

Aus der Abteilung für Orale Struktur- und Entwicklungsbiologie
des Instituts für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Einfluss des Lötens bzw. Laserschweißens
auf die Verbundfestigkeit von
Metall-Keramik-Systemen**

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Nicolas Simon

aus Berlin

Gutachter: 1. Priv.-Doz. Dr. R. Strietzel
 2. Prof. Dr. K. Böning
 3. Prof. Dr. J. M. Setz

Datum der Promotion: 16.05.2010

1	EINLEITUNG	6
2	SCHRIFTTUM	7
2.1	Dentallegierungen	7
2.1.1	Aufbrennlegierungen	7
2.1.1.1	Cobalt-Chrom- und Nickel-Chrom-Legierungen	9
2.1.2	Lote	11
2.1.3	Schweißzusatzwerkstoffe	11
2.1.4	Physikalische Eigenschaften	12
2.1.5	Chemische Eigenschaften	13
2.1.5.1	Korrosion	13
2.1.6	Fügbarekeit Edelmetall-, Nichtedelmetall-Legierungen	14
2.2	Dentalkeramik	15
2.2.1	Aufbrennkeramiken	17
2.3	Metall-Keramik-Systeme	17
2.3.1	Verbund zwischen Metall und Keramik	17
2.3.2	Verbund auf gefügten Gerüsten	19
2.3.2.1	Gelötete Gerüste	19
2.3.2.2	Lasergeschweißte Gerüste	20
2.3.3	Tests zur Bestimmung der Verbundfestigkeit	21
2.3.3.1	Biegeversuche:	21
2.3.3.2	Abscherversuche	22
2.4	Fügetechniken	23
2.4.1	Löten	23
2.4.2	Laserschweißen	26
2.4.2.1	Allgemeines	26
2.4.2.2	Funktionsprinzip des Lasers	27
2.4.2.3	Vorteile	28
2.4.3	Kleben	29
3	MATERIAL UND METHODE	31
3.1	Materialien	31
3.1.1	Verwendete Legierungen	31
3.1.2	Verblendkeramik	32

3.2	Herstellung der Prüfkörper	33
3.2.1	Herstellung der Metallgerüste	35
3.2.2	Verblenden mit Keramik	39
3.3	Prüfmethode	41
3.3.1	Hauptversuch	41
3.3.2	Auswertung des Ergebnisses.....	41
3.3.3	Mikroskopische Untersuchungen	43
3.4	Statistische Verfahren	44
4	ERGEBNISSE	46
4.1	Ergebnisse des Dreipunkt-Biegeverbundtests nach SCHWICKERATH	46
4.1.1	Ergebnisse Wirobond® 280	46
4.1.2	Ergebnisse Wirobond® LFC	49
4.1.3	Ergebnisse Wirocer® plus	52
4.2	Oberflächenuntersuchungen	55
4.2.1	Aufsicht.....	55
4.2.2	Längsschliffe – Keramikblock abgelöst.....	58
4.2.3	Längsschliffe – mit Keramikblock.....	60
5	DISKUSSION	62
5.1	Fehlerdiskussion	62
5.1.1	Prüfkörperherstellung.....	62
5.1.2	Eignung der Methode.....	65
5.1.3	Messfehler.....	66
5.2	Diskussion der Ergebnisse	67
5.2.1	Diskussion der Messwerte	67
5.2.1.1	Ungefügte Serien.....	68
5.2.1.2	Gelötete Serien.....	69
5.2.1.3	Lasergeschweißte Serien.....	70
5.2.2	Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchung	72
5.3	Klinische Bedeutung und Schlussfolgerung	75
5.3.1	Für den Zahntechniker	75
5.3.2	Für den Zahnarzt und Patienten	76
5.3.3	Ausblick	77

Inhaltsverzeichnis	5
6 ZUSAMMENFASSUNG	78
6.1 Summary	80
7 LITERATURVERZEICHNIS	82
8 ANHANG	90
8.1 Verwendete Geräte und Zusatzmaterialien	90
8.2 Messwerte und beschreibende Statistik	91
8.3 Danksagung	105
8.4 Lebenslauf	106
8.5 Erklärung	107

1 Einleitung

Der Einstückguss ist hinsichtlich der werkstofflichen Zuverlässigkeit und Langlebigkeit sicherlich der bevorzugte Zustand eines Gussobjektes [81]. Jedoch ist er aus technischen Gründen nicht immer realisierbar oder aus finanziellen Gründen nicht immer sinnvoll, so dass Fügemethoden dann unumgänglich sind.

Trotz Alternativen (passiver Sitz durch Fräsverfahren [74] oder Funkenerosion [31]) ist es heute in der Implantatprothetik oft nötig, weitspannigen Zahnersatz aus Gründen nicht optimaler Passung zu trennen und anschließend wieder zu fügen. Dies gilt sowohl für festsitzenden [10, 41] als auch für kombinierten Zahnersatz [57]. Des Weiteren können Gerüste, die aus verschiedenen Legierungen bestehen, nicht in einem Guss hergestellt werden, was insbesondere den kombinierten Zahnersatz betrifft. Hierbei spielt auch das Anfügen von konfektionierten Verbindungselementen eine Rolle [16, 91]. Reparaturen nach Brüchen von Gerüsten können mit Hilfe von Fügetechniken durchgeführt werden, ohne dass eine Neuanfertigung notwendig ist. Löcher in Gerüsten, die durch Fehler beim Ausarbeiten oder durch Gussunzulänglichkeiten (z. B. Lunker) entstanden sind, werden oft nicht *lege artis* durch Lötungen verschlossen [50, 121].

Fügemethoden gehören zum zahntechnischen Alltag. Sollen die gelöteten oder laser-geschweißten Gerüste im Fügebereich keramisch verblendet werden, liegt für den Metall-Keramik-Verbund eine andere Situation vor. Hier stellt sich die Frage, ob diese Fügemethoden den Verbund negativ beeinflussen. Schließlich ist das Ziel, dass Restaurationen jahrelange funktionelle und ästhetische Haltbarkeit und Zuverlässigkeit beweisen. Darüber hinaus besteht die Forderung nach biologischer Unbedenklichkeit. Dies soll sowohl für den Einstückguss als auch für den gefügten Zahnersatz gelten.

Diese Arbeit soll mit Hilfe des Dreipunkt-Biegeverbundtests nach SCHWICKERATH zeigen, welchen Einfluss das Löten bzw. Laserschweißen auf die Scher-Verbundfestigkeit von Keramik an verschiedenen edelmetallfreien Aufbrennlegierungen hat.

