch ein eventueller Luftzug beim Öffnen des Brennofens nimmt keinen Einfluss auf das optische Erscheinungsbild der an verschiedenen horizontalen Positionen gebrannten Prüfkörper auf einer Ebene. Analog dazu gilt dies ebenfalls für die Prüfkörper, die auf Ebene 2 und 3 gebrannt wurden, so dass auch die vertikale Lage des Prüfkörpers keinen Einfluss auf das optische Erscheinungsbild zu haben scheint. Aus diesem Grund wurde auf eine Fotodokumentation der Prüfkörper des ersten Teils dieser Arbeit verzichtet.

6.3.2 Ergebnisdiskussion Teil 2 – veränderte Brenntemperatur

Ergebnisse des SCHWICKERATH-Tests

Im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit wurden durch erhöhte und erniedrigte Brenntemperaturen ein Über- bzw. Unterbrennen der Keramik und der Einfluss auf die Verbundfestigkeit simuliert. Da nur an zwei Positionen gebrannt wurde (mittig und seitlich), war es sinnvoll, als Referenzwert zwei Gruppen nach Herstellerangaben/Gebrauchsanweisung (GA) anzufertigen, die der Überprüfung der Reproduzierbarkeit dienen. Damit sollte überprüft werden, ob die Werte aus Teil 1 (sechs horizontale Positionen, drei vertikale Ebenen) aufgrund der größeren Masse durch Wärmeabzug der zusätzlichen Prüfkörper und der Abstandhalter beeinflusst worden sind.

Die durchschnittlichen Scherverbundfestigkeitswerte der bei erniedrigter Brenntemperatur hergestellten Prüfkörper lagen deutlich unterhalb der durchschnittlichen Verbundfestigkeit der nach Herstellerangaben gebrannten Prüfkörper. Die Differenz wurde umso größer, je niedriger die Brenntemperatur war und zwar auf beiden horizontalen Positionen (s. o.). Es ist anzunehmen, dass diese Abnahme der mechanischen Belastbarkeit durch Porositäten in der Keramik verursacht wird. Diese Annahme stimmt mit Aussagen von EICHNER und KAPPERT [18] überein. Es zeigte sich kein signifikanter Einfluss der horizontalen Position, sehr wohl aber der Temperaturabweichung von GA (s. Tab. XXX). Zu Beginn der Untersuchungen wurde davon ausgegangen, dass die Scherverbundfestigkeitswerte aller nicht nach Herstellerangaben gebrannten Prüfkörper niedriger ausfallen würden. Die Resultate der überbrannten Prüfkörper erwiesen sich, entgegen der anfänglichen Erwartungen, höher als die Resultate der nach Herstellerangaben gebrann-

ten Prüfkörper. Erklären lassen sich die Resultate dahingehend, dass Fehler in der Brandführung (s. Kapitel 2.2.4.2), im Fall der vorliegenden Arbeit eine erhöhte bzw. erniedrigte Brenntemperatur, die physikalischen Eigenschaften wie WAK und Biegefestigkeit der Keramik beeinflussten. THOLEY und THIEL bestätigen diese Aussage [30].

Auch ZIMNY simulierte durch Abweichungen von der empfohlenen Brenntemperatur von -20 °C und $+20\text{ °C}$ ein Unter- bzw. Überbrennen. Ihre ermittelten höheren Scherverbundfestigkeitswerte erklärte sie sich durch die Tatsache, dass die unter- und überbrannten Prüfkörper zum Ende der praktischen Versuche mit optimierten zahntechnischen Fähigkeiten hergestellt wurden [100].

In der zweiten Versuchsreihe wurden wie dargestellt zwei Gruppen nach Herstellerangaben als Referenzwert gebrannt. Die Verbundfestigkeitswerte dieser nach Herstellerangaben gebrannten Gruppen fielen bei bereits routinierter Herstellung niedriger als die Verbundfestigkeitswerte der um 100 °C erhöht gebrannten Prüfkörper aus. Somit kann das Erklärungsmuster von ZIMNY für den zweiten Teil der vorliegenden Arbeit ausgeschlossen werden.

Die höheren Scherverbundfestigkeitswerte der bei erhöhten Temperaturen gebrannten Prüfkörper dürfen also nicht zu dem Schluss verleiten, dass es sich hierbei um eine allgemeine Optimierung der Eigenschaften handelt und stets höher gebrannt werden sollte. Neben dem WAK und der Biegefestigkeit der Keramik werden auch optische Eigenschaften wie Farbwirkung und -streuung sowie Formstabilität beeinflusst.

Visuelle Begutachtung

Die spröde und glanzlose Oberfläche der Gruppen -20 °C , -50 °C und -100 °C ist dadurch zu erklären, dass die keramische Masse aufgrund der veränderten Brennführung weniger gesintert ist. Der daraus resultierende reduzierte Schwundwert war nach dem ersten Dentinbrand optisch wahrzunehmen. Wie beschrieben gingen damit schwundwertreduzierende Porositäten zulasten der Transparenz und Farbwirkung der Keramik einher. Die Abnahme der Farbintensität spiegelt sich auch in der Abnahme der Verbundfestigkeitswerte wider. Dieses Ergebnis deckt sich mit Beobachtungen und Aussagen von THOLEY und THIEL [30] sowie EICHNER und KAPPERT [18], die ähnliche Versuche durchführten. Über mögliche Gründe dieses Phänomens wurde bereits in Kapitel 2.2.4.2 eingegangen.

Das genaue Gegenteil war bei den überbrannten Prüfkörpern der Fall. Bei ihnen zeigte sich ein erhöhter Oberflächenglanz gegenüber denen nach Herstellerangaben und den

bei niedrigeren Temperaturen gebrannten Prüfkörpern. Auch zeigten sich Formveränderungen durch abgerundete Kanten. Auch dieses Phänomen der Formveränderung und Zunahme der Farbintensität bei steigender Sintertemperatur wird durch Aussagen von THOLEY und THIEL [30] sowie KAPPERT und EICHNER [18] bestätigt. Deren Theorien über die Ursachen dieses Phänomens wurden bereits in Kapitel 2.2.4.2 erläutert. Wie erwähnt (s. Kapitel 6.1.2.4) wurde eine Gruppe zu stark überbrannt, da der Ofen versehentlich falsch programmiert wurde (+150 °C statt +100 °C). Es zeigte sich hier in noch extremerer Weise das beschriebene Phänomen der Formveränderung. Die Keramik war gänzlich verlaufen und frakturierte allein schon beim Öffnen des Ofens. Diese sechs Prüfkörper wurden verworfen. Hier zeigt sich deutlich die Angemessenheit des in der statistischen Analyse gewählten **quadratischen Regressionsmodells**. Es zeigt sich kein linearer Zusammenhang. Die Werte würden nicht unendlich ansteigen, sondern fallen wieder ab (s. Kapitel 5.2, Abb. 43) bzw. entfallen durch ein unmöglich gewordenen Testen gänzlich. Die durch das Regressionsmodell mögliche Prognose der zur Temperaturabweichung korrelierenden Scherverbundfestigkeitswerte bezieht sich lediglich auf den in dieser Arbeit gewählten Versuchsbereich von -100 °C bis +100 °C.

6.4 Vergleich der Ergebnisse mit den Literaturwerten

Im Vergleich mit bislang bekannten Literaturwerten ergab sich, dass handelsübliche Kobalt-Chrom-Legierungen in der Literatur Verbundfestigkeitswerte zwischen 35,2 MPa und 59,2 MPa aufweisen [110, 100, 88, 117, 114].

Die Mittelwerte der Scherverbundfestigkeit, die in der vorliegenden Arbeit ermittelt wurden, lagen zwischen 39,54 MPa und 48,16 MPa (s. Tab. XXI) und somit absolut im erwarteten Bereich. Aus diesem Grund kann von einer prinzipiellen Validität der Ergebnisse ausgegangen werden.

6.5 Bedeutung für die Praxis und Schlussfolgerung

Die Situation in der prothetischen Praxis erfordert geometrisch unbestimmte Brennobjekte in einem Ofen bei unterschiedlicher Brennführung. Mehrgliedrige Brücken mit einer weiten Spanne können aufgrund ihrer Maße oft nicht zentrisch auf dem Brenngutträger positioniert werden. Auch ist es in der zahntechnischen Praxis notwendig, die Kronen und Brücken auf Pins abgestützt zu brennen, um die Modellation des Kronen-

randes oder die basale Fläche eines Brückengliedes nicht in unerwünschter Weise zu deformieren. Prothetische Kronen, beispielsweise im Frontzahnbereich mit einer weiten Kronenrand-Schneidekanten-Distanz, sowie implantatgetragene Kronen und Brücken, die aufgrund einer möglichen vorangegangenen Atrophie des Alveolarfortsatzes zuweilen höher anzufertigen sind - zum Einsatz kommen hier u. a. zahnfleischfarbene Keramikmassen für die zervikalen Anteile -, werden aufgrund ihrer Größe im Bereich des Kronenrandes in einer tieferen Ebene des Brennofens gebrannt als der inzisale bzw. okklusale Anteil. Wie bereits erwähnt ist es möglich, dass Temperaturgradienten Einfluss auf die Verbundfestigkeitswerte des Brennguts bei unterschiedlichen horizontalen und vertikalen Positionierungen im Brennofen nehmen. Mithilfe der vorliegenden Arbeit konnte herausgefunden werden, dass die horizontale und vertikale Position des SCHWICKERATH-Plättchens keine Einflussgröße darstellt. Da es sich allerdings um genormte Prüfkörper handelt, sind Rückschlüsse auf ein analoges Ergebnis bei individuell gestalteten prothetischen Arbeiten insofern nur begrenzt möglich, da bei ihnen durch eine partiell voluminöse Gestaltung der Kaufläche (unterschiedliche Keramikstärken durch ein natürlich gestaltetes Relief im Sinne von Fissuren, Dreieckswülsten, Höckerabhängen und Randleisten) unterschiedliche Temperaturgradienten innerhalb des Objektes auftreten können.

In der vorliegenden Arbeit lagen die sechs horizontal positionierten SCHWICKERATH-Plättchen mit größtmöglichem Abstand zueinander. Zwar zeigte sich zunächst ein (knapp) signifikanter Einfluss der horizontalen Position (die Werte der mittig gebrannten Prüfkörper waren tendenziell geringer s. o.), jedoch konnte der Einfluss der horizontalen Position bei den anschließenden paarweisen Gruppenvergleichen mit dem Post Hoc-Test nach TUKEY-HSD nicht verifiziert werden. Anders kann es sich aber verhalten, wenn auf dem Brenngutträger viele prothetische Arbeiten positioniert werden. Ein abweichendes Ergebnis in der Verbundfestigkeit bei Objekten mit abweichendem Volumen ist denkbar. So können viele Arbeiten, die zudem womöglich groß gestaltet sind, die Hitze länger speichern als die hier hergestellten Prüfkörper. KLINKE und BIFFAR [70] unterstützen diese Argumentation. Demnach könnte sich die Abkühlphase verzögern, was die Verbundfestigkeit beeinflussen könnte. Folglich darf gemutmaßt werden, dass die Wahrscheinlichkeit, langfristig prothetisch erfolgreiche Ergebnisse zu erzielen umso höher ist, je gleichmäßiger die Brennobjekte gestaltet sind.

Im Laboralltag stehen Auftragslage und Terminforderung den Patientenforderungen nach langer Haltbarkeit und hoher Ästhetik des Zahnersatzes gegenüber. Diese Forderungen gilt es in Einklang zu bringen ohne zahnmedizinische Nachteile zu befürchten.

Klinisch zu diskutieren wäre, welche Brennkammerlage hohe Verbundfestigkeitswerte und damit Spätbruchsicherheit gewährleistet oder gar Misserfolge erwarten lässt. Gleiches gilt für die Farbwirkung und -streuung der Keramik. Hieraus ergäbe sich evtl. die Notwendigkeit neuer Brenngutträgermodelle bzw. -gestelle für eine optimale Brennkammerausnutzung.

Bezüglich der oben genannten Forderungen ergeben sich zudem weitere Fragestellungen. Bei terminlichem Zeitdruck im Dentallabor und hoher Auftragslage stellt sich die Frage, inwieweit eine maximale Ausnutzung der Brennkammer (gleichzeitiges Brennen vieler Arbeiten auf mehreren Ebenen) Qualitätssicherheit garantiert und in zahnmedizinischer Verantwortung dem Patienten gegenüber dessen Forderungen und Wünschen gerecht wird. Hierbei sollte aber zwischen Zeitersparnis und der schwierigeren Praktikabilität abgewogen werden. Zwischen dem Abstrahlen und dem Auftragen der Keramik ist nicht viel Zeit, um die Oberflächenenergie optimal zu nutzen.

Anhand der Ergebnisse lässt sich schlussfolgern, dass bei regelmäßiger Kalibrierung und Wartung des Brennofens sowie korrekter Temperaturführung die horizontale und vertikale Position im Brennofen sich nicht auf die Verbundfestigkeit und das optische Erscheinungsbild des genormten SCHWICKERATH-Plättchens auswirkt.

Es ist davon auszugehen, dass die Brennführung, Größe, Form und Anzahl der Brennobjekte entscheidender für das Brennergebnis von individuellen Restaurationen sind als die Positionierung im Brennofen, vorausgesetzt, dass dieser fehlerfrei funktioniert.

Damit ist die Positionierung der Brennobjekte im Brennofen für ihre spätere Festigkeit und Verwendbarkeit praktisch irrelevant.

7 Literaturverzeichnis

- 1 DIN. DIN EN ISO 9693 Dentale restaurative Metallkeramiksysteme. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlags GmbH, Berlin, pp 2012
- 2 Kappert HF, Eichner K. Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung. Thieme Stuttgart, New York, pp 2008
- 3 Dorsch P. Die Charakterisierung des Metall/Keramik-Verbundes mit dem Biegetest nach ISO und DIN. Quintessenz Zahntech 1990; 16: 709-718
- 4 Seher J, Viohl J. In-vitro-Verfärbungen von Kunststoffen durch Farbstoffe und UV-Strahlung. Dtsch Zahnärztl Z 1992; 47: 634-636
- 5 Olms C, Setz JM. Klinischer Vergleich von komposit- und keramik-verblendeten metallunterstützten Kronen. Erste Ergebnisse nach 18 Monaten. Quintessenz Zahntech 2010; 36: 1364-1372
- 6 Reitemeier B, Hänsel K, Kastner C, Weber A, Walter MH. A prospective 10-year study of metal ceramic single crowns and fixed dental prosthesis retainers in private practice settings. J Prosthet Dent 2013; 109: 149-155
- 7 Li J, Ye X, Li B, Liao J, Zhuang P, Ye J. Effect of oxidation heat treatment on the bond strength between a ceramic and cast and milled cobalt-chromium alloys. Eur J Oral Sci 2015 (I); 123: 297-304
- 8 Venkatachalam B, Goldstein GR, Pines MS, Hittelman EL. Ceramic pressed to metal versus feldspathic porcelain fused to metal: A comparative study of bond strength. Int J Prosthodont 2009; 22: 94-100
- 9 Li JY, Li RN, Chang SH, Zhuang PL, Liao JK, Ye XH, Ye JT. Effect of heating palladium-silver alloys on ceramic bond strength. J Prosthet Dent 2015 (II); 114: 715-724

-
- 10 Lauer HC, Ottl P, Weigl P. Metallkeramik-Einfluss von Verfahrenstechniken auf die klinische Bewertung. Dtsch Zahnärztl Z 1998; 53: 167-174
- 11 Kraft J, Schäfer G. Untersuchungen zur Verbundfestigkeit von Metallkeramik/Kunststoff-Systemen. Dtsch Zahnärztl Z 1994; 49: 124-128
- 12 Knischewski F, Rau G. Grundwissen für Zahntechniker. Werkstoffkunde: Metalle. Verlag Neuer Merkur GmbH, München, pp 1984
- 13 Ludwig K. Lexikon der Zahnmedizinischen Werkstoffkunde. Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin, pp 2005
- 14 Lee DH, Lee BJ, Kim SH, Lee KB. Shear bond strength of porcelain to a new millable alloy and a conventional castable alloy. J Prosthet Dent 2015; 113: 329-335
- 15 Strietzel R. Die Werkstoffkunde der Metall-Keramik-Systeme. Verlag Neuer Merkur GmbH, München, pp 2005
- 16 Meiners H, Lehmann KM. Klinische Materialkunde für Zahnärzte. Carl Hanser Verlag, München, Wien, pp 1998
- 17 DIN. DIN EN ISO 22674 Zahnheilkunde- Metallische Werkstoffe für festsitzenden und herausnehmbaren Zahnersatz und Vorrichtungen. Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth Verlags GmbH, Berlin pp 2006
- 18 Eichner K, Kappert HF. Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung- Band 1 Grundlagen und Verarbeitung. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, pp 2005
- 19 Roberts HW, Berzins DW, Moore BK, Charlton DG. Metal-ceramic alloys in Dentistry: A Review. Journal of Prosthodontics 2009; 18: 188-194
- 20 Strietzel R. Der Metall-Keramik-Verbund. Fehler bei der Verarbeitung. Quintessenz Zahntech 2002; 28: 1412-1421

-
- 21 Atluri KR, Vallabhaneni TT, Tadi DP, Vadapalli SB, Tripuraneni SC, Averneni P. Comparative evaluation of metal-ceramic bond strengths of nickel chromium and cobalt chromium alloys on repeated castings: A in vitro study. J Int Oral Health 2014; 6: 99-103
- 22 Tauber M, Eykmann R. Gerüstgestaltung für metallkeramische Restaurationen. Teil 2: Physikalische Hinweise zur Gerüstgestaltung. Quintessenz Zahntech 2006; 32: 384-392
- 23 Fischer J. Vergleich der Brandsimulation nach DIN 13927 und ISO 9693. Dtsch Zahnärztl Z 1997; 52: 800-803
- 24 Zukunft D. Allgemeine Metallkunde für Zahntechniker. Verlag Volk und Gesundheit, Berlin, pp 1974
- 25 Fischer J. Biokompatibilität aufbrennfähiger Legierungen. Quintessenz Zahntech 2009; 35: 1002-1016
- 26 Schwickerath H. Zur Passivierung von Dentallegierungen. Quintessenz Zahntech 1993; 19: 403-408
- 27 Pfeiffer P, Kang-Lee HY, Schwickerath H. Korrosionsverhalten von 6 aufbrennfähigen Dentallegierungen nach Oberflächenbehandlung. Dtsch Zahnärztl Z 1997; 52: 347-350
- 28 Caesar H, Ernst S. Grundwissen für Zahntechniker- Die Nichtmetalle in der Zahntechnik. Verlag Neuer Merkur GmbH, München, pp 1998
- 29 Marxkors R, Meiners H. Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde. Deutscher Zahnärzte Verlag DÄV GmbH, Köln, pp 2005
- 30 Tholey MJ, Thiel N. Das Brennen von dentaler Verblendkeramik. Quintessenz Zahntechnik 2009; 35: 1018-1029
- 31 Claus H. Die Bedeutung des Leuzits für die Dentalkeramik. ZWR 1981: 44-46

-
- 32 Claus H. Werkstoffkundliche Grundlagen der Dentalkeramik. Dent Lab 1980; 28: 1743-1750
- 33 Schäfer A. Experimentelle Untersuchung über den Einfluss der Brandführung auf Wärmedehnung und Biegefestigkeit keramischer Massen für die Aufbrennkeramik. Quintessenz Zahntech 1993; 19: 825-832
- 34 Prasad A, Day GP, Tobey RG. Neues Verfahren zur Bewertung von kompatiblen Keramiklegierungen. Dental-labor 1991; 39: 1403-1411
- 35 Schwickerath H. Neue Keramiksyste me unter Dauerbeanspruchung. Quintessenz Zahntechnik 1994 (II); 20: 1495-1499
- 36 Fischer H, Marx R. Festigkeit von Dentalkeramik. ZWR 2000; 109: 240-244
- 37 Hahn R, Löst C. Konventionelle Dentalporzelane versus bruchzähe Hochleistungskeramiken. Dtsch Zahnärztl Z 1992; 47: 659-664
- 38 Pfeiffer P, Schwickerath H, Sommer MC. Nickelabgabe von Dentallegierungen nach Überhitzen der Schmelze und/oder Keramikbrand. Dtsch Zahnärztl Z 1993; 48: 369-371
- 39 Dörfler B, Fleetwood PW, Fischer J. Prüfung dentaler Edelmetall-Gusslegierungen. Die Bestimmung der metallkeramischen Verbundfestigkeit mit der Biege-Scher-Prüfung. Quintessenz Zahntech 1995; 21: 813-824
- 40 Zscherlich D, Mitzner E, Müller WD. Werkstoffkundliche Betrachtung eines neuen keramischen Reparaturmaterials. Quintessenz Zahntech 2009; 35: 302-309
- 41 VITA: Gebrauchsinformation VITA VM 13
- 42 Siebert GK. Dentallegierungen in der zahnärztlichen Prothetik. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1989

-
- 43 Liu R, Johnston WM, Holloway JA, Brantley WA, Dasgupta T. The effect of metal re-casting on porcelain-metal bonding: A force-to-failure study. J Prosthet Dent 2010; 104: 165-172
- 44 Strietzel R. Wiedervergießen von Dentallegierungen. Dental-labor 2000; 48: 58-63
- 45 Strietzel R. Edelmetalllegierungen: Der Goldstandard, und trotzdem geht es manchmal schief. Quintessenz Zahntech 2007; 33: 966-980
- 46 Strietzel R. Einfluss des Abstrahlens auf den Metall-Keramik-Verbund eine Übersicht. Quintessenz Zahntechnik 2009; 35: 970-983
- 47 Tauber M, Kappert H. Gerüstgestaltung für metallkeramische Restaurationen. Teil 1: Statik der Gerüstgestaltung. Quintessenz Zahntech 2006; 32: 172-180
- 48 Tauber M. Gerüstgestaltung für metallkeramische Restaurationen. Teil 4:Die Verbundfestigkeit von Metall und Keramik. Quintessenz Zahntech 2006 (II); 32: 1052-1061
- 49 Koinig H. Metallkeramik. Verlag Neuer Merkur GmbH, München, 2003
- 50 Brämer W, Petter HJ. Untersuchung der Blasenbildung im Metallkeramik-Verbund. Dent Lab 1990; 38: 65-66
- 51 Hopp M, Biffar R. Besonderheiten der keramischen Verblendung von Galvanostrukturen. Quintessenz Zahntech 2006; 32: 1036-1050
- 52 Lenz U, Raser G, Lenz E. Verbesserte Oberflächenqualität von Dentallegierungen und Titan. Dent Lab 2001; 49: 685-698
- 53 Breustedt A. Zahnärztliche Keramik. Verlag Volk und Gesundheit, Berlin, 1965
- 54 Claus H. Das Gefüge und Mikrogefüge der Dentalkeramik in Abhängigkeit von den Brennbedingungen. Quintessenz Zahntech 1990; 16: 1479-1495

55 Hohmann A, Hielscher W. Lehrbuch der Zahntechnik Band 3. Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin, 1987

56 Fischer H, Weinzierl P, Weber M, Marx R. Bearbeitungsinduzierte Schädigung von Dentalkeramik. Dtsch Zahnärztl Z 1999; 54: 484-488

57 Hofer H, Fischer J. Verarbeitung von Edelmetalllegierungen – Misserfolge und deren Ursachen. Quintessenz Zahntech 1997; 23: 1369-1375

58 Carl W. Qualitätsminderung der metallkeramischen Bindung durch Korrekturbrände. Dtsch Zahnärztl Z 1988; 43: 1001-1005

59 Ren XW, Zeng L, Wei ZM, Xin XZ, Wie B. Effects of multiple firings on metal-ceramic bond strength of Co-Cr alloy fabricated by selective laser melting. J Prosthet Dent (2015) pii: S0022-3913 (15) 00326-1.doi 10.1016/2015.03.023

60 Wagner R. Welche dentalen Aufbrennlegierungen bzw. -typen sind wissenschaftlich anerkannt? Quintessenz Zahntech 2009; 35: 966-969

61 Schwickerath H, Mokbel MA. Grundlagen zur Prüfung des Verbundes Metall-Keramik. Dtsch Zahnärztl Z 1983; 38: 949-952

62 Schwickerath H. Das Festigkeitsverhalten von aufbrennfähigen Keramiken. Dtsch Zahnärztl Z 1985; 40: 996-1003

63 Rösler J, Harders H, Bäker M. Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2012

64 Pang Z, Chughtai A, Sailer I, Zhang Y. A fractographic study of clinical retrieved zirconia-ceramic and metal-ceramic fixed dental prostheses. Dent Mater 2015; 31: 1198-1206

65 Steinberg PA, Schmitz K. Grundriss der Dental-Keramik. Verlag Neuer Merkur GmbH, München, 1968

66 McLean JW. Wissenschaft und Kunst der Dentalkeramik, Band II: Brückenkonstruktionen und Laborarbeiten in der Dentalkeramik. Quintessenz Bibliothek, Berlin, Chicago, Tokio, 1981

67 IVOCLAR. Bedienungsanleitung Automatisches Temperaturkontrollset (ATK 2)

68 Claus H. Test zur Prüfung des Brenngrades der Dentalkeramik. Dent Lab 1997; 45: 245-248

69 IVOCLAR. Bedienungsanleitung Programat® EP 3000

70 Klinker T, Biffar R. Einfluss von Sinterbedingungen auf die Sintergüte von Verblendkeramik. Quintessenz Zahntech 2000; 26: 1317-1330

71 Voß R, Meiners H. Fortschritte der Zahnärztlichen Prothetik und Werkstoffkunde. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1980

72 Claus H. Gefügeuntersuchungen an metallkeramischen Systemen. Dent Lab 1983; 31: 597-602

73 Schmitz K, Schulmeyer H. Bestimmung der Haftfestigkeit dentaler metallkeramischer Verbundsysteme. Dent Lab 1975; 23: 1416-1420

74 Gürtler T, Raser G, Dietz W, Welker D, Küpper H. Festigkeit und Bruchcharakteristik von 2 Titankeramiksyste men. ZWR 2005; 114: 19-27

75 Kappert HF, Riedling W, Weymann J. Eine vergleichende Studie von drei Methoden zur Untersuchung des Metall-Keramik-Verbundes bei NEM-Legierungen. Dtsch Zahnärztl Z 1985; 40: 1179-1186

76 Schneider GA, Swain MV. The Schwickerath adhesion test: A fracture mechanics analysis. Dent Mater 2015; 31: 986-991

77 Caputo AA, Dunn B, Reisbick MH. A flexural method for evaluation of metal-ceramic bond strengths. J Dent Res 1977; 56: 1501-1506

78 Auterhoff J, Lenz J. Wärmeeigenspannungen am marginalen Rand metallkeramischer Kronen mit Stufenpräparation. Dtsch Zahnärztl Z 1985; 40: 1004-1009

79 Psoch A, Stadler A, Setz JM. Bewährung von Keramikverblendungen gefräster Titanrestorationen nach zwölf Monaten Tragezeit. Dtsch Zahnärztl Z 2006; 61: 229-232

80 Reitemeyer B, Hänsel K, Kastner C, Walter MH. Prospektive Studie zur Bewährung metallkeramischer Kronen unter Praxisbedingungen: 8-Jahresergebnisse. Dtsch Zahnärztl Z 2007; 62: 104-109

81 Strub JR, Türp JC, Witkowski S, Hürzeler MB, Kern M. Curriculum Prothetik Band I. Quintessenz Verlags-GmbH, Berlin, 2005

82 Tauber M. Gerüstgestaltung für metallkeramische Restaurationen. Teil 3: Gerüstgestaltung für eine parodontale Gesundheit. Quintessenz Zahntech 2006 (I); 32: 672-680

83 Seymour K, Zou L, Samarawickrama D, Lynch E. Assessment of shoulder dimensions and angles of porcelain bonded to metal crown preparations. J Prosthet Dent 1996; 75: 406-411

84 Eichner K. Methodische und systemische Ursachen von Fehlern in der Metallkeramik. Dental-labor 2000; 68: 535-543

85 Schwickerath H. Materialien für die Aufbrennkeramik, ihre Eigenschaften und ihr Verhalten. Dtsch Zahnärztl Z 1978; 33: 837-845

86 Massironi D, Pascetta R, Romeo G. Präzision in der Metallkeramik. Quintessenz Zahntech 2009; 35: 984-1000

-
- 87 Lehmann K, Hellwig E. Einführung in die zahnärztliche Propädeutik. Urban und Fischer, München, Jena, 2002
- 88 Schwickerath H, Mosleh I. Verbundfestigkeit und Korrosionslösungen. Dtsch Zahnärztl Z 1985; 40: 1126-1128
- 89 Rinke S, Schulz-Fincke V, Schäfers F, Özmumcu A, Hüls A. Vergleichende Qualitätsbeurteilung von Einzelzahnrestorationen aus Titan und einer Edelmetall-Legierung. Dtsch Zahnärztl Z 1998; 53: 272-275
- 90 Kraft J, Stender E. Verbund palladiumfreier Au-Legierungen mit niedrigschmelzenden Dentalkeramiken. Dtsch Zahnärztl Z 1995; 50: 371-374
- 91 Schnettger A, Zylla IM, Kappert HF. Prüfung der Verbundfestigkeit metallkeramischer Systeme. Quintessenz Zahntech 2006; 32: 732-738
- 92 Schweitzer DM, Goldstein GR, Ricci JL, Silva NR, Hittelmann EL. Comparison of bond strength of a pressed ceramic fused to metal versus feldspathic porcelain fused to metal. J Prosthodont 2005; 14: 239-247 2005
- 93 Blume A, Raser G, Lenz E, Dietz W. Eine experimentelle Wertung des Titan-Keramik-Verbundes. Quintessenz Zahntech 1998 (II); 24: 1143-1149
- 94 Schwickerath H. Dauerfestigkeit von Metallkeramik. Dtsch Zahnärztl Z 1984; 39: 143-145
- 95 Biffar R, Klinker T, Mattmüller A. Longitudinale Studie zum Frakturrisiko von hydrothermalen Verblendkeramik Duceragold über mehr als 36 Monate. Dtsch Zahnärztl Z 1997; 52: 291-294
- 96 Anusavice KJ. Standardizing failure, success and survival decisions in clinical studies of ceramic and metal-ceramic fixed dental prostheses. Dent Mater 2012; 28: 102-111

- 97 Mikeli A, Boening KW, Lißke B. Ceramic defects in metal-ceramic fixed dental prostheses made from Co-Cr and Au-Pt alloys: A retrospective study. *Int J Prosthodont* 2015; 28: 487-489
- 98 Leibrock A, Degenhart M, Behr M, Rosentritt M, Handel G. In vitro study of the effect of thermo- and load-cycling on the bond strength of porcelain repair systems. *J Oral Rehabil* 1999; 26: 130-137
- 99 Kerschbaum T, Paszyna C, Klapp S, Meyer G. Verweildauer- und Risikofaktorenanalyse von festsitzendem Zahnersatz. *Dtsch Zahnärztl Z* 1991: 20-24
- 100 Zimny F. Vergleichende Untersuchung zum Einfluss der Position des Brenngutes auf Verbundfestigkeit. *Med Diss.* 2010
- 101 Böning K, Ullmann U, Wolf A, Lazarek K, Walter M. Dreijährige klinische Bewährung konventionell zementierter Einzelkronen aus Lithiumdisilikat-Keramik. *Dtsch Zahnärztl Z* 2006; 61: 604-611
- 102 Walter M, Reppel PD, Bohning K, Freesmeyer WB. Six-year-follow-up of titanium and high-gold porcelain-fused-to-metal fixed partial dentures. *J Oral Rehabil* 1999; 26: 91-96
- 103 Lövgren R, Andersson B, Carlson GE, Odman P. Prospective clinical 5-year study of ceramic-veneered titanium restorations with the Procera system. *J Prosthet Dent* 2000; 84: 514-521
- 104 Pjetursson BE, Sailer I, Makarov NA, Zwahlen M, Thoma DS. All-ceramic or metal-ceramic tooth-supported fixed dental prostheses (FDPs)? A systematic review of the survival and complication rates. Part II: Multiple-unit FDPs. *Dent Mater* 2015; 31: 624-639
- 105 Sailer I, Makarov NA, Thoma DS, Zwahlen M, Pjetursson BE. All-ceramic or metal-ceramic tooth supported fixed dental prostheses (FDPs)? A systematic review of the survival and complication rates. Part I: Single crowns SCs. *Dent Mater* 2015; 31: 603-623

-
- 106 Rinke S, Schäfer S, Lange K, Gersdorff N, Roediger M. Practice-based clinical evaluation of metal-ceramic and zirconia molar crowns: 3-year results. *J Oral Rehabil.* 2013; 40: 228-237
- 107 Smales RJ, Hawthorne WS. Long-term survival of extensive amalgams and posterior crowns. *J Dent* 1997;25: 225-227
- 108 Kerschbaum T, Seth M, Teeuwen U. Verweildauer von kunststoff- und metallkeramisch verblendeten Kronen und Brücken. *Dtsch Zahnärztl Z* 1997; 52: 404-406
- 109 BEGO: Gebrauchsanweisung Wirobond® 280 (Stand 2009-07)
- 110 Pumpe M, Einfluss der Dauer und der Temperatur von Oxidbränden auf die Verbundfestigkeit zwischen Keramik und EMF-Legierungen. *Med. Diss.* 2008
- 111 Field A, *Discovering statistics using IBM SPSS statistics.* Sage-Verlag, Los Angeles London New Delhi Singapore Washington DC, 2013
- 112 Rasch B, Friese M, Hofmann W, Naumann E, *Quantitative Methoden 2 Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2014
- 113 Klinke T, Lucas C, Quooß A, Biffar R. Jetzt wird's heiß-oder auch nicht, zur Temperaturverteilung im Keramikofen. *Quintessenz Zahntech* 2017; 43: 1225-1232
- 114 Derfert B. Vergleichende Untersuchung zur Verbundfestigkeit von verschiedenen Metall-Keramik-Kombinationen auf Basis von EM- und NEM-Legierungen in Verbindung mit herkömmlicher und niedrigschmelzender Keramik. *Med. Diss.* 2003
- 115 Kappert HF, Becker R, Pollocek W. Prüfung der Biegefestigkeit von Metall-Keramik-Verbund-Systemen bei Verwendung von verschiedenen Dentallegierungen. *Dtsch Zahnärztl Z* 1988; 43: 445-452

116 Schwarz S, Lenz J, Schwickerath H. Zur Festigkeit des metallkeramischen Verbundes bei der Biegeprüfung. Dtsch Zahnärztl Z 1988; 43: 1152-1158

117 Strietzel R. Eine neue Technologie zur Produktion von Dentallegierungen. Dent Lab 1999; 47: 1433-1438

8 Anhang

8.1 Verwendete zusätzliche Materialien und Geräte

- Schleifpapier der Körnung 60
- Wachsdraht mit einem Durchmesser von 4 mm (BEGO)
- Muffelsystem Größe 6x (HERAEUS)
- BegoSol® HE (BEGO)
- Bellavest® SH (BEGO)
- Vakuumanmischgerät Multivac® 4 (DEGUSSA)
- Rüttler KV-38 (WASSERMANN)
- Vorwärmofen Nabertherm Programm Controller S 27 (NABERTHERM)
- Gussautomat Multiherz Senior (SAED-PINEROLO)
- Aufbrennlegierung Wirobond® 280 (BEGO)
- Abstrahlmittel Korox 250 µm (BEGO)
- Umlaufstrahler D-H 22 (HARNISCH UND RIETH)
- Griffelstrahler Basic quattro (RENFERT)
- Trockendampf- und Nassdampfreiniger Triton® SLA (BEGO)
- Keramikschichthilfe (BEGO)
- Washopaker WASH OPAQUE PASTE (VITA)
- Opaker OPAQUE PASTE VITA VM® 13 (VITA)
- Dentinmasse BASE DENTINE VITA VM® 13 (VITA)
- Anmischflüssigkeit MODELLING LIQUID (VITA)
- Le Cron-Instrument, Pinzette, Arterienklemme (SCHWEICKHARD)
- Verdichtungsgerät Ceramo Sonic Condenser S.A. (SHOFU)
- Naturhaarpinsel
- Keramikbrennofen Programat® EP 3000 (IVOCLAR)
- Parallelfräsgerät 2501 BIENNE (CENDRES & METAUX S.A.)
- Digitaler Mess-Schieber (BAHAG AG)
- Universalprüfmaschine Zwick Z010® (Zwick GmbH & Co)
- Lichtmikroskop
- Forschungsmikroskop Keyence ® (BEGO)
- Statistik-Programm IBM SPSS Statistics, Version 22 (IBM Deutschland GmbH, Ehningen)

8.2 Eidesstattliche Versicherung

Ich, Kathrin Klein, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema „Vergleichende Untersuchung zum Einfluss der vertikalen Position des Brennguts in einem Brennofen auf die Verbundfestigkeit“ selbstständig und ohne Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder im Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE –www.icmje.org) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s. o.) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Betreuer/in, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o.) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.

Datum

Unterschrift

8.3 Lebenslauf

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

Danksagung

Herrn PD Dr. Roland Strietzel danke ich herzlich für die Überlassung dieses Themas und die stets freundliche und hilfsbereite Unterstützung als auch Motivation beim Entstehen dieser Arbeit.

Ebenso danke ich BEGO Bremen für die zur Verfügung gestellten Materialien.

Mein Dank gilt auch Frau Monika Poppinga für die freundliche Hilfe bei der Durchführung der SCHWICKERATH-Versuche bei BEGO Bremen.

Für die statistische Beratung danke ich Herrn Dr. Johannes Gladitz.

Der Geschäftsführung und den Mitarbeitern des Dentallabors ZLK in Berlin Schöneberg danke ich herzlich für die Nutzung der zahntechnischen Geräte sowie für die vielen kurzweiligen Stunden, die ich dort bei der Herstellung der Prüfkörper hatte.

Des Weiteren danke ich Dr. Uta Kalinke und Robert Quint für Rat und Tat bei der Formatierung dieser Arbeit und nicht zuletzt meinen Eltern Reni und Hans-Joachim Klein, meiner Schwester Marie-Fee Bleckwenn und meinem Freund Felix Schubert für die seelische und moralische Unterstützung beim Entstehen dieser Arbeit.