

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

Dissertation

**Vergleichende Untersuchungen zur Verbundfestigkeit von Metall-Keramik-
Kombinationen in Verbindung mit herkömmlicher und
niedrigschmelzender Keramik bei Verwendung unterschiedlicher
Gussysteme**

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin
Berlin

von Caroline Christine Reinsch
aus Berlin

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

2. Prof. Dr. W. B. Freesmeyer

3. Prof. Dr. med. dent. K. Böning

Datum der Promotion: 21.11.2008

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
1 Einleitung	8
2 Schrifttum	10
2.1 Legierungen in der Zahnheilkunde.....	10
2.1.1 Geschichte der Dentallegierungen	10
2.1.2 Einteilung der Dentallegierungen	11
2.2 Gießprozess	12
2.2.1 Schmelzverfahren	13
2.2.1.1 Flammenschmelzen	13
2.2.1.2 Widerstandsbeheiztes Schmelzen	13
2.2.1.3 Induktionsschmelzen.....	14
2.2.1.4 Lichtbogenschmelzen	14
2.2.2 Gussysteme	15
2.2.2.1 Statischer Guss.....	15
2.2.2.2 Schleuderguss	15
2.2.2.3 Druckguss	15
2.2.2.4 Vakuum- Druckguss.....	16
2.3 Einflüsse der Legierung auf die Verbundstärke	17
2.3.1 Zusammensetzung.....	17
2.3.2 Chemische Eigenschaften	17
2.3.3 physikalische Eigenschaften	18
2.3.4 Verarbeitung	19
2.4 Keramik	21

2.4.1	Geschichte der Dentalkeramik	21
2.4.2	Anforderungen an Dentalkeramiken.....	22
2.5	Einflüsse der Keramik auf die Verbundstärke.....	23
2.5.1	Chemische Eigenschaften	23
2.6	Metall- Keramik- Verbundsysteme.....	24
2.6.1	Mechanischer Verbund	24
2.6.2	Chemischer Verbund	24
2.6.3	Adhäsiver Verbund.....	25
2.7	Prüfmethoden für Metall- Keramik- Verbundsysteme	26
2.7.1	Druck – Scherversuch nach SCHMITZ- SCHULMEYER	26
2.7.2	Prüfmethode nach VOSS (Biegedruckversuch)	27
2.7.3	Methode nach SHELL/ NIELSEN (Zugscherversuch)	27
2.7.4	Methode nach NALLY/ BERTA (Zugversuch).....	28
2.7.5	Schlagversuch nach DIN 51 155.....	28
2.7.6	Drei-Punkt-Biegeversuch nach SCHWICKERATH.....	29
3	Material und Methode	32
3.1	Verwendete Materialien	32
3.1.1	Verwendete Legierung	32
3.1.2	Verwendete Keramiken.....	32
3.1.3	Verwendete Gussgeräte	33
3.2	Herstellung der Prüfkörper.....	33
3.2.1	Herstellung der Metallplättchen.....	33
3.2.2	Aufbrennen der Keramik	33
3.3	Versuchsdurchführung.....	34
3.3.1	Anordnung und Parameter der Biegeapparatur	34

3.3.2 Lichtmikroskopische Untersuchung.....	35
3.3.3 Vorbereitung der Prüfkörper für die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung mit EDX- Analyse.....	37
3.3.4 Rasterelektronenmikroskopuntersuchung und EDX- Analyse.....	37
4 Ergebnisse	39
4.1 Ergebnisse der Gusssysteme.....	39
4.1.1 Ergebnisse des Gusssystems Nautilus T mit den verwendeten Keramiken.....	39
4.1.2 Ergebnisse des Gusssystems Nautilus MC+ mit den verwendeten Keramiken.....	40
4.1.3 Ergebnisse des Gusssystems Fornax T mit den verwendeten Keramiken.....	41
4.1.4 Ergebnisse des Gusssystems Fornax G mit den verwendeten Keramiken.....	42
4.1.5 Ergebnisse des Gusssystems Fundor T mit den verwendeten Keramiken.....	43
4.1.6 Vergleich der Verbundfestigkeiten der verschiedenen Gusssysteme untereinander.....	45
4.1.7 Zusammenfassende Darstellung und Analyse der Gusssysteme	48
4.2 Ergebnisse der Keramiken	49
4.2.1 Ergebnisse der Keramik Vita Omega 900 mit den unterschiedlichen Gusssystemen	49
4.2.2 Ergebnisse der Keramik IPS- d.Sign mit den unterschiedlichen Gusssystemen	50
4.2.3 Ergebnisse der Keramik Heraceram mit den unterschiedlichen Gusssystemen	51
4.2.4 Ergebnisse der Keramik Vintage Halo mit den unterschiedlichen Gusssystemen	52

4.2.5 Ergebnisse der Keramik Creation mit den unterschiedlichen Gussystemen	54
4.2.6 Vergleich der Verbundfestigkeiten der verschiedenen Keramiken untereinander	55
4.2.7 Zusammenfassende Darstellung und Analyse der Keramiken.....	58
4.3 Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen und der EDX- Analyse	59
4.3.1 Ergebnisse der lichtmikroskopischen Untersuchung.....	59
4.3.1.1 Ergebnisse der Lichtmikroskopischen Untersuchung bei Fornax G mit den verwendeten Keramiken	61
4.3.1.2 Ergebnisse der lichtmikroskopischen Untersuchung bei Fornax T mit den verwendeten Keramiken	62
4.3.1.3 Ergebnisse der lichtmikroskopischen Untersuchung bei Fundor T mit den verwendeten Keramiken	63
4.3.1.4 Ergebnisse der lichtmikroskopischen Untersuchung bei Nautilus MC+ mit den verwendeten Keramiken	64
4.3.1.5 Ergebnisse der lichtmikroskopischen Untersuchung bei Nautilus T mit den verwendeten Keramiken.....	65
4.3.2 Ergebnisse der EDX-Analyse.....	66
4.3.2.1 Ergebnisse der EDX-Analyse beim Gussystem Nautilus T.....	66
4.3.2.2 Ergebnisse der EDX-Analyse beim Gussystem Nautilus MC +	67
4.3.2.3 Ergebnisse der EDX-Analyse beim Gussystem Fornax T	68
4.3.2.4 Ergebnisse der EDX-Analyse beim Gussystem Fornax G.....	70
4.3.2.5 Ergebnisse der EDX-Analyse beim Gussystem Fundor T	71
5 Diskussion.....	73
5.1 Fehlerbetrachtung	73
5.1.1 Herstellung der Prüfkörper	73

5.1.1.1 Maßhaltigkeit der Metallplättchen	73
5.1.1.2 Bearbeiten der Legierung	73
5.1.1.3 Aufbrennen der Keramiken.....	74
5.1.2 Eignung der Methode.....	75
5.1.3 Mess- und Ablesefehler	76
5.1.4 EDX-Analyse.....	78
5.2 Diskussion der Messwerte.....	79
5.3 Klinische Bedeutung.....	83
6 Zusammenfassung.....	84
7 Summary.....	86
8 Literaturverzeichnis	88
9 Anhang.....	102
9.1 Messprotokolle und Messstatistiken für alle Gussysteme mit den verwendeten Keramiken	102
9.2 Brenntabellen für die verwendeten Keramiken	115
10 Danksagung.....	117
11 Lebenslauf.....	118
Erklärung.....	119

1 Einleitung

Viele Jahre intensiver Entwicklungsarbeit waren erforderlich, bis die Aufbrennkeramik zufrieden stellende Ergebnisse lieferte, da die Ausdehnungs- und Kontraktions-Koeffizienten von Metall und Keramik aufeinander abgestimmt werden mussten [25]. Das Verfahren geriet in den 30er Jahren durch die Erfindung zahnfarbener Kunststoffe und Goldknappheit vor dem Krieg ins Hintertreffen.

Erst 1956, seit den Veröffentlichungen von SILVER, KLEIN und HOWARD sowie BRECKER in den USA, wurden die Metallkeramiksysteme wieder ins Gespräch gebracht und wissenschaftlich untersucht [25].

Mit dem Erreichen einer größeren Härte der zu verblendenden Legierungen kam der große Durchbruch 1963 bis 1965. Hierdurch ergab sich ein größerer Widerstand gegen die Kaukräfte und ein Abplatzen der aufgebrannten Keramik wurde verhindert.

Viele Autoren haben über die hohe klinische Sicherheit des Metall- Keramik-Haftverbunds geschrieben (FREESMEYER 1982 [32], KAPPERT 1980, SCHWICKERATH 1985 und VOSS 1983) [25].

Die Kobalt-Chrom-Legierungen werden zur finanziellen Entlastung der Patienten verwendet, ohne dass die Ästhetik und die mechanischen Eigenschaften der Arbeit in Frage gestellt werden [20].

Beim Vergießen von Kobalt-Chrom-Legierungen müssen die Formen höher vorgewärmt werden und haben eine größere Expansion als goldhaltige Legierungen. Wiederholtes Vergießen von Kobalt-Chrom-Legierungen führt zu Verminderung der Mundbeständigkeit und ungünstigeren mechanischen Eigenschaften anders als bei Edelmetalllegierungen [11].

Aufgrund der hohen Biokompatibilität gewann Titan immer mehr an Bedeutung. Der thermische Ausdehnungskoeffizient von Titan liegt deutlich unterhalb der üblichen Ausdehnung anderer in der Prothetik verwendeten Legierungen. Aus diesem Grund mussten neue keramische Massen entwickelt werden [74, 81,

137]. Einige Autoren übten Kritik an der klinischen Haltbarkeit des Haftverbunds zwischen Titan und Keramik (REPPEL 1992, SOMMER et al. 1991) und es wurde in Versuchen gezeigt, dass die von KAPPERT et al. 1980 geforderte Grenze von 300 N oft nicht erreicht wurde (BAUMANN 1992 und KEIL 1992) [25, 20].

Im Mund sind immer unterschiedliche Belastungsrichtungen vorhanden. Damit annähernd realistische Ergebnisse mit den Prüfkörpern erzielt werden, müssen die Prüfkörper in vitro diesen Belastungen ausgesetzt werden. Die Verbundfestigkeit wird mit dem Dreipunktbiegeversuch nach SCHWICKERATH ermittelt. Zusätzlich werden alle Proben lichtmikroskopisch untersucht und an ausgewählten Prüfkörpern wird eine rasterelektronenmikroskopische Untersuchung und eine energiedisperse Röntgenstrahl-Analyse durchgeführt.

Neben der Art der Legierung ist die zahntechnische Verarbeitung von entscheidender Bedeutung. Die handwerklichen Tätigkeiten, aber auch die apparativen Gegebenheiten spielen eine große Rolle. Der Gießprozess kann die Eigenschaften von Legierungen und damit auch eventuell die Verbundstärke zur Keramik beeinflussen.

Ziel dieser Arbeit ist es, festzustellen, ob es einen Einfluss der verschiedenen Gusssysteme auf den Haftverbund zwischen einer hochgoldhaltigen Legierung und herkömmlichen und niedrignschmelzenden Keramiken gibt.

2 Schrifttum

2.1 Legierungen in der Zahnheilkunde

„Reine Metalle können im zahnärztlichen Bereich wegen ihrer unzureichenden mechanischen Eigenschaften nur in Ausnahmefällen verwendet werden. Zu diesen Ausnahmen gehören z.B. das in besonderer Weise aufbereitet Feingold, mit dem kleine Kavitäten ausgefüllt werden (Goldhämmerfüllung, Anmerkung des Autors), oder Folien aus Gold, Platin oder Zinn“ [63].

2.1.1 Geschichte der Dentallegierungen

Im 19. Jahrhundert wurden für festsitzenden Zahnersatz ausschließlich Gold und seine Legierungen, Silber und Kupfer verwendet [72]. Mit Hilfe der Goldschmiedetechnik wurden verformte Bleche und Drähte zusammengelötet. Blattgold wurde durch Hämmern zu einer kompakten Füllung und kam somit in der Füllungstherapie zum Einsatz. Um 1900 entstand ein Wachsauerschmelz-Gießverfahren, durch das auch größere Zahnersatzarbeiten, individuell gestaltet und hergestellt werden konnten.

Aus wirtschaftlichen Gründen wurde Anfang des 20. Jahrhunderts den Legierungen Platin zulegiert. Diese platinhaltigen Legierungen waren anlaufbeständiger und hatten günstigere mechanische Eigenschaften als die bisherigen Legierungen.

1912 entwickelte die Firma Krupp aufgrund der hohen Gold- und Platinpreise einen rostfreien Stahl, den V2A Stahl.

HAUPTMEYER präsentierte 1919 das erste „Stahlgebiss“. 1926 erlangte man erste Erfahrungen mit dem Guss von rostfreiem Stahl und konnte so partiellen Zahnersatz herstellen.

Da der Stahl eine niedrige Festigkeit hatte, versuchte man diese durch Zulegieren von Metallen zu steigern. Auf diesem Weg kam es 1932 zur Einführung der Kobalt-Chrom-Gusslegierung in die Zahnheilkunde.

2.1.2 Einteilung der Dentallegierungen

Die Einteilung der Dentallegierungen kann nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen. Zum einen können sie nach ihrer Zusammensetzung (Tab. 3) und zum anderen nach ihrer Indikation unterschieden werden.

A. nach der chemischen Zusammensetzung

Die qualitative chemische Zusammensetzung ist in untenstehender Tabelle jeweils für Edelmetalllegierungen und Nichtedelmetalllegierungen aufgeführt. Die Prozentuale Zusammensetzung der Legierungen ist variabel und wird in den nachfolgenden Kapiteln genauer beschrieben.

EM-Legierungen	NEM-Legierungen
Goldlegierungen : - hochgoldhaltig (70%-95% Au) - goldreduziert (40%-69% Au) Au-Pt Au-Pd Au-Ag Au-Cu	Kobaltlegierungen: Co-Cr-Mo
Palladiumlegierungen: Pd-Au Pd-Ag Pd-Cu	Nickellegierungen: Ni-Cr-Co Ni-Fe-Cr Ni-Cr-Mo Ni-Ti
Silberlegierungen (nicht mundbeständig): Ag-Au Ag-Pd	Eisenlegierungen: Fe-Ni-Cr Fe-Cr-Ni
	Titan und Titanlegierungen
Quecksilberlegierungen: Hg-Ag-Sn Hg-Ag-Sn-Cu	

Tab. 1: chemische Zusammensetzung von Dentallegierungen

B. nach dem Verwendungszweck

a. Füllungstherapie (Gussfüllungen (Inlay, Onlay), Stiftstumpfaufbau (angussfähige Stifte), Wurzelstifte (Stumpf- Aufbauschrauben), Verankerungsstifte)

b. Kronen- und Brückenersatz (Vollkrone, Teilkronen, Teleskopkrone, verblendete Krone (Kunststoff oder Keramik), Brücken, Stege und Geschiebe)

c. Herausnehmbarer bzw. kombiniert festsitzend- herausnehmbarer Ersatz (Modellguss- Teilprothesengerüst, Basis für Totalprothesen, Attachments, Retentionshilfen)

d. Teilweise Verwendung für kieferorthopädische Drähte

[99]

2.2 Gießprozess

Metallische Gerüste werden im Allgemeinen durch das Lost-wax-Verfahren [26, 104] hergestellt. Den Gießprozess kann man in zwei Phasen unterteilen, das Aufschmelzen (Verflüssigung des Metalls) und den Guss (Überführung der Schmelze in die Muffel).

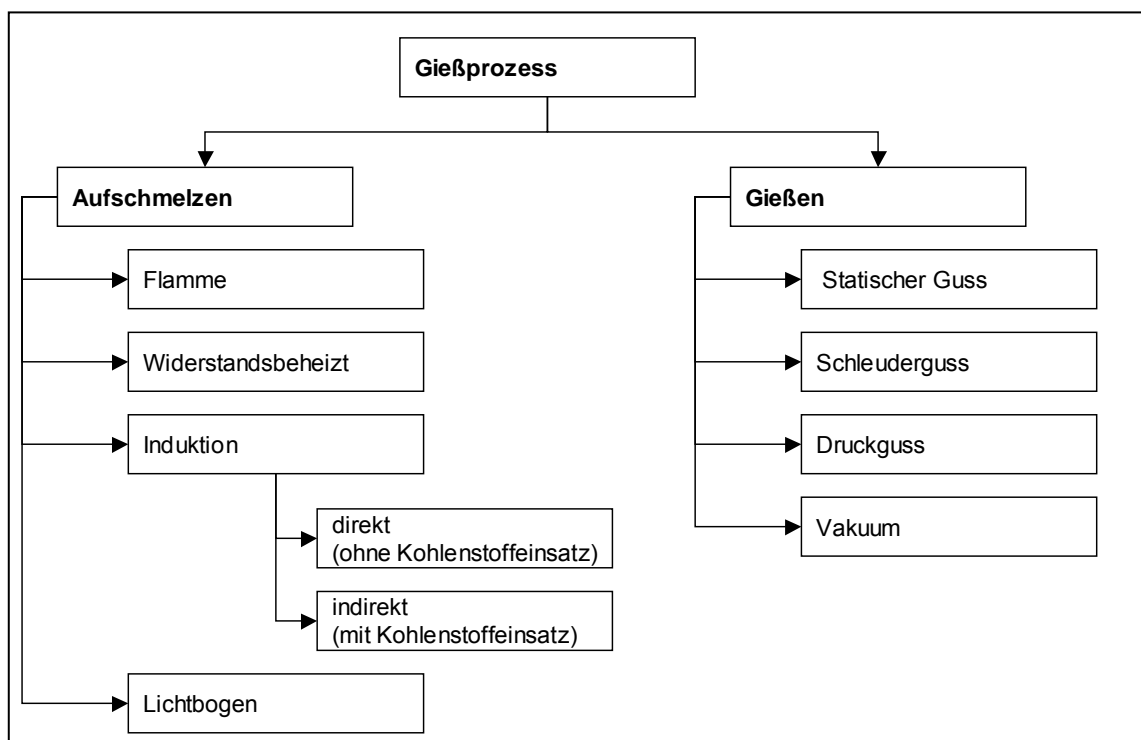


Abb. 1: Einteilung der unterschiedlichen Gussvarianten

2.2.1 Schmelzverfahren

Es gibt verschiedene Schmelzverfahren, die man in Flammenschmelzen, widerstandsbeheiztes Schmelzen, Induktionsschmelzen und Lichtbogenschmelzen unterscheidet.

2.2.1.1 Flammenschmelzen

Beim Flammenschmelzen wird das Brenngas mit Sauerstoff oder Luft gemischt und dann verbrannt. Es können verschiedene Gase verwendet werden. Die entstehende Flammentemperatur ist vom Gasgemisch abhängig. Die Flammentemperatur von Acetylen-Propangas-Sauerstoff-Gebläsen liegt mit 2000- 3000 °C um mehr als 1000 °C über dem Schmelzpunkt der EM-Legierungen. Dadurch kann die Schmelze partiell oder total überhitzt werden, was zu Schmelzverlusten von 1 % und zu Poren und Lunkern führt [52]. Die Dentallegierungen sollten in einer neutralen Flamme, die weder einen Sauerstoff-, noch einen Kohlenstoffüberschuss hat, geschmolzen werden [11]. Bei bestimmten Acetylen-Sauerstoff-Brennern wird die Flamme in 18 kleine Flammen unterteilt. So soll eine gleichmäßige, optimal gebündelte Flamme erzielt werden [138]. Die Brenneinstellung ist ein wesentlicher Faktor, um die Schmelze gegenüber dem Sauerstoff der Luft zu schützen und eine Wasserstoff- und/ oder Kohlenstoffaufnahme zu verhindern. Beides kann zur Versprödung der Legierung führen [52]. Eine unkontrollierte, ungleichmäßige Aufheizung und Überhitzung der Legierung ist möglich [10]. Im Allgemeinen wird dem Flammenschmelzen das Schmelzen mit der Induktionsheizung vorgezogen durch die sicherere Schmelzföhrung [52,10].

2.2.1.2 Widerstandsbeheiztes Schmelzen

Bei den widerstandsbeheizten Öfen werden durch Anlegen einer steuerbaren Spannung Heizwendel erhitzt und somit die Legierung erschmolzen. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Steuerung des Schmelzprozesses, wodurch unkontrollierte Überhitzung ausgeschlossen wird [52]. Der Vorteil im Vergleich zum Flammenschmelzen liegt in der schonenderen Behandlung des Gussmaterials. Durch die relativ niedrige Aufheizgeschwindigkeit ist diese Art

des indirekten Schmelzens zeitaufwendiger. Goldlegierungen sind hier im Graphittiegel durch die im Tiegel entstehenden Kohlenoxide vor Oxidation und Abbrand geschützt [52].

2.2.1.3 Induktionsschmelzen

Der elektrische Induktionsofen besitzt einen Transformator, dessen Primärwicklung von Wechselstrom durchflossen wird und ein veränderliches Magnetfeld im Tiegel erzeugt. Der hochgespannte Wechselstrom hat eine Frequenz von 10000 bis 20000 Hz. Der Wechselstrom induziert Wirbelströme [138]. Durch die in der Legierung induzierten Wirbelströme entsteht Joulesche Wärme, die die Legierung zum Schmelzen bringt [10, 52]. Die Wirbelströme führen zu einer guten Durchmischung der Schmelze [11, 138]. Den Legierungen kann die Schmelzwärme schneller zugeführt werden als mit der Widerstandsheizung. Die hohe Leistung des hochfrequenten Stromes fördert allerdings die Überhitzungsgefahr. Dadurch werden umfangreiche elektronische Anlagen zur automatischen Schmelzkontrolle benötigt. Das Induktionsschmelzen ist besonders für Nichtelegierungen und Titan geeignet [52].

2.2.1.4 Lichtbogenschmelzen

Die Wärme wird dabei durch einen zwischen zwei Elektroden überspringenden Lichtbogen erzeugt. Die eine Elektrode wird durch die Legierung gebildet, die andere durch eine wassergekühlte Wolfram-Elektrode. Zwischen den Elektroden befindet sich ein Gas, dem durch eine Elektrode Elektronen zugefügt werden. Bei genügender Spannung zwischen den beiden Elektroden erhalten die Elektronen eine so große Bewegungsenergie, dass es beim Zusammenprall mit den neutralen Gasatomen zu einer Stoßionisation kommt. Die große Menge freier Elektronen bewirkt, dass das Gas elektrischen Strom leitet. Der Spaltungsprozess der Gasatome wird durch die große Hitze des Lichtbogens beschleunigt [11]. Die Überhitzungsgefahr ist hier besonders hoch. WEBER hält diese Verfahren für NEM-Legierungen für besonders geeignet, da hierbei hohe Schmelztemperaturen möglich sind [52].

2.2.2 Gussysteme

Gussysteme können durch die unterschiedlichen Kräfte, mit der die Schmelze in die Gussform gepresst wird, eingeteilt werden. Man unterscheidet den statischen Guss, Schleuderguss, Druckguss und Vakuum-Druckguss.

2.2.2.1 Statischer Guss

Der statische Guss nutzt die Schwerkraft einer Schmelze aus. Bei diesem Gussystem wird eine größere Metallmenge benötigt, als bei den anderen Gießverfahren, um die relativ große Oberflächenspannung der Schmelze zu überwinden [11].

2.2.2.2 Schleuderguss

Dieser nutzt die bei Rotation eines Körpers entstehende Zentrifugalkraft aus. Damit kann die größte Krafteinwirkung auf eine Schmelze erreicht werden. Die Zentrifugalkraft ist proportional zu der Masse des Gusmetalls (m), zum Radius des Schleuderarmes (r) und die Anzahl der Umdrehungen pro Minute (n). $F = m \cdot 4 \pi^2 \cdot r \cdot n^2$ (N) [11]. Nach diesem Prinzip arbeiten die Handschleuder, die Sirius Schleuder und die Tiegelschleuder sowie Gussautomaten mit Induktionsschmelzanlage [138].

Der Schleuderguss ist besonders für Legierung mit hoher Dichte geeignet und fördert Formfüllung und Porenfreiheit [69].

Gussautomaten vereinigen in sich optimale Schmelz- und Gießbedingungen. Es erfolgt ein flammenloses Schmelzen, automatische Temperaturkontrolle, Schmelzen in einem Tiegel unter Schutzgas und es entstehen hohe Zentrifugalkräfte zum Ausfließen graziler Gussteile. Sie sind einfach und sicher bedienbar [129].

2.2.2.3 Druckguss

Der notwendige Druck wird hierbei durch Gase erzielt, die von allen Seiten auf die Einbettmasse und Schmelze einwirken [11].

2.2.2.4 Vakuum- Druckguss

Bei diesem Verfahren wird der Gussraum evakuiert. Die Legierung wird erschmolzen und dann nach dem Einfließen durch ihre Schwerkraft unter hohem Überdruck in die Gießform gepresst [138]. Der Vakuum-Druckguss ist von der Dichte der Legierung unabhängig. Die Druckgussverfahren können die Aufnahme von Gasen und damit die Bildung von Mikroporositäten begünstigen. Es kann durch Verwirbelung der Schmelze, durch Richtungsänderungen beim Einfließen der Schmelze, unterschiedliche Volumenverteilung im Gussobjekt und erschwerter Abzug der Luft im Gushohlraum zu Fehlstellen und Porositäten im Gussobjekt kommen [69, 121].

Die beim Schleuderguss manchmal auftretenden Kohlenstoffeinschlüsse durch mitgerissene Russpartikel sind hier ausgeschlossen, da die Schmelze sehr langsam einfließt, so dass sich der Ruß aufgrund seines niedrigen spezifischen Gewichtes auf der Oberfläche des Gusskegels absetzen kann [52]. Ein weiterer Vorteil ist die Nähe des glühenden Tiegels zur Gussmuffel, dadurch wird die gerichtete Erstarrung unterstützt [52].

CHANG und MARUYAMA wie auch TRAINI halten das Argonvakuumgussystem für genauer, benutzerfreundlicher und weniger technikempfindlich als das Schleudergussystem [52, 121].

HARASZTHY kam in seinen Untersuchungen mit dem Schleuderguss zu besseren Ergebnissen und bemängelte mangelnde Vollständigkeit der Prüfkörper, die mit dem Druckguss hergestellt werden [52].

Beim Sichten der Literatur ergaben sich unterschiede in den Bewertungen der jeweiligen Gussqualitäten. Während sich noch vor 20 Jahren die Autoren darum stritten, welches Gussystem zu bevorzugen sei, setzt sich heute immer mehr die Meinung durch, dass beide Systeme in ihren Ergebnissen gleich zu bewerten sind [10, 52].

2.3 Einflüsse der Legierung auf die Verbundstärke

2.3.1 Zusammensetzung

Um einen chemischen Verbund zwischen dem Metallgerüst und den Verblendkeramiken herzustellen, müssen oxidable Elemente zulegiert werden. Bei den NEM-Legierungen trägt diese Aufgabe hauptsächlich das Chrom. Bei den EM-Legierungen werden mangels Oxidationsbereitschaft der Hauptkomponenten Nichteledmetalle wie Gallium, Indium oder Zinn zur Bildung der für den Verbund erforderlichen Haftoxide eingesetzt [119].

2.3.2 Chemische Eigenschaften

Unter Korrosion versteht man die elektrochemische Reaktion eines Metalls mit seiner Umgebung. Notwendig ist ein Metall, welchem durch ein Oxidationsmittel Elektronen entzogen werden. Zum Ladungsausgleich und zum Abtransport der gebildeten Ionen benötigt man eine Elektrolytlösung.

Jedes Metall und jede Legierung unterliegen der Korrosion. Bei einer sehr geringen Korrosionsrate kommt es praktisch zu keinem Materialabtrag [104].

Haupttriebkraft der Korrosion ist die Sauerstoffreduktion, alle anderen Mechanismen sind quantitativ unterlegen [84]. NEM-Legierungen können noch zusätzlich der Säurekorrosion unterliegen, wenn die passivierende Schutzschicht durch Auflösen oder Verschleiß abgetragen wird [84]. Es kommt dann zur Konkurrenz zwischen Auflösung der Legierung und der Repassivierung.

Bei niedrigeren pH-Wert steigen die Korrosionsraten der Legierungen an, was durch die Förderung der Sauerstoffreduktion infolge geringerer Konzentration an Hydroxidionen zu erklären ist [84].

Bei der Nahrungsaufnahme oder in Spalten und Lunkern kann der pH-Wert im Speichel einen Wert von 2,3 annehmen, wobei es zu Korrosionsschäden am Metall-Keramik-Verbund kommen kann, das zum Versagen des Systems führen kann.

Neben den materialabhängigen Faktoren ist der Einfluss des Zahntechnikers auf die Korrosion nicht zu unterschätzen. Durch die zahntechnische Ver- und Bearbeitung können Materialeigenschaften grundlegend verändert werden [99]. Durch das Überhitzen der Legierung kann es zur Oxidation von metallischen Werkstoffen kommen und es besteht die Gefahr, dass es zu einer örtlichen Entmischung kommen kann. Besonders unedle Metalle wie Indium können sich stark anreichern. Diese entstandenen Phasen sind sehr stark korrosionsanfällig und es kann bei Kontakt mit dem Speichel zur massiven Korrosion kommen [104].

2.3.3 physikalische Eigenschaften

A. Schmelzintervall

Das Schmelzintervall der Legierung muss deutlich (mindestens 50 °C, besser mehr) oberhalb der Brenntemperatur der Verblendkeramik liegen, damit sich das Gerüst während des Aufbrennens nicht verzieht.

B. Wärmeausdehnungskoeffizient

Der WAK ist ein Maß für die dimensionale Veränderung eines Stoffes unter definierter Temperatureinwirkung [115].

Bei der Auswahl geeigneter Verblendkeramiken muss vor allem das Harmonisieren der WAK der Verbundpartner beachtet werden. Diese sollten möglichst nahe beieinander liegen. Der WAK der Keramik muss jedoch niedriger sein als der des Metalls. Bei einem höheren WAK der Keramik würde die Keramik beim Abkühlen nach den Bränden stärker schrumpfen als das Metall. Dadurch würde die Keramik unter Zugspannung gesetzt werden. Dies könnte zu Rissen und Abplatzungen der Keramik führen [20, 110]. Durch die Zugabe von Platin und Palladium ist es möglich den WAK der Legierung zu senken und so den geringeren WAK der Keramik anzugleichen.

C. Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul (E-Modul) ist ein Maß dafür, wie viel Kraft aufgebracht werden muss, um das Gerüst zu verbiegen [104, 111]. Der E-Modul sollte

möglichst hoch sein, da die Verblendkeramik auf gar keinen Fall unter Zugspannung gesetzt werden darf (siehe WAK), was bei einer Durchbiegung des Metallgerüsts unweigerlich geschehen würde [111].

2.3.4 Verarbeitung

Die Verarbeitung hat einen großen Einfluss auf den Haftverbund zwischen Gold und Keramik. Die Hauptverantwortung der Verarbeitung liegt beim Zahntechniker und ist von der Tagesform und der Erfahrung des Zahntechnikers abhängig. Nachstehend werden wichtige Arbeitsschritte und deren damit zusammenhängende mögliche Fehlerquellen aufgeführt.

A. Guss

Beim Aufschmelzen der Legierung muss man beachten, dass die Legierung nicht zu lange und zu hoch erhitzt wird. Besonders EM-Legierungen, die leicht oxidable Bestandteile wie Indium, Zink oder Zinn enthalten. Diese Elemente können beim Überhitzen oxidiert und damit der Legierung entzogen werden. Dadurch können die mechanischen Eigenschaften der Legierung und auch die Verbundfestigkeiten zu Keramiken verändert werden. Das Überhitzen kann in Extremfällen auch zu einer Ausscheidung von einzelnen Phasen führen, diese sind sehr korrosionsanfällig und können leicht in Lösung gehen. Hierdurch kann es dann zu unerwünschten biologischen Reaktionen kommen [103]. Bei zu heißen Güssen kann es auch zu heftigen Reaktionen mit der Einbettmasse kommen, so dass der Zahntechniker einen erhöhten Aufwand an Zeit und Material benötigt, um eine saubere Oberfläche zu erhalten [100, 103].

Eine zu „fette“ Flammeneinstellung beim Flammenschmelzen können zu einer ungewollten Kohlenstoffaufnahme führen [105]. Das kann beim Aufbrennen der Keramik zu einer Blasenbildung in der Keramik führen.

Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben kann ein Überhitzen beim Flammenschmelzen zu Poren und Lunkern in der Legierung führen, das sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften und auf den Haftverbund zur Keramik auswirken kann.

Bei zu kalten Güssen besteht die Gefahr, dass einzelne Areale nicht ausfließen und es kann zu Mikroporositäten und Schwachstellen im Gefüge kommen [104].

Für das Auftreten von metallischen oder nichtmetallischen Einschlüssen spielen die Kräfte, von denen die Schmelze aus dem Tiegel in den Formhohlraum befördert wird, eine entscheidende Rolle. Die Gefahr des Eintrags von Einschlüssen in das Gussobjekt ist beim Zentrifugalguss sehr hoch. Die beim Auslösen des Gießvorgangs sogleich auf die Schmelze und alle losen Partikel einwirkende Zentrifugalkraft ist die Ursache für diese Erscheinung. Dagegen ist diese Gefahr beim Vakuum-Druckguss-Verfahren deutlich gemindert, da die Schmelze aufgrund ihres Eigengewichtes in den Formhohlraum fließt und erst anschließend mit Druckluft beaufschlagt wird [10].

B. Oberflächenkonditionierung

Zur Oberflächenkonditionierung gehört das Abstrahlen des Gerüsts, der Oxidbrand und das Absäuern.

Das Abstrahlen des Gerüsts ist einer der wichtigsten Arbeitsschritte überhaupt [99]. Durch das Abstrahlen wird die Oberfläche gereinigt, die Dicke der Oxidschicht vermindert, die Mikroretentionen erhöht und die Oberflächenenergie erhöht. STRIETZEL zeigte bei einer Untersuchung zum Einfluss der Oberflächenkonditionierung auf den Haftverbund die niedrigsten Werte in den Serien bei denen die Gerüste nicht abgestrahlt wurden [104].

Bei den EM-Legierungen muss nach dem Ausarbeiten ein Oxidbrand durchgeführt werden. Das Gerüst soll mindestens 10 Minuten bei der höchsten Brenntemperatur des verwendeten Keramiksystems gebrannt werden. Durch den Oxidbrand soll eine homogene und dichte Oxidschicht auf dem Metall erzeugt werden. Bei NEM-Legierungen ist eine dicht Oxidschicht schon durch die Passivierungsschicht schon gegeben. Ein Oxidbrand ist daher nicht nötig und verschiedene Untersuchungen zeigten, dass Oxidbrände bei NEM-Legierungen tendenziell zu ungünstigeren Werten führen [96, 98, 104].

Durch das Absäuern sollen die bei den keramischen Bränden entstandenen Oxidschichten von EM-Legierungen in ihrer Dicke reduziert werden. Die

Oxidschicht wird beim Oxidbrand dicker als nötig. Die mechanische Festigkeit dieser Haftoxidschicht ist ungenügend [104]. Beim Belassen dieser dicken Oxidschicht würde beim Aufbrennen der Keramik, die Keramik gut haften, aber bei mechanischer Belastung würde es zum Versagen dieser Schicht kommen und die Keramik würde abplatzen [104].

Durch die verwendeten Säuren werden die bestehenden Oxidschichten gelöst. Man muss darauf achten, dass die Oxidschicht nicht völlig abgetragen wird. Bei vollständiger Entfernung der Oxidschicht kommt es zu keiner chemischen Bindung zwischen Metall und Keramik [104].

NEM-Legierungen sollten nicht abgesäuert werden, da es zu massiven Schädigungen der Oberflächen bis zur partiellen Auflösung kommen kann [104].

2.4 Keramik

2.4.1 Geschichte der Dentalkeramik

Die dentalen Keramikmassen entwickelten sich aus dem Porzellan. Am sächsischem Hof von BÖTTGER wurde erstmals 1709 in Europa Porzellan hergestellt. Mit dem Ziel Zahnschmelz durch Email nachzubilden, stellte 1710 GUILLEMEAU eine Masse für künstliche Zähne bestehend aus Mastix, Harz und gepulverter Koralle her. Durch Zusätze von Metalloxiden erfolgte die Farbgebung [30].

Das Frittenporzellan wurde durch Versuche von REAUMMUR und MORTIN erfunden. CHEMANT beschrieb 1783 die Herstellung von Porzellanzähnen und stellte 1803 den ersten Stifzahn mit Porzellankrone her [30].

1820 beschrieb LINDERER ein Füllungsmaterial, das aus Walross- und Flusspferdzähnen ausgesägt und in die Kavität gepresst wurde. Es kam aber zu Zersetzungen im Mund [63].

Durch die Arbeit von BRILL, LEVIN, u. a. ist 1925/1926 die Jacketkrone entstanden. Diese wurde 1932 modifiziert, indem die Porzellanschale aus

einem fabrikgefertigten Zahn ausgeschliffen wurde und der fehlende Rückenteil mit speziell dafür entwickelter keramischer Masse ergänzt wurde.

1940 entwickelte GAZKA das Vakuumbrennverfahren und brachte 9 Jahre später die ersten vakuumgebrannten Prothesenzähne auf den Markt [30].

2.4.2 Anforderungen an Dentalkeramiken

Die Dentalkeramiken müssen viele Anforderungen erfüllen, um den klinischen Ansprüchen und den verschiedenen verarbeitungstechnischen Ansprüchen zu genügen.

Anforderungsklasse	Anforderungen
Klinische Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ästhetisch befriedigendes Aussehen in Farbe und Form ▪ Farb- und Formbeständigkeit ▪ Mundbeständigkeit ▪ Reizlosigkeit ▪ Funktionstüchtigkeit ▪ Widerstandsfähigkeit gegenüber Druck- und Biegebeanspruchung ▪ Verarbeitbarkeit mit anderen Werkstoffen ▪ [30, 63, 66, 75]
Material- und verarbeitungstechnische Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hohe Dichte und Porenfreiheit ▪ Beschleif- und Polierbarkeit ▪ Modellierbarkeit ▪ ausreichendes Schmelzintervall ▪ nicht zu hoher Schmelzpunkt ▪ Temperaturwechselbeständigkeit ▪ geringe Schwindung ▪ [30, 63, 66, 75]

Tab. 2: Anforderungen an Dentalkeramiken

2.5 Einflüsse der Keramik auf die Verbundstärke

2.5.1 Chemische Eigenschaften

In der DIN EN ISO 9693 [21] liegt der festgelegte Grenzwert für den oberflächenbezogenen Materialverlust der Keramik bei $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Die zur Zeit auf dem Markt befindlichen Keramiksysteme erfüllen mit Werten zwischen $10\text{-}30 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ diese Normanforderung.

Die Verträglichkeit der Metallkeramik ist gegeben, da die in den Keramiken vorhandenen Metall- und Siliziumoxide, die eventuell durch chemische oder abrasive Prozesse aus der Keramik herausgelöst werden können, unter den Bedingungen in der Mundhöhle chemisch sehr stabil sind und auch andererseits biologisch inert sind.

Bei einer falschen Brandführung z. B. zu hohe oder zu niedrige Temperaturen bzw. Brenndauer, verursacht durch den Zahntechniker, können Keramiken eine höhere Löslichkeit zeigen [104]. Deshalb muss vom Zahntechniker die Brenntemperatur und -dauer der verschiedenen Keramiken exakt eingehalten werden.

Physikalische Eigenschaften

Wie im Kapitel 2.4.3 Beschrieben, muss der Wärmeausdehnungskoeffizient der Keramik niedriger sein als der der Legierung, aber nahe dem Wert der Legierung. Um das zu erreichen, muss der Wärmeausdehnungskoeffizient der Keramik bei der Herstellung erhöht werden. Dafür wird bei der Herstellung nach dem Fritten das Material für eine bestimmte Zeit auf einer bestimmten Temperatur gehalten. Während dieses Prozesses wird unter Zusatz von Kaliumkarbonat erreicht, dass sich Leuzit-Kristalle isolieren und in die Matrix eingehen. Diese Leuzit-Kristalle bestimmen mit ihrem hohen WAK die stärkere Wärmeausdehnung der Keramik [49].

2.6 Metall- Keramik- Verbundsysteme

Der Verbundmechanismus zwischen der Legierung und der Keramik ist noch nicht vollständig geklärt. Man unterscheidet drei Komponenten, die für den Haftverbund eine Rolle spielen, den mechanischen, chemischen und adhäsiven Verbund.

2.6.1 Mechanischer Verbund

Dieser entsteht zum einem durch das Aufschrumpfen der Keramik auf das Metallgerüst durch einen geringfügig höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten der Legierung und zum anderen durch Mikroretentionen [93]. Das Aufrauen der Metalloberfläche durch Abstrahlen oder durch grobe rotierende Instrumente ist eine Voraussetzung für die mechanische Retention der keramischen Masse an der Metalloberfläche [18, 32, 33, 48, 120]. Das Abstrahlen führt zu einer Oberflächenvergrößerung und der Entstehung von Unterschnitten im Metall [48, 112, 120, 121]. Die Oberflächenvergrößerung ist abhängig von der Körnung des Strahlmittels, der Härte der Legierung und dem Druck beim Abstrahlen [11]. Dieser Verbundsteigernde Effekt wird von mehreren Autoren bestätigt [18, 32, 48, 120]. Bei zu großer Aufrauung der Oberfläche kann es jedoch durch Spannungskonzentrationen zu Rissen in der Keramik kommen oder es entstehen Gasfallen [66, 75].

2.6.2 Chemischer Verbund

Zwischen Dentallegierungen und Keramik kommt es durch die Brenntemperaturen beim Aufbrennen der Keramik zu einer chemischen Bindung. Eine rein chemische Wechselwirkung zwischen Metall und Keramik ist gar nicht möglich, da beim Metall metallische Bindungen vorhanden sind und bei der Keramik kovalente und ein geringer Anteil ionische Bedingen. Für den chemischen Verbund sind die so genannten Haftoxide verantwortlich. Dies sind bei den EM- Legierungen vorwiegend die unedlen Bestandteile, z. B. Indium-, Gallium-, Zinn- oder Zinkoxide. Es sind Legierungsbestandteile, die in der Schmelzphase der Dentalkeramik löslich sind und dabei nicht den Kontakt zur

Grundstruktur des Metalls verlieren, da die Oxidschicht retentiv und adhäsiv mit dem Metallgerüst verbunden ist.

Bindung 1: Metall :: Metalloxid

Bindung 2: Metalloxid :: Keramik

EM-Legierungen müssen Nichtedelmetalle in geringen Mengen zulegiert werden, die dann während des Brennvorganges an die Oberfläche wandern und dort oxidieren. Die entstandenen Metalloxid- Ionen werden in der Schmelzphase von der Keramik zum Teil aufgelöst und diffundieren in diese hinein [11, 50].

Durch Austauschreaktionen entstehen Ionenbindungen zwischen Metall und Keramik [34]. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Größe der von Keramikresten bedeckten Metalloberfläche nach dem Absprengen der Aufbrennkeramik im Biegeversuch direkt mit der Anhebekraft der Oxide auf der Legierung korreliert. Eine zu dicke Oxidschicht kann allerdings als Trennschicht wirken und den Haftverbund erniedrigen [32, 48, 92].

2.6.3 Adhäsiver Verbund

Zwischenmolekulare Anziehungskräfte (van-der-Waals-Kräfte) führen zu einer Haftung zwischen Metall und Keramik [107]. Die wichtigsten Kräfte sind die Dipol- Wechselwirkungen und die Wasserstoffbrückenbindungen [104]. Dipole entstehen in Molekülen oder funktionellen Gruppen durch stark unterschiedliche Elektronegativitäten. Dabei kommt es zu einer messbaren Ladungsverschiebung, aber nicht zu einer Ladungstrennung [104]. Die Größe der Haftkraft ist abhängig von der Fähigkeit der Keramik das Metall zu benetzen [48, 76]. Der Anteil an der Gesamthaftkraft ist nur gering [9, 30, 48, 66, 75], aber zur Herstellung des Verbundes haben die zwischenmolekularen Anziehungskräfte eine überragende Funktion [104].

2.7 Prüfmethode für Metall- Keramik- Verbundsysteme

2.7.1 Druck – Scherversuch nach SCHMITZ- SCHULMEYER

Als Prüfkörper werden Metallwürfel mit einer Kantenlänge von 6mm hergestellt. Auf die Stirnfläche des Metallwürfels wird zur Hälfte Keramik aufgebrannt. Die Maße betragen 3 mm x 3mm x 6 mm. Die andere Hälfte wird mit Epoxydharz beschichtet, damit die Druckfinne mit planer Fläche einen gleichmäßigen Druck auf den gesamten Keramikquader ausübt. Der Prüfkörper wird in einem speziellen Scherwerkzeug fixiert. Die Druckfinne wird so nah wie möglich an die Kante Metall-Epoxydharz fixiert, so dass ein mögliches Biegemoment in der Keramik klein gehalten wird. Die Keramik wird dann mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit des Druckstempels bis zum vollständigen Abscheren belastet. [68, 85]

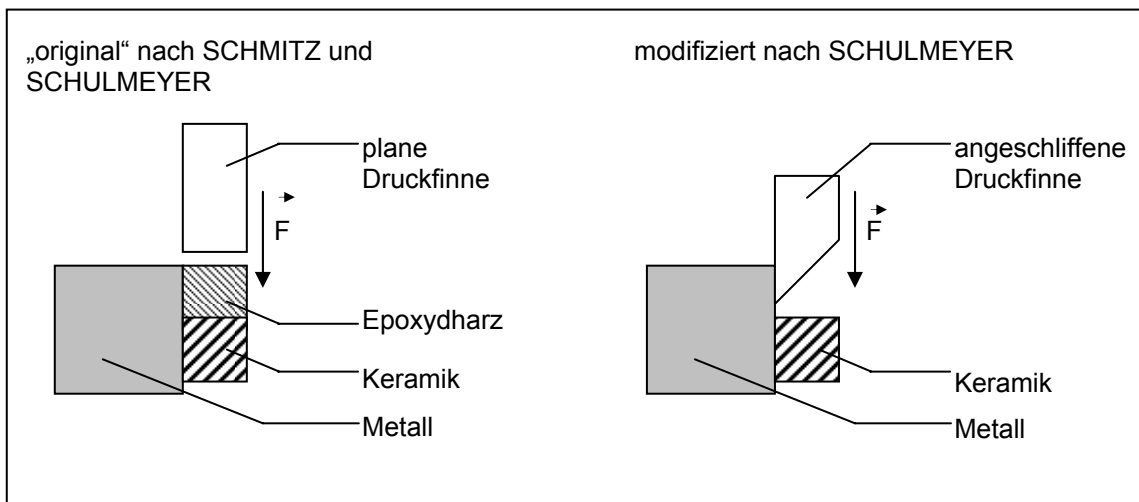


Abb. 2: Gegenüberstellung der SCHMITZ-SCHULMEYER Schertest Modifikationen [68]

Die maximale Scherspannung wird dann als Quotient aus dem Kraftwert bei der Bruchbelastung und der Haftfläche des Metall-Keramik-Verbundes ermittelt [20]. Anfang der 80er Jahre modifizierte SCHULMEYER den Test. Der Metallwürfel wurde nicht mehr mit Epoxydharz beschichtet. Zusätzlich wurde ein angeschrägter Druckstempel benutzt und der Angriffspunkt des

Druckstempels wurde so nah wie möglich an die Metall-Keramik-Kante gelegt [20, 45, 48, 68].

2.7.2 Prüfmethode nach VOSS (Biegedruckversuch)

Es werden keramisch verblendete Kronen hergestellt und auf polierte Metallstümpfe zementiert. Nach 24 Stunden werden die Proben in einer Halterung der Prüfmaschine fixiert und mit einem ebenen Druckstempel unter 45° zur Achse des Stumpfes belastet. Der Wert der maximalen Druckbelastung, die bis zum Bruch der Keramik führt, wird als Versuchsergebnis gewertet [20, 45].

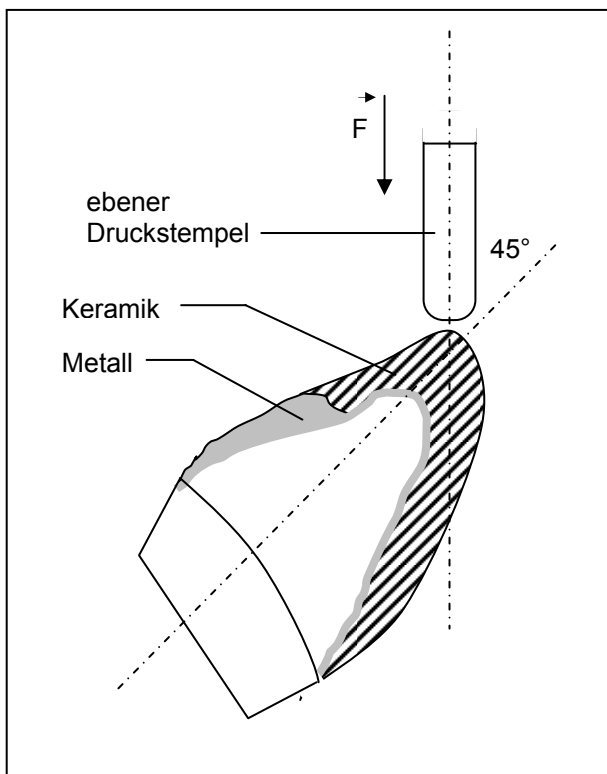


Abb. 3: Biegedruckversuch nach VOSS

2.7.3 Methode nach SHELL/ NIELSEN (Zugscherversuch)

Auf einen Metallstab mit rundem Querschnitt wird Keramik so aufgebrannt, dass die Dentinmasse keinen Kontakt zum Metall hat. Der Stab wird aus der Keramik

herausgerissen und der hierbei ermittelte Kraftwert wird als Maß für die Verbundfestigkeit herangezogen [20, 68].

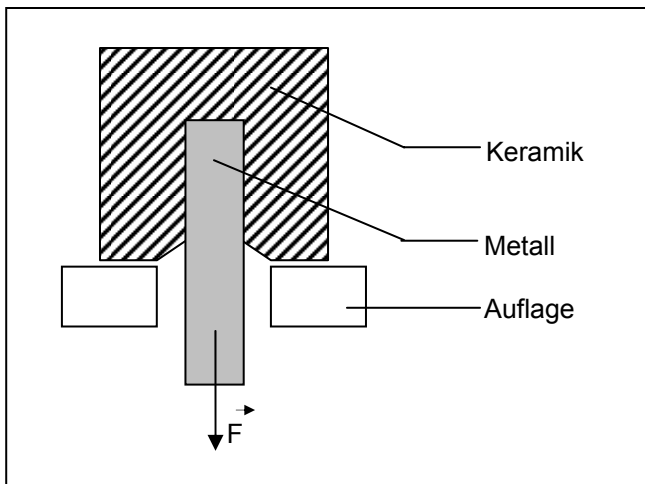


Abb. 4: Zugversuch nach SHELL/NIELSEN [68]

2.7.4 Methode nach NALLY/ BERTA (Zugversuch)

Zwei runde Metallstäbe werden an der Stirnseite mit Keramik verblendet und darüber miteinander verbunden. Danach wird die Probe einer Zugkraft ausgesetzt [20, 85].

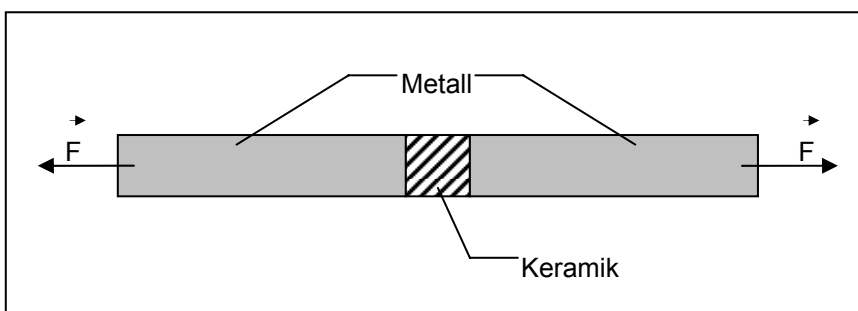


Abb.: 5 Zugversuch nach NALLY/BERTA

2.7.5 Schlagversuch nach DIN 51 155

Dieser Versuch wird seit längerer Zeit für die Prüfung von Email eingesetzt, um das Verhalten bei mechanischer Beanspruchung durch Schlag zu ermitteln. Diese Methode kann auch zur Prüfung der Metallkeramik herangezogen werden. Es werden planparallele Metallplättchen mit den Maßen 15 mm x 15

mm x 1,3 mm hergestellt und mit Keramik verblendet. Ein vorne kugelförmiger Schlagbolzen, der unter eine einstellbare Federspannung gebracht wird, wird gegen die Probenoberfläche geschossen bis die Dentalkeramik abplatzt. Die Federkraft, die eine sichtbare Beschädigung hervorruft, ist der Empfindlichkeit des emailierten Gegenstandes gegen den Schlag umgekehrt proportional [16].

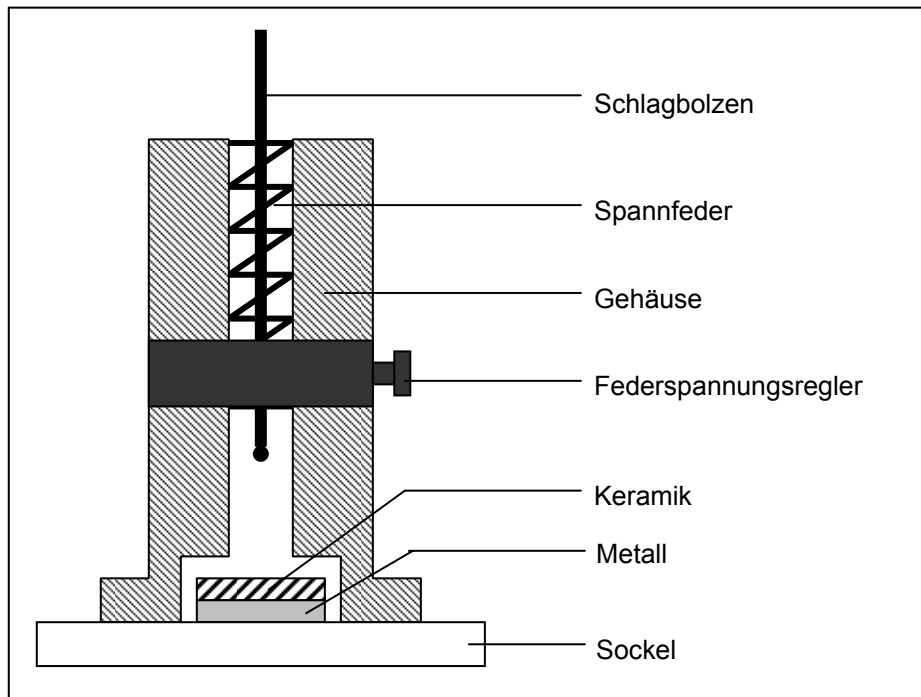


Abb. 6: Schlagversuch nach DIN 51155

2.7.6 Drei-Punkt-Biegeversuch nach SCHWICKERATH

Dieser Test ist dadurch gekennzeichnet, dass auf ein Metallplättchen mit den Massen 0,5 mm x 3 mm x 25 mm eine Keramik mit den Abmessungen 1 mm x 3 mm x 8 mm gebrannt wird. Der Prüfkörper wird auf zwei Auflagen mit der Auflagenweite von 20 mm in die Prüfmaschine gelegt. Die keramisch verblendete Seite der Probe liegt auf der gegenüberliegenden Seite des Druckstempels. Der Druckstempel hat einen Radius von 1 mm und belastet von oben das Metallplättchen.

Bei der Durchbiegung wirkt ein Teil der Kraft auf die anhaftende Keramik und der andere Teil der Kraft wirkt auf das Metall, um es zu verbiegen.

Das Metallplättchen besitzt eine gewisse Biegesteifigkeit, die vom Elastizitätsmodul und von dem Flächenträgheitsmoment anhängig ist.

Das Flächenträgheitsmoment hängt von der Dicke des Plättchens (d^3) und Breite des Plättchens ab. Für die weiteren Berechnungen ist die exakte Angabe der Abmessungen der Prüfkörper notwendig, um einen realen Vergleich der Werte zu ermöglichen.

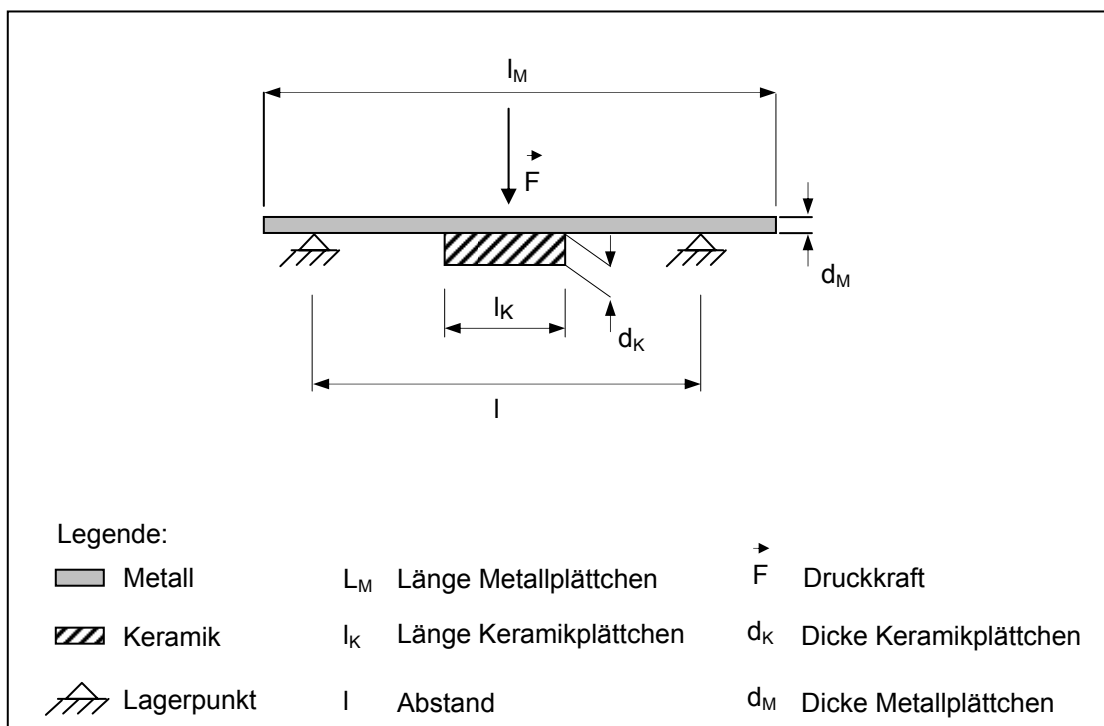


Abb. 7: Schematischer Aufbau des Dreipunktbiegeversuchs nach SCHWICKERATH [16]

Jeder Prüfkörper wird mit dem Stempel belastet, bis sich die Keramik an einem Verblendungsende von dem Metallplättchen gelöst hat oder die Keramikschicht in der Mitte der Verblendung einen Riss aufweist. Die dafür erforderliche Kraft wird registriert.

Die gemessene Kraft ist von der Qualität des Metall-Keramik-Verbundes, vom Elastizitätsmodul der Legierung, vom Elastizitätsmodul der Keramik und die Dicke der Metallplättchen abhängig. Um die Plättchendicke mit einzubeziehen, wurde ein Diagramm erstellt, das einmal den Elastizitätsmodul und andererseits die Dicke der Metallplättchen berücksichtigt. Aus diesem Diagramm (siehe

Abbildung 7) kann ein Faktor abgelesen werden. Dieser Faktor („k“) wird mit der gemessenen Kraft multipliziert. Damit errechnet sich die Verbundfestigkeit, in die auch die Faktoren individuelle Plättchendicke und der Elastizitätsmodul der Legierung eingehen.

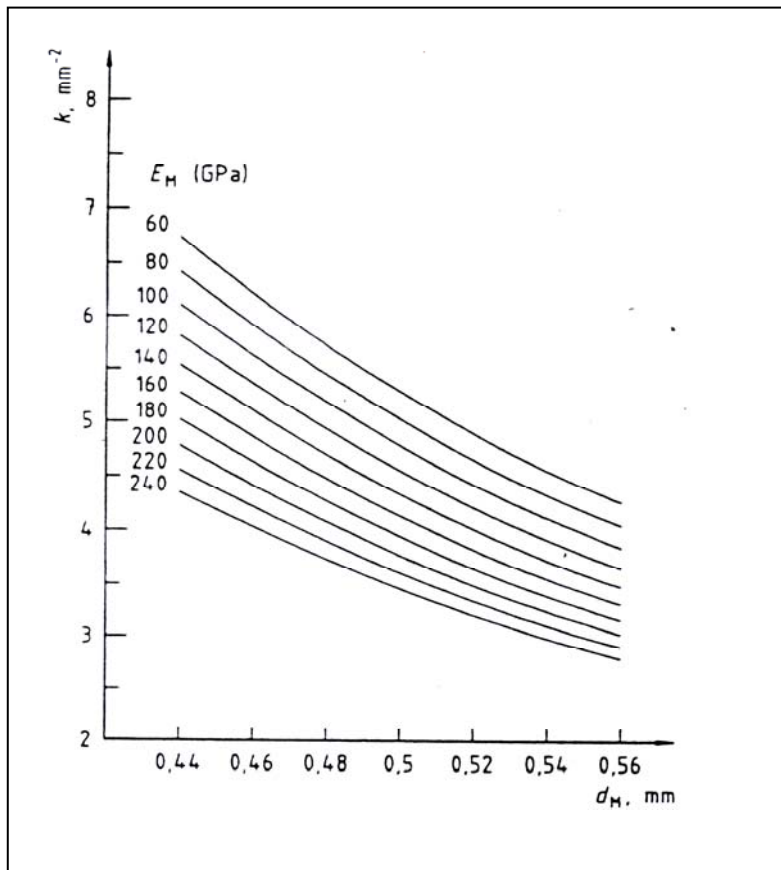


Abb. 8: Diagramm zur Bestimmung des Koeffizienten k als Funktion der Dicke des Metallgerüsts d und des E-Moduls für den metallischen Werkstoff [21]

3 Material und Methode

Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden durch mehrere Versuche erzeugt. Die dabei eingesetzten Materialien und Methoden werden in diesem Kapitel beschrieben. Nachstehendes Flussdiagramm stellt die einzelnen Schritte der Versuchsreihe dar und fasst die wesentlichen Maßnahmen und Ergebnisse zu jedem Schritt zusammen.

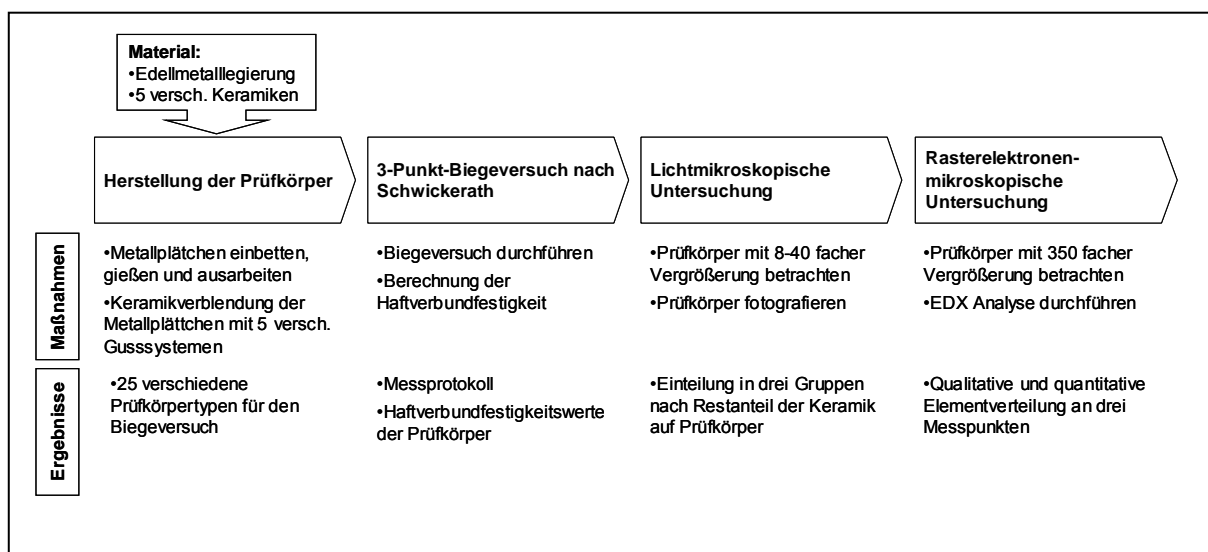


Abb. 9: Flussdiagramm Material und Methode

3.1 Verwendete Materialien

3.1.1 Verwendete Legierung

Für die Herstellung der Metallplättchen wurde Bio PontoStar, eine hochgoldhaltige Legierung mit 87 % Goldanteil, 10 % Platin, 1,5 % Zink und 0,3 % Indium der Firma BEGO benutzt.

3.1.2 Verwendete Keramiken

- Omega 900/ Fa. Vita
- Creation/ Fa. Geller
- Vintage Halo / Fa. Shofu

- IPS-d.Sign/ Fa. Ivoclar
- Heraceram / Fa. Heraeus

3.1.3 Verwendete Gussgeräte

- Vakuum-Druckgussmaschine Nautilus MC+ der Firma BEGO
- Vakuum-Druckgussgerät Nautilus T der Firma BEGO
- Hochfrequenz-Induktions-Gussschleuder Fornax G der Firma BEGO
- Hochfrequenz-Induktions-Gussschleuder Fornax T der Firma BEGO
- Tisch-Gussschleuder Fundor T der Firma BEGO

3.2 Herstellung der Prüfkörper

3.2.1 Herstellung der Metallplättchen

Für die Versuche wurden pro Metall-Keramik-System sechs Prüfkörper hergestellt. Die Plättchen wurden mit fünf verschiedenen Gussystemen gegossen. Es wurden insgesamt 150 Prüfkörper hergestellt. Die Metallplättchen sollten ein Volumen von 3 mm x 0,5 mm x 25 mm haben. Aus einer Kunststoffplatte mit der Dicke von 0,5 mm wurden mit einer Blechschere die Plättchen auf die richtigen Maße geschnitten. Jeweils sechs Kunststoffplättchen wurden mit Gusswachs zusammen angestiftet, eingebettet und mit jedem Gussystem nach Herstellerangaben gegossen. Die Proben wurden danach ausgebettet, abgestrahlt und vom Gusskanal abgetrennt. Die Oberfläche wurde laut Herstellerangaben konditioniert. Dazu wurden die Plättchen mit einer Korngröße von 110 µm und einem Druck von zwei Bar abgestrahlt und danach abgedampft. Es erfolgte ein zehn minütiger Oxidbrand bei 900 °C, dann wurden die Plättchen erneut mit 100 µm Korngröße und zwei Bar Druck abgestrahlt, in ein Aurocidbad gelegt und abschließend abgedampft.

3.2.2 Aufbrennen der Keramik

Die Metallplättchen wurden in einer Keramikschichthilfe fixiert, um dann mit einem Skalpell die Länge der Keramikfläche zu markieren. In diesen Bereich

wurde dann der Opaker dünn mit einem Pinsel aufgetragen und im Brennofen beim Washbrand gebrannt. Danach wurde der Opaker deckend aufgetragen und erneut im Brennofen gebrannt. Nach dem Grundbrand der für jede Keramik nach Herstellerangaben durchgeführt wurde, wurden die Metallplättchen in der Messlehre fixiert und die erste Keramikschiicht aufgetragen und anschließend gebrannt. Um die Schrumpfung vom ersten Brand auszugleichen, erfolgt erneut ein Keramikauftrag mit Hilfe der Messlehre. Die Plättchen werden wieder im Brennofen nach Herstellerangaben gebrannt. Die Verdichtung der Keramik, um die Schrumpfung so gering wie möglich zuhalten, erfolgt mit rüttelnden Bewegungen und Absaugen der Flüssigkeit mittels Papiertüchern. Nach dem zweiten Dentinbrand werden die Maße der Keramikblöcke noch einmal kontrolliert und gegebenenfalls mit Keramiksleifkörpern korrigiert. Das Volumen soll 8 mm x 1 mm x 3 mm betragen. Danach erfolgt der abschließende Glanzbrand.

3.3 Versuchsdurchführung

An den verblendeten Plättchen wurde der drei- Punkt- Biegeversuch nach SCHWICKERATH durchgeführt. Alle Proben wurden nach diesem Versuch unter einem Lichtmikroskop betrachtet und fotografiert. Danach wurde aus einer Versuchsserie die Probe mit dem geringsten Zugfestigkeitswert (R_m - Wert) ausgesucht und unter einem Rasterelektronenmikroskop untersucht und einer EDX-Analyse unterzogen.

3.3.1 Anordnung und Parameter der Biegeapparatur

Der Drei-Punkt-Biegeversuch nach SCHWICKERATH wird nach der DIN EN ISO-Norm 9693 durchgeführt [21].

Die Biegeapparatur wird auf den Abstand der Plättchen eingestellt. Danach werden die Prüfkörper auf die Auflagen gelegt. Die Finne des Biegestempels hat einen Radius von 1 mm und wird so in der Apparatur eingespannt, dass er das Metallplättchen zentral belastet. Bei der Biegeprüfung wird zur Messung der Kraft eine 1 kN Kraftmessdose eingesetzt. Der Versuch wird mit dem Vorschub von 1 mm/min durchgeführt. Die beschreibende Statistik befindet sich

in Tabellen im Anhang. Da die Wertescharen nicht normalverteilt sind, wird für die vergleichende Statistik mit dem U-Test nach Mann-Whitney berechnet ($p < 0,05$) [79,80].

Bei diesem Test wird die Kraft aufgezeichnet, bei der sich die Keramikschicht von einem Metallende löst. Bei einem Kraftabfall von 15 % wurde die Messung abgebrochen. Im Diagramm ist an diesem Punkt ein deutlicher Abfall der Kraft erkennbar. Die benötigte Kraft zum Ablösen der Keramik wird angezeigt und für weitere Berechnungen aufgezeichnet.

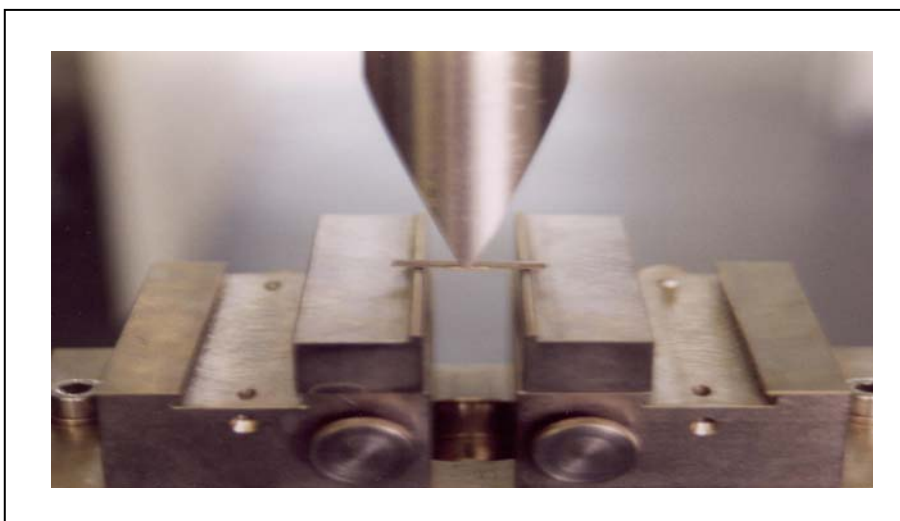


Abb. 10: Biegeapparatur

3.3.2 Lichtmikroskopische Untersuchung

Die lichtmikroskopische Untersuchung wurde an einem Stereoauflichtmikroskop der Firma Zeiss mit einer achtfachen, sechzehnfachen und vierzigfachen Vergrößerung durchgeführt. Die Proben wurden unter dem Mikroskop fotografiert. Um die Güte des Keramikhaftverbundes zu quantifizieren, sollte die Fläche bestimmt werden, die nicht mehr von Keramik bedeckt ist, nach Durchführung des Drei-Punkt-Biegeversuch nach SCHWICKERATH. Bei der lichtmikroskopischen Untersuchung zeigte sich aber, dass alle Proben auf der verblendeten Fläche noch mit einer Restschicht Keramik bedeckt waren. Die Plättchen unterschieden sich in der Menge, der noch vorhandenen Keramik. Zur Quantifizierung der Güte des Keramikhaftverbundes sollten die Proben

daher nach der Menge der Restschicht unterschieden werden. Hierzu wurde die Restschichtdicke zunächst in zwei Schichtdicken unterschieden:

- Schichtdicke Typ 1: „dicke Restschicht“, Metall scheint nicht durch die Restschicht
- Schichtdicke Typ 2: „dünne Restschicht“, Metall scheint durch die Restschicht

Dann wurden für jeden Prüfkörper die Fläche der Schichtdicke vom Typ 1 bestimmt und in Abhängigkeit der Flächengröße eine Einteilung in nachstehende Gruppen vorgenommen:

- Gruppe 1: bis $\frac{1}{3}$ der Fläche des Metallplättchens ist mit einer Restschichtdicke von Typ 1 bedeckt
- Gruppe 2: über $\frac{1}{3}$ bis $\frac{2}{3}$ der Fläche des Metallplättchens ist mit einer Restschichtdicke von Typ 1 bedeckt
- Gruppe 3: über $\frac{2}{3}$ der Fläche des Metallplättchens ist mit einer Restschichtdicke von Typ 1 bedeckt

Nachstehende Abbildungen zeigen typische Beispiele für Prüfkörper der verschiedenen Gruppen.

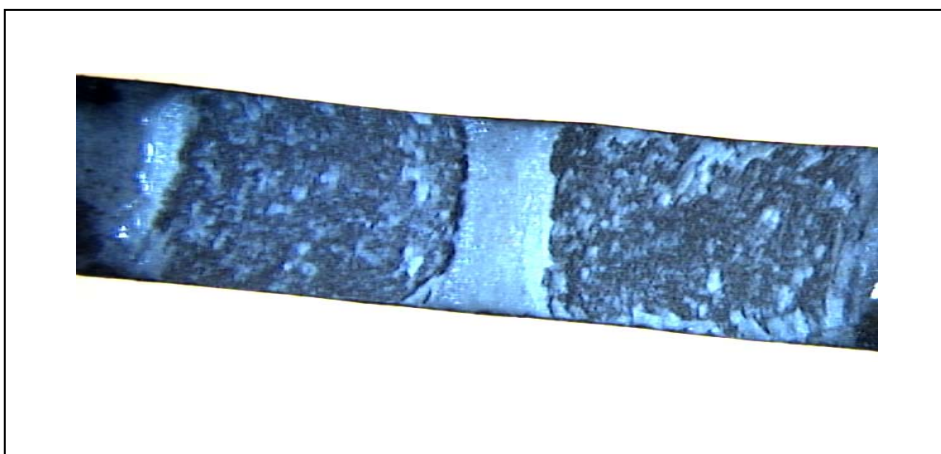


Abb. 11: Gruppe 1 der Prüfkörper

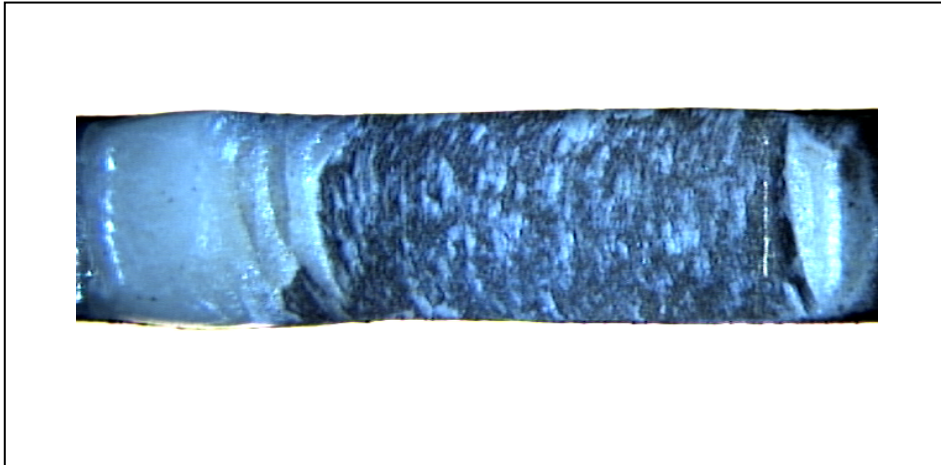


Abb. 12: Gruppe 2 der Prüfkörper

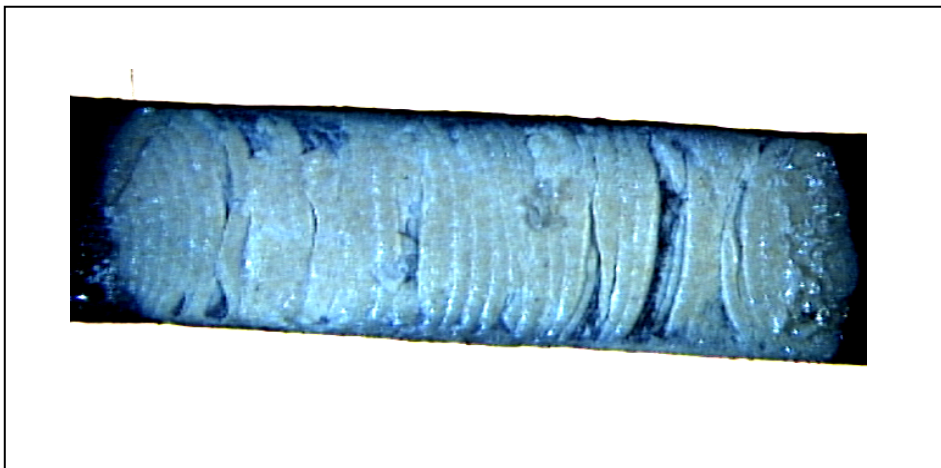


Abb. 13: Gruppe 3 der Prüfkörper

3.3.3 Vorbereitung der Prüfkörper für die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung mit EDX- Analyse

Die Proben mit dem niedrigsten R_m –Wert aus einer Versuchserie wurden in Harz eingebettet und anschließend am Poliermotor bis zum 1000 Schmirgelpapier poliert. Danach wurden die Proben im Ultraschallbad gereinigt.

3.3.4 Rasterelektronenmikroskopuntersuchung und EDX- Analyse

Bei 350facher Vergrößerung wurde im Rasterelektronenmikroskop von jeder Probe ein Foto angefertigt. Danach erfolgte bei 1000facher Vergrößerung die

EDX-Analyse, wobei an jeder Probe an drei Messpunkten die Elementverteilung qualitativ und quantitativ bestimmt wird. Die drei Messpunkte liegen in der Grenzschicht zwischen Metall und Opakerschicht, in der Opakerschicht sowie in der Keramik und sind in untenstehender Abbildung schematisch dargestellt.

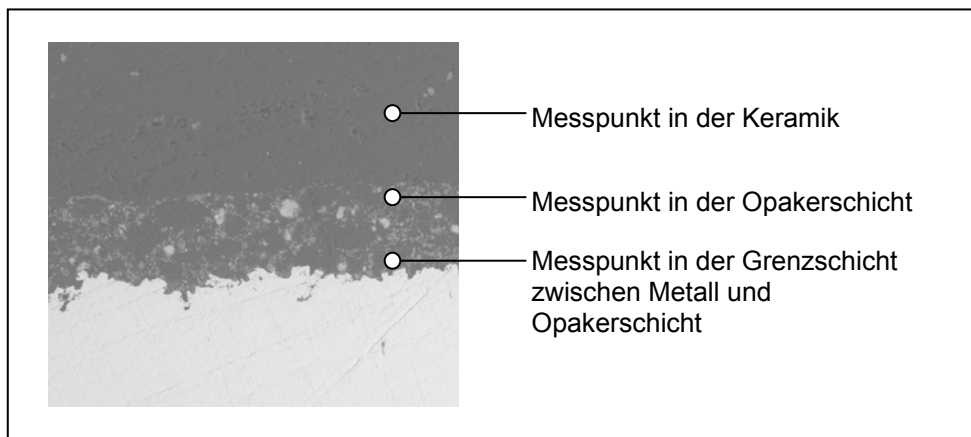


Abb. 14: Beispiel einer REM-Aufnahme bei 300facher Vergrößerung mit eingezeichneten Messpunkten

Die Ergebnisse der EDX-Analyse sind in Kapitel 4.3.2 dargestellt.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Gussysteme

4.1.1 Ergebnisse des Gussystems Nautilus T mit den verwendeten Keramiken

Die Verbundfestigkeiten liegen bei Nautilus T mit der Keramik Vita Omega 900 zwischen 70,6 MPa und 84,3 MPa. Der Mittelwert beträgt 75,6 MPa, der Medianwert 74,6 MPa, der Variationskoeffizient 6,7 % und die Standardabweichung 1,0 MPa.

Bei der Keramik Ivoclar IPS-d.Sign sind Verbundfestigkeiten zwischen 61,2 MPa und 80,4 MPa zu beobachten. Der Mittelwert liegt bei 71,0 MPa, der Medianwert bei 71,5 MPa, der Variationskoeffizient bei 9,2 % und die Standardabweichung bei 1,4 MPa.

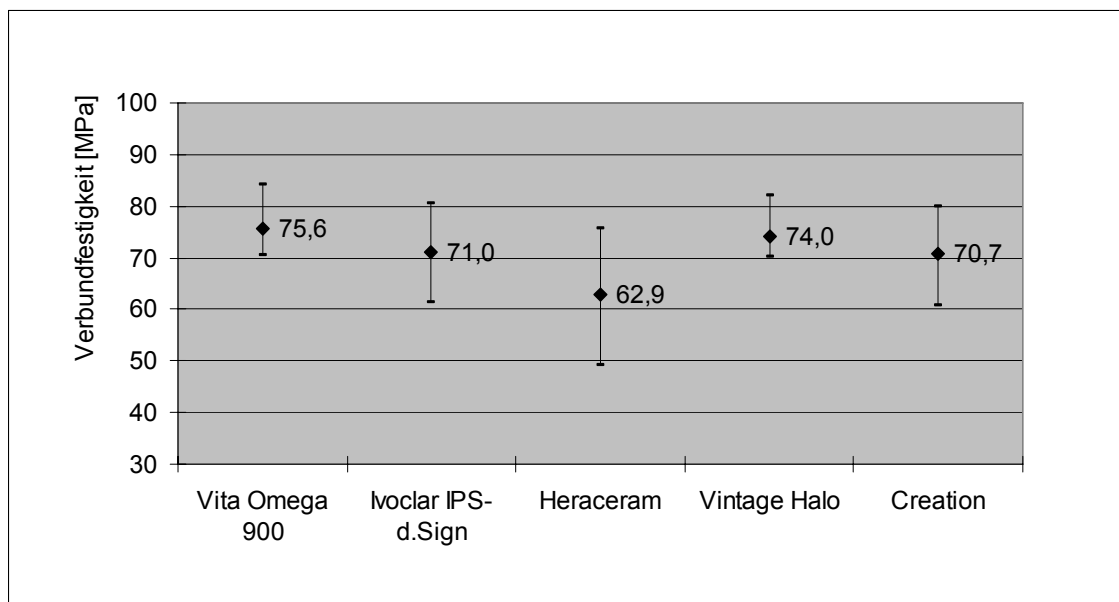


Abb. 15: Spannweite der Verbundfestigkeiten (Minima, Maxima und Mittelwerte) der verwendeten Haftverbunde mit dem Gussystem Nautilus T

Mit der Keramik Heraceram liegt der Minimalwert der Verbundfestigkeiten bei 49,2 MPa und der Maximalwert bei 75,6 MPa. Der Mittelwert beträgt 62,9 MPa, der Medianwert 61,8 MPa, der Variationskoeffizient 15,0 % und die Standardabweichung 2,0 MPa.

Die Verbundfestigkeiten bei Nautilus T und Vintage Halo liegen zwischen 70,2 MPa und 82,1 MPa. Der Mittelwert liegt bei 74,0 MPa, der Medianwert bei 72,8 MPa, der Variationskoeffizient bei 6,1 % und die Standardabweichung bei 0,9 MPa.

Bei der Keramik Creation betragen die Verbundfestigkeiten 60,9 MPa bis 80 MPa. Der Mittelwert beträgt 70,7 MPa, der Medianwert 70,3 MPa, der Variationskoeffizient 8,9 % und die Standardabweichung 1,3 MPa.

4.1.2 Ergebnisse des Gussystems Nautilus MC+ mit den verwendeten Keramiken

Die Verbundfestigkeiten bei Nautilus MC+ und der Keramik Vita Omega 900 sind zwischen 58,3 MPa und 81,8 MPa. Der Mittelwert ist 68,9 MPa, der Medianwert 69,1 MPa, der Variationskoeffizient 12,1 % und die Standardabweichung 1,7 MPa.

Bei der Keramik Ivoclar IPS-d.Sign liegen die Werte für die Verbundfestigkeiten zwischen 66,7 MPa und 80,3 MPa. Der Mittelwert liegt bei 73,9 MPa, der Medianwert bei 73,9 MPa, der Variationskoeffizient bei 8,0 % und die Standardabweichung bei 1,2 MPa.

Mit der Keramik Heraceram beträgt das Minimum 57,8 MPa und das Maximum 64,1 MPa. Der Mittelwert beträgt 61,1 MPa, der Medianwert 61,1 MPa, der Variationskoeffizient 4,6 % und die Standardabweichung 0,6 MPa.

Die Verbundfestigkeiten bei der Keramik Vintage Halo sind zwischen 63,8 MPa und 71,2 MPa. Der Mittelwert ist 66,0 MPa, der Medianwert 66,4 MPa, der Variationskoeffizient 6,8 % und die Standardabweichung 0,9 MPa.

Bei der Keramik Creation liegen die Verbundfestigkeiten zwischen 59,2 MPa und 78,7 MPa. Der Mittelwert liegt bei 70,4 MPa, der Medianwert bei 70,6 , der Variationskoeffizient bei 9,4 % und die Standardabweichung bei 1,4 MPa.

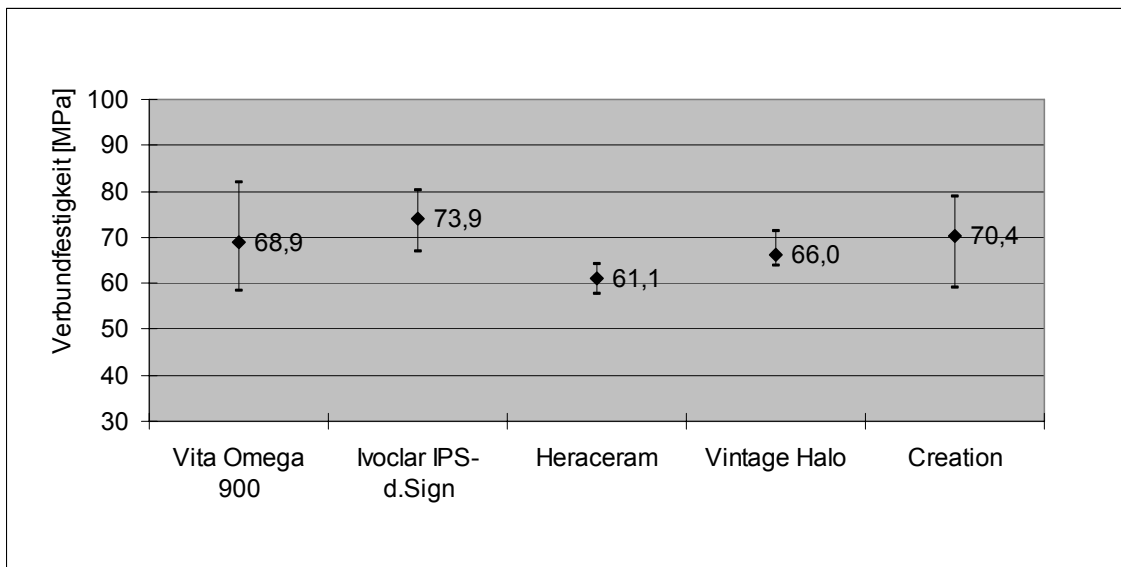


Abb. 16: Spannweite der Verbundfestigkeiten (Minima, Maxima und Mittelwerte) der verwendeten Haftverbunde mit dem Gussystem Nautilus MC+

4.1.3 Ergebnisse des Gussystems Fornax T mit den verwendeten Keramiken

Die Verbundfestigkeiten liegen bei Fornax T mit der Keramik Vita Omega 900 zwischen 60,5 MPa und 83,1 MPa. Der Mittelwert beträgt 74,5 MPa, der Medianwert 77,3 MPa, der Variationskoeffizient 11,6 % und die Standardabweichung 1,8 MPa.

Bei der Keramik Ivoclar IPS- d.Sign sind die Verbundfestigkeiten zwischen 50,2 MPa und 78,2 MPa. Der Mittelwert ist bei 66,6 MPa, der Medianwert bei 68,8 MPa, der Variationskoeffizient bei 13,9 % und die Standardabweichung bei 1,9 MPa.

Mit der Keramik Heraceram liegt der Minimalwert der Verbundfestigkeiten bei 61,9 MPa und der Maximalwert bei 66,9 MPa. Der Mittelwert beträgt 64,5 MPa, der Medianwert 64,8 MPa, der Variationskoeffizient 3,2 % und die Standardabweichung 0,4 MPa.

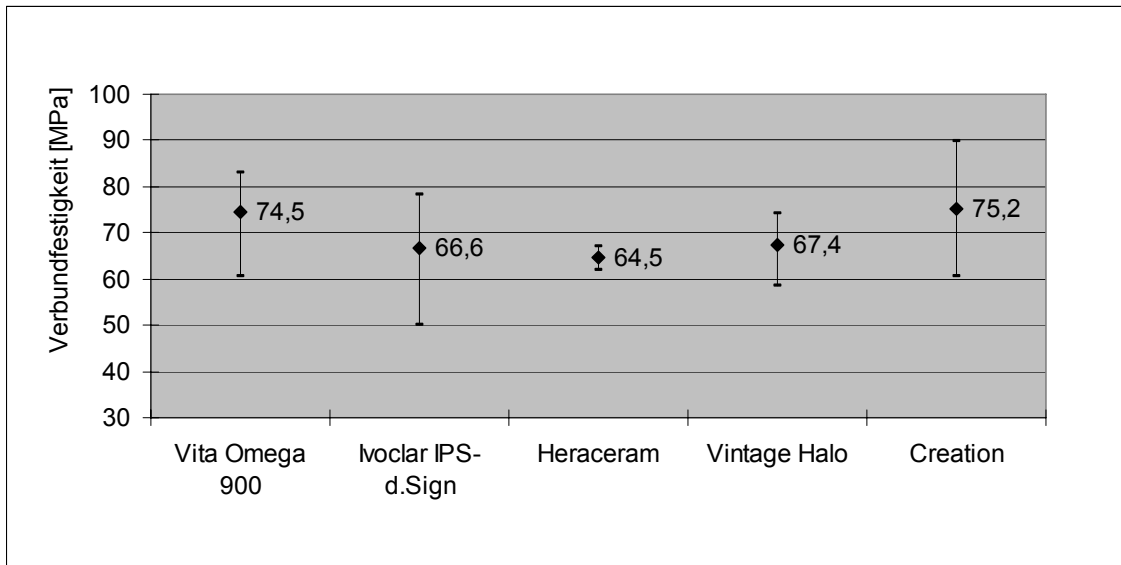


Abb. 17: Spannweite der Verbundfestigkeiten (Minima, Maxima und Mittelwerte) der verwendeten Haftverbunde mit dem Gussystem Fornax T

Die Verbundfestigkeiten bei Fornax T und Vintage Halo liegen zwischen 58,4 MPa und 74,2 MPa. Der Mittelwert liegt bei 67,4 MPa, der Medianwert bei 69,5 MPa, der Variationskoeffizient bei 8,5 % und die Standardabweichung bei 1,2 MPa.

Bei der Keramik Creation betragen die Verbundfestigkeiten 60,7 MPa bis 89,8 MPa. Der Mittelwert beträgt 75,2 MPa, der Medianwert 78,0 MPa, der Variationskoeffizient 15,8 % und die Standardabweichung 2,5 MPa.

4.1.4 Ergebnisse des Gussystems Fornax G mit den verwendeten Keramiken

Die Verbundfestigkeiten bei Fornax G und der Keramik Vita Omega 900 sind zwischen 55,7 MPa und 75,2 MPa. Der Mittelwert ist 62,0 MPa, der Medianwert 59,2 MPa, der Variationskoeffizient 11,6 % und die Standardabweichung 1,5MPa.

Bei der Keramik Ivoclar IPS-d.Sign liegen die Werte für die Verbundfestigkeiten zwischen 54,0 MPa und 71,4 MPa. Der Mittelwert liegt bei 62,2 MPa, der

Medianwert bei 60,6 MPa, der Variationskoeffizient bei 11,9 % und die Standardabweichung bei 1,5 MPa.

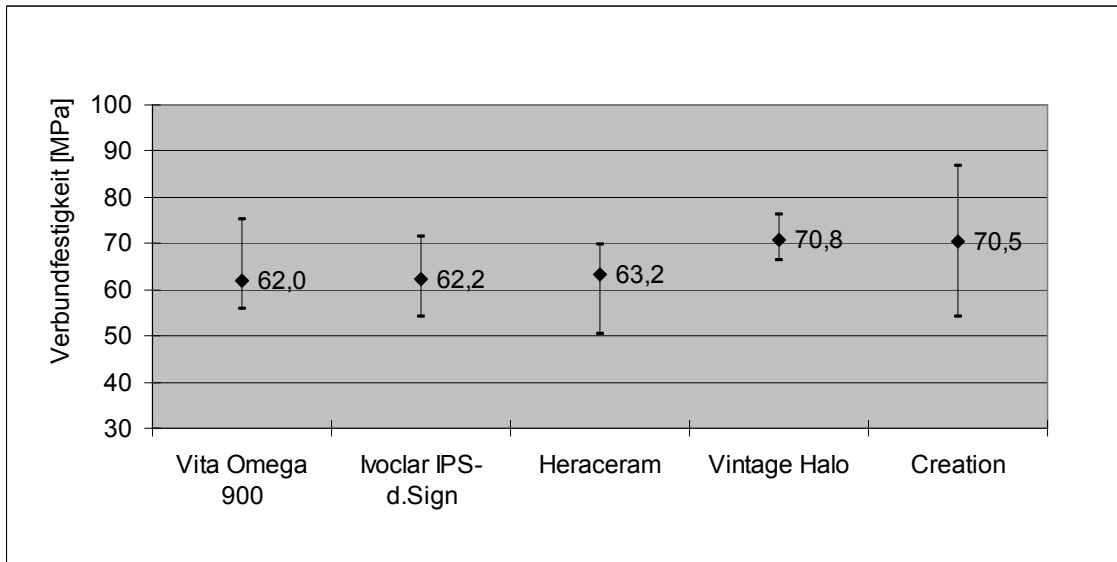


Abb. 18: Spannweite der Verbundfestigkeiten (Minima, Maxima und Mittelwerte) der verwendeten Haftverbunde mit dem Gussystem Fornax G

Mit der Keramik Heraceram beträgt das Minimum 50,4 MPa und das Maximum 69,8 MPa. Der Mittelwert beträgt 63,2 MPa, der Medianwert 65,2 MPa, der Variationskoeffizient 12,2 % und die Standardabweichung 1,6 MPa.

Die Verbundfestigkeiten bei der Keramik Vintage Halo sind zwischen 66,3 MPa und 76,1 MPa. Der Mittelwert ist 70,8 MPa, der Medianwert 70,5 MPa, der Variationskoeffizient 4,9 % und die Standardabweichung 0,7 MPa.

Bei der Keramik Creation liegen die Verbundfestigkeiten zwischen 54,3 MPa und 86,8 MPa. Der Mittelwert liegt bei 65,1 MPa, der Medianwert bei 66,3 , der Variationskoeffizient bei 20,7 % und die Standardabweichung bei 2,8 MPa.

4.1.5 Ergebnisse des Gussystems Fundor T mit den verwendeten Keramiken

Die Verbundfestigkeiten liegen bei Fundor T mit der Keramik Vita Omega 900 zwischen 73,3 MPa und 94,2 MPa. Der Mittelwert beträgt 82,1 MPa, der

Medianwert 80,1 der Variationskoeffizient 111,0 % und die Standardabweichung 1,9 MPa.

Bei der Keramik Ivoclar IPS- d.Sign sind die Verbundfestigkeiten zwischen 44,2 MPa und 69,5 MPa. Der Mittelwert ist bei 61,3 MPa, der Medianwert bei 63,1 MPa, der Variationskoeffizient bei 14,5 % und die Standardabweichung bei 1,8 MPa

Mit der Keramik Heraceram ist der Minimalwert der Verbundfestigkeiten bei 59,2 MPa und der Maximalwert bei 81,8 MPa. Der Mittelwert beträgt 66,2 MPa, der Medianwert 61,9 MPa, der Variationskoeffizient 13,7 % und die Standardabweichung 1,9 MPa.

Die Verbundfestigkeiten bei Fundor T und Vintage Halo liegen zwischen 67,4 MPa und 77,4 MPa. Der Mittelwert liegt bei 72,5 MPa, der Medianwert bei 72,6 MPa, der Variationskoeffizient bei 6,0 % und die Standardabweichung bei 0,9 MPa.

Bei der Keramik Creation betragen die Verbundfestigkeiten 60,0 MPa bis 92,3 MPa. Der Mittelwert beträgt 76,1 MPa, der Medianwert 75,5 MPa, der Variationskoeffizient 14,2 % und die Standardabweichung 2,2 MPa.

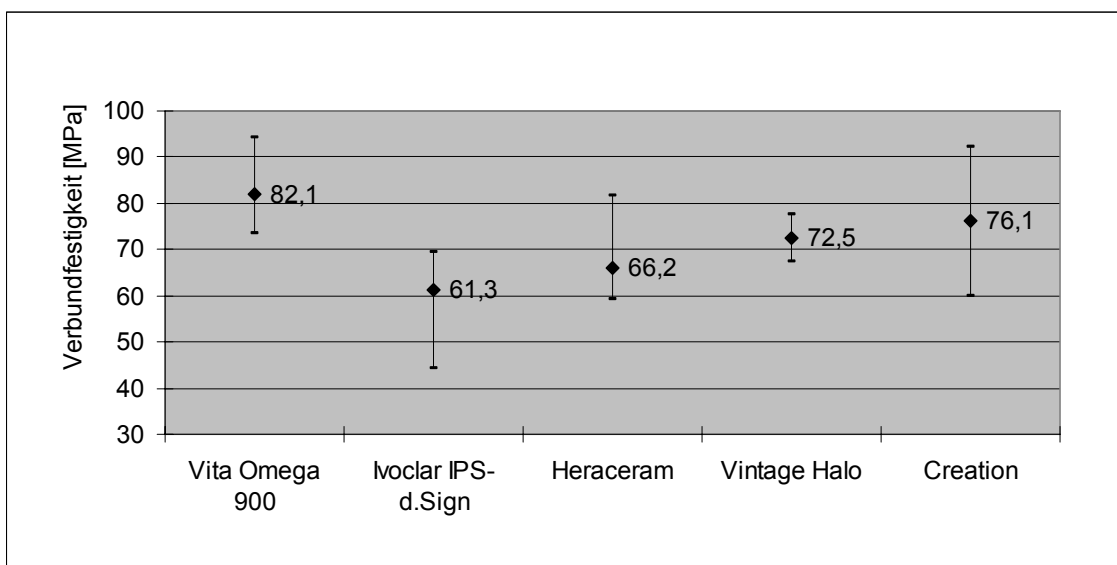


Abb. 19: Spannweite der Verbundfestigkeiten (Minima, Maxima und Mittelwerte) der verwendeten Haftverbunde mit dem Gussystem Fundor T

4.1.6 Vergleich der Verbundfestigkeiten der verschiedenen Gusssysteme untereinander

In den nachfolgenden Tabellen werden die signifikanten Unterschiede der Verbundfestigkeiten der verschiedenen Gusssysteme mit jeweils einer Keramik dargestellt. In den Tabellen wird signifikant wird mit „sign.“ Und nicht signifikant mit „n. s.“ abgekürzt.

A. Vita Omega 900

	Nautilus T			
Nautilus MC+	n. s.	Nautilus MC+		
Fornax T	n. s.	n. s.	Fornax T	
Fornax G	sign.	n. s.	sign.	Fornax G
Fundor T	n. s.	sign.	n. s.	sign.

Tab. 3: Signifikanzprüfung der Verbundfestigkeiten der Keramik Vita Omega 900 mit den verschiedenen Gusssystemen

Bei der Keramik Vita Omega 900 treten höhere Werte bei den Gusssystemen Nautilus T und Fundor T auf und niedrigere Werte bei Fornax G. Es ist ein signifikanter Unterschied zwischen Fornax G und Nautilus T, Fornax G und Fornax T, Fornax G und Fundor T und Nautilus MC+ und Fundor T festzustellen.

B. Ivoclar IPS-d.Sign

	Nautilus T			
Nautilus MC+	n. s.	Nautilus MC+		
Fornax T	n. s.	n. s.	Fornax T	
Fornax G	n. s.	sign.	n. s.	Fornax G
Fundor T	n. s.	sign.	n. s.	n. s.

Tab. 4: Signifikanzprüfung der Verbundfestigkeiten der Keramik Ivoclar IPS-d.Sign mit den verschiedenen Gussystemen

Bei der Keramik Ivoclar IPS-d.Sign sind bei den Gussystemen Fornax G und Fundor T niedrigere Werte zu finden. Nautilus MC+ hat im Vergleich zu den anderen Gussystemen einen höheren Minimalwert. Es treten signifikante Unterschiede zwischen Nautilus MC+ und Fornax G und Nautilus MC + und Fundor T auf. Ansonsten konnte man keine signifikanten Unterschiede ausmachen.

C. Heraceram/ Heraeus

	Nautilus T			
Nautilus MC+	n. s.	Nautilus MC+		
Fornax T	n. s.	n. s.	Fornax T	
Fornax G	n. s.	n. s.	n. s.	Fornax G
Fundor T	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.

Tab. 5: Signifikanzprüfung der Verbundfestigkeit der Keramik Heraceram mit den verschiedenen Gussystemen

Bei der Keramik Heraceram traten beim Vergleich der verschiedenen Gussystem keine signifikanten Unterschiede auf.

D. Vintage Halo/Shofu

	Nautilus T			
Nautilus MC+	sign.	Nautilus MC+		
Fornax T	sign.	n. s.	Fornax T	
Fornax G	n. s.	n. s.	n. s.	Fornax G
Fundor T	n. s.	sign.	n. s.	n. s.

Tab. 6: Signifikanzprüfung der Verbundfestigkeiten der Keramik Vintage Halo mit den verschiedenen Gussystemen

Bei der Keramik Vintage Halo sind bei Nautilus T höhere Werte für die Verbundfestigkeit vorhanden. Es bestehen signifikante Unterschiede zwischen Nautilus T und Nautilus MC+, Nautilus T und Fornax T und zwischen Nautilus MC+ und Fundor T.

E. Creation/ Fa Geller

	Nautilus T			
Nautilus MC+	n. s.	Nautilus MC+		
Fornax T	n. s.	n. s.	Fornax T	
Fornax G	n. s.	n. s.	n. s.	Fornax G
Fundor T	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.

Tab. 7: Signifikanzprüfung der Verbundfestigkeiten der Keramik Creation mit den verschiedenen Gussystemen

Bei der Keramik Creation gibt es keinen signifikanten Unterschied zwischen den verschiedenen Gussystemen.

4.1.7 Zusammenfassende Darstellung und Analyse der Gussysteme

Insgesamt wurden 9 signifikante Unterschiede zwischen den Gussystemen festgestellt. Keines der Gussysteme zeigte dabei auffällig viele signifikante Unterschiede zu anderen Gussystemen. Die Kombination Nautilus MC+ und Fundor T trat mit drei signifikanten Unterschieden am häufigsten auf. Es ergab sich jedoch keine eindeutige Überlegenheit eines Gussystems bezüglich der Verbundfestigkeit. So entstanden die signifikanten Unterschiede in diesen drei Fällen zweimal durch vergleichsweise höhere Werte für die Verbundfestigkeit von Fundor T und einmal durch vergleichsweise höhere Werte von Nautilus MC+. Die Kombination wurde daher keiner weiteren Analyse unterzogen. Alle anderen Kombinationen traten nur einmal auf.

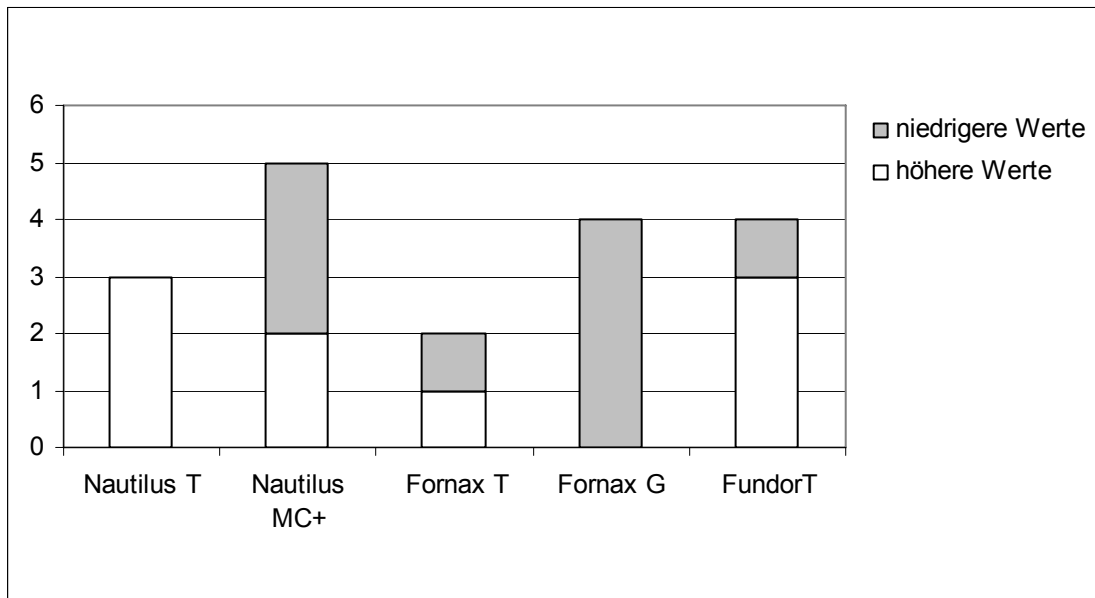


Abb. 20: Aufteilung der Signifikanzunterschiede zwischen den Gussystemen in niedrigere und höhere Verbundfestigkeiten

Die Abbildung 20 zeigt die Aufteilung der Signifikanzunterschiede in vergleichsweise höhere und niedrigere Werte je Gussystem. Auffällig zeigten sich hier Nautilus T und Fornax G. Bei Nautilus T kamen alle drei signifikanten

Unterschiede durch vergleichsweise höhere Verbundfestigkeiten zustande. Beim Gussystem Fornax G dagegen sind alle vier signifikante Unterschiede durch vergleichsweise geringere Verbundfestigkeitswerte zu erklären. Bei Nautilus MC+, Fornax T und Fundor T kamen sowohl durch höhere als auch durch niedrigere Werte signifikante Unterschiede zu dem im Vergleich stehenden Gussystemen zustande.

4.2 Ergebnisse der Keramiken

4.2.1 Ergebnisse der Keramik Vita Omega 900 mit den unterschiedlichen Gussystemen

Die Verbundfestigkeiten bei Vita Omega 900 und dem Gussystem Nautilus T sind zwischen 70,6 MPa und 84,3 MPa. Der Mittelwert ist 75,6 MPa, der Medianwert 74,6 MPa, der Variationskoeffizient 6,7 % und die Standardabweichung 1,0 MPa.

Bei dem Gussystem Nautilus MC+ liegen die Werte für die Verbundfestigkeiten zwischen 58,3 MPa und 81,8 MPa. Der Mittelwert liegt bei 68,9 MPa, der Medianwert bei 69,1 MPa, der Variationskoeffizient bei 12,1 % und die Standardabweichung bei 1,7 MPa.

Mit dem Gussystem Fornax T beträgt das Minimum 60,5 MPa und das Maximum 83,1 MPa. Der Mittelwert beträgt 74,5 MPa, der Medianwert 77,3 MPa, der Variationskoeffizient 11,6 % und die Standardabweichung 1,8 MPa.

Die Verbundfestigkeiten bei dem Gussystem Fornax G sind zwischen 55,7 MPa und 75,2 MPa. Der Mittelwert ist 62,0 MPa, der Medianwert 59,2 MPa, der Variationskoeffizient 11,6 % und die Standardabweichung 1,5 MPa.

Bei dem Gussystem Fundor T liegen die Verbundfestigkeiten zwischen 73,3 MPa und 97,2 MPa. Der Mittelwert liegt bei 82,1 MPa, der Medianwert bei 80,1 MPa, der Variationskoeffizient bei 11,0 % und die Standardabweichung bei 1,9 MPa.

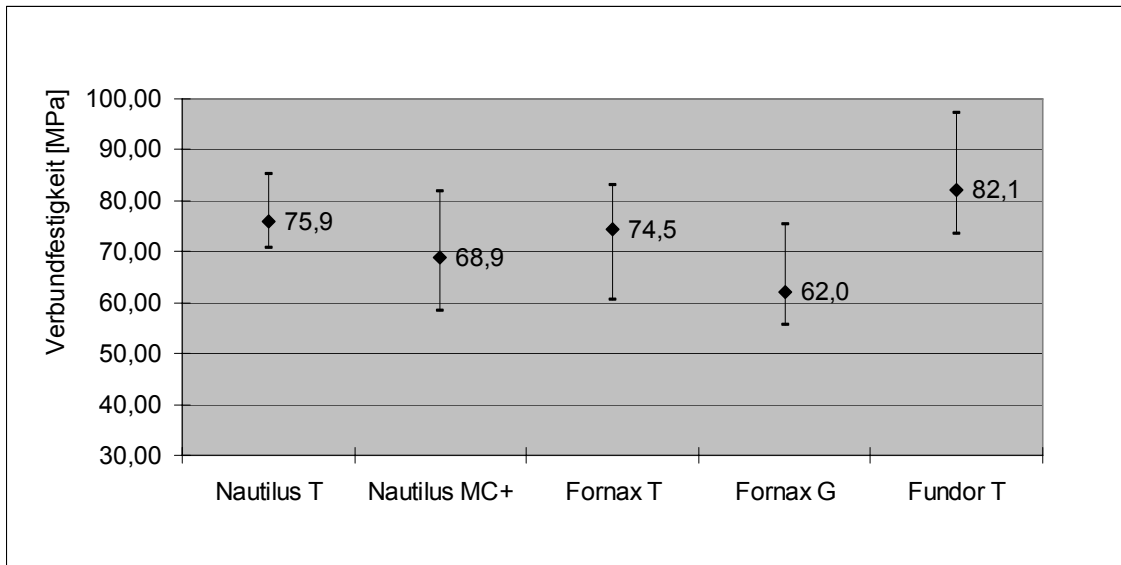


Abb. 21: Spannweite der Verbundfestigkeiten (Minima, Maxima und Mittelwerte) der verwendeten Gussystem mit der Keramik Vita Omega 900 im Haftverbund

4.2.2 Ergebnisse der Keramik IPS- d.Sign mit den unterschiedlichen Gussystemen

Die Verbundfestigkeiten liegen bei Nautilus T zwischen 61,2 MPa und 80,4 MPa. Der Mittelwert beträgt 71,0 MPa, der Medianwert 71,5 MPa der Variationskoeffizient 9,2 % und die Standardabweichung 1,4 MPa.

Bei dem Gussystem Nautilus MC+ sind die Verbundfestigkeiten zwischen 66,7 MPa und 80,3 MPa. Der Mittelwert ist bei 73,9 MPa, der Medianwert bei 73,9 MPa, der Variationskoeffizient bei 8,0 % und die Standardabweichung bei 1,2 MPa

Mit dem Gussystem Fornax T wist der Minimalwert der Verbundfestigkeiten bei 50,2 MPa und der Maximalwert bei 78,2 MPa. Der Mittelwert beträgt 66,6 MPa, der Medianwert 68,8 MPa, der Variationskoeffizient 13,9 % und die Standardabweichung 1,9 MPa.

Die Verbundfestigkeiten bei Fornax G liegen zwischen 54,0 MPa und 71,4 MPa. Der Mittelwert liegt bei 62,2 MPa, der Medianwert bei 60,6 MPa, der Variationskoeffizient bei 11,9 % und die Standardabweichung bei 1,5 MPa.

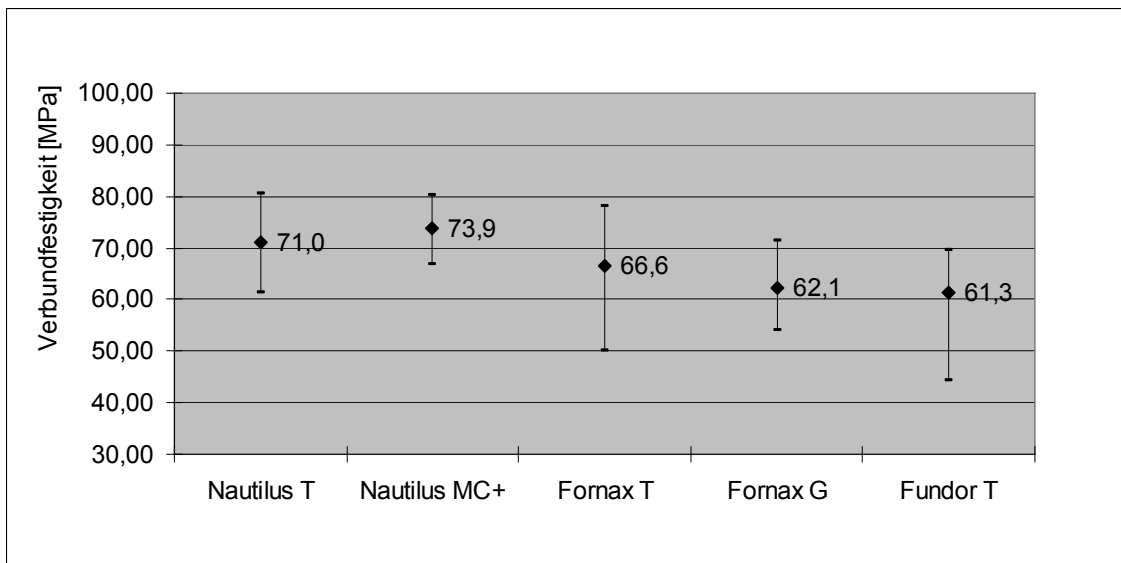


Abb. 22: Spannweite der Verbundfestigkeiten (Minima, Maxima und Mittelwerte) der verwendeten Gussystem mit der Keramik IPS- d.Sign im Haftverbund

Bei dem Gussystem Fundor T betragen die Verbundfestigkeiten 44,2 MPa bis 69,5 MPa. Der Mittelwert beträgt 61,3 MPa, der Medianwert 63,1 MPa, der Variationskoeffizient 14,6 % und die Standardabweichung 1,8 MPa.

4.2.3 Ergebnisse der Keramik Heraceram mit den unterschiedlichen Gussystemen

Die Verbundfestigkeiten bei Vita Omega 900 und dem Gussystem Nautilus T sind zwischen 49,2 MPa und 75,6 MPa. Der Mittelwert ist 62,9 MPa, der Medianwert 61,8 MPa, der Variationskoeffizient 15,0 % und die Standardabweichung 2,0 MPa.

Bei dem Gussystem Nautilus MC+ liegen die Werte für die Verbundfestigkeiten zwischen 57,8MPa und 64,1 MPa. Der Mittelwert liegt bei 61,1 MPa, der Medianwert bei 61,1 MPa, der Variationskoeffizient bei 4,6 % und die Standardabweichung bei 0,6 MPa.

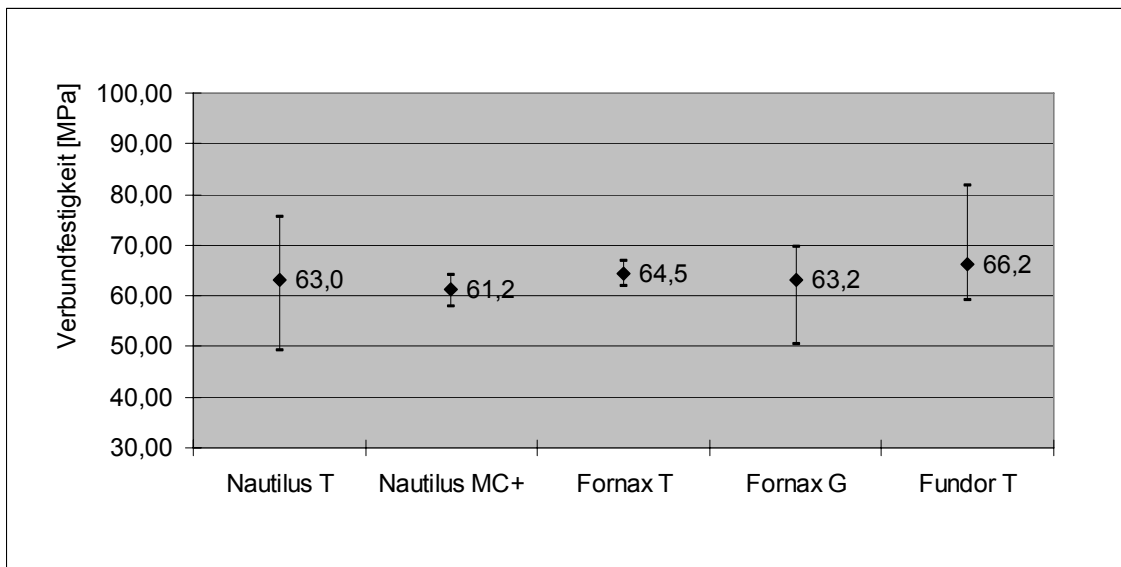


Abb. 23: Spannweite der Verbundfestigkeiten (Minima, Maxima und Mittelwerte) der verwendeten Gussystem mit der Keramik Heraceram im Haftverbund

Mit dem Gussystem Fornax T beträgt das Minimum 61,9 MPa und das Maximum 66,9 MPa. Der Mittelwert beträgt 64,5 MPa, der Medianwert 64,8 MPa, der Variationskoeffizient 3,2 % und die Standardabweichung 0,4 MPa.

Die Verbundfestigkeiten bei dem Gussystem Fornax G sind zwischen 50,4 MPa und 69,8 MPa. Der Mittelwert ist 63,2 MPa, der Medianwert 65,2 MPa, der Variationskoeffizient 12,2 % und die Standardabweichung 1,6 MPa.

Bei dem Gussystem Fundor T liegen die Verbundfestigkeiten zwischen 59,2 MPa und 81,8 MPa. Der Mittelwert liegt bei 66,2 MPa, der Medianwert bei 61,9 MPa, der Variationskoeffizient bei 13,7 % und die Standardabweichung bei 1,9 MPa.

4.2.4 Ergebnisse der Keramik Vintage Halo mit den unterschiedlichen Gussystemen

Die Verbundfestigkeiten liegen bei Nautilus T zwischen 70,2 MPa und 82,1 MPa. Der Mittelwert beträgt 74,0 MPa, der Medianwert 72,8 MPa der Variationskoeffizient 6,1 % und die Standardabweichung 0,9 MPa.

Bei dem Gussystem Nautilus MC+ sind die Verbundfestigkeiten zwischen 63,8 MPa und 71,2 MPa. Der Mittelwert ist bei 66,0 MPa, der Medianwert bei 66,4 MPa, der Variationskoeffizient bei 6,8 % und die Standardabweichung bei 0,9 MPa.

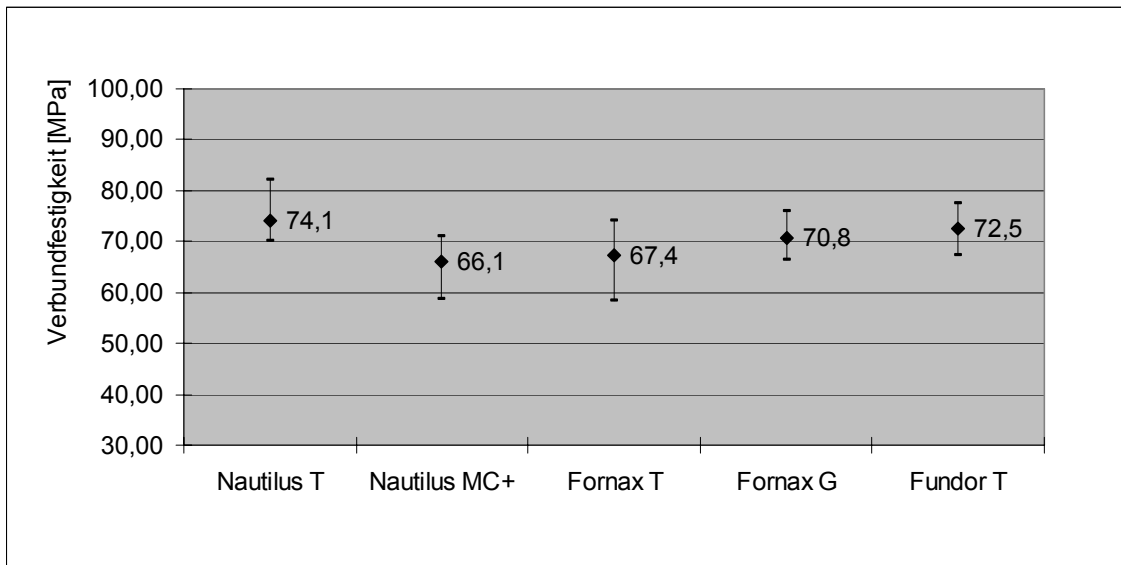


Abb. 24: Spannweite der Verbundfestigkeiten (Minima, Maxima und Mittelwerte) der verwendeten Gussysteme mit der Keramik Vintage Halo im Haftverbund

Mit dem Gussystem Fornax T liegt der Minimalwert der Verbundfestigkeiten bei 58,4 MPa und der Maximalwert bei 74,2 MPa. Der Mittelwert beträgt 67,4 MPa, der Medianwert 69,5 MPa, der Variationskoeffizient 8,5 % und die Standardabweichung 1,2 MPa.

Die Verbundfestigkeiten bei Fornax G liegen zwischen 66,3 MPa und 76,1 MPa. Der Mittelwert liegt bei 70,8 MPa, der Medianwert bei 70,5 MPa, der Variationskoeffizient bei 4,9 % und die Standardabweichung bei 0,7 MPa.

Bei dem Gussystem Fundor T betragen die Verbundfestigkeiten 67,4 MPa bis 77,4 MPa. Der Mittelwert beträgt 72,5 MPa, der Medianwert 72,6 MPa, der Variationskoeffizient 6,0 % und die Standardabweichung 0,9 MPa.

4.2.5 Ergebnisse der Keramik Creation mit den unterschiedlichen Gussystemen

Die Verbundfestigkeiten bei Creation und dem Gussystem Nautilus T sind zwischen 60,9 MPa und 80,0 MPa. Der Mittelwert ist 70,7 MPa, der Medianwert 70,3 MPa, der Variationskoeffizient 8,9 % und die Standardabweichung 1,3 MPa.

Bei dem Gussystem Nautilus MC+ liegen die Werte für die Verbundfestigkeiten zwischen 59,2 MPa und 78,7 MPa. Der Mittelwert liegt bei 70,38 MPa, der Medianwert bei 70,6 MPa, der Variationskoeffizient bei 9,4 % und die Standardabweichung bei 1,4 MPa.

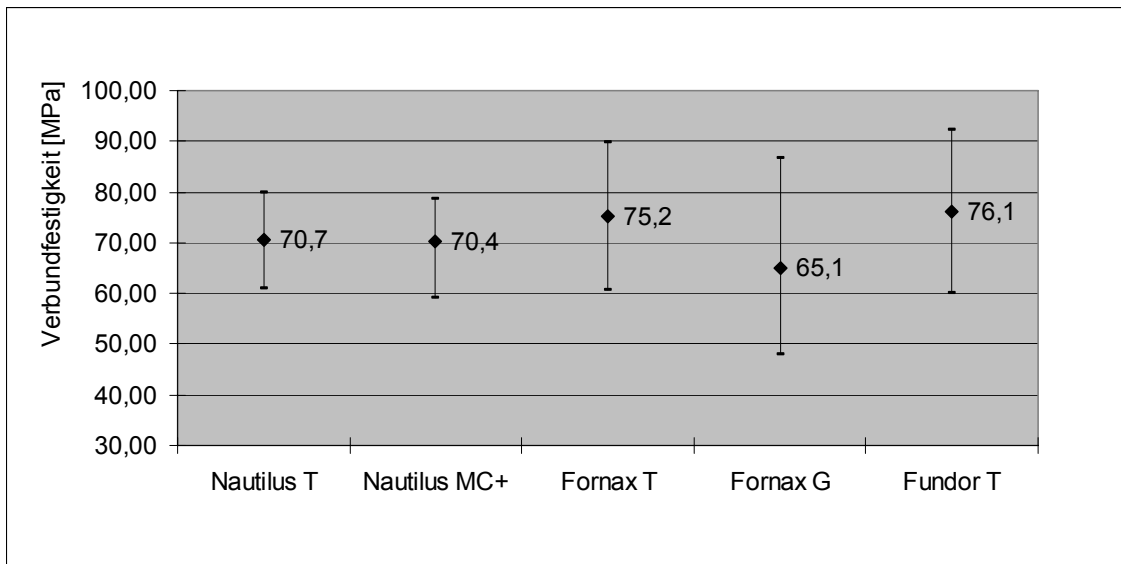


Abb. 25: Spannweite der Verbundfestigkeiten (Minima, Maxima und Mittelwerte) der verwendeten Gussystem mit der Keramik Creation im Haftverbund

Mit dem Gussystem Fornax T beträgt das Minimum 60,7 MPa und das Maximum 89,8 MPa. Der Mittelwert beträgt 75,2 MPa, der Medianwert 78,0 MPa, der Variationskoeffizient 15,8 % und die Standardabweichung 2,5 MPa.

Die Verbundfestigkeiten bei dem Gussystem Fornax G sind zwischen 54,3 MPa und 86,8 MPa. Der Mittelwert ist 65,1 MPa, der Medianwert 66,3 MPa, der Variationskoeffizient 20,7 % und die Standardabweichung 2,8 MPa.

Bei dem Gussystem Fundor T liegen die Verbundfestigkeiten zwischen 60,0 MPa und 92,3 MPa. Der Mittelwert liegt bei 76,1 MPa, der Medianwert bei 75,5 MPa, der Variationskoeffizient bei 14,2 % und die Standardabweichung bei 2,2 MPa.

4.2.6 Vergleich der Verbundfestigkeiten der verschiedenen Keramiken untereinander

In den nachfolgenden Tabellen werden die signifikanten Unterschiede der Verbundfestigkeiten der verschiedenen Keramiken mit jeweils einem Gussystem dargestellt. In den Tabellen wird signifikant wird mit „sign.“ Und nicht signifikant mit „n. s.“ abgekürzt. Am Ende dieses Kapitels werden die signifikanten Unterschiede zwischen den Keramiken analysiert und ihre Ursachen diskutiert.

A. Nautilus T

	Vita Omega			
d. Sign	n. s.	d. Sign		
Heraceram	sign.	n. s.	Heraceram	
Vintage Halo	n. s.	n. s.	n. s.	Vintage Halo
Creation	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.

Tab. 8: Signifikanzprüfung der Verbundfestigkeiten des Gussystems Nautilus T mit den verwendeten Keramiken

Beim Gussystem Nautilus T sind niedrigere Werte für die Verbundfestigkeit bei der Keramik Heraceram vorzufinden. Es besteht ein signifikanter Unterschied zwischen Vita Omega 900 und Heraceram. Sonst gab es keine signifikanten Unterschiede.

B. Nautilus MC+

	Vita Omega			
d. Sign	n. s.	d. Sign		
Heraceram	sign.	Sign.	Heraceram	
Vintage Halo	n. s.	sign.	n. s.	Vintage Halo
Creation	n. s.	n. s.	sign.	n. s.

Tab. 9: Signifikanzprüfung der Verbundfestigkeiten des Gussystems Nautilus MC+ mit den verwendeten Keramiken

Beim Gussystem Nautilus MC+ wies die Keramik Ivoclar IPS-d.Sign höhere Verbundfestigkeitswerte auf und die Keramik Heraceram niedrigere. Es traten signifikante Unterschiede zwischen Ivoclar IPS-d.Sign und Vintage Halo, Ivoclar IPS-d.Sign und Heraceram und zwischen Heraceram und Creation.

C. Fornax T

	Vita Omega			
d. Sign	n. s.	d. Sign		
Heraceram	n. s.	n. s.	Heraceram	
Vintage Halo	n. s.	n. s.	n. s.	Vintage Halo
Creation	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.

Tab. 10: Signifikanzprüfung der Verbundfestigkeiten des Gussystems Fornax T mit den verwendeten Keramiken

Bei dem Gussystem Fornax T traten keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Keramiken auf.

D. Fornax G

	Vita Omega			
d. Sign	n. s.	d. Sign		
Heraceram	n. s.	n. s.	Heraceram	
Vintage Halo	sign.	n. s.	n. s.	Vintage Halo
Creation	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.

Tab. 11: Signifikanzprüfung der Verbundfestigkeiten des Gussystems Fornax G mit den verwendeten Keramiken

Bei dem Gussystem Fornax G besteht ein signifikanter Unterschied zwischen der Keramik Vintage Halo und Vita Omega 900, die durch höhere Werte für den Haftverbund bei der Keramik Vintage Halo ermittelt wurden als für die Keramik Vita Omega 900. Ansonsten traten keine signifikanten Unterschiede zwischen den verwendeten Keramiken auf.

E. Fundor T

	Vita Omega			
d. Sign	n. s.	d. Sign		
Heraceram	n. s.	n. s.	Heraceram	
Vintage Halo	sign.	Sign.	n. s.	Vintage Halo
Creation	n. s.	sign.	n. s.	n. s.

Tab. 12: Signifikanzprüfung der Verbundfestigkeiten des Gussystems Fundor T mit den verwendeten Keramiken

Bei dem Gussystem Fundor T hat die Keramik Ivoclar IPS-d.Sign niedrigere Werte und Vita Omega 900 höhere Werte für die Verbundfestigkeit. Es gibt signifikante Unterschiede zwischen Ivoclar IPS-d.Sign und Vintage Halo, Ivoclar IPS-d.Sign und Creation, Ivoclar IPS-d.Sign und Vita Omega 900, Vita Omega 900 und Vintage Halo und zwischen Vita Omega 900 und Heraceram.

4.2.7 Zusammenfassende Darstellung und Analyse der Keramiken

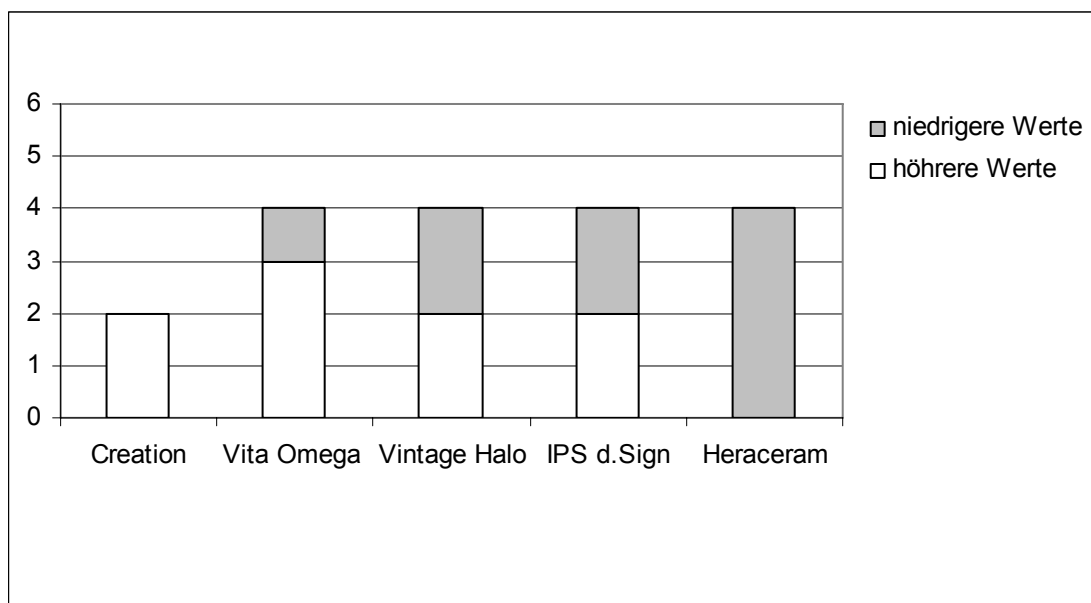


Abb. 26: Aufteilung der Signifikanzunterschiede zwischen den Keramiken in niedrigere und höhere Verbundfestigkeiten

Insgesamt wurden 9 signifikante Unterschiede zwischen den Keramiken festgestellt. Keine Keramik zeigte dabei auffällig viele signifikante Unterschiede zu anderen Keramiken. Die Signifikanzen kamen sowohl durch höhere als auch durch niedrigere Verbundfestigkeitswerte bei den verschiedenen Keramiken zustande außer bei den Keramiken Heraceram und Creation. Bei der Keramik Heraceram traten ausschließlich vergleichsweise niedrigere Werte und bei der Keramik Creation ausschließlich vergleichsweise höhere Werte für den Haftverbund auf.

4.3 Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen und der EDX-Analyse

4.3.1 Ergebnisse der lichtmikroskopischen Untersuchung

Bei der lichtmikroskopischen Untersuchung waren alle Metallplättchen mit Keramik bedeckt, so dass an keiner Probe Metall durchschien. Um die Güte des Keramikhaftverbundes klassifizieren zu können, wurden die Prüfkörper in drei Gruppen eingeteilt (siehe Kapitel 3.3.2. und Abb. 22-24)

Bei Betrachtung der Gesamtverteilung der Gruppen 1 bis 3 bei allen verwendeten Gussystemen und allen verwendeten Keramiken konnte eine relativ gleichmäßige Verteilung auf alle Gruppen festgestellt werden.

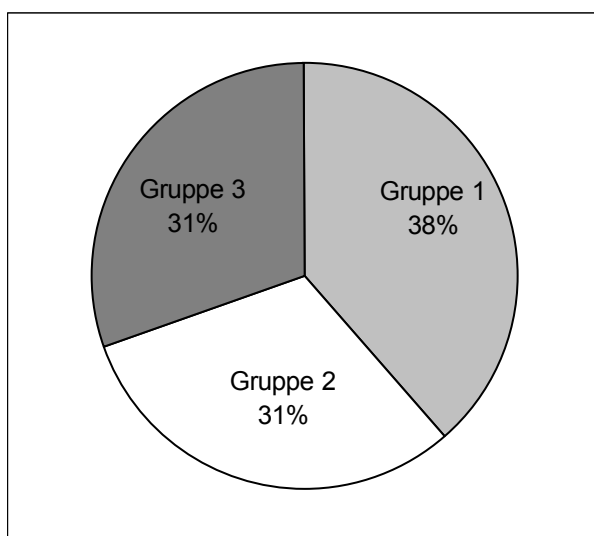


Abb. 26: Verteilung aller Keramikhaftverbunde auf die Gruppen 1-3

Betrachtet man die Verteilung der Gruppen aus Sicht der Gussysteme, stellt sich, wie in der untenstehenden Abbildung dargestellt, eine ungleichmäßigere Verteilung da.

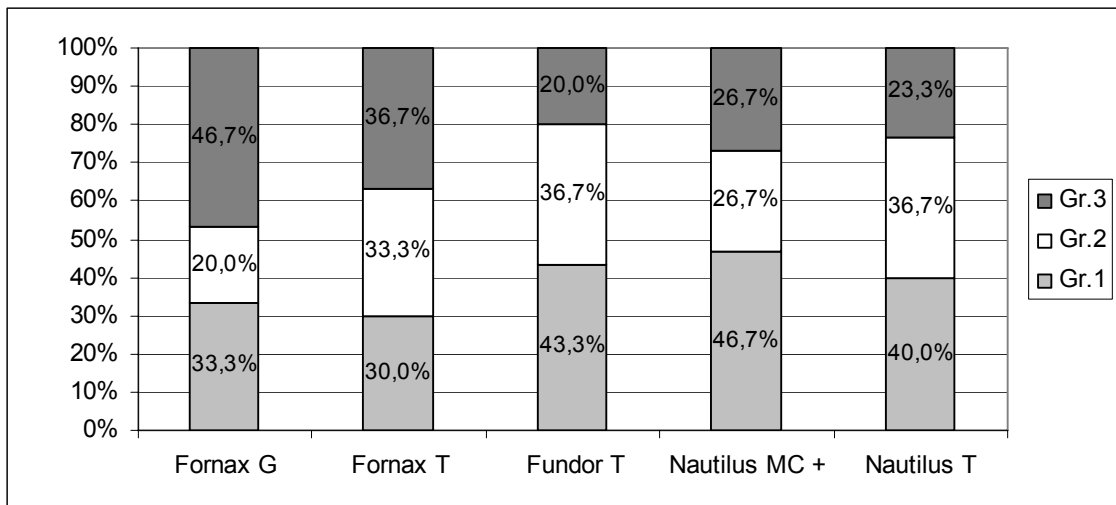


Abb. 26: Verteilung aller Keramikhaftverbunde auf die Gruppen 1 bis 3 je Gussystem

Bei Betrachtung der Gruppenverteilung aus Sicht der Keramiken liegt eine deutlich ungleichmäßige Verteilung der einzelnen Gruppen vor. Diese Verteilung wird in der untenstehenden Abbildung dargestellt.

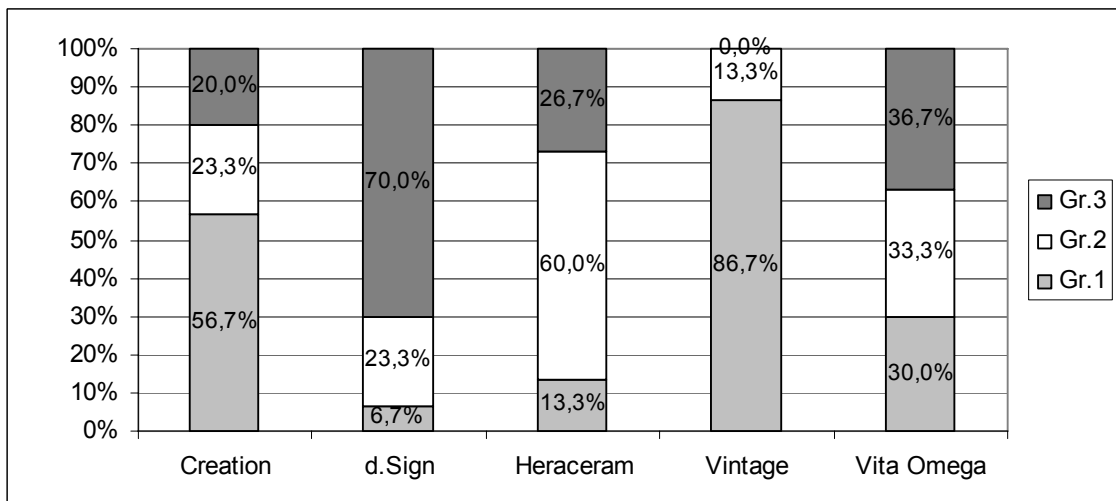


Abb. 27: Verteilung aller Keramikhaftverbunde auf die Gruppen 1 bis 3 je Keramik

Die Ergebnisse der lichtmikroskopischen Untersuchung werden nachfolgend aus Sicht der Gussysteme detailliert aufgeführt.

4.3.1.1 Ergebnisse der Lichtmikroskopischen Untersuchung bei Fornax G mit den verwendeten Keramiken

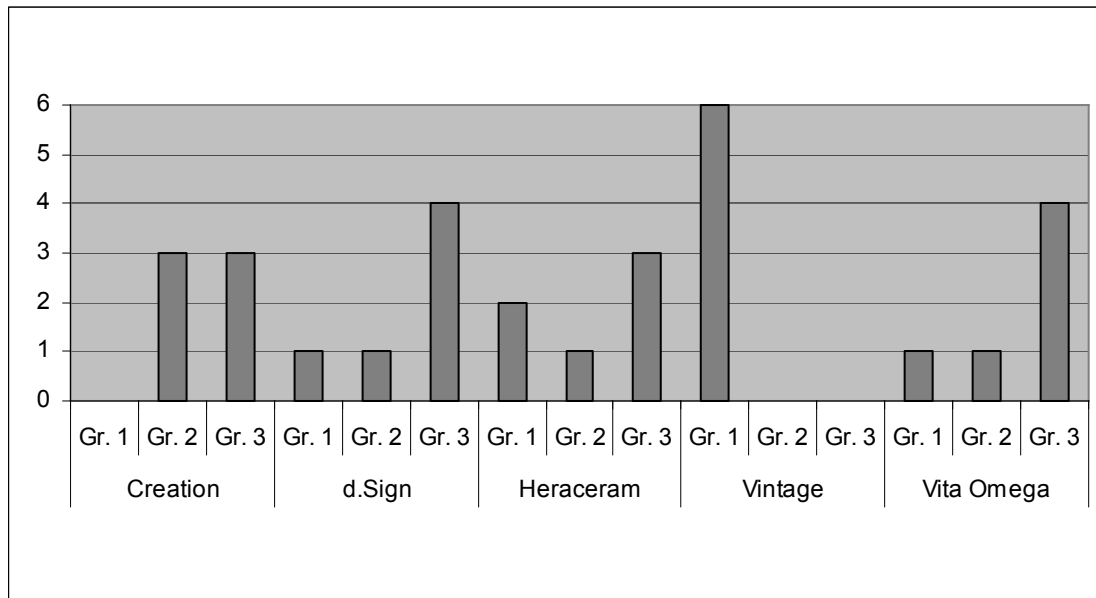


Abb. 28: Absolute Gruppenhäufigkeit der Keramikhaftverbunde für das Gussystem Fornax G

Bei dem Gussystem Fornax G mit der Keramik Creation ist die eine Hälfte der Proben zwischen einem Drittel und zwei Drittel der Fläche mit einer dicken Restschicht Keramik bedeckt und die andere Hälfte über zwei Drittel der Fläche.

Von den 6 Proben des Gussystems Fornax G und der Keramik Ivoclar IPS-d.Sign können vier der Gruppe 3 zugeordnet werden und jeweils eine den Gruppen 1 und 2.

Die Prüfkörper der Verbundkombination Fornax G mit der Keramik Heraceram sind drei Proben über zwei Drittel der Fläche mit einer dicken Restschicht Keramik bedeckt, eine ist zwischen ein Drittel und zwei Drittel der Fläche gut mit Keramik bedeckt und zwei der Gruppe 1 bis zu einem Drittel der Fläche.

Bei den Metallplättchen des Gussystems Fornax G sind zumeist mehr als zwei Drittel der Fläche noch mit einer dicken Restschicht der Keramik Vita Omega 900 bedeckt.

Die Prüfkörper des Gussystems Fornax G sind immer weniger als ein Drittel der Flächen mit der Keramik Vintage Halo bedeckt.

4.3.1.2 Ergebnisse der lichtmikroskopischen Untersuchung bei Fornax T mit den verwendeten Keramiken

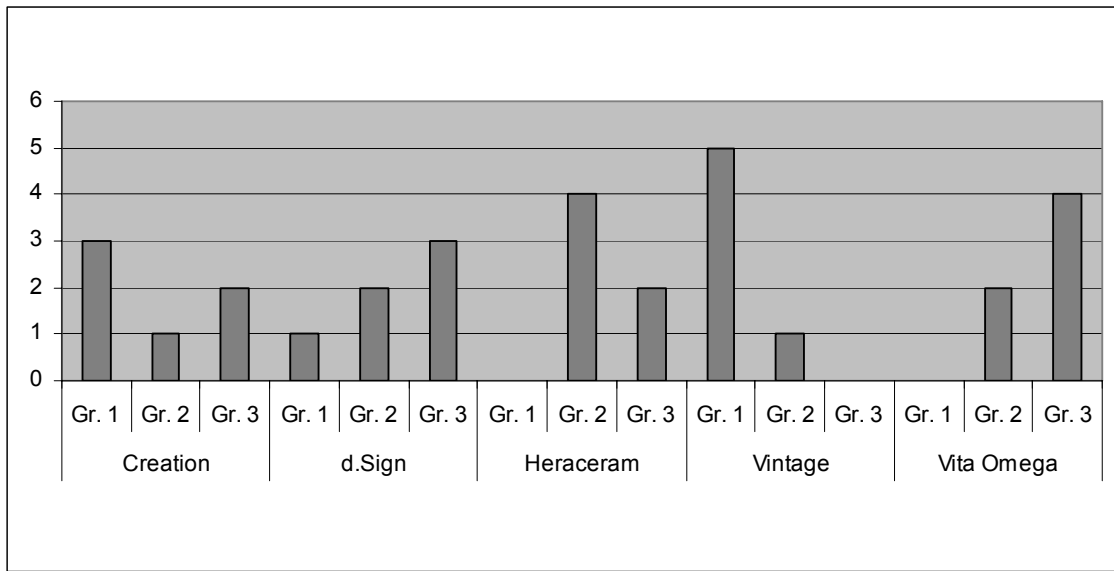


Abb. 29: Absolute Gruppenhäufigkeit der Keramikhaftverbunde für das Gussystem Fornax T

Die Hälfte der Proben des Gussystems Fornax T und der Keramik Creation werden der Gruppe 3 zugeteilt, zwei der Gruppe 3 und eine der Gruppe 2.

Beim Gussystem Fornax T mit der Keramik Ivoclar IPS-d.Sign sind drei von sechs Proben mit mehr als zwei Dritteln der Fläche mit einer dicken Restschicht Keramik bedeckt. Zwei werden in die Gruppe 2 und eine in die Gruppe 1 eingeteilt.

Alle Proben des Gussystems Fornax T sind mit mehr als ein Drittel der Fläche noch mit einer dicken Restschicht der Keramik Heraceram bedeckt.

Die meisten Proben des Gussystems Fornax T, die mit der Keramik Vita Omega 900 verblendet wurden, können der Gruppe 3 zugeteilt werden.

Fünf von sechs Proben des Gussystems Fornax T haben weniger als ein Drittel der Keramik Vintage Halo auf der Fläche.

4.3.1.3 Ergebnisse der lichtmikroskopischen Untersuchung bei Fundor T mit den verwendeten Keramiken

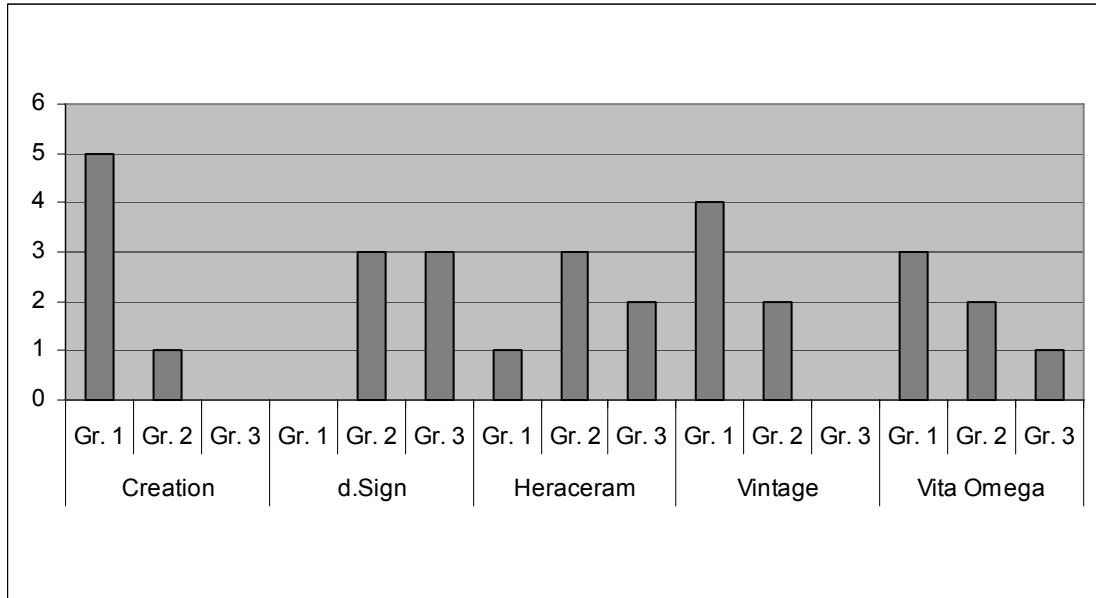


Abb. 29: Absolute Gruppenhäufigkeit der Keramikhaftverbunde für das Gussystem Fundor T

In dieser Reihe des Gussystems Fundor T und der Keramik Creation ist nur auf einer Probe mehr als ein Drittel der Fläche mit einer dicken Restschicht Keramik bedeckt.

Die eine Hälfte der Metallplättchen des Gussystems Fundor T, die mit der Keramik Ivoclar IPS –d.Sign verblendet wurden, wird in die Gruppe 2 eingeteilt und die andere Hälfte in die Gruppe 3.

Ein Prüfkörper des Gussystems Fundor T und der Keramik Heraceram wird der Gruppe 1 zugeteilt, drei der Gruppe 2 und zwei der Gruppe 3.

Die Hälfte der Proben des Gussystems Fundor T sind unter einem Drittel der Fläche mit einer dicken Restschicht der Keramik Vita Omega 900 bedeckt, bei der anderen Hälfte ist eine Probe über zwei Drittel der Fläche mit einer dicken Restschicht Keramik bedeckt.

Es erfolgt zumeist eine Zuteilung der Prüfkörper Fundor T mit der Keramik Vintage Halo bei der Gruppe 1.

4.3.1.4 Ergebnisse der lichtmikroskopischen Untersuchung bei Nautilus MC+ mit den verwendeten Keramiken

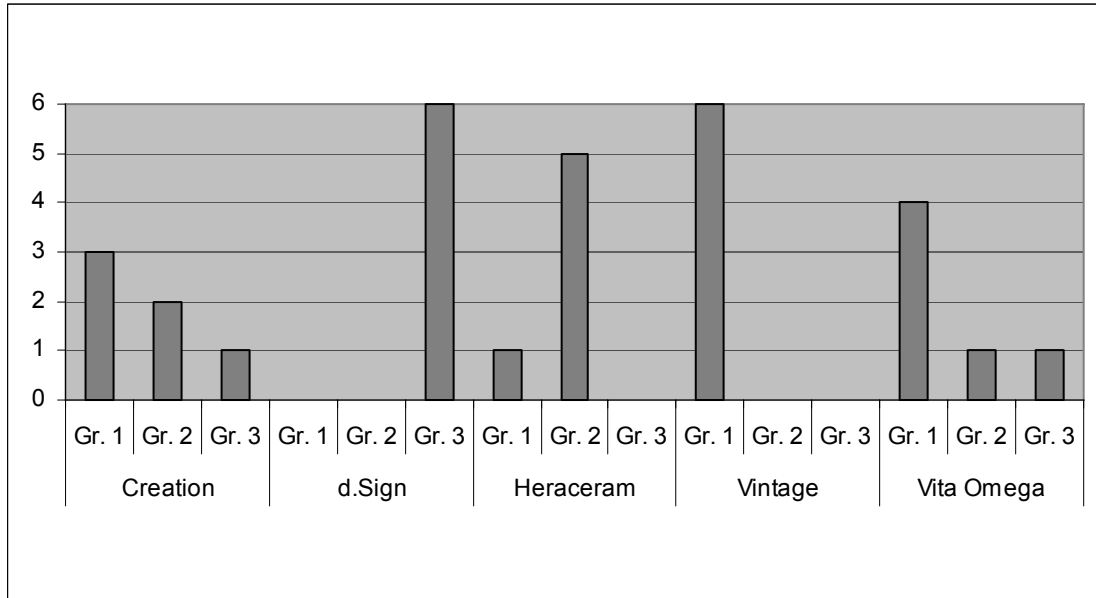


Abb. 30: Absolute Gruppenhäufigkeit der Keramikhaftverbunde für das Gusssystem Nautilus MC+

Bei der Kombination Nautilus MC+ mit der Keramik Creation wird ein Plättchen der Gruppe 3 zugeteilt, zwei der Gruppe 2 und drei der Gruppe 1.

Alle Prüfkörper des Gusssystems Nautilus MC + sind mit mehr als zwei Dritteln der Fläche mit einer dicken Restschicht der Keramik Ivoclar IPS-d.Sign bedeckt.

Bis auf eine Probe des Gusssystems Nautilus MC+ und der Keramik Heraceram werden alle anderen der Gruppe 2 zugeschrieben.

Vier von sechs Plättchen des Gusssystems Nautilus MC+ sind mit weniger als ein Drittel der Fläche mit einer dicken Restschicht der Keramik Vita Omega 900 bedeckt. Eins ist bis zwei Drittel der Fläche mit Keramik bedeckt und eins über zwei Drittel.

Alle Prüfkörper der Verbundkombination Nautilus MC+ und der Keramik Vintage Halo werden der Gruppe 1 zugeteilt.

4.3.1.5 Ergebnisse der lichtmikroskopischen Untersuchung bei Nautilus T mit den verwendeten Keramiken

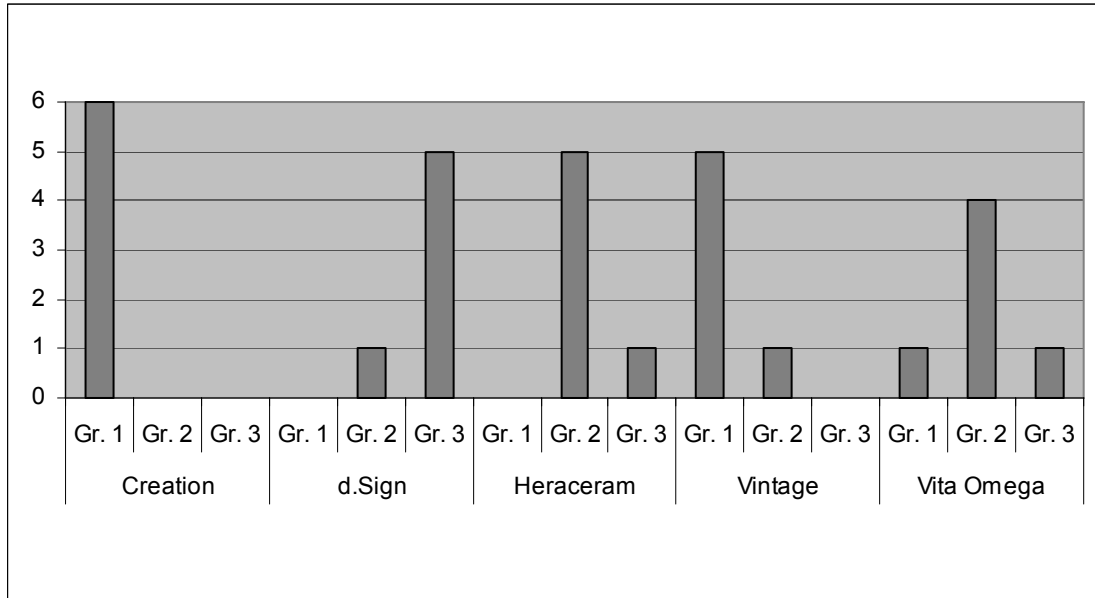


Abb. 31: Absolute Gruppenhäufigkeit der Keramikhaftverbunde für das Gusssystem Nautilus T

Bei den sechs Proben bei dem Gusssystem Nautilus T mit der Keramik Creation ist immer weniger als ein Drittel der Fläche mit einer dicken Restschicht Keramik bedeckt.

Bei den Metallplättchen, die mit dem Gusssystem Nautilus T vergossen wurden und mit der Keramik Ivoclar IPS-d.Sign verblendet wurden, sind hauptsächlich mehr als zwei Drittel der verblendeten Fläche mit einer dicken Restschicht Keramik bedeckt.

Fünf von sechs Prüfkörpern des Gusssystems Nautilus T, die mit der Keramik Heraceram verblendet wurden, können in die Gruppe 2 eingeteilt werden, eins in Gruppe 3.

Bei der Verbundkombination des Gusssystems Nautilus T und der Keramik Vita Omega 900 ist einmal die Gruppe 1, einmal die Gruppe 3 und viermal die Gruppe 2 vorhanden.

Nur einmal ist mehr als ein Drittel der Fläche der Plättchen des Gusssystems Nautilus T mit einer dicken Restschicht der Keramik Vintage Halo bedeckt, die anderen Proben liegen alle darunter.

4.3.2 Ergebnisse der EDX-Analyse

Die EDX-Analyse wurde an einer Probe aus einer Versuchsreihe durchgeführt. Die Haftoxidbildenden Elemente hatten meist eine hohe Konzentration in der Opakerschicht, die sich entweder noch in der Keramikschiicht steigerte oder in der Keramikschiicht wieder abnahm. Die Anzahl an Prüfkörpern ist zu gering, um eine statistische Auswertung vorzunehmen. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt deshalb durch das Aufzeigen von Tendenzen.

4.3.2.1 Ergebnisse der EDX-Analyse beim Gusssystem Nautilus T

Im Grenzzonenpunkt bei der Keramik Vita Omega 900 liegt die Konzentration von Gold, Platin knapp unter den Herstellerangaben. Die Konzentration des Indiums liegt dagegen deutlich über den Herstellerangaben. Während der Gold- und Platinanteil bis zur Keramikschiicht immer weiter sinkt, steigt die Indiumkonzentration bis in die Keramikschiicht weiter an.

Bei dem mit der Keramik Vintage Halo verblendeten Prüfkörper sind die Gold- und Platinkonzentrationen im Grenzpunkt niedriger, die Konzentration von Indium deutlich über den Konzentrationsangaben vom Hersteller. In der Verbund- und der Keramikschiicht sinkt die Gold- und Platinmenge. Indium steigt in der Verbundphase und fällt dann wieder ab in der Keramikschiicht.

In der Grenzzone der Probe mit der Keramik Creation liegt der Gold- und Indiumgehalt über den Herstellerangaben, der Platingehalt liegt darunter. Gold und Platin verringern sich bis in die Keramik, Indium erhöht sich stark in der Opakerschiicht und verringert sich dann wieder in der Keramik.

Die EDX-Analyse bei dem Plättchen, auf das die Keramik Ivoclar IPS d.Sign aufgebrannt wurde, ergibt eine um einige Prozent geringere Gold- und Platinkonzentration als vom Hersteller angegeben, die Prozentangabe von Indium liegt deutlich darüber. Die Indiummesswerte steigern sich deutlich bis in

die Keramikschiicht, wobei die Messwerte für Gold und Platin kontinuierlich abnehmen.

Tendenziell mehr Gold und Indium und tendenziell weniger Platin befinden sich in der Grenzzone der Probe mit der Keramik Heraceram. Die Indiumkonzentration steigt in der Opakerschicht deutlich an und sinkt in der Keramikschiicht wieder, während die Gold- und Platinkonzentration bis in die Keramikschiicht sinkt.

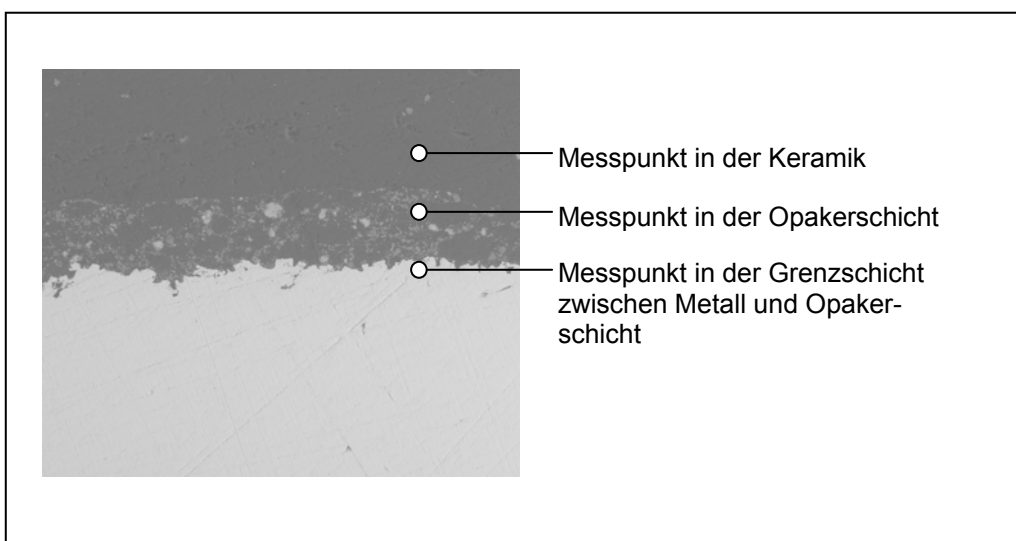


Abb. 32: Beispiel einer REM- Aufnahme bei 300facher Vergrößerung mit eingezeichneten Messpunkten für das Gussystem Nautilus T

4.3.2.2 Ergebnisse der EDX-Analyse beim Gussystem Nautilus MC +

Mit der Keramik Vita Omega 900 befindet sich am Grenzpunkt eine niedrigere Gold- und Platinkonzentration und eine höhere Indiumkonzentration als vom Hersteller angegeben. Die Gold- und Platinanteile verringern sich bis in den Keramikmesspunkt und die Indiumkonzentration steigt.

In den Grenzzonebereich, bei dem mit der Keramik Vintage Halo verblendeten Prüfkörper, liegt die Gold- und Platinmenge unter und die Indiumkonzentration weit über den Herstellerangaben. Die Menge an Gold, Platin und Indium sinkt in der Opakerschicht und im Keramikmesspunkt nochmals.

Die Probe, die mit der Keramik Creation verblendet wurde, enthält tendenziell gering weniger Gold und Platin dafür vermehrt Indium. Während sich die Gold- und Platinkonzentration ab dem Opakerschichtpunkt sinkt, steigt die Indiumkonzentration an.

Die EDX-Analyse ergibt für das Plättchen mit der Keramik Ivoclar IPS d.Sign Werte für Gold und Platin unterhalb der Herstellerangaben, der Wert für Indium liegt darüber. Der Indiumgehalt steigt sehr in der Verbundschicht und wird dann im Keramikmesspunkt wieder geringer, während der Gold- und Platingehalt kontinuierlich geringer wird.

Tendenziell weniger Gold und Platin und tendenziell mehr Indium enthält die mit der Keramik Heraceram verblendete Probe. Der Indiumanteil erhöht sich in der Opakerschicht und wird in der Keramik wieder kleiner. Der Gold- und Platingehalt wird bis in die Keramik immer kleiner.

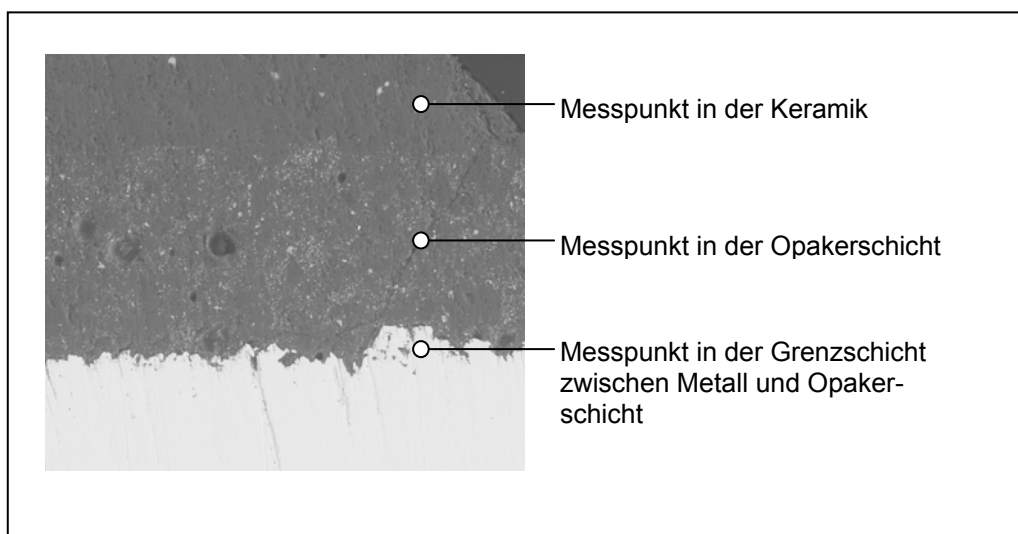


Abb. 33: Beispiel einer REM- Aufnahme bei 300facher Vergrößerung mit eingezeichneten Messpunkten für das Gussystem Nautilus MC+

4.3.2.3 Ergebnisse der EDX-Analyse beim Gussystem Fornax T

Das Plättchen mit der Keramik Vita Omega 900 hat im Grenzzonenpunkt niedrigere Werte für Gold und Platin, aber höhere Werte für Indium als vom Hersteller angegeben. Während der Indiumgehalt bis in den Keramikmesspunkt kontinuierlich steigt, sinkt der Gold- und Platingehalt kontinuierlich.

In der Grenzschicht liegt die Gold- und Platinkonzentration, bei dem mit der Keramik Vintage Halo verblendeten Prüfkörper deutlich unter den Herstellerangaben. Die Indiumkonzentration liegt dagegen deutlich darüber. Die Indiumkonzentration erhöht sich in der Opakerschicht und verringert sich in der Keramikschicht. Gold und Platin verringern sich bis in die Keramikschicht.

Bei der EDX-Analyse mit der Keramik Creation befindet sich der Gold- und Platingehalt leicht unterhalb, der Indiumgehalt über den Herstellerangaben. Der Gold- und Platingehalt wird bis in die Keramikschicht immer geringer, wobei der Indiumgehalt in der Opakerschicht größer wird und in der Keramikschicht wieder abfällt.

Laut Herstellerangaben war der Gold- und Platinanteil bei der Probe, die mit der Keramik Ivoclar IPS d.Sign verblendet war, gering erniedrigt, der Indiumgehalt erhöht. Die Indiumkonzentration steigt in der Opakerschicht an und fällt in der Keramikschicht ab. Die Gold- und Platinkonzentration fiel bis zum Keramikmesspunkt ab.

Tendenziell weniger Gold und Platin dafür mehr Indium als vom Hersteller angegeben sind in der Grenzzone bei der Keramik Heraceram. Der Indiumwert steigert sich in der Opakerschicht und verringert sich im Keramikmesspunkt. Der Gold- und Platinwert verringert sich bis zum Keramikmesspunkt.

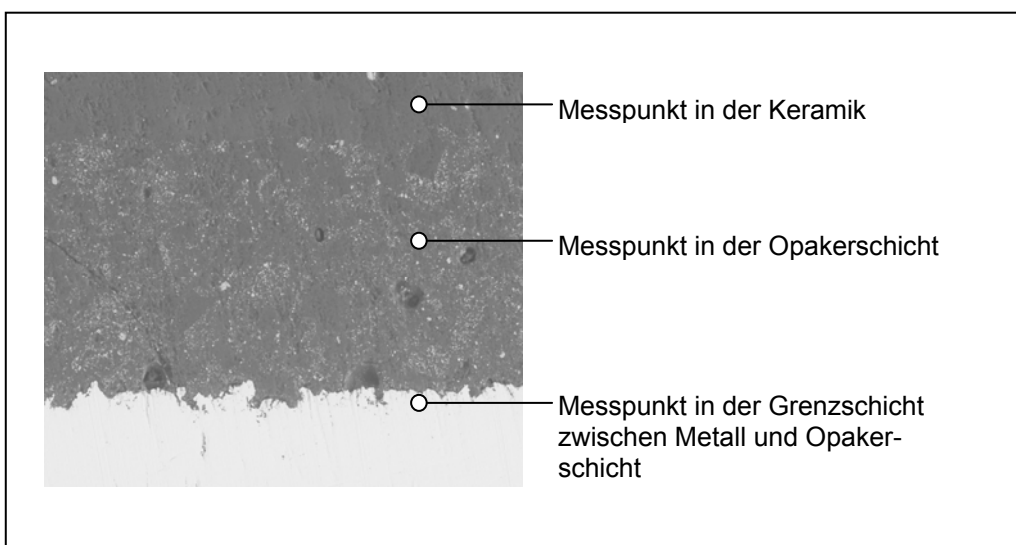


Abb. 34: Beispiel einer REM- Aufnahme bei 300facher Vergrößerung mit eingezeichneten Messpunkten für das Gusssystem Fornax T

4.3.2.4 Ergebnisse der EDX-Analyse beim Gussystem Fornax G

Für die Probe mit der Keramik Vita Omega 900 sind die Werte für Gold und Platin geringer und für Indium größer als die Herstellerangaben. Während der Wert für Indium bis in die Keramikschicht stetig steigt, senken sich die Werte für Gold und Platin.

Die Gold- und Platinkonzentration des Prüfkörpers, der mit der Keramik Vintage Halo gebrannt wurde, liegt unter den Herstellerangaben, die Indiumkonzentration weit darüber. Während die Indiumkonzentration in der Opakerschicht ihr Maximum erreicht und sich dann verringert, verringert sich die Gold- und Platinkonzentration bis zum Keramikmesspunkt.

Bei der EDX-Analyse des Metallplättchens mit der Keramik Creation liegen der Gold- und Platinanteil unter, der Indiumanteil über den Angaben des Herstellers. Der Gold- und Platinanteil wird bis in die Keramik immer kleiner, wobei der Indiumanteil in der Opakerschicht erst größer wird und dann im Keramikmesspunkt kleiner.

Tendenziell höhere Werte für Gold und für Indium und tendenziell einen niedrigeren Wert für Platin als angegeben, sind in der Probe mit der Keramik d. Sign. Der Wert für Indium steigt in der Opakerschicht und sinkt in der Keramikschicht. Die Werte von Gold und Platin sinken bis in die Keramikschicht.

Laut Herstellerangaben ist bei dem mit der Keramik Heraceram verblendeten Prüfkörper mehr Indium und weniger Gold und Platin vorzufinden.

Gold und Platin werden bis zum Keramikmesspunkt geringer vorgefunden und Indium wird in der Opakerschicht mehr und dann in der Keramik wieder weniger vorgefunden.

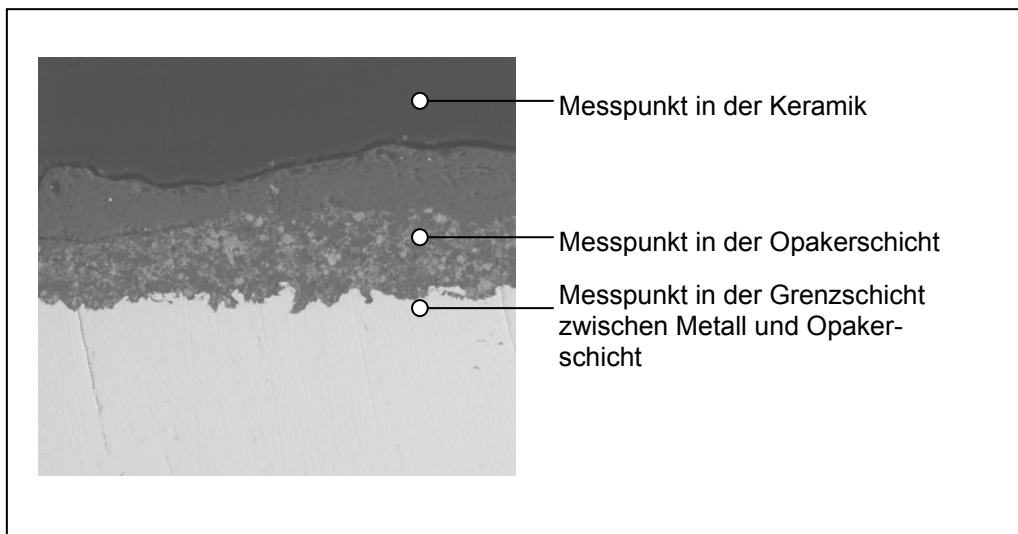


Abb. 35: Beispiel einer REM- Aufnahme bei 300facher Vergrößerung mit eingezeichneten Messpunkten für das Gussystem Fornax G

4.3.2.5 Ergebnisse der EDX-Analyse beim Gussystem Fundor T

Die Probe mit der Keramik Vita Omega 900 hat für Gold und Indium höhere und für Platin niedrigere Werte als der Hersteller angibt. Während die Gold- und Platinwerte bis in die Keramikschiicht immer kleiner werden, steigt der Indiumwert in der Opakerschicht und sinkt in der Keramik wieder.

Die Gold- und Platinkonzentration des Metallplättchens, das mit der Keramik Vintage Halo verblendet wurde, ist geringer und die Indiumkonzentration größer als die Herstellerangaben. Die Indiumkonzentration steigt bis zum Keramikmesspunkt und die Gold- und Platinkonzentration sinkt bis zum Keramikmesspunkt.

Bei der Keramik Creation liegen der Gold-, Platin- und Indiumanteil unter den Angaben des Herstellers. Der Indiumanteil erhöht sich in der Opakerschicht und verringert sich in der Keramikschiicht. Der Gold- und Platinanteil verringert sich bis in die Keramikschiicht.

Laut Herstellerangaben sind bei dem mit der Keramik Ivoclar IPS-d.Sign gebrannten Prüfkörper mehr Gold und Indium und weniger Platin vorhanden. Der Wert für Indium wird bis in die Keramik immer größer, wobei der Wert für Gold und Platin immer niedriger wird.

Tendenziell geringere Konzentrationen für Gold und für Platin und tendenziell eine höhere Konzentration für Indium als angegeben, sind in der Probe mit der Keramik Heraceram. Die Indiumkonzentration steigt in der Opakerschicht und sinkt im Keramikmesspunkt. Die Gold- und Platinkonzentration sinkt bis zum Keramikmesspunkt.

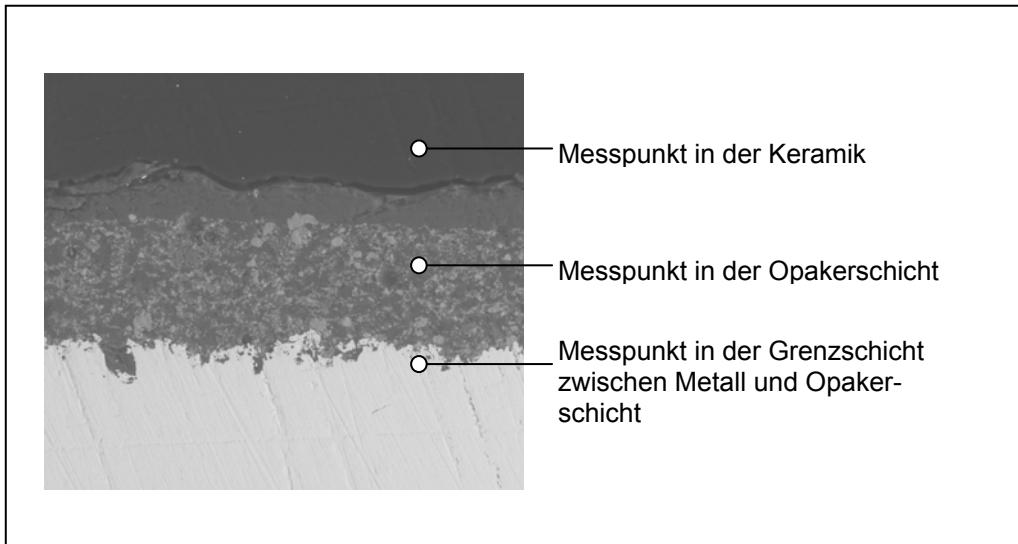


Abb. 36: Beispiel einer REM- Aufnahme bei 300facher Vergrößerung mit eingezeichneten Messpunkten für das Gussystem Fundor T

5 Diskussion

5.1 Fehlerbetrachtung

Fehler, die sich zu Beginn der Arbeit einschleichen, können sich bis zum Ende der Arbeit um ein vielfaches potenzieren. Aber auch Fehler, die am Ende der Arbeit begangen werden, können das Ergebnis beeinflussen. An dieser Stelle sollen daher die wesentlichen Fehlereinflüsse und Fehlermöglichkeiten auf die Versuchsergebnisse dieser Arbeit diskutiert werden.

5.1.1 Herstellung der Prüfkörper

5.1.1.1 Maßhaltigkeit der Metallplättchen

Die Maßhaltigkeit der Metallplättchen nimmt großen Einfluss auf die Messwerte der Verbundfestigkeit, da die gemessene Bruchkraft F von den geometrischen Abmessungen des Metallplättchens abhängig ist. Für die Berechnung der Verbundfestigkeit geht die Dicke mit der dritten Potenz ein. Die Breite und die Länge sind linear zur Verbundfestigkeit.

Zur Sicherstellung der Maßhaltigkeit wurden die Legierungsplättchen mittels eines rückstandslos verbrennbaren Kunststoffes hergestellt. Mit dieser Methode kann eine regelmäßige Dicke der Plättchen sowie eine bessere Formbeständigkeit im Gegensatz zu Wachsmustern erreicht werden [23]. Die Abmessung betrug bei allen Metallplättchen 25 mm x 3 mm x 0,5 mm.

Durch die Einhaltung der Abmessungen der Plättchen wurde dieser Fehlereinfluss auf die Messergebnisse der Verbundfestigkeit vermieden.

5.1.1.2 Bearbeiten der Legierung

Die Oberfläche der Metallplättchen ist wichtig für den Haftverbund zur Keramik. Da die Haftung von Keramik an glatten Oberflächen niedriger als an aufgerauten Oberflächen ist [104], wurden die Metallplättchen mit Korund abgestrahlt, um die Mikroretentionen an der Oberfläche der Prüfkörper zu

erhöhen. Zusätzlich wird durch das Abstrahlen die Oberfläche gereinigt, die Oberflächenenergie erhöht und die Dicke der Oxidschicht vermindert [92]. Dadurch werden die Tangentialspannungen vermindert und Einschlüsse von Partikeln in die Keramik verhindert, was den Haftverbund vermindern würde.

Durch die exakte Einhaltung der Herstellerangaben und die Einhaltung der oben dargestellten Vorgehensweisen wurden die beschriebenen Fehlereinflüsse beim Herstellungsprozess der Metallplättchen reduziert. Durch die Herstellung der Plättchen mittels einer Person wurde die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gewährt.

5.1.1.3 Aufbrennen der Keramiken

Es ist anzunehmen, dass die bis zum Abplatzen der Keramik aufzuwendende Kraft stark von der Biegefestigkeit des Metallplättchens und auch zum Teil von der Haftung der Keramik abhängt [5, 45]. Fehlermöglichkeiten bezüglich der Haftung ergeben sich insbesondere bei der Verarbeitung der keramischen Massen und wurden wie folgt berücksichtigt.

Da die Abweichung der Brenntemperatur Einfluss auf die Verbundfestigkeiten hat [26, 27, 48, 74, 122], wurden die Herstellerangaben beim Brennen der Keramik exakt eingehalten. Alle Serien wurden unter gleichen Bedingungen im selben Ofen gebrannt, damit eventuell auftretende Fehler bei allen Serien annähernd gleich sind. Nach SCHWICKERTATH und CLAUS ist die Anzahl der Keramikbrände beim Aufbrennen der Keramik auf das Metall möglichst klein zu halten, da Mehrfachbrände den Verbund verschlechtern [26, 48, 132]. Daher wurden alle Prüfkörper mit nur zwei Bränden hergestellt. Fehler beim Brennvorgang selbst sind aufgrund der Automatik der Anlagen weitgehend auszuschließen.

Die exakte Dicke der Keramik spielt nach ARLOM bei der Ermittlung der Verbundfestigkeit eine untergeordnete Rolle [5].

Um dennoch möglichst exakte Abmessungen der Keramik auf dem Metallplättchen zu erhalten, wurde mit einer Messlehre gearbeitet. Das bei der Herstellung angewendete Riffeln mit dem LeCron-Instrument und Absaugen der

Flüssigkeit mittels Zellstofftuch zum Kompensieren der Keramik unterliegt zwar subjektiven Einflussgrößen [5]. Aber bereits durch den zweiten Dentinbrand konnten die von der DIN EN ISO-Norm 9693 [21] geforderten Maße exakt eingehalten werden.

Es wurde Wert darauf gelegt, dass Prüfkörper einer Serie zusammenhängend gefertigt wurden, damit die Abweichungen möglichst gering ausfallen [37]. Da alle Prüfkörper von einer Person hergestellt wurden, kann auch davon ausgegangen werden, dass die Bedingungen bei der Herstellung aller Proben, abgesehen von der Tagesform, annähernd gleich waren.

5.1.2 Eignung der Methode

Es gibt in der Literatur viele Prüfverfahren zur qualitativen und / oder quantitativen Beurteilung des Verbunds zwischen Metall und Keramik [8, 48]. Der Dreipunkt- Biegeversuch nach SCHWICKERATH wurde aus mehreren Gründen für diese Arbeit gewählt. Er hat sich in der internationalen Normung etabliert [33, 48]. Mit dieser Prüfmethode können unterschiedliche Metall-Keramik-Systeme miteinander verglichen werden, da der Elastizitätsmodul der jeweiligen Legierung in den Verbundfestigkeitswert mit einberechnet wird.

Nach SIEBERT kann man mit dieser Messmethode eine Prognose abgeben, wie groß das Risiko für Keramikabplatzungen zwischen verschiedenen Legierungen bei vergleichbaren Manipulationen in der Mundhöhle ist [48, 138].

Die Dicke der Metallplättchen hat dieselbe Größe, wie ein Metallkappchen in der klinischen Realität, das mit Keramik verblendet wird. Nach SCHWICKERATH [48, 132] ist diese Prüfmethode die Grundlage vieler Prüfanordnungen von Brückenkonstruktionen, da die Biegebelastung die wesentliche Beanspruchungsart des Verbundes ist [48].

Ein großer Vorteil dieser Prüfmethode liegt in einem einfachen Versuchsaufbau und in einer relativ einfachen Herstellungsform der Prüfkörper [48, 128]. Abweichungen bei den Messergebnissen sind in den meisten Fällen auf Fehler bei der Herstellung der Prüfkörper zurückzuführen (siehe 5.1.1).

Ein weiterer Vorteil liegt gerade bei der Verwendung von hochgoldhaltigen Legierungen bei dem geringen Materialverbrauch.

Die reproduzierbare Einspannung der Prüfkörper in eine Lehre ist vorteilhaft. Bei der Versuchsdurchführung können die Proben in eine reproduzierbare Position in der Haltevorrichtung eingebracht werden.

Bei der in dieser Arbeit nach der Norm untersuchten Serien lagen die mittleren Verbundfestigkeitswerte von ca. 55 MPa über den von der Norm geforderten Mindestwert von 25 MPa [21]. Die Messwerte zeigten bei allen Prüfungsgruppen eine geringe Standardabweichung. Die geringe Messwertstreuung und die gleichmäßigen Ergebnisse dieser Serien zeigen ein sorgfältiges Ausführen aller Arbeitsschritte bei der Herstellung der Prüfkörper, aber auch, dass das Verfahren grundsätzlich geeignet erscheint, um einheitliche Ergebnisse zu erzielen.

5.1.3 Mess- und Ablesefehler

Der Messfehler hängt zum einem von der Herstellung der Proben ab und zum anderen von der Genauigkeit des Messgerätes. Im relevanten Messbereich von 4-200 N beträgt dieser 0,5 % gemäß Angabe des Messgeräteherstellers [20,48]. Dieser Messfehler ist im Vergleich zu den herstellungsbedingten Fehlern der Prüfkörper als äußerst gering einzuschätzen.

Der Abstand der Auflagen im Messgerät und das Volumen der Proben können einen entscheidenden Einfluss auf die Messergebnisse haben. Die Auflagenweite ist mit der dritten Potenz antiproportional zur Bruchkraft $[R_n]$ [45, 48]. Die Nichteinhaltung der in der DIN EN ISO-Norm 9693 [21] geforderten Auflagenweite von 20 mm kann die Messergebnisse beeinflussen. Zur Einhaltung der Auflagenweite erfolgten Kontrollmessungen.

Bei veränderter Ausrichtung der Prüfkörper zum Biegestempel verändern sich die mechanischen Prüfbedingungen und dadurch können geringere Werte für die Verbundfestigkeit gemessen werden [48]. Die nach DIN EN ISO-Norm 9693 [21] geforderte Ausrichtung war deshalb Grundvoraussetzung für die Durchführung des Versuchs [48]. Bei einer Ausrichtung der Prüfkörper zum

Biegestempel mit 15° konnte KHALOUF [48] keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zur Ausrichtung nach der Norm feststellen. Erst bei einer Ausrichtung mit 45° traten signifikante Unterschiede durch niedrigere Verbundfestigkeitswerte im Vergleich zur Norm auf [48]. Daher ist davon auszugehen, dass bei dieser Arbeit der mögliche Fehler durch eine geringe abweichende Ausrichtung vernachlässigbar ist.

Eine weitere Fehlerquelle liegt in der Bestimmung des Koeffizienten k , der zur Ermittlung der Verbundfestigkeit erforderlich ist. Der Koeffizient wird aus einem der Norm enthaltenen Diagramm abgelesen [21] (siehe Kapitel 2.4.6).

Im Diagramm wird k in Abhängigkeit vom E-Modul der verwendeten Legierung und der Dicke der Metallplättchen bestimmt. KAPPERT [45] stellte fest, dass bei seinen Biegeversuchen die ermittelten effektiven Elastizitätsmodule um 30 bis 50 % unter den Angaben der Hersteller lagen. Dies war auf verarbeitungsbedingte Probleme zurückzuführen [45]. Experimentell ermittelte tiefere E-Module haben bei gleicher Dicke des Metallplättchens einen höheren Koeffizienten k . Dies bedeutet, dass auch die Verbundfestigkeit höher wäre. In dieser Untersuchung wurde der Elastizitätsmodul der verwendeten Legierung nicht experimentell gemessen, sondern der Angabe des Herstellers zugrunde gelegt. Damit wird evtl. ein systematischer Fehler gemacht, die Vergleichbarkeit der Messwerte ist jedoch gewährleistet, da alle Serien mit der gleichen Legierung durchgeführt wurden. Die zweite Größe, die den Koeffizienten k im Diagramm bestimmt, ist die Dicke der Metallplättchen. Die Vermessung der Metallplättchen ergab bei allen, die in der Norm geforderte Dicke von 0,5 mm (siehe auch 5.1.1.). Der Fehlereinfluss des abgelesenen Koeffizienten k auf die Berechnung ist demnach hier vernachlässigbar.

Die in dieser Arbeit ermittelten Werte für die Verbundfestigkeit lagen im Bereich der in der Literatur angegebenen Spannen. Damit ist die Richtigkeit und Präzision der vorliegenden Messungen belegt.

Verbundkombination: EM-Legierung und herkömmliche Keramiken	Verbundfestigkeit in MPa
DERFERT [20]	22- 41
DÖRFLER,FLEETWOOD, FISCHER[18]	60-67
KAPPERT [41]	35- 51
SCHNETTGER,ZYLLA, KAPPERT [71]	47- 65
STRIETZEL [100]	63- 70
STRIETZEL [102]	56- 66
WOOD [135]	31- 34
YODA [136]	30- 35
Messwerte dieser Arbeit	56- 97

Tab. 13: Vergleich der Wertespanne der gemessenen Verbundfestigkeit mit Literaturdaten

5.1.4 EDX-Analyse

Bei der EDX-Analyse bestehen Fehlermöglichkeiten hinsichtlich der Vorbehandlung der Prüfkörper, Auswertung des Messprotokolls und Konzentration der betrachteten Elemente.

Für die EDX-Analyse wurden die Prüfkörper vorher poliert. Dadurch kann die weiche hochgoldhaltige Legierung über die gesamte Fläche poliert werden. Um den daraus entstehenden Fehler zu minimieren, wurden die Proben danach in ein Ultraschallbad gelegt und anschließend noch einmal mit Propanol gereinigt.

Es kann bei den Messungen auch zu Überlappungen von Peaks kommen, so dass bei der Auswertung des Messprotokolls Elemente unberücksichtigt bleiben konnten.

Bei der Messung wird der Vertrauensbereich und der Messfehler angezeigt. Bei zu hohem Messfehler und zu geringem Vertrauensbereich wurde das Element bei den Messergebnissen nicht berücksichtigt.

Der Messfehler liegt im Allgemeinen bei ca. 1 % ab einer Konzentration von ca. 1 %. Bei sehr niedrigen Gehalten kann der Messfehler bis 100% und mehr betragen [19]. Bei der verwendeten Legierung sind bis auf Gold, Platin und Zink die anderen Elemente in einer Konzentration von unter 1 % vorhanden. Somit ist hier von einem großen Messfehler auszugehen.

Auf Grund der dargestellten Fehlereinflüsse wurde die EDX-Analyse nur zum Aufzeigen von Tendenzen benutzt.

5.2 Diskussion der Messwerte

Mit allen fünf Gussystemen wurden Werte für die Verbundfestigkeit über den in der DIN EN ISO-Norm 9693 [21] geforderten Wert von 25 MPa erreicht.

In Kapitel 2.3 wurden die verschiedenen physikalischen Einflüsse auf den Haftverbund aufgeführt. Bei der Untersuchung von KOSSEL [52] wurde der Einfluss der verschiedenen Gussysteme auf die mechanischen Eigenschaften von hochgoldhaltigen Dentallegierungen überprüft. Es wurden die gleichen Gussgeräte verwendet wie bei dieser Untersuchung und auch die hochgoldhaltige Legierung Bio PontoStar. Es konnte kein Einfluss der verschiedenen Gussysteme auf die **mechanischen Eigenschaften** wie z. B. den E-Modul festgestellt werden. Demnach kann auch bei dieser Untersuchung davon ausgegangen werden, dass die verschiedenen Gussysteme die physikalischen Eigenschaften der Legierung nicht beeinflusst haben und somit kein Einfluss auf den Haftverbund haben. Damit ist ein Einfluss möglicherweise geänderter mechanischer Parameter auf den Haftverbund auszuschließen.

Auch die Verarbeitung hat wie in Kapitel 2.3 aufgeführt einen großen Einfluss auf den Haftverbund. Bei der Herstellung der Metallplättchen spielt insbesondere die Gießtemperatur der Legierung eine Rolle.

Bei einem zu **kalten Guss** kommt es zu Fehlgüssen und porigen Oberflächen. Filigrane Modellationen werden nicht aufgefüllt, da die Schmelze zu hoch ist.

Die Gefahr eines zu kalten Gusses besteht besonders beim Gussystem Fundor T aber auch bei den Gussystemen Fornax G und Fornax T. Bei den Gussystemen Nautilus T und Nautilus MC+ ist die Gefahr eines zu kalten Gusses relativ gering, da mit einer exakten Gießzeiterkennung gearbeitet wird. Bei dieser Arbeit traten keine Fehlgüsse auf und die Metallplättchen hatten alle die von der DIN EN ISO-Norm 9693 [21] geforderten Abmessungen, so dass davon ausgegangen werden kann, dass kein Einfluss auf den Haftverbund durch zu kalte Güsse entstanden ist.

Bei zu **heißen Güssen** kann es zu heftigen Reaktionen mit der Einbettmasse kommen, das eine erhöhten Aufwand beim Ausarbeiten zur Folge hat. Das trat bei dieser Untersuchung nicht auf.

Ein zu heißer Guss kann auch zu einer verstärkten Oxidation an der Oberfläche führen. Besonders unedle Metalle wie Indium können sich stark an der Oberfläche der Legierung anreichern [104]. Beim Aufbrennen der Keramik kann es zu einer verstärkten **Mischoxidbildung** kommen, die sich positiv auf den Haftverbund auswirkt. Durch eine zu dicke Oxidschicht wird der Haftverbund zunehmend negativ beeinflusst, da deren mechanische Stabilität sehr gering ist [107]. Die Gefahr zu heißer Güsse ist bei den Gussystemen Nautilus T und Nautilus MC+ sehr gering. Aufgrund der exakten Gießzeiterkennung und durch das Arbeiten mit Vakuum wird eine weitgehende Oxidation verhindert [11]. Die Gefahr zu heißer Güsse besteht bei den Gussystemen Fornax T und Fornax G und insbesondere bei der Methode des Flammenschmelzen beim Gussystem Fundor T.

Bei der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung wurde die Anreicherung von Indium in der Oxidschicht untersucht, um einen Zusammenhang zu der Höhe der Werte der Verbundfestigkeit zu überprüfen. Die größte Verbundfestigkeit der gesamten Untersuchung wurde mit der Kombination Fundor T und Vita Omega 900 erreicht. Bei der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung für diese Kombination konnte im Vergleich zu allen anderen Gussystemen und Keramiken eine höhere Indiumkonzentration in der Verbundschicht festgestellt werden. Bei den anderen Gussystemen

konnte allerdings kein Zusammenhang zwischen einer hohen Indiumkonzentration und der Verbundfestigkeit festgestellt werden. Auch die Auswertung der Fotografien der lichtmikroskopischen Ergebnisse ließ keinen Zusammenhang zwischen Indiumkonzentration und der verbliebenen Keramikrückstände auf den Metallplättchen erkennen.

Ein Überhitzen der Legierung führt zudem zu **porösen und lunkrigen Güssen** mit rauen Oberflächen, die durch bei der Erstarrung abgegebenes Gas und durch Reaktion mit der Einbettmasse entstehen können [104]. Zusätzlich begünstigt der Zentrifugalguss wie in Kapitel 2.2.2.2 beschrieben den Eintrag von Einschlüssen, was beim Vakuum- Druckgussverfahren auf ein Minimum reduziert wird. Diese Einschlüsse wirken sich negativ auf den Haftverbund aus. Das konnte bei dieser Untersuchung nicht festgestellt werden. Bei der raterlektronenmikroskopischen Untersuchung zeigte sich kein vermehrtes Lunker- oder Porenvorkommen bei den Metallplättchen die mit dem Schleuderguss hergestellt wurden. Aus dieser Untersuchung kann gefolgert werden, dass bei Einhaltung der Arbeitsanweisungen mit allen Gussgeräten der in der DIN EN ISO-Norm 9693 [21] geforderte Wert von 25 MPa erreicht wird.

Bei allen Gussystemen konnte ein Unter- oder Überhitzen der Legierung verhindert werden. Der Gießzeitpunkt konnte optisch oder automatisch ausreichend genau erkannt werden. Befolgt der Zahntechniker die Empfehlung des Herstellers können gussbedingte Schwächungen der Haftverbände nicht beobachtet werden, wenn man die Mindestanforderungen von 25 MPa zu Grunde legt.

Bei der Keramikverarbeitung nehmen die Brenntemperatur und der verwendete Opaker Einfluss auf den Haftverbund. Bei Betrachtung des Einflusses der Keramik auf die Verbundfestigkeitswerte stellte CLAUS [18] bei seinen Untersuchungen einen Einfluss der **Brenntemperatur** auf die Haftung der Dentalkeramik fest. Bei dieser Versuchsreihe schnitten die Proben mit einer Brenntemperatur von 980 °C günstiger ab als Keramiken mit niedrigerer Brenntemperatur. Nach diesen Messergebnissen hat bereits ein Temperaturunterschied von 20 °C einen Einfluss. Die Keramik Heraceram hat

die niedrigste Brenntemperatur im Vergleich zu den anderen Keramiken und die niedrigsten Mittelwerte für die Verbundfestigkeit. Auch die Indiumkonzentrationen sind geringer als bei den anderen verwendeten Keramiken mit Ausnahme in Kombination mit dem Gussystem Nautilus T.

Bei der Keramik Heraceram wurde ein **Pastenopaker** verwendet bei den anderen Keramiken ein **Pulveropaker**. Die Pulveropaker müssen mit einer Flüssigkeit gemischt werden. Dies birgt eine Fehlerquelle, da auf diese Weise zu dünne oder zu dicke Mischungen erzielt werden können. Auch wurde das Anmischen der Keramikpulver mit Wasser als problematisch angesehen, da die Formstabilität nicht genügend ist und die Modellation zerfließen können. Diese Fehlermöglichkeit sollte durch die Einführung von Pastenopakern vermieden werden, da so eine gebrauchsfertige Mischung appliziert werden kann.

Bei Pastenopakern kann es aber zu Problemen bei der verwendeten Flüssigkeit kommen. Diese kann aus Glycerin bestehen, das später siedet als z.B. Wasser. Dadurch kann es bei den Trocknungsschritten zu Problemen kommen, da Glycerin gar nicht oder nur unzureichend verdampft. Dies führt bei den späteren Brennvorgängen zur Blasenbildung und Absprengungen, da das Verbrennen erst jetzt einsetzt [104]. Zudem haben bei den Pastenopakern die Keramikpartikel eine geringere Korngröße im Vergleich zum Pulveropaker. Um eine geeignete Konsistenz der Pastenopaker zu erzielen, werden feinere Partikel verwendet. Bei den Trocknungsphasen bei zu hoher Temperatur oder bei zu schnellem Aufheizen können diese nun leichter an der Oberfläche versintern. Dadurch wird das Verdampfen der Flüssigkeit verhindert. So verbleibt die Flüssigkeit in der Keramik, was zu einer Blasenbildung führt [105].

Die unterschiedlichen Brenntemperaturen könnten die signifikanten Unterschiede von Heraceram und Creation im Vergleich zu den anderen Keramiken erklären. Bei der Keramik Heraceram kann zusätzlich die Verwendung eines Pastenopakers als Erklärung der signifikanten Unterschiede herangezogen werden. Zur Ermittlung des Einfluss der Brenntemperatur und des Opakers auf den Haftverbund scheinen weitere Untersuchungen sinnvoll.

5.3 Klinische Bedeutung

Hinsichtlich der im klinischen Alltag zu wählenden Gussysteme zeigte die Tischgusschleuder Fundor T die höchsten Werte für die Verbundfestigkeit an. Bei diesem System traten aber im Vergleich zu den beiden Vakuumdruckgussmaschinen Nautilus T und Nautilus MC+ größere Schwankungen zwischen Minimum und Maximum auf. Bei Nautilus T und Nautilus MC+ waren die Verbundfestigkeitswerte insgesamt höher als bei den anderen Gussystemen. Die Höchstwerte mit über 90 MPa wurden allerdings mit Fundor T erreicht. Die Werte für die Verbundfestigkeit bei den Hochfrequenz-Induktions-Gusschleudern Fornax T und Fornax G waren zumeist zwischen Minimum und Maximum mit großen Differenzen verbunden und die Verbundfestigkeit war zumeist niedriger als bei Fundor T, Nautilus T und Nautilus MC+. Bei den Keramiken war Vintage Halo die einzige Keramik, die bei allen Gussystemen gleichgute Ergebnisse erzielt hat ohne große Differenzen. Es gab auch keine großen Differenzen zwischen Minimum und Maximum. Die höchsten Verbundfestigkeitswerte wurden mit den Keramiken Creation und Vita Omega 900 erzielt. Die niedrigsten mit den Keramiken Ivoclar IPS-d.Sign und Heraceram.

Fasst man alle Ergebnisse zusammen, zeigt sich, dass mit jedem Gussystem und mit jeder Keramik ausreichend hohe Werte für die Verbundfestigkeit erzielt wurden.

Aus finanzieller Sicht wurden auch mit der günstigeren Tischgusschleuder hohe Verbundfestigkeitswerte erzielt, einfacher in der Anwendung und mit etwas zuverlässigeren Werten für die Verbundfestigkeit waren die Vakuumdruckgussmaschinen Nautilus T und Nautilus MC +.

In jedem Fall werden jedoch die in der DIN EN ISO-Norm 9693 geforderten Mindestanforderungen bei allen Herstellungsvarianten erfüllt. Alle Gussystemvarianten und Keramikvarianten zeigten Verbundfestigkeiten von über 25 MPa auf. Systeme, die oberhalb von 25 MPa liegen, sind als klinisch sicher anzusehen.

6 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Untersuchung war es, mögliche vorhandene Unterschiede in den Verbundfestigkeiten von Metallkeramikkombinationen aufgrund unterschiedlicher Gussysteme bei unterschiedlichen Keramiken aufzuzeigen.

Als Vakuum-Druckgussmaschinen mit Induktionsschmelzeinrichtung wurden Nautilus T und Nautilus MC+ verwendet. Die Vertreter für die Hochfrequenz-Induktions- Gusschleudern waren Fornax T und Fornax G. Als Tischgusschleuder für das Flammenschmelzen wurde Fundor T verwendet. Als hochgoldhaltige Legierung wurde Bio PontoStar benutzt.

Es wurden insgesamt 150 Prüfkörper hergestellt. Jedes Gussystem wurde mit fünf unterschiedlichen Keramiken kombiniert, so dass von jeder Kombination eine Versuchsreihe von 6 Prüfkörpern existiert.

Alle Prüfkörper wurden dem Drei-Punkt-Biegeversuch nach SCHWICKERATH nach DIN EN ISO-Norm 9693 unterzogen. Es konnte festgestellt werden, dass mit der Tischgusschleuder die höchsten Verbundfestigkeitswerte erzielt werden konnten. Insgesamt hohe Ergebnisse wurden mit den Vakuum-Druckgussmaschinen mit Induktionsschmelzeinrichtung erzielt. Die Keramik Vintage Halo erzielte mit allen Gussystemen gute Ergebnisse. Die höchsten Werte für die Verbundfestigkeit erreichte man mit den Keramiken Creation und Vita Omega 900. Mit der Leichtfließenden Keramik Heraceram wurden tendenziell niedrigere Werte für die Verbundfestigkeit festgestellt.

Anschließend wurden alle Proben lichtmikroskopisch untersucht. Die Prüfkörper wurden anhand der noch vorhandenen Keramik in Gruppen eingeteilt. Bei der Keramik Vintage Halo waren bis auf 4 Proben alle mit weniger als ein Drittel der Fläche mit einer dicken Restschicht Keramik bedeckt. Bei der Keramik IPS-d.Sign waren über die Hälfte der Proben mit mehr als zwei Dritteln der Fläche mit einer dicken Restschicht Keramik bedeckt. Die Plättchen, die mit der Keramik Vita Omega 900 verblendet wurden, hatten eine gleichmäßige Verteilung der Proben auf die Gruppen, der noch vorhanden Keramik.

Bei den Gussystemen war die Aufteilung in die drei Gruppen, der noch vorhandenen Keramik, relativ gleichmäßig, ohne dass eine Gruppe dominiert.

Aus jeder Versuchsreihe wurde der Prüfkörper mit der jeweils geringsten Verbundfestigkeit einer rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen und einer EDX-Analyse unterzogen. Die EDX-Analyse ergab, dass bei allen Versuchskombinationen die Indiumkonzentration in der ausgebildeten Haftoxidschicht erhöht war. Bei der Keramik IPS-d.Sign waren die Messwerte für die Indiumkonzentration in der Opakerschicht am größten. Von den Gussystemen hat Fornax T die tendenziell höhere Konzentration für Indium.

7 Summary

The ambition of this examination was to point out possible existing differences in the strength of bonds of metal-ceramic-combinations due to different casting-systems at variable ceramics.

The following casting-systems were assayed:

- Nautilus T and Nautilus MC+: vacuum-pressure-casting-systems with induction-melt-facility.
- Fornax T and Fornax G: high-frequency-induction centrifugal casting-system.
- Fundor T: centrifugal casting-system with an open flame.

Bio PontoStar, a high noble gold alloy, was used to fabricate 150 samples. Every casting-system was combined with five different ceramics, so that for each combination a group of six samples existed.

The bond strengths were evaluated using the three point bend test according to SCHWICKERATH after DIN EN ISO 9693. The casting-system Fundor T achieved the highest measurement. The vacuum pressure-casting-system with induction-melt-facility Nautilus T and Nautilus MC+ derived in general the highest measurements in all groups. The ceramic Vintage Halo had favourable measurements with every casting system. The ceramic Creation and Vita Omega 900 achieved the highest bond strength. According to the others the low fusing ceramic Heraceram derived the lowest measurements.

A light microscopic analysis was carried out with every sample. The samples were splitted in three groups by means of the existing ceramics after the three point bend test. Less than one third of the surface of the ceramic Vintage Halo samples was covered with a thick film of ceramic except four samples. More than two third of the surface of over the half of the IPS-d.Sign samples were covered with a thick ceramic film. The samples from Vita Omega 900 as well as

the casting-systems were distributed equally in the three groups of remained ceramics.

The samples with the lowest bond strength of each group were selected to carry out a raster-screen-electron-microscope-analysis with EDX analysis. The EDX-analysis showed that the indium concentration in the opaque porcelain film was heightened in every combination. The ceramic IPS-d.Sign and the casting system Fornax T had the highest concentration of indium.

8 Literaturverzeichnis

1. Anusavice, K.J.:
Suchtest für Metall- Keramik- Systeme
In: MCLean, I. W. : Dental- Keramik
Quintessenz, Berlin, 1984
2. Anusavice, K. J., Shen, C., Lee, R.:
Strengthening of feldspathic porcelain by ion exchange and tempering
J Dent Res 71 (5), 1134- 1138, 1992
3. Anusavice, K. J., Shen, C., Vermost, B., Chow, B.:
Strengthening of porcelain by ion exchange subsequent to thermal tempering
Dent Materials 8 (3), 149- 152, 1992
4. Arieley, E.:
Licht-, REM- und Mikrosondenanalysen an sieben
metallkeramischen Systemen
Dtsch Zahnärztl Z 39, 217-222, 1983
5. Arlom, R.:
Untersuchung des Einflusses modifizierter Oberflächen auf die
Verbundfestigkeit einer Kobalt- Chrom- Legierung mit Keramik sowie von
Reintitan mit Titankeramik
Zahnmed Diss, Berlin, 1998
6. BEGO, Bremer Goldschlägerei:
Produktinformation : BioPonto Star
Bremen, 2003
7. BEGO, Bremer Goldschlägerei:
Produktinformation : Nautilus T, Nautilus MC+, Fornax T, Fornax G, Fundor T
Bremen, 2003
8. Belohlavek, H.:
In Super- Zeitlupe: Die Vorgänge beim Druck- und Schleuderguss
Dent Lab 29, 1049-1052, 1981
9. Bertolotti, R. L.:
Die Verbindung von Metall und Porzellan
In: MCLean, I. W. : Dental- Keramik
Quintessenz, Berlin, 1984
10. Brämer, W.:
Gießen in der Zahntechnik: Ein Gussfehleratlas
Heraeus, 1998

11. Caesar, H. H.; Ernst, S.:
Grundwissen für Zahntechniker
Band 2: Nichtmetalle in der Zahntechnik
Verlag Neuer Merkur, 1998
12. Cheung, K. C., Darvell, B. W.:
Sintering of dental porcelain: effect of time and temperature on appearance and porosity
Dent Materials 18, 163-173, 2002
13. Claus, H.:
Das Gefüge und Mikrogefüge der Dentalkeramik in Abhängigkeit von den Brenntemperaturen
Quint Zahntech 16, 1479-1495, 1990
14. Claus, H.:
Die Bedeutung des Leuzits für die Dentalkeramik
Zahnärztl Welt 90, 44-46, 1981
15. Claus, H.:
Gefügeuntersuchung an metallkeramischen System
Dent Lab 31, 597-602, 1983
16. Claus, H. :
Untersuchung zur Haftfestigkeit von Keramik auf Metall-Legierungen
Dent Lab 29, 749-752, 1981
17. Claus, H.:
Verbundfestigkeit eines metallkeramischen Systems in Abhängigkeit von der Brenntemperatur
Zahnärztl Welt 7, 50-54, 1982
18. Claus, H.:
Viele Faktoren haben einen positiven Einfluss auf die Haftung von Dentalkeramik
Dent Lab 33, 897-900, 1985
19. Claus, H.:
Werkstoffkundliche Grundlagen der Dentalkeramik
Dent Lab 28, 1743-1750, 1980
20. Derfert, B.:
Vergleichende Untersuchung zur Verbundfestigkeit von verschiedenen Metall- Keramik- Kombinationen auf der Basis von EM- und NEM- Legierungen in Verbindung mit herkömmlicher und Niedrigschmelzender Keramik
Zahnmed Diss, Berlin, 2003

21. DIN EN ISO 9693 : 2000-12:
Dentale restaurative Metallkeramiksysteme
Beuth, Berlin, 2001
22. Dörfler, B.:
Ein neuer Schritt auf dem Weg zu einer dentalen Allround-Legierung
Dtsch Zahnärztl W Spezial 1, 30-33, 1999
23. Dörfler, B.; Fleetwood, P.; Fischer, J.:
Prüfung dentaler Edelmetall- Gusslegierungen
Quint Zahntech 21, 813-824, 1995
24. Eichner, K.:
Anwendung von Metall-Legierungen in der Zahnheilkunde - ein Überblick
Zahnärztl Welt 2, 28-36, 1983
25. Eichner, K.:
Gegenwärtiger Stand der werkstoffkundlichen und klinischen
Metallkeramik, Teil 1
Zahnärztl Welt 7-8, 477-485, 1997
26. Eichner, K.:
Metallkeramik nach dreißigjähriger Anwendung, Teil 2
Zahnärztl Welt 9, 562-567, 1997
27. Eichner, K.:
Methodische und systemische Ursachen von Fehler in der Metallkeramik
Dent Lab 4, 535- 543, 2000
28. Eichner, K.:
Über die Bindung von keramischen Massen und Edelmetall-Legierungen -
Theorien und optische sowie elektronenmikroskopische Untersuchungen
Dtsch Zahnärztl Z 23, 373-382, 1968
29. Eichner, K.:
Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung, Band 1
Hüthig, Heidelberg, 2000
30. Eichner, K.:
Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung, Band 2
Hüthig, Heidelberg, 2000
31. Finger, W.; Jung, T.; Quast, U.:
Das Gussgefüge nach Vakuum-Druck-Guss und nach Schleuderguss
Dtsch Zahnärztl Z 30, 111-115, 1975

32. Freesmeyer, W. B.; Lindemann, W.:
Verbundfestigkeit zwischen keramischer Masse und NEM-Legierungen in
Abhängigkeit von der Vorbehandlung des Metallgerüsts
Dtsch Zahnärztl Z 37, 288-291, 1982
33. Henning, G.:
Die Metall- Keramik- Bindung
Dent Lab 8, 1065-1071, 1976
34. Hofer, H.; Fischer, J.:
Verarbeitung von Edelmetalllegierungen - Misserfolge und deren Ursachen-
Teil1:Gießen
Quint Zahntech 23, 1369-1375, 1997
35. Hofer, H.; Fischer, J.:
Verarbeitung von Edelmetalllegierungen - Misserfolge und deren Ursachen-Teil
3: Metallkeramik
Quint Zahntech 24, 55-59, 1998
36. Hohmann, A.; Hielscher, W.:
Lehrbuch der Zahntechnik, Band 3
Quintessenz, Berlin, 1993
37. Hohmann, A.; Hielscher, W.:
Zahntechnik in Frage und Antwort
Verlag Neuer Merkur, München, 1995
38. Holdt, R.:
Eigenschaften von Legierungskomponenten
Dtsch Zahnärztl W Spezial 1, 22-24, 1999
39. Janda, R.:
Gläser, Glaskeramiken und Keramiken
Teil 1: Grundlagen
Quint Zahntech 32 (11), 1264- 1273, 2006
40. Janda, R.:
Gläser, Glaskeramiken und Keramiken
Teil 2: Grundlagen
Quint Zahntech 33 (2), 186-194, 2007
41. Kappert, H. F.; Becker, R.; Pollocek, W.:
Prüfung der Biegefestigkeit von Metall-Keramik-Verbundsystemen bei
Verwendung von verschiedenen Dentallegierungen
Dtsch Zahnärztl Z 43, 445-452, 1988

42. Kappert, H. F.:
Moderne Metall- Keramik- Systeme mit Omega 900
Zahnärztl Mitteil 18, 1-8, 1986
43. Kappert, H. F.; Krah, M.:
Dentalkeramiken und zahntechnische Verfahren zur Herstellung von
keramischen Zahnersatz in der Übersicht
Quint Zahntech 6, 666-687, 2001
44. Kappert, H.F.:
Probleme der Gusstechnik aus werkstoffkundlicher Sicht
Zahnärztl Mitteil 20, 2305-2314, 1986
45. Kappert, H. F.; Riedling, W.; Weyhmann, J.:
Eine vergleichende Studie von drei Methoden zur Untersuchung des Metall-
Keramik-Verbundes bei NEM-Legierungen
Dtsch Zahnärztl Z 40, 1179-1186, 1985
46. Kerschbaum, Th.:
Metallkeramische Verblendkronen nach mehrjähriger klinischer Bewährung
Zahnärztl Mitteil 67, 1195, 1977
47. Kerschbaum, Th.; Leempoel, P. J. B.:
Kronen und Brücken – Konsequenzen aus Langzeitergebnissen
In: Fortschritte der zahnärztlichen Prothetik und Werkstoffkunde, Bd. 4
Hanser Verlag München, 109-132, 1989
48. Khalouf, E.:
Einfluss verschiedener Parameter auf die Ergebnisse des SCHWICKERATH-
Versuches
Zahnmed Diss, Berlin, 2003
49. Kleinen, St.:
Zum Einfluss von Metallarmierungen auf die Biegefestigkeit von Keramikinlays
Zahnmed Diss, Berlin 2000
50. Koinig, H.:
Metallkeramik
Verlag Neuer Merkur, 2003
51. Kollmannsperger, P.; Eichner, K.:
Zur Porenbildung in der Grenzschicht keramisch verblendeter Edelmetall-
Dentallegierungen
Dtsch Zahnärztl Z 39: 753-756, 1984

52. Kossel, S.:
Experimentelle Untersuchungen zur qualitativen und quantitativen Bestimmung
des Einflusses verschiedener Gussysteme auf die mechanischen
Eigenschaften von hochgoldhaltigen Dentallegierungen
Zahnmed Diss, Berlin, 2007
53. Krumbholz, K.:
Entwicklung und Eigenschaften der Aufbrennkeramik
Dent Lab 2: 189-194, 1998
54. Krumbholz, K.:
Hydrothermale Keramik- weit mehr als ein Marketingbegriff
Dent Lab 46, 559-560, 1998
55. Krumbholz, K.:
Wärmedehnung keramischer Massen
Dent Lab 2: 1935-1937, 1986
56. Kuga, M.:
Verarbeitungsfehler und deren Lösungen in der Metallkeramik
Quint Zahntech 32 (9), 972- 981, 2006
57. Kyselova, J.; Kysela, B.; Mares, J.:
Der Einfluss der Gussapparate auf das Vorkommen der Defekte in
Dentalgüssen
SMfZ, 403-419, 1959
58. Lenz, J.:
Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an Grenzflächen von
metallkeramischen Systemen
Dtsch Zahnärztl Z 30, 121-125, 1975
59. Lenz, J.; Kessel, S.:
Thermal stresses in metal-ceramic specimens for the ISO crack initiation test
(three-point flexure bond test)
Dent Mater 14 (7): 277-280, 1998
60. Lenz, J.; Schwarz, S.; Schwickerath, H.; Sperner, F.; Schäfer, A.:
Bond strength of metal-ceramic systems in three-point flexure bond test
J Appl Biomat 6:55-64, 1995
61. Lindemann, W.:
Elektronenmikroskopischer und röntgenographischer Nachweis der Haftoxide
auf unedlen Metallen
Dtsch Zahnärztl Z 37, 285-287, 1982

62. Marx, H.:
Die metallkeramische Verbundfestigkeitsprüfung- Ein besonderes
werkstoffkundliches Problem
Zahnärztl Welt 95, 524-527, 1986
63. Marxkors, R.:
Werkstoffe in der zahnärztlichen Praxis
3. Aufl., J. A. Barth, Frankfurt am Main, 1972
64. Marxkors, R., Meiners, H.:
Verblendung von Kronen und Brücken
In: Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde, 4. Aufl., 173-178,
Hanser Verlag München Wien, 1993
- 65: McLaren, E. A., Giordano II, R. A., Pober, R., Abozenda, B.:
Zweiphasige Vollglas- Verblendkeramik
Quint Zahntech 30 (1), 32- 45, 2004
66. McLean, J.W.:
Wissenschaft und Kunst der Dentalkeramik, Band 2
Quintessenz, Berlin- Chicago- Tokio, 1981
67. Medizinisches Wörterbuch:
Psyhyrembel
Nikol Verlagsgesellschaft mbH, Hamburg, 1993
68. Meier, V.:
Untersuchungen zum Einfluss von Modifikationen des Druck- Schertests nach
SCHMITZ- SCHULMEYER auf die Höhe der Messwerte sowie auf die
Messwertstreuung
Zahnmed Diss, Berlin 2001
69. Meiners, H.; Lehmann, K. M.:
Klinische Materialkunde für Zahnärzte
Hanser Verlag, 1998
70. Päßler, K.:
Der dentale Titanguss- Grundlagen, Technologie und werkstoffkundliche
Bewertung
Quint Zahntech 17, 717-726, 1991
71. Päßler, K.; Bestellmeyer, F.; Ohnmacht, P.; Sernetz, F.:
Einflüsse auf die Qualität und Eigenschaften von dentalen Titangüssen
Dent Lab 39, 809-815, 1991
72. Paulino, S., Leal, M., Pagnano, V., Bezzon, O.:
The castibility of pure titanium compared with Ni- Cr and Ni- Cr- Be alloys
J Prosthet Dent, 98, 445- 454, 2007

73. Pfeiffer, P.; Schwickerath, H.; Sommer, Ch. M.:
Festigkeit dentalkeramischer Massen
Zahnärztl Welt 1000, 938-942, 1991
74. Praud, C. ; Bordeaux, B. M. ; Chomet, F. ; Lelievre, F.:
Keramik auf Titan
Dent Lab 52, 1407-1412, 2004
75. Preston, J. D.:
Perspektiven der Dentalkeramik
Berichte vom 4. internationalem Keramik-Symposium
Quintessenz Verlags- GmbH, 1989
76. Reuling, N., Siebert, G. K.:
Keramische Werkstoffe Entwicklungsstand und Bedeutung
Dent Lab 37, 67-71, 1989
77. Rinn, L.:
Die Bedeutung von Gefügedichte und Temperatursteuerung beim
Keramikbrand
Quint. Zahntech. 20, 335-346, 1994
78. Roulet, J.-F. ; Janda, R.:
Keramiksysteme der Zukunft
Quint Zahntech 30, 986-1006, 2004
79. Sachs, L.:
Angewandte Statistik
Springer- Verlag, Berlin- Heidelberg, 2002
80. Sachs, L.:
Statistische Methoden : Planung und Auswertung
Springer- Verlag, Berlin- Heidelberg, 1993
81. Sadeq, A.; Cai, Z.; Woody, R.; Miller, A.:
Effect of interfacial variables on ceramic adherence to cast and machined
commercially pure titanium
J Prosthet Dent, 11- 17, 2003
82. Schäfer, A.; Apel, T.:
Brenngradbestimmung an niedrighschmelzenden Keramiksystemen- eine
obligatorische Maßnahme?
Quint Zahntech 30, 878-892, 2004

83. Schinker, S.:
Vergleich der Verbundfestigkeit unterschiedlicher Verblendkunststoffe auf
verschiedenen Legierungen im Drei- Punkt- Biegeversuch
Zahnmed Diss, Gießen 2001
84. Schmidt, I.:
Vergleich von Gold- Titan- Legierungen verschiedener Hersteller unter dem
Gesichtspunkt der Korrosion
Zahnmed Diss, Berlin 2001
85. Schmitz, K.; Schulmeyer, H.:
Bestimmung der Haftfestigkeit dentaler metallkeramischer Verbundsysteme
Dent Lab 12, 1416-1419, 1975
86. Schwarz, S.; Lenz, J.:
Numerische Untersuchung zur Biegeprüfung des metallkeramischen Verbunds
Zahnärztl Praxis , 50-53, 1988
87. Schwickerath, H.:
Dauerfestigkeit von Metallkeramik
Dtsch Zahnärztl Z 39: 143-145, 1984
88. Schwickerath, H.:
Der Einfluss unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten auf das
Verhalten metallkeramischer Konstruktionen
Dtsch Zahnärztl Z 38, 554-556, 1983
89. Schwickerath, H.:
Einfluss mechanischer Eigenschaften der Legierung auf die Belastbarkeit
metallkeramischer Restaurationen, Teil 1
Zahnärztl Praxis 5: 6-8, 1995
90. Schwickerath, H.:
Festigkeitsverhalten von Dentalkeramik
Dtsch Zahnärztl Z 40, 273-275, 1985
91. Schwickerath, H.:
Materialien für die Aufbrennkeramik, ihre Eigenschaften und ihr Verhalten
Dtsch Zahnärztl Z 33, 837-845, 1978
92. Schwickerath, H.:
Zwischenschichten in der Metallkeramik
Dtsch Zahnärztl Z 37, 281-284, 1982
93. Schwickerath, H.:
Zur Beurteilung der Belastbarkeit von metallkeramischen Restaurationen
Dtsch Zahnärztebl 5, 434-440, 1989

94. Schwickerath, H.:
Zur Biegefestigkeit keramischer Massen
Quint Zahntech 125-128, 1979
95. Schwickerath, H.:
Zur Verbundfestigkeit von Metallkeramik
Dtsch Zahnärztl Z 35, 910, 1980
96. Schwickerath, H.; Mokbel, M. A.:
Grundlagen zur Prüfung des Verbundes Metall- Keramik
Dtsch Zahnärztl Z 38: 949-952, 1983
97. Schwickerath, H.; Molsleh, I.:
Verbundfestigkeit und Korrosionslösungen
Dtsch Zahnärztl Z 40: 1126-1128, 1985
98. Seifert, S.:
Dauerbiegefestigkeit des Verbundes Metall- Kunststoff
Zahnmed Diss, Berlin, 1996
99. Siebert, G.K.:
Dentallegierungen in der zahnärztlichen Prothetik
Hanser Verlag, München- Wien, 1989
100. Siebert, G. K.; Queisser, A.:
Elementverteilung des Verbundes Metall- Keramik im Bereich der Grenzschicht
bei NEM- und EM- Legierungen
Dtsch Zahnärztl Z 40, 1163-1168, 1985
101. Siebert, G. K.; Schwickerath, H.:
Untersuchung über ein neues NEM- Keramik- System – Dentitan-
Dtsch Zahnärztl Z 38, 1029, 1983
102. Strietzel, R.:
Aufbrennfähige Kobalt- Chrom- Legierungen
Dent Lab 49, 1687-1693, 2001
103. Strietzel, R.:
Der Metall- Keramik-Verbund Fehler bei der Verarbeitung
Quint Zahntech 28, 12, 1412- 1421, 2002
104. Strietzel, R.:
Die Werkstoffkunde der Metall- Keramik- Systeme
Verlag Neuer Merkur 2005

105. Strietzel, R.:
Edelmetalllegierungen: der Goldstandard, und trotzdem geht es manchmal schief
Quint Zahntech 33 (8), 966- 980, 2007
106. Strietzel, R.:
Eine neue Technologie zur Produktion von Dentallegierungen
Dent Lab 9, 1433-1438, 1999
107. Strietzel, R.:
Haftoxide sind für den guten Verbund wichtig, aber nicht unproblematisch
Dtsch Zahnärztl W Spezial 1 : 25-27, 1999
108. Strietzel, R.:
Herstellung von metallischen Gerüsten mit Hilfe des BEGO Medifactoring Verfahrens
Quint Zahntech 30, 406- 417, 2004
109. Strietzel, R.:
Nickel- Chrom- Legierungen- Warum nicht ?
Dtsch Zahnärztl W Spezial 3: 24-26, 2000
110. Strietzel, R.:
Physikalische Eigenschaften, Teil 1
Dent Lab 53, 847-851, 2005
111. Strietzel, R.:
Physikalische Eigenschaften, Teil 2
Dent Lab 53, 1015-1020, 2005
112. Strietzel, R.:
Quintessenz der Dentallegierungen
Quint Zahntech 24: 509-517, 1998
113. Suansuwan, N., Swain, MV.:
Characterization of tribiochemically assisted bonding of composites resin to porcelain and metal
J Dent 28 (6), 4415, 1999
114. Suansuwan, N., Swain, MV.:
Application of strain energy release rate to characterize the adhesion at ceramic- metal interfaces
University of Sidney PhD 2001
115. Tauber, M.:
Gerüstgestaltung für metallkeramische Restaurationen
Teil 2: Physikalische Hinweise zur Gerüstgestaltung
Quint Zahntech 32 (4), 384- 392, 2006

116. Tauber, M.:
Gerüstgestaltung für metallkeramische Restaurationen
Teil 4: Die Verbundfestigkeit von Metall und Keramik
Quint Zahntech 32 (9), 1052- 1061, 2006
117. Tesch, U.; Päßler, V.; Mann, E.:
Untersuchungen zum Titan- Keramik- Verbund
Dent Lab 41, 71-74, 1993
118. Thies, M.; Lenz, J.; Schweizerhof, K.:
Wärmespannungen in metallkeramischen Kronen
Teamwork 2/1, 42-59, 1999
119. Tholey, M. J., Stephan, M.:
Haftverbundmechanismen in dentalen Schichtsystemen
Quint Zahntech 33 (2), 160- 168, 2007
120. Tiller, H. J.; Musil, R.:
Der Sandstrahlprozess und seine Einwirkung auf den Oberflächenzustand
von Dentallegierungen (2)
Quint 11, 2151-2158, 1985
121. Tinchert, J.; Marx, R.; Gussone, R.:
Struktur von Keramik für die Titanverblendung
Dtsch Zahnärztl. Z 50, 31-34, 1995
121. Traini, T., Murmura, G., Di Lullo, N., Caputi, S.:
Adherence of investment to Au- Pd- Ag alloy using a vacuum- argon pressure
casting machine
Dent materials 19, 732-738, 2003
122. Troester, P. M.:
Nachuntersuchungen von getragenen metallkeramischen Arbeiten und
klinische sowie labortechnische Folgerungen
Dtsch Zahnärztl Z 32, 959, 1977
123. Van Niekerk, A.:
Gold- und andere Gusslegierungen für Kronen und Brücken
Quint Zahntech 23, 1267-1273, 1997
124. Van Straelen, F.:
Vergleichende Untersuchungen zur Verbundfestigkeit von drei Metall- Keramik-
Verbundkombinationen in Abhängigkeit von den Lagerbedingungen und
Brennzyklen
Zahnmed Diss, Berlin, 1997

125. Vita Zahnfabrik:
Produktinformation Vita Omega 900
Bad Säckingen, 2000
126. Voss, R.:
Die Festigkeit metallkeramischer Kronen
Dtsch Zahnärztl Z 8, 726-731, 1969
127. Voss, R.:
Untersuchungen über die Verblendkrone und ihre mechanische
Widerstandsfähigkeit
Zahnärztl Rdsch 66, 265-268, 1957
128. Voss, R., Eichner, K.:
Orientierende Untersuchungen über die Festigkeit metallkeramischer Kronen
aus neuen Werkstoffen
Dtsch Zahnärztl Z 33, 456-460, 1978
129. Watanabe, Y., Yamanaka, N., Fukui, Y.:
Control of composition gradient in a metal- ceramic functionally graded material
manufactured by the centrifugal method
Composites Part A 29 A Elsevier Science Limited, 595- 601, 1998
130. Weber, H.:
Kritische Wertung der unterschiedlichen Legierungstypen
Medizinische und technologische Aspekte dentaler Alternativlegierungen
Quintessenz, Berlin 1983
131. Weber, K.:
Häufige Fehler in der Metallkeramik
Dent Lab 3, 332-338, 1976
132. Wirz, J.; Schmidli, F.:
Klinische Bewährung von Legierungen, Teil 1
Quint 11, 1875-1877, 1990
133. Wirz, J.; Schmidli, F.:
Klinische Bewährung von Legierungen, Teil 2
Quint 12, 2039-2043, 1990
134. Wirz, J.; Schmidli, F.; Förster, F. W.:
Haftoxide
Quint 45, 1279-1290, 1994

135. Wood, M.; Thompson, G.; Agar, J.:
A comparison of debonding strengths of four metal- ceramic systems with and without opaque porcelain
J Prosthet Dent , 141- 149, 2007
136. Yoda, M. et al.:
Bond strength of binary titanium alloys to porcelain
Biomaterials , 22, 1675-1681, 2001
137. Zinelis, S. ; Tsetsekou, A. ; Papadopoulos, T.:
Thermal expansion and microstructural analysis of experimental metal- ceramic titanium alloys
J Prosthet Dent, 332-338, 2003
138. Zukunft, D.:
Spezielle Metallkunde für Zahntechniker
Ullstein Mosby, Berlin, 1993

9 Anhang

9.1 Messprotokolle und Messstatistiken für alle Gussysteme mit den verwendeten Keramiken

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	12,47	60,48	Gruppe 2
2	14,02	68,00	Gruppe 3
3	17,13	83,08	Gruppe 3
4	16,21	78,62	Gruppe 3
5	16,67	80,85	Gruppe 2
6	15,66	75,95	Gruppe 3
Mittelwert [MPa]:	74,50		
Medianwert [MPa]:	77,29		
Minimalwert [MPa]:	60,48		
Maximalwert [MPa]:	83,08		
Variationskoeffizient [%]:	11,58		
Standardabweichung [MPa]:	1,78		

Tab. 14: Messprotokoll und Messstatistik für Fornax T und Vita Omega 900

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	14,37	69,69	Gruppe 2
2	14,39	69,79	Gruppe 1
3	10,35	50,20	Gruppe 3
4	13,17	63,87	Gruppe 3
5	16,12	78,18	Gruppe 3
6	13,99	67,85	Gruppe 2
Mittelwert [MPa]: 66,60			
Medianwert [MPa]: 68,77			
Minimalwert [MPa]: 50,20			
Maximalwert [MPa]: 78,18			
Variationskoeffizient [%]: 13,96			
Standardabweichung [MPa]: 1,92			

Tab. 15: Messprotokoll und Messstatistik für Fornax T Ivoclar IPS-d.Sign

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	13,80	66,93	Gruppe 2
2	13,66	66,25	Gruppe 3
3	12,90	62,57	Gruppe 2
4	13,51	65,52	Gruppe 2
5	13,20	64,02	Gruppe 2
6	12,76	61,89	Gruppe 3
Mittelwert [MPa]: 64,53			
Medianwert [MPa]: 64,77			
Minimalwert [MPa]: 61,89			
Maximalwert [MPa]: 66,93			
Variationskoeffizient [%]: 3,15			
Standardabweichung [MPa]: 0,42			

Tab. 16: Messprotokoll und Messstatistik für Fornax T und Heraceram/ Heraeus

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	14,40	69,84	Gruppe 1
2	12,04	58,39	Gruppe 1
3	14,45	70,08	Gruppe 1
4	14,25	69,11	Gruppe 1
5	12,98	62,95	Gruppe 2
6	15,30	74,21	Gruppe 1
Mittelwert [MPa]:	67,43		
Medianwert [MPa]:	69,48		
Minimalwert [MPa]:	58,39		
Maximalwert [MPa]:	74,21		
Variationskoeffizient [%]:	8,48		
Standardabweichung [MPa] :	1,18		

Tab. 17: Messprotokoll und Messstatistik für Fornax T und Vintage Halo/Shofu

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	15,97	77,45	Gruppe 1
2	12,52	60,72	Gruppe 3
3	18,51	89,77	Gruppe 1
4	12,62	61,21	Gruppe 1
5	17,23	83,57	Gruppe 3
6	16,21	78,62	Gruppe 2
Mittelwert [MPa]:	75,22		
Medianwert [MPa]:	78,04		
Minimalwert [MPa]:	60,72		
Maximalwert [MPa]:	89,77		
Variationskoeffizient [%]:	15,79		
Standardabweichung [MPa]:	2,45		

Tab. 18: Messprotokoll und Messstatistik für Fornax T und Creation/ Fa. Geller

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	12,02	58,30	Gruppe 1
2	12,82	62,18	Gruppe 3
3	14,68	71,20	Gruppe 1
4	13,82	67,03	Gruppe 1
5	16,87	81,82	Gruppe 2
6	15,02	72,85	Gruppe 1
Mittelwert [MPa]:	68,90		
Medianwert [MPa]:	69,12		
Minimalwert [MPa]:	58,30		
Maximalwert [MPa]:	81,82		
Variationskoeffizient [%]:	12,12		
Standardabweichung [MPa]:	1,72		

Tab. 19: Messprotokoll und Messstatistik für Nautilus MC+ und Vita Omega 900

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	14,49	70,28	Gruppe 3
2	16,55	80,27	Gruppe 3
3	16,42	79,64	Gruppe 3
4	16,00	77,60	Gruppe 3
5	14,21	68,92	Gruppe 3
6	13,76	66,74	Gruppe 3
Mittelwert [MPa]:	73,91		
Medianwert [MPa]:	73,94		
Minimalwert [MPa]:	66,74		
Maximalwert [MPa]:	80,27		
Variationskoeffizient [%]:	8,03		
Standardabweichung [MPa]:	1,22		

Tab. 20: Messprotokoll und Messstatistik für Nautilus MC+ und Ivoclar-IPS d.Sign

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	12,10	58,69	Gruppe 2
2	12,25	59,41	Gruppe 2
3	13,22	64,12	Gruppe 2
4	13,20	64,02	Gruppe 2
5	11,92	57,81	Gruppe 1
6	12,95	62,81	Gruppe 2
Mittelwert [MPa]:	61,14		
Medianwert [MPa]:	61,11		
Minimalwert [MPa]:	57,81		
Maximalwert [MPa]:	64,12		
Variationskoeffizient [%]:	4,61		
Standardabweichung [MPa]:	0,58		

Tab. 21: Messprotokoll und Messstatistik für Nautilus MC+ und Heraceram/Heraeus

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	13,15	63,78	Gruppe 1
2	14,38	69,74	Gruppe 1
3	12,10	58,69	Gruppe 1
4	13,68	66,35	Gruppe 1
5	13,71	66,49	Gruppe 1
6	14,67	71,15	Gruppe 1
Mittelwert [MPa]:	66,03		
Medianwert [MPa]:	66,42		
Minimalwert [MPa]:	63,78		
Maximalwert [MPa]:	71,15		
Variationskoeffizient [%]:	6,76		
Standardabweichung [MPa]:	0,92		

Tab. 22: Messprotokoll und Messstatistik für Nautilus MC+ und Vintage Halo/ Shofu

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	16,22	78,67	Gruppe 1
2	14,87	72,12	Gruppe 3
3	14,18	68,77	Gruppe 2
4	14,22	68,97	Gruppe 1
5	15,38	74,59	Gruppe 1
6	12,20	59,17	Gruppe 2
Mittelwert [MPa]:	70,38		
Medianwert [MPa]:	70,55		
Minimalwert [MPa]:	59,17		
Maximalwert [MPa]:	78,67		
Variationskoeffizient [%]:	9,40		
Standardabweichung [MPa]:	1,36		

Tab. 23: Messprotokoll und Messstatistik für Nautilus MC+ und Creation/ Fa. Geller

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	15,66	75,95	Gruppe 2
2	15,13	73,38	Gruppe 2
3	15,64	75,85	Gruppe 2
4	14,56	70,62	Gruppe 1
5	15,10	73,24	Gruppe 2
6	17,56	84,29	Gruppe 3
Mittelwert [MPa]:	75,56		
Medianwert [MPa]:	74,62		
Minimalwert [MPa]:	70,62		
Maximalwert [MPa]:	84,29		
Variationskoeffizient [%]:	6,66		
Standardabweichung [MPa]:	1,04		

Tab. 24: Messprotokoll und Messstatistik für Nautilus T und Vita Omega 900

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	15,34	74,40	Gruppe 3
2	14,70	71,30	Gruppe 3
3	12,62	61,21	Gruppe 3
4	16,58	80,41	Gruppe 2
5	14,79	71,73	Gruppe 3
6	13,77	66,78	Gruppe 3
Mittelwert [MPa]:	70,97		
Medianwert [MPa]:	71,52		
Minimalwert [MPa]:	61,21		
Maximalwert [MPa]:	80,41		
Variationskoeffizient [%]:	9,22		
Standardabweichung [MPa]:	1,35		

Tab. 25: Messprotokoll und Messstatistik für Nautilus T und Ivoclar IPS-d.Sign

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	14,63	70,96	Gruppe 2
2	13,29	64,46	Gruppe 2
3	10,15	49,23	Gruppe 2
4	11,98	58,10	Gruppe 3
5	12,33	59,18	Gruppe 2
6	15,59	75,61	Gruppe 2
Mittelwert [MPa]:	62,92		
Medianwert [MPa]:	61,82		
Minimalwert [MPa]:	49,23		
Maximalwert [MPa]:	75,61		
Variationskoeffizient [%]:	15,02		
Standardabweichung [MPa]:	1,95		

Tab. 26: Messprotokoll und Messstatistik für Nautilus T und Heraceraam/Heraeus

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	15,12	73,33	Gruppe 1
2	15,70	76,15	Gruppe 1
3	16,92	82,06	Gruppe 1
4	14,88	72,17	Gruppe 1
5	14,51	70,37	Gruppe 2
6	14,47	70,17	Gruppe 1
Mittelwert [MPa]:	74,04		
Medianwert [MPa]:	72,75		
Minimalwert [MPa]:	70,17		
Maximalwert [MPa]:	82,06		
Variationskoeffizient [%]:	6,07		
Standardabweichung [MPa]:	0,93		

Tab. 27: Messprotokoll und Messstatistik für Nautilus T und Vintage Halo/Shofu

Probennummer	Kraft F in N	Verbundfestigkeit in MPa	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	16,49	79,98	Gruppe 1
2	15,24	73,91	Gruppe 1
3	12,55	60,87	Gruppe 1
4	14,15	68,63	Gruppe 1
5	14,38	69,74	Gruppe 1
6	14,62	70,91	Gruppe 1
Mittelwert [MPa]:	70,67		
Medianwert [MPa]:	70,33		
Minimalwert [MPa]:	60,87		
Maximalwert [MPa]:	79,98		
Variationskoeffizient [%]:	8,90		
Standardabweichung [MPa]:	1,30		

Tab. 28: Messprotokoll und Messstatistik für Nautilus T und Creation/ Fa. Geller

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	12,27	59,51	Gruppe 3
2	15,51	75,22	Gruppe 3
3	12,15	58,93	Gruppe 2
4	11,88	57,62	Gruppe 3
5	11,49	55,73	Gruppe 3
6	13,36	64,80	Gruppe 1
Mittelwert [MPa]: 61,97			
Medianwert [MPa]: 59,22			
Minimalwert [MPa]: 55,73			
Maximalwert [MPa]: 75,22			
Variationskoeffizient [%]: 11,55			
Standardabweichung [MPa]: 1,48			

Tab. 29: Messprotokoll und Messstatistik für Fornax G und Vita Omega 900

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	14,40	69,84	Gruppe 2
2	11,13	53,98	Gruppe 1
3	14,72	71,39	Gruppe 3
4	11,66	56,55	Gruppe 3
5	13,23	64,17	Gruppe 3
6	11,74	56,94	Gruppe 3
Mittelwert [MPa]: 62,15			
Medianwert [MPa]: 60,56			
Minimalwert [MPa]: 53,98			
Maximalwert [MPa]: 71,39			
Variationskoeffizient [%]: 11,90			
Standardabweichung [MPa]: 1,52			

Tab. 30: Messprotokoll und Messstatistik für Fornax G und Ivoclar IPS-d.Sign

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	12,76	61,89	Gruppe 1
2	14,13	68,53	Gruppe 3
3	10,39	50,39	Gruppe 1
4	12,16	58,98	Gruppe 3
5	14,39	69,79	Gruppe 3
6	14,37	69,69	Gruppe 2
Mittelwert [MPa]: 63,21			
Medianwert [MPa]: 65,21			
Minimalwert [MPa]: 50,39			
Maximalwert [MPa]: 69,79			
Variationskoeffizient [%]: 12,21			
Standardabweichung [MPa]: 1,59			

Tab. 31: Messprotokoll und Messstatistik für Fornax G und Heraceram/ Heraeus

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	14,23	69,02	Gruppe 1
2	14,93	72,41	Gruppe 1
3	13,66	66,25	Gruppe 1
4	14,20	68,87	Gruppe 1
5	14,83	71,93	Gruppe 1
6	15,68	76,05	Gruppe 1
Mittelwert [MPa]: 70,76			
Medianwert [MPa]: 70,48			
Minimalwert [MPa]: 66,25			
Maximalwert [MPa]: 76,05			
Variationskoeffizient [%]: 4,86			
Standardabweichung [MPa]: 0,71			

Tab. 32: Messprotokoll und Messstatistik für Fornax G und Vintage Halo/ Shofu

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	13,44	65,18	Gruppe 2
2	13,91	67,46	Gruppe 3
3	14,27	69,21	Gruppe 2
4	11,19	54,27	Gruppe 3
5	17,90	86,82	Gruppe 3
6	9,88	47,92	Gruppe 2
Mittelwert [MPa]:	65,14		
Medianwert [MPa]:	66,32		
Minimalwert [MPa]:	54,27		
Maximalwert [MPa]:	86,82		
Variationskoeffizient [%]:	20,66		
Standardabweichung [MPa]:	2,77		

Tab. 33: Messprotokoll und Messstatistik für Fornax G und Creation/ Fa. Geller

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	17,87	86,67	Gruppe 1
2	15,86	76,92	Gruppe 1
3	15,12	73,33	Gruppe 1
4	17,16	83,23	Gruppe 2
5	20,05	97,24	Gruppe 3
6	15,46	74,98	Gruppe 2
Mittelwert [MPa]:	82,06		
Medianwert [MPa]:	80,08		
Minimalwert [MPa]:	73,33		
Maximalwert [MPa]:	97,24		
Variationskoeffizient [%]:	10,98		
Standardabweichung [MPa]:	1,86		

Tab. 34: Messprotokoll und Messstatistik für Fundor T und Vita Omega 900

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	12,79	62,03	Gruppe 2
2	14,32	69,45	Gruppe 3
3	9,12	44,23	Gruppe 3
4	13,73	66,59	Gruppe 2
5	12,64	61,30	Gruppe 2
6	13,24	64,21	Gruppe 3
Mittelwert [MPa]:	61,30		
Medianwert [MPa]:	63,12		
Minimalwert [MPa]:	44,23		
Maximalwert [MPa]:	69,45		
Variationskoeffizient [%]:	14,50		
Standardabweichung [MPa]:	1,83		

Tab. 35: Messprotokoll und Messstatistik für Fundor T und Ivoclar IPS-d.Sign

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3
1	16,86	81,77	Gruppe 2
2	12,32	59,75	Gruppe 3
3	12,35	59,90	Gruppe 2
4	12,21	59,22	Gruppe 3
5	14,90	72,27	Gruppe 1
6	13,19	63,97	Gruppe 2
Mittelwert [MPa]:	66,15		
Medianwert [MPa]:	61,94		
Minimalwert [MPa]:	59,22		
Maximalwert [MPa]:	81,77		
Variationskoeffizient [%]:	13,74		
Standardabweichung [MPa]:	1,87		

Tab. 36: Messprotokoll und Messstatistik für Fundor T und Heraceram/ Heraeus

Probennummer	Kraft F [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3										
1	15,96	77,41	Gruppe 1										
2	13,89	67,37	Gruppe 1										
3	15,76	76,44	Gruppe 2										
4	15,46	74,98	Gruppe 1										
5	14,13	68,53	Gruppe 2										
6	14,47	70,18	Gruppe 1										
<table border="1"> <tr> <td>Mittelwert [MPa]:</td> <td>72,49</td> </tr> <tr> <td>Medianwert [MPa]:</td> <td>72,58</td> </tr> <tr> <td>Minimalwert [MPa]:</td> <td>67,37</td> </tr> <tr> <td>Maximalwert [MPa]:</td> <td>77,41</td> </tr> <tr> <td>Variationskoeffizient [%]:</td> <td>5,96</td> </tr> </table>				Mittelwert [MPa]:	72,49	Medianwert [MPa]:	72,58	Minimalwert [MPa]:	67,37	Maximalwert [MPa]:	77,41	Variationskoeffizient [%]:	5,96
Mittelwert [MPa]:	72,49												
Medianwert [MPa]:	72,58												
Minimalwert [MPa]:	67,37												
Maximalwert [MPa]:	77,41												
Variationskoeffizient [%]:	5,96												
Standardabweichung [MPa]: 0,89													

Tab. 37: Messprotokoll und Messstatistik für Fundor T und Vintage Halo/ Shofu

Probennummer	Kraft [N]	Verbundfestigkeit [MPa]	Restkeramik nach Gruppeneinteilung 1-3												
1	12,36	59,95	Gruppe 1												
2	14,72	71,39	Gruppe 1												
3	15,89	77,07	Gruppe 2												
4	16,93	82,11	Gruppe 1												
5	19,03	92,30	Gruppe 1												
6	15,24	73,91	Gruppe 1												
<table border="1"> <tr> <td>Mittelwert [MPa]:</td> <td>76,12</td> </tr> <tr> <td>Medianwert [MPa]:</td> <td>75,49</td> </tr> <tr> <td>Minimalwert [MPa]:</td> <td>59,95</td> </tr> <tr> <td>Maximalwert [MPa]:</td> <td>92,30</td> </tr> <tr> <td>Variationskoeffizient [%]:</td> <td>14,24</td> </tr> <tr> <td>Standardabweichung [MPa]:</td> <td>2,23</td> </tr> </table>				Mittelwert [MPa]:	76,12	Medianwert [MPa]:	75,49	Minimalwert [MPa]:	59,95	Maximalwert [MPa]:	92,30	Variationskoeffizient [%]:	14,24	Standardabweichung [MPa]:	2,23
Mittelwert [MPa]:	76,12														
Medianwert [MPa]:	75,49														
Minimalwert [MPa]:	59,95														
Maximalwert [MPa]:	92,30														
Variationskoeffizient [%]:	14,24														
Standardabweichung [MPa]:	2,23														

Tab. 38: Messprotokoll und Messstatistik für Fundor T und Creation/ Fa. Geller

9.2 Brenntabellen für die verwendeten Keramiken

Brenntabelle für Heraceram Heraeus	Washbrand	Opakerbrand	1.Dentinbrand	2.Dentinbrand	Glanzbrand
Vorwärmtemperatur [°C]	600	600	600	600	600
Vorwärmzeit [min]	6	6	5	5	4
Temperaturanstieg [°C/min]	100	100	100	100	100
Endtemperatur[°C]	880	880	860	850	850
Haltezeit [min]	1	1	1	1	0,7
Vakuumstart [°C]	600	600	600	600	-
Vakuumstop [°C]	880	880	860	850	-

Tab. 39: Brenntabelle für die Keramik Heraceram/ Heraeus

Brenntabelle für Vita Omega 900	Washbrand	Opakerbrand	1.Dentinbrand	2.Dentinbrand	Glanzbrand
Vorwärmtemperatur [°C]	600	600	600	600	600
Vorwärmzeit [min]	2	2	2	6	6
Temperaturanstieg [°C/min]	55	55	55	55	55
Endtemperatur[°C]	900	900	900	900	890
Haltezeit [min]	2	2	1	1	1
Vakuumstart [°C]	600	600	600	600	600
Vakuumstop [°C]	899	899	899	899	889

Tab. 40: Brenntabelle für die Keramik Vita Omega 900

Brenntabelle für d.Sign	Washbrand	Opakerbrand	1.Dentinbrand	2.Dentinbrand	Glanzbrand
Vorwärmtemperatur [°C]	403	403	403	403	403
Vorwärmzeit [min]	6	6	5	4	4
Temperaturanstieg [°C/min]	60	60	60	60	60
Endtemperatur[°C]	900	900	870	870	870
Haltezeit [min]	1	1	1	1	0,7
Vakuumstart [°C]	450	450	450	450	450
Vakuumstop [°C]	899	899	869	869	869

Tab. 41: Brenntabelle für die Keramik Ivoclar IPSd.Sign

Brenntabelle für Creation	Washbrand	Opakerbrand	1.Dentinbrand	2.Dentinbrand	Glanzbrand
Vorwärmtemperatur [°C]	600	600	580	580	600
Vorwärmzeit [min]	2	2	6	4	2
Temperaturanstieg [°C/min]	80	80	55	55	55
Endtemperatur[°C]	980	950	920	910	930
Haltezeit [min]	1	1	1	1	-
Vakuumstart [°C]	600	600	580	580	600
Vakuumstop [°C]	980	950	920	910	930

Tab. 42: Brenntabelle für die Keramik Creation/ Fa. Geller

Brenntabelle für Vintage Halo	Washbrand	Opakerbrand	1.Dentinbrand	2.Dentinbrand	Glanzbrand
Vorwärmtemperatur [°C]	650	650	650	650	650
Vorwärmzeit [min]	3	3	5	5	4
Temperaturanstieg [°C/min]	60	60	60	60	60
Endtemperatur[°C]	950	940	910	905	900
Haltezeit [min]	1	1	-	-	-
Vakuumstart [°C]	650	650	650	650	-
Vakuumstop [°C]	950	940	910	905	-

Tab. 43: Brenntabelle für die Keramik Vintage Halo/ Shofu

10 Danksagung

Ich danke ganz besonders Herrn PD Dr. R. Strietzel für die Überlassung des Themas und die fachliche Unterstützung, die mir jederzeit zuteil wurde.

Der Firma BEGO danke ich für die Bereitstellung der Materialien.

Ich danke den Mitarbeitern der Firma BEGO für die Unterstützung bei der Anfertigung der Gussobjekte und Durchführung des Drei-Punkt-Biegeversuchs nach SCHWICKERATH, ganz besonders Frau Monika Poppinga, Frau Elvira Lier und Herrn Ralf Kröger.

Des weiteren möchte ich mich bei Frau Bölling bedanken, die mich am Lichtmikroskop und bei der Vorbereitung der Proben für das Rasterelektronenmikroskop unterstützte.

Frau Kähler bin ich sehr zu Dank verpflichtet für den Einsatz am Rasterelektronenmikroskop und die EDX- Analyse.

11 Lebenslauf

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

Erklärung

„Ich, Caroline Reinsch, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema: Vergleichende Untersuchung zur Verbundfestigkeit von Metall-Keramik-Kombinationen in Verbindung mit herkömmlicher und niedrigschmelzender Keramik bei Verwendung unterschiedlicher Gussysteme selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.“

Datum

Unterschrift