2 Schrifttum

2.1 Dentallegierungen

Legierungen sind Gemische von Metallen, die geschmolzen ineinander löslich sind und beim Erstarren Mischkristalle bilden. Darin können auch Nicht-Metalle enthalten sein [27, 123]. Sinn des Mischens eines Reinmetalls mit anderen Stoffen ist die Optimierung der Eigenschaften. So können gewünschte mechanische und chemische Werte erreicht werden, die vom Reinmetall nicht erfüllt werden. Dies betrifft Größen wie z. B. Härte, Elastizitätsmodul (E-Modul), Dehngrenze, Zugfestigkeit, Korrosionsfestigkeit oder das Schmelzintervall [27].

Legierungen besitzen keinen einheitlichen Schmelzpunkt wie Reinmetalle oder eutektische Legierungen sondern ein Schmelzintervall. Dieses wird zur festen Phase hin durch den Soliduspunkt und zur flüssigen Phase hin durch den Liquiduspunkt begrenzt. Die Größe des Schmelzintervalls ist maßgeblich für die Gusstemperatur, die Wahl der Verblendkeramik und die Wahl des Lotes beim Fügen.

Da Dentallegierungen über einen langen Zeitraum in der Mundhöhle inkorporiert sind, müssen sie den dortigen mechanischen, thermischen, elektrochemischen und mikrobiellen Gegebenheiten standhalten und biologisch verträglich sein [59].

Für weiterführende Literatur hinsichtlich der Dentallegierungen im Allgemeinen wird auf die entsprechenden Lehrbücher verwiesen [27, 93, 98].

2.1.1 Aufbrennlegierungen

Innerhalb der aufbrennfähigen Legierungen lassen sich zwei große Gruppen unterteilen: Edelmetall- (EM-) Legierungen (Gold, Palladium und Silber als Basis) sowie Nicht-edelmetall- und edelmetallfreie (NEM-/EMF-) Legierungen (Cobalt, Nickel, Titan und Eisen als Basis).

Für die Verblendmöglichkeit mit Keramik müssen Legierungen folgende Bedingungen erfüllen [25, 98]; darüber hinaus gilt hier die Norm DIN EN ISO 9693 [18]:

- Hohe mechanische Festigkeit: Verblendkeramiken können elastische Verformungen des Legierungsgerüsts nicht nachvollziehen und drohen dann abzuplatzen. Je höher

der E-Modul einer Legierung ist, desto höher ist ihr Widerstand gegenüber einer elastischen Verformung bei Krafteinwirkung [87].

- Hohes Schmelzintervall: Der Soliduspunkt der Legierung muss ca. 150 °C über der Brenntemperatur der Verblendkeramik liegen, um dabei Verzüge des Legierungsgerüsts zu vermeiden. Je größer diese Temperaturdifferenz ist, desto warmfester ist eine Legierung [48, 59].
- Verbundmöglichkeit zur Keramik: Um ein Metall-Keramik-Verbundsystem auszubilden, müssen Verblendkeramik und Legierung eine mechanische, adhäsive und chemische Verbindung eingehen. Bei NEM/EMF-Legierungen und Titan geschieht der chemische Haftverbund durch die Passivierungsschicht. Die Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) von Legierung und Keramik müssen aufeinander abgestimmt sein.
- Chemische Beständigkeit: Legierung und Keramik in das Mundhöhlenmilieu eingebracht sollen keine unerwünschten Wechselwirkungen (Korrosion, Verfärbungen, allergische Reaktionen) mit den Geweben hervorrufen – sie sollten biotolerabel sein. Ebenso dürfen bei Kombinationen verschiedener Legierungen in der Mundhöhle keine Korrosionserscheinungen auftreten.
- Fügbarkeit: Die Gerüste müssen laserschweißbar und lötbar (vor und nach dem keramischen Brand) sein. Dies ist z.B. bei Reparaturen notwendig oder um Passungen zu erreichen.

EM-Legierungen	NEM/EMF-Legierungen
Gold und Gold-Legierungen <ul style="list-style-type: none"> • Rein-Gold (Galvano-Technik) • hochgoldhaltig • goldreduziert 	Eisen-Legierungen <ul style="list-style-type: none"> • Stähle
Palladium-Legierungen <ul style="list-style-type: none"> • kupferhaltige • silberhaltige 	Nickel-Legierungen <p>Nickel-Chrom-Legierungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • mit Cr-Gehalt < 15 % • mit Cr-Gehalt > 20 % <p>Nickel-Titan-Legierungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nitinol-analoge Legierungen
Silber-Legierungen <ul style="list-style-type: none"> • Silber-Palladium-Legierungen • Silber-Gold-Legierungen 	Cobalt-Legierungen <ul style="list-style-type: none"> • für die Modellgusstechnik • für festsitzenden Zahnersatz
	Titan und Titan-Legierungen <ul style="list-style-type: none"> • Rein-Titan • Titan-Legierungen

Tab. 1: Einteilung der Dentallegierungen nach ihrer Zusammensetzung (Gold und Titan sind als Reinmetalle neben den Legierungen mit aufgeführt) [98]

Innerhalb dieser Gruppen differenzieren sich die EM-Legierungen noch nach der Möglichkeit der Keramikverblendung (Aufbrennfähigkeit genannt). NEM-Legierungen können Spuren von Edelmetallen enthalten, wohingegen EMF-Legierungen völlig frei davon sind.

2.1.1.1 Cobalt-Chrom- und Nickel-Chrom-Legierungen

Die Anforderungen an Cobalt- und Nickel-Basis-Legierungen sind in der Norm DIN EN ISO 22674 [21] festgehalten. Werden diese Legierungen keramisch verblendet, müssen sie zudem die Norm DIN EN ISO 9693 [18] erfüllen. Ihr Indikationsbereich deckt im Großen und Ganzen den von EM-Legierungen ab. Ihr preislicher Vorteil gegenüber EM-Legierungen macht sie sehr attraktiv [62]. Die keramische Verblendbarkeit durch eine ausreichend hohe Scher-Verbundfestigkeit ist gegeben (Literaturwerte: Tab. 2). Die Hauptbestandteile der Legierungen (Cobalt, Nickel) legen die grundlegen-

den Eigenschaften fest. Zur weiteren Verbesserung werden zusätzliche Elemente hinzulegiert (z. B. Chrom, Eisen, Niob, Molybdän, Kohlenstoff, Bor oder Stickstoff) [98].

Chrom spielt zwei wichtige Rollen:

- Bei der Korrosionsbeständigkeit: Aufgrund der hohen Sauerstoff-Affinität bildet sich ähnlich wie bei Titan innerhalb von kürzester Zeit eine Oxidschicht an der Oberfläche aus – die Passivierungsschicht. Dies kommt einer Veredelung der Legierung gleich. Der Chrom-Anteil sollte 20 % nicht unterschreiten. Die Elemente Molybdän und Wolfram sind hierbei auch von Bedeutung. Die empirische Wirksumme PRI (pitting resistance index) bringt die Korrosionsresistenz zum Ausdruck: $PRI = Cr + 3,3(Mo + 0,5W) + 0,25N > 30$. Je höher der Wert, desto korrosionsresistenter verhält sich die Legierung [38, 88].
- Beim Metall-Keramik-Verbund: Bei den CoCr-Legierungen sind die Modellgusslegierungen von denen für festsitzenden Zahnersatz zu unterscheiden, die aufbrennfähig sind. Letztere haben einen auf die Keramik abgestimmten WAK, da es ansonsten zu Sprüngen und Abplatzungen der Verblendung kommen kann. Des Weiteren ist die durch die Chromoxide gebildete Passivierungsschicht für den chemischen Verbund zur Keramik verantwortlich [93].

Cobalt-Chrom-Legierungen zeichnen sich durch Eigenschaften wie einen hohen E-Modul, eine hohe Verschleißfestigkeit und eine hohe Steifigkeit aus. Ihre Korrosionsbeständigkeit ist mit EM-Legierungen vergleichbar, wenn ein ausreichend hoher Chrom- und Molybdän-Anteil vorhanden ist (s.o.!) [59, 105]. Die Wärmeleitfähigkeit ist geringer als bei EM-Legierungen. Durch die höheren Festigkeitswerte können die Gerüste gezielter gestaltet werden als bei EM-Legierungen [99]. Die Aufbrennlegierungen verfügen über eine hohe Warmfestigkeit, da ihr Soliduspunkt mehr als 200 °C höher liegt als die Brenntemperatur der Keramik. Für die mechanischen Eigenschaften ist neben der chemischen Zusammensetzung der Legierung auch ihre Struktur verantwortlich. Die Cobalt-Chrom-Legierungen für Kronen und Brücken unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihre Kohlenstoff-Freiheit von den härteren Modellgusslegierungen. Dies spielt bei der Fügbarkeit eine Rolle [62] (vgl. Kap. 2.1.6). Durch Zulegieren der Elemente Mangan oder Eisen erhöht sich der WAK, wodurch das Verblenden mit Low Fusing Ceramics (LFC-Massen) möglich wird [99].

Nickel-Chrom-Legierungen kommen fast ausschließlich als aufbrennfähige Legierungen für festsitzenden Zahnersatz zum Einsatz. Das Schmelzintervall von Nickel-Chrom- liegt niedriger als bei Cobalt-Chrom-Legierungen. Beträgt der Chrom-Anteil unter 15 % und der Molybdän-Anteil unter 4 %, ist eine genügende Korrosionsresistenz und Mundbeständigkeit nicht gewährleistet [34, 92, 97, 118]. So sollte der Chrom-Anteil größer als 20 % sein. Beryllium wird als Bestandteil wegen seiner Toxizität und wegen des Korrosionsverhaltens nicht mehr empfohlen [8, 27, 59, 97]. Aufgrund einer teilweise psychologisch motivierten Nickel-Angst bieten einige Hersteller in Deutschland keine Nickel-Basis-Legierungen mehr an [38].

2.1.2 Lote

Unter Lot versteht man eine als Zusatzmetall zum Löten geeignete Legierung, z. B. in Form von Drähten [28]. Der Unterschied besteht darin, dass zur Absenkung des Schmelzintervalls für den Lötvorgang Elemente mit niedrigeren Schmelzpunkten hinzugesetzt werden [41]: Bei NEM/EMF-Loten sind das Silicium, Bor und Eisen, bei EM-Loten Silber, Kupfer und Zink. Es werden hochschmelzende Lote (Arbeitstemperatur 1000 – 1200 °C) und niedrig schmelzende Lote (700 – 1000 °C) für Lötungen nach dem Keramikbrand unterschieden [27]. Hinsichtlich der Schmelzintervalle und des Korrosionsverhaltens müssen Lot, Basislegierung und Verblendkeramik aufeinander abgestimmt sein. Durch die unterschiedliche Zusammensetzung besitzen Lote andere WAK und E-Moduln als die Grundwerkstoffe. Daher sollten Lotflächen unter Keramikverblendungen möglichst klein gehalten werden. Weiteres s. Kap. 2.4.1.

2.1.3 Schweißzusatzwerkstoffe

Das zum Schweißen verwendete Material hat im Gegensatz zu Loten eine sehr ähnliche oder identische Zusammensetzung und WAK im Vergleich zur zu schweißenden Legierung. Es werden keine zusätzlichen Elemente hinzulegiert. Dadurch erreicht die Schweißstelle eine mit der Gusslegierung vergleichbare Korrosionsbeständigkeit. Die Verwendung von zusätzlichen Schweiß-Drähten soll eine Verjüngung der Schweißnähte verhindern. Aufgrund der Versprödungsgefahr muss der Schweißzusatzwerkstoff kohlenstofffrei sein [62].

2.1.4 Physikalische Eigenschaften

- **E-Modul:** Der Elastizitätsmodul ist ein Maß für die Steifigkeit eines Materials. Er ist derjenige Widerstand, den eine Probe einer elastischen (reversiblen) Verformung entgegensetzt. Die Spannung wird in GPa angegeben. Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm ist der E-Modul die Steigung im geraden Teil der Kurve. In diesem Teil gilt das Hook'sche Gesetz. In Metall-Keramik-Systemen sollte der E-Modul der Legierung hoch sein, da die Verblendkeramik Gerüstverformungen, selbst elastische, nicht nachvollziehen kann und zu springen bzw. abzuplatzen droht. In der Praxis bedeutet ein hoher E-Modul Vorteile für weitspannige Brückenkonstruktionen und Modellgussprothesen. NEM/EMF-Legierungen weisen hier im Vergleich zu EM-Legierungen hohe Werte auf. Außerdem führt der hohe E-Modul der NEM/EMF-Legierungen dazu, dass die Gerüste graziler gestaltet werden können als bei EM.
- **0,2 %-Dehngrenze ($R_{p0,2}$):** Nach der elastischen Verformung erfolgt bei weiterer Spannungserhöhung eine plastische (irreversible) Verformung der Probe, was in einem gekrümmten Kurvenverlauf im Spannungs-Dehnungs-Diagramm resultiert. Da der genaue Übergang nicht bestimmbar ist, hat man ihn bei 0,2 % Änderung der Ausgangslänge festgesetzt. Bei Erreichen der 0,2 %-Dehngrenze ist ein Gerüst irreversibel zerstört.
- **Zugfestigkeit (R_m):** Die Zugfestigkeit ist die maximale Spannung einer Probe vor dem Zerreißen. Da Proben schon bei Erreichen der 0,2 %-Dehngrenze irreversibel zerstört sind, hat die Zugfestigkeit keine zahntechnische Relevanz. Da sie sich jedoch gut bestimmen lässt, kann man mit ihr verschiedene Legierungen vergleichen.
- **Bruchdehnung:** Die Bruchdehnung gibt das Ausmaß der plastischen Verformung beim Bruch einer Probe an. Je niedriger dieser Wert ist, desto spröder ist das Material, je höher, desto dehnbarer. Der Wert ist eine vom Kurvenschnittpunkt gezogene Parallele zum geraden Kurvenverlauf auf die Abszisse des Diagramms.
- **Wärmeausdehnungskoeffizient (WAK):** Der WAK, auch linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient genannt, ist definiert als: $\alpha = \Delta l / l_0 \cdot \Delta T [10^{-6} K^{-1}]$. Er gibt an, um wie viel seiner Ausgangslänge (l_0) sich ein Material bei Erwärmung um 1 °C ausdehnt. Die Wärmedehnungen der Verbundpartner von Metall-Keramik-Systemen sind von großer Wichtigkeit [48, 53, 119] (s. Kap. 2.2.1 und 2.3.1).

- Warmfestigkeit: Die Warmverzugsfestigkeit beschreibt hier das Formverhalten von Legierungen unterhalb des Soliduspunktes. Dies ist beim Aufbrennen von Keramik von Bedeutung. Je formkonstanter sich ein Gerüst verhält, desto warmer ist es. Ein ausreichender Abstand zwischen dem Soliduspunkt der Legierung und der Brenntemperatur der Keramik bzw. Löt-Arbeitstemperatur ist nötig, um Verzüge zu vermeiden. Das gilt insbesondere für weitspannige Arbeiten. Eine hohe Legierungsdichte sowie lange Wärmebehandlungen wirken sich negativ auf die Formstabilität aus [98, 100].

Für die Darstellung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms und hinsichtlich weiterer physikalischer Eigenschaften wird auf die entsprechenden Lehrbücher verwiesen [27, 98].

2.1.5 Chemische Eigenschaften

2.1.5.1 Korrosion

Definitionsgemäß ist Korrosion eine elektrochemische Reaktion zwischen einem Material und seiner Umgebung, die eine Veränderung des Materials und seiner Eigenschaften nach sich zieht [33]. Hinsichtlich der chemischen und physikalischen Vorgänge bei der Korrosion im Genaueren wird auf die entsprechende Literatur verwiesen [25, 27, 98]. Weitere beeinflussende Faktoren der Korrosion sind individuelle wie die Speichelzusammensetzung, die Plaqueakkumulationen auf den Legierungsoberflächen sowie konstruktive wie die Qualität des zahntechnischen Gusses oder die der Oberflächenverarbeitung [29]. Zu letzteren zählt auch die Kombination unterschiedlicher Metalle wie bei Lötungen oder das Vorhandensein von Spalträumen. Das Ausmaß der Korrosionsrate wird von der chemischen Zusammensetzung und Struktur sowie der Natur der schützenden Passivierungsschicht der jeweiligen Legierung bestimmt [33, 105]. Die korrosionsbedingte Ionenfreisetzung kann zu lokalen oder systemischen Unverträglichkeitsreaktionen der Gewebe [59, 89], zur Hypersensibilisierung gegenüber dem Stoff oder zum Funktionsverlust (Fraktur!) des Zahnersatzes führen [9, 102]. Die Menge und Art der korrosiv herausgelösten Ionen ist für die Biokompatibilität entscheidend, nicht ihr Anteil innerhalb der Legierung (Dosis-Wirkungs-Charakteristik) [33, 38]. Der Pitting Resistance Index wurde im Kapitel 2.1.1.1 erläutert. Nach Möglichkeit sollten Lotnähte unter eine keramische Verblendung, da sie dort vor Speichelzutritt und somit

vor Korrosion geschützt sind [98]. Ist eine Legierung nicht ausreichend korrosionsfest, hat dies zudem negative Auswirkungen auf die Verbundfestigkeit von Metall-Keramik-Systemen. Generell gilt, die Legierungsvielfalt im Mund möglichst gering zu halten [38].

Zu unterscheiden sind folgende Korrosionsarten:

- selektive Korrosion („Lochfraß“) [38, 59]
- Spaltkorrosion [29, 33, 37].
- Kontaktkorrosion [33, 42, 59, 63, 92].

Gelötete Cobalt-Chrom-Legierungen sind von ihrem Korrosionsverhalten ungünstiger zu beurteilen als lasergeschweißte [38, 125], was insbesondere beim Verlöten mit ar-tungleichen Goldloten deutlich wird [1, 9]. In Korrosionstests haben sich Lote korrosionsanfälliger als ihre Basislegierungen herausgestellt. Gelötete Cobalt-Chrom-Legierungen zeigten sich deutlich korrosionsresistenter als gelötete Nickel-Chrom-Legierungen [27, 114].

2.1.6 Fügbarkeit Edelmetall-, Nichtedelmetall-Legierungen

Allgemein müssen Legierungen, um lötlbar zu sein, die Norm DIN EN ISO 9333 [20] erfüllen. Die Anforderungen für die Laserschweißbeignung beschreibt die Norm DIN 13972-2 [19].

Das Laserschweißen ist für EM und NEM/EMF-Legierungen geeignet [7, 52, 62, 103, 115]. Bei NEM/EMF-Legierungen ist die Schweißbarkeit stark vom Kohlenstoffgehalt abhängig. Ist dieser zu hoch, kommt es zur Versprödung und Rissbildung. Hier sind die Modellguss- von den Legierungen für Kronen und Brücken zu unterscheiden [62]. Bei EM-Legierungen sind die höhere Wärmeleitfähigkeit und das Reflexionsverhalten bezüglich der Schweißparameter zu beachten. Paarungen unterschiedlicher Legierungen (z. B. Gold/Cobalt-Chrom) sind durch Laserschweißungen befriedigend zu realisieren, Lötungen unterliegen hier qualitativ [17, 50]. In beiden Fällen sollte die Korrosionsstabilität des gefügten Legierungs-Hybrids hinterfragt werden. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit und hohe Laserstrahlabsorption bietet Titan besonders gute Voraussetzungen zum Laserschweißen [109]. Das Mikroplasma-schweißen kommt wegen der großen Wärmeeinflusszone nur für Legierungen mit niedriger Wärmeleitfähigkeit (NEM/EMF) in Betracht [103].

Lötungen sollten bei EM- bzw. NEM/EMF-Legierungen nur mit geeigneten Loten mit möglichst ähnlicher Zusammensetzung durchgeführt werden [9]. Aufgrund der starken Oxidbildung ist für Titan kein akzeptables Lötverfahren in der Dentaltechnik existent [52].

2.2 Dentalkeramik

Der Begriff „Keramik“ wird in der zahnärztlichen Werkstoffkunde gleichbedeutend mit „Glas“ und „Glaskeramik“ verwendet. Gläser sind unterkühlte Schmelzen, die keine kristalline Gestalt haben, sondern amorph sind. Ihr Aussehen ist glasig-transparent. Sie verfügen über ein breites Schmelzintervall. Glaskeramiken sind hauptsächlich silikatischen Ursprungs. Sie bilden beim Abkühlen Kristallphasen. Aufbrennkeramiken zählen zu den Glaskeramiken. Reine Keramiken haben eine kristalline Struktur, sind optisch opak und haben einen definierten Schmelzpunkt.

Weitere Einteilungsmöglichkeiten bestehen nach ihren Brenntemperaturen, nach ihrer chemischen Zusammensetzung oder nach der Art der Verarbeitung:

- Schmelzprozess (Pressen/Gießen)
- Sinterprozess (freie Modellation des Schlickers/Pressen)
- mechanische Bearbeitung (Fräsen/Schleifen) der verschiedenen CAD/CAM-Verfahren.

In dieser Arbeit wird eine Silikat-Sinterkeramik zur Verblendung verwendet.

Die silikatischen Rohstoffe zur Herstellung sind Feldspat (60 – 80 %), Quarz (15 – 25 %), Kaolin (0 – 5 %). Zugemischt werden Farbzusätze und Flussmittel (verschiedene Metalloxide). Feldspat trennt sich bei den keramischen Bränden in der Abkühlphase in eine glasartige Schmelze mit kristallinem Leuzit auf. Letzteres erhöht durch seinen Anteil den WAK, reduziert die Rissanfälligkeit [13] und ist für die Standfestigkeit im Keramikofen verantwortlich [46, 53]. Die Leuzitbildung wird durch mehrmaliges Brennen, langsame Abkühlung und niedrige Brenntemperaturen begünstigt [66]. Die mit vermehrten keramischen Bränden (Lötung nach dem keramischen Brand!) verbundene kontinuierliche Erhöhung des Leuzitgehalts und des WAK der Keramik ist nicht immer erwünscht. Die Abstimmung der WAK verändert sich dahingehend, dass es zu größeren WAK-Abweichungen der Materialien und schließlich zu Zugspannungen in der Keramik

mit Rissen und Abplatzungen kommen kann [48, 98, 119]. Die empfohlene Anzahl, Dauer und Temperatur der Brände ist beim Verblenden zu beachten.

Aus den obigen Rohstoffen entstehen während der Herstellung so genannte Glasfritten mit spezifischen Eigenschaften und Korngrößen. Mit ihnen werden durch unterschiedliche Vermengung die gewünschten Materialeigenschaften eingestellt (auch der WAK) – dies geschieht somit nicht durch die Rohstoffe direkt [47]. Durch gezielte Vermischung der Glasfritten werden die Pulver zur freien Modellation oder die Formkörper für die CAD/CAM- bzw. Pressverfahren hergestellt.

Vollkeramische Restaurationen werden aus Zirkoniumdioxid, Aluminiumoxid oder Lithiumdisilikat-verstärktem Siliziumdioxid als Kernmasse hergestellt. Die silikatischen Vollkeramiken zeichnen sich durch Transparenz und hohe ästhetische Eigenschaften aus, wohingegen Aluminium- und Zirkoniumdioxidkeramiken weißlich opak und hinsichtlich der Ästhetik weniger optimal sind. Letztere sind jedoch deutlich belastbarer und haben eine hohe Bruchzähigkeit^a, weswegen sie sich auch für Brückenrestaurationen im Seitenzahnbereich eignen, wo höchste Festigkeiten gefragt sind [49]. Hier sind die silikatischen Vollkeramiken denen auf Zirkoniumdioxid- und Aluminiumoxid-Basis unterlegen.

Grundlegende Anforderungen an Aufbrenn- und Vollkeramiken sind [47]:

- hoher Grad an Sinterung und Porenfreiheit
- hohe Verbundfestigkeit zum Gerüst
- optimale Ästhetik
- auf das Gerüst abgestimmter WAK
- Brenntemperatur deutlich unter dem Erweichungspunkt des Gerüsts
- sehr gute Bioverträglichkeit und Mundbeständigkeit.

Hinsichtlich der Ästhetik, Hygiene, Dauerhaftigkeit und Gewebeverträglichkeit sind Dentalkeramiken von anderen Materialien kaum zu übertreffen. Sie besitzen eine geringe Wärmeleitfähigkeit, eine hohe Druckfestigkeit und Härte und im Allgemeinen eine geringe Zug- und Biegefestigkeit (Ausnahme Aluminiumoxid- und Zirkoniumdioxid-

^a Widerstandskraft gegen fortschreitende Rissausbreitung

Keramiken). Die Ausbreitungstendenz von Sprüngen kann durch Beimischung bestimmter Kristalle (Leuzit [13], Spinelle, Whisker) reduziert werden.

2.2.1 Aufbrennkeramiken

Aufbrennkeramiken zählen zu den Silikatkeramiken. Sie können auf Metallgerüste (EM, NEM/EMF) oder auf Vollkeramikermassen (Aluminiumoxid, Zirkoniumdioxid, etc.) aufgebrannt werden [47]. Eine für das Aufbrennen wichtige physikalische Größe ist hier der WAK. Auf ihn bezogen lassen sich grob drei Gruppen von Verblendkeramiken bilden [98]:

- für Titan, Zirkoniumdioxid: $\alpha \approx 9,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- konventionelle Keramiken: $\alpha \approx 14 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- LFC (hochexpandierend): $\alpha \approx 16 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Dieser Wert muss auf die Aufbrennlegierung abgestimmt sein, um bei Temperaturwechseln Spannungen in den Grenzbereichen beider Werkstoffe gering zu halten. Verminderte Haftung sowie Verbundversagen durch Sprünge und Abplatzungen können die Folge sein. Idealerweise liegt der Wert der Verblendkeramik 5 – 10 % unter dem der Legierung. TAUBER empfiehlt eine WAK-Differenz von $\Delta\alpha = 1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, JANDA betrachtet das bereits als kritischen Wert [48, 100].

LFC-Massen sintern bei relativ niedrigeren Temperaturen und haben hohe WAK (s.o.).

Für die Verarbeitung stehen verschiedene Opak-, Hals-, Dentin-, Schmelz- sowie Effektmassen zur Verfügung. Die ästhetischen Ergebnisse der Verblendungen durch Farbe, Transparenz/Opazität, Fluoreszenz und Opaleszenz lassen sich heutzutage als sehr gut bezeichnen. Neben den Keramikmassen für Dentin und Schmelz besitzen Opaker eigene WAK, die zu berücksichtigen sind.

2.3 Metall-Keramik-Systeme

2.3.1 Verbund zwischen Metall und Keramik

Der Verbund zwischen Metall und Keramik wird durch drei Arten von Kräften charakterisiert [48, 98]:

- Mechanische Kräfte:

- a) Zuerst tritt eine Volumenschumpfung durch die Sinterung und das Verdampfen von Flüssigkeit ein (ca. 20 – 25 %). Hierdurch schrumpft die Keramik auf das Gerüst auf. Je nach Geometrie des Gerüsts und Schichtstärke des Schlickers können bei diesem Vorgang Spannungen in der Keramik entstehen.
- b) Die WAK der Verbundpartner sollten so gewählt werden, dass der WAK der Legierung etwas größer ist. Somit schrumpft das Metallgerüst beim Abkühlen etwas stärker als die Keramik. Bei diesem Aufschumpfen wird die Keramik unter Druckspannung gesetzt. Das hat den Vorteil, dass bei später auftretenden Zugspannungen zuerst diese Druckspannung überwunden werden muss und die Keramik insgesamt einer höheren Kraffteinwirkung ausgesetzt werden kann [87].
- c) Retention: Durch rotierende Instrumente sowie Abstrahlen wird die Oberfläche zum einen gereinigt sowie ein mikroretentives Oberflächenmuster auf dem Gerüst erzeugt, in dem sich die Keramik verankern kann. Diese Oberfläche ist größer als eine glatte. Zudem erhöht das Abstrahlen für eine gewisse Zeit die Oberflächenenergie im Sinne einer „Aktivierung“. Dies erhöht zusätzlich die Benetzbarkeit für den Keramik-Schlicker. Der Vorgang ist unerlässlich für eine maximale Haftfestigkeit [36, 43, 112, 113, 117, 119].
- Adhäsion: Hierbei handelt es sich um Van-der-Waals-Kräfte (Wasserstoffbrücken-Bindungen und Dipol-Wechselwirkungen). Sie spielen bei der Benetzung der Legierung durch den Schlicker eine große Rolle. Ihre Bedeutung für den Verbund ist eher gering.
 - Chemische Bindung: Der chemische Anteil am Verbund ist von der Beteiligung her der kräftigste. Er findet zwischen der Oxidschicht der Legierung und der Keramik statt. Bei NEM/EMF-Legierungen ist dies die Passivierungsschicht, bei EM-Legierungen die Haftoxid-Schicht. Bei den Bränden entstehen Mischoxide über Sauerstoffbrücken zwischen Anteilen aus Keramik und Oxidschicht der Legierung. Hier liegen kovalente Bindungen vor. Diese Schicht wird auch Interdiffusionsschicht genannt. Zu dicke Oxidschichten auf der Legierungsoberfläche können sich im Sinne einer Trennschicht negativ auf die Verbundfestigkeit auswirken [87, 94], denn die mechanische Festigkeit innerhalb der Oxidschicht ist sehr gering. Ferner führt die gute Löslichkeit der Oxide zu einer erhöhten Ionenabgabe, die biologisch nicht erwünscht ist [79]. Bei NEM/EMF-Legierungen bringt ein Oxidbrand keine signifikante

Haftverbesserung [76]. SCHNETTGER et al. geben eine Oxidschichtdicke von 3 μm unter der Keramik und bis zu 23 μm an unverblendeten Stellen an (NEM/EMF) [83].

Zusammenfassend sind die wesentlichen Voraussetzungen für einen günstigen Verbund [48]:

- Angerauhte, saubere Metalloberfläche
- Sehr hohe Benetzung des Metalls mit der Keramik beim Brand
- Ausbildung von kovalenten Bindungen
- Diffusion von Legierungsanteilen in die Keramik und umgekehrt
- Angepasste WAK

Eine weitere qualitative Einflussgröße ist freilich die Verarbeitungsweise und die Fertigkeit des Zahntechnikers. Hier liegen eine Reihe von Fehlerquellen, die zu negativen Ergebnissen im Metall-Keramik-Verbund führen können [67].

Autor	Verbundfestigkeit [MPa]	Autor	Verbundfestigkeit [MPa]
YILMAZ et al.	47	SCHWEITZER et al.	31
KOCHS	40	SCHNETTGER et al.	36
MIETKO	36		

Tab. 2: Prüfungen von Scher-Verbundfestigkeiten (CoCr-/NiCr-Basis nach DIN EN ISO 9693) [58, 67, 83, 85, 120]

Untersuchungen nach DIN EN ISO 9693 von MIRKOVIC ergaben, dass die Scher-Verbundfestigkeit zwischen Metall und Keramik bei der Nickel-Chrom-Legierung Wiron 99[®] im Vergleich zur Cobalt-Chrom-Legierung Wirobond[®] C unterlegen ist [68].

2.3.2 Verbund auf gefügten Gerüsten

2.3.2.1 Gelötete Gerüste

Zwischen Lot und Basislegierung bestehen Unterschiede in der Zusammensetzung und damit auch Abweichungen bei den WAK. Damit die WAK-Abstimmung Basislegierung-Verblendkeramik nicht gestört wird, empfiehlt STRIETZEL, die Lotflächen möglichst klein zu halten. Der abweichende WAK des Lots kann bei kleinen Flächen durch einen erhöhten chemischen Haftverbund zur Keramik kompensiert werden. Bei größeren Lot-

Flächen gefährdet die WAK-Differenz den Verbund [98]. Nach HOFER und FISCHER ist die Verbundfestigkeit der Keramik ab einer Lotfläche, die größer als 1 mm^2 ist, nicht mehr gewährleistet [40]. NIKELLIS et al. weisen zudem auf mögliche Unterschiede hinsichtlich E-Modul und Härte zwischen Lot und Basislegierung hin [73].

SCHÄFER bedeckte nach DIN EN ISO 9693 angefertigte Prüfkörper verschiedener Legierungen im Verblendbereich mit Lot. Im Vergleich zu den nicht gelöteten Referenzserien war die Scher-Verbundfestigkeit bei den Gold- und den Nickel-Chrom-Gerüsten nicht signifikant erhöht, im Falle der goldreduzierten und der Cobalt-Chrom-Prüfkörper deutlich gestiegen [80].

NIKELLIS et al. verwendeten ebenso nach DIN EN ISO 9693 erstellte Prüfkörper (Nickel-Chrom-Legierung), um sie dann auf ganzer Fläche mit Lot zu überziehen. Härte und E-Modul der Löt-Serie waren durch den Lot-Anteil im Vergleich zur ungelöteten Referenz-Serie deutlich erniedrigt. In Bezug auf die Scher-Verbundfestigkeit wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Serien festgestellt [73].

GALINDO et al. stellten Prüfkörper der Maße $20 \cdot 6 \cdot 0,5 \text{ mm}^3$ aus einer Palladium-Legierung her und perforierten sie mittig. Der Defekt (ca. 3 mm^2) wurde durch Lot verschlossen und ein Keramikblock ($10 \cdot 6 \cdot 1,5 \text{ mm}^3$) aufgebrannt. Der Dreipunkt-Biegeverbundtest ergab keinen signifikanten Unterschied in Bezug auf die Verbundfestigkeit. Dennoch wiesen die gelöteten Serien einen höheren Anteil kohäsiver Brüche auf als die ungelöteten [32].

In einer Studie von KANG et al. wurden kronenartige Prüfkörper (Palladium-Legierung) hergestellt, bukkal perforiert und mit Lot wieder geschlossen. Die Dicke der aufgebrannten Keramik betrug $1,5 \text{ mm}$. In einem vertikalen Belastungstest versagten die gelöteten Serien früher als die ungelöteten [51].

2.3.2.2 Lasergeschweißte Gerüste

LI et al. verblendeten lasergeschweißte Stäbe aus einer Nickel-Chrom-Legierung im Fugebereich keramisch. Nach einem Pull-Through-Test kamen sie zu dem Ergebnis, dass Laserschweißen den Metall-Keramik-Verbund nicht beeinträchtigt [61].

WEGENER prüfte die Keramikhaftfestigkeit auf lasergeschweißten EM-Gerüsten nach DIN EN ISO 9693. Die Testgruppe wurde im gesamten Verblendbereich ohne Zusatz-

werkstoff lasergeschweißt. Das Laserschweißen hatte in dieser Arbeit überwiegend keinen Einfluss auf die Verbundfestigkeit, so dass die Mindestanforderungen der Norm erfüllt wurden [110].

In einem Vier-Punkt-Biegetest prüfte DÉRAND die Verbundfestigkeit zwischen lasergeschweißten Titanoberflächen und Verblendkeramik. Durch das Fügeverfahren kam es zu keiner Verringerung des Verbundes [15]. Zu diesem Ergebnis kamen auch ZHU et al. in einem Dreipunkt-Biegeverbundtest [124].

2.3.3 Tests zur Bestimmung der Verbundfestigkeit

Viele Einflussgrößen bestimmen in ihrer Gesamtheit die Belastbarkeit einer Metall-Keramik-Verbundkonstruktion: WAK-Differenz, Festigkeit und elastische Eigenschaften von Keramik und Metall, Form und Abmessung der Gesamtkonstruktion mit ihrer Verteilung der Materialien im Verbund. Berücksichtigung für die Haltbarkeit müssen auch die äußeren Bedingungen der Mundhöhle finden: Dauerbeanspruchung durch Kaukräfte, Temperaturwechsel und feuchtes Milieu mit korrosiven Anteilen [87]. Um die verschiedenen Metall-Keramik-Systeme miteinander in reproduzierbaren Ergebnissen zu vergleichen und ihre klinische Tauglichkeit einschätzen zu können, wurden verschiedene Testverfahren (in vitro) entwickelt. Diese simulieren jeweils bestimmte Belastungen. Alle Beanspruchungen mit einem Test zu simulieren, ist nicht möglich. Daher müssen mehrere Prüfungen herangezogen werden. Hieraus resultieren Aussagen über Haftmechanismen oder die Eignung von Materialkombinationen. Im Anschluss muss ein bis hier ausreichend stabiler Metall-Keramik-Verbund durch klinische Tests (in vivo) bestätigt werden. Vorklinische Tests bilden somit die Ausgangssituation für klinische Untersuchungen. Letztere sind unerlässlich und aufgrund ihrer Komplexität nicht durch simulierte Belastungstests zu ersetzen.

2.3.3.1 Biegeversuche:

- Dreipunkt-Biegeverbundtest nach SCHWICKERATH

Scherspannungen, wie sie bei großen Zahnersatzspannen auftreten, werden im Metall-Keramik-Verbund als schädlichste Beanspruchung angesehen [86]. Der Dreipunkt-Biegeverbundtest nach SCHWICKERATH simuliert eine solche Biegescher-Belastung auf den Verbund. Er liefert reproduzierbare und präzise Ergebnisse aufgrund der relativ einfachen Herstellung der Prüfkörper [60, 79]. Die Eignung des Testverfahrens wurde

von KAPPERT et al. und FISCHER bestätigt [30, 54]. Definiert wird die Kraft F_{Bruch} , bei der es zum Versagen kommt. Diese lässt sich wertmäßig festhalten. Hierdurch ist es möglich, Kombinationen verschiedener Legierungen und/oder Keramiken zu vergleichen.

Die Scher-Verbundfestigkeit τ_v hängt sowohl von der Kraft F_{Bruch} als auch von der Dicke des Metallgerüsts d_M und dem E-Modul der Legierung E_M ab. Sie errechnet sich aus der Formel: $\tau_v = \sigma_{xy} \cdot F_{\text{Bruch}}$. Die Scherspannung σ_{xy} ergibt sich aus der Funktion von d_M und E_M [86], sie wird auch als Koeffizient k bezeichnet [18]. Die Abhängigkeit der Scher-Verbundfestigkeit von der Gerüstdicke und dem E-Modul ist ausgeprägt, da die Bruchkraft in der dritten Potenz von der Gerüste abhängig ist (vgl. Kap. 3.3.2).

In der Norm DIN EN ISO 9693 [18] ist der Dreipunkt-Biegeverbundtest nach SCHWICKERATH als Testverfahren für Metall-Keramik-Systeme standardisiert. $\tau_v \geq 25$ MPa wird hier als Mindestwert für den klinischen Einsatz gefordert.

Da die Materialeigenschaften des Verblendmaterials in der Berechnung von τ_v nicht berücksichtigt sind, ist es nach MARX nur möglich, Verbund-Systeme mit gleichen oder sehr ähnlichen Verblendmaterialien zu vergleichen [64].

2.3.3.2 Abscherversuche

- Zugscherversuch nach SHELL und NIELSEN

Ein Rundstab aus der entsprechenden Legierung wird an einem Ende zuerst mit Grundmasse und dann mit Keramik verblendet, so dass kein Kontakt zwischen Metall und der Keramik besteht. Eine Auflage dient der Dentinkeramik als Widerlager, während der Metallstab axial herausgezogen wird bis es zum Verbundversagen kommt [90]. Dieser Test wurde von ANTHONY et al. weiter modifiziert (Pull-Through-Test) [2].

- Druckscherversuch nach SCHMITZ und SCHULMEYER

Gemäß der modifizierten Versuchsanordnung werden Grundmasse und Keramik mit den Maßen $3 \cdot 3 \cdot 6 \text{ mm}^3$ auf einen Metallwürfel mit 6 mm Kantenlänge aufgebrannt. Der keramische Quader wird dicht am Metallwürfel bis zum Abscheren mit Druck belastet [82]. Geringe WAK-Differenzen zwischen Metall und Keramik können im Falle des massiven Würfels nicht durch elastische Verformung kompensiert werden, so dass innere Spannungen im Verbund entstehen. Dies führt zu relativ niedrigen Messwerten mit

hoher Streuung. Auf der anderen Seite lassen sich genaue Aussagen über den Einfluss von WAK-Differenzen machen [54].

- Druckversuch nach VOSS

Für dieses Prüfverfahren werden keramisch verblendete Einzelkronen in der Form standardisierter Eckzähne hergestellt und auf polierte Metallstümpfe zementiert. Eine Druckfinne belastet die Krone im 45°-Winkel an der Inzisalkante bis zum Bruch der Keramik [106]. Von Vorteil sind praxisnahe Prüfkörpergeometrien sowie die Möglichkeit, die ermittelten Messwerte in direkten Bezug zu physiologischen Kaukräften setzen zu können. Negativ zu betrachten ist die komplizierte Prüfkörperherstellung. Dies geht zu Lasten der Reproduzierbarkeit und erhöht die Streuung der Messwerte [93].

Eine Übersicht weiterer Prüfverfahren gibt WALTHER [108].

2.4 Fügetechniken

Werkstücke können lösbar oder unlösbar zusammengefügt werden. Zu den lösbaren Verbindungen zählen die kraft- bzw. formschlüssigen (z.B. friktiv: Teleskopkronen, Geschiebe, Magneten, bzw. retentiv: Riegel und Bolzen) des kombinierten Zahnersatzes.

Die unlösbaren, stoffschlüssigen Verbindungen entstehen durch Löten, Schweißen oder Kleben (z.B. beim Verbinden von konfektionierten Teilen mit einem Modellgussgerüst) [44]. Sie müssen in der Lage sein, die verschiedenen Krafteinwirkungen und elektrochemischen Beanspruchungen zu überdauern, ohne Schaden zu nehmen. Zu den thermischen Verfahren zählen Lötungen und Schweißungen; das Kleben verbindet chemisch.

2.4.1 Löten

Das Löten wurde als weitverbreitetste Fügetechnik der Zahntechnik vom Laserschweißen mittlerweile abgelöst [72]. Definitionsgemäß ist das Löten ein thermisches Verfahren zum Verbinden metallischer Werkstoffe unter Verwendung eines geschmolzenen Zusatzmetalls, des Lots, gegebenenfalls unter Anwendung von Flussmitteln und/oder Lötenschutzgasen [28]. Als Verbindungswerkstoff werden Hartlote verwendet. Die Anforderungen an diese Lote und deren Verbindungen definiert die Norm DIN EN ISO 9333 [20].

Es werden grundsätzlich drei verschiedene Löttechniken unterschieden: Die Flammen-

lötung vor dem Verblenden (z. B. Propan-Sauerstoff-Gemisch), die Ofenlötung nach dem Verblenden und die Lötung mittels infraroter Strahlung vor/nach dem Verblenden. WADDELL et al. geben eine Übersicht verschiedener Autoren, die die Eigenschaften dieser verschiedenen Techniken untersuchten [107].

Der Soliduspunkt der Grundwerkstoffe wird beim Lötvorgang nicht erreicht [41]. Im Falle der Flammenlötung sollte die Arbeitstemperatur des Lots mindestens 50 °C niedriger sein als der Soliduspunkt der zu fügenden Legierung, um Gerüstverzüge zu vermeiden, sowie 50 °C über der höchsten Brenntemperatur der Verblendkeramik liegen [98]. Beim Lötvorgang entsteht eine Diffusionszone zwischen Lot und Grundwerkstoff, in der eine irreversible Legierungsbildung stattfindet. Es resultiert eine metallische Bindung. Höheres Erhitzen und längeres Halten der Temperatur begünstigen prinzipiell den Diffusionsprozess, stellen aber eine Verzugs- und Versprödungsgefahr dar [96], was bei der ungenauen Temperaturführung bei der Flammenlötung zu beachten ist. Die Beschaffenheit der Diffusionszone ist verantwortlich für die Festigkeit der Lötstelle [17]. Werden niedriger schmelzende Lote verwendet, hat die Bindung eher adhäsiven Charakter [103]. Deswegen wird von Ofenlötungen abgeraten.

Für gute Lötresultate sind große, parallele, gut benetzbare und saubere Fügeflächen entscheidend [27, 75]. Der ideale Lötspalt hat planparallele Fügeflächen mit einem Abstand von 0,1 bis 0,2 mm [41]. Mit dieser Geometrie wird erreicht, dass das Lot durch den kapillaren Fülldruck in den Spalt hineingetrieben wird [40]. Die Werkstoffenden müssen beim Erhitzen vor Oxidation geschützt werden. Dies gewährleistet ein geeignetes Flussmittel. Ansonsten ist eine Benetzung des Grundwerkstoffs durch das Lot unmöglich. Ist der Spalt zu groß, spricht man von einer Lotfuge [39]. Diese kann durch unvollständiges Ausfließen des Lotes zwischen den Grundwerkstoffen, Porositäten und Schrumpflunker in der Fuge gekennzeichnet sein. Derartige Lötungen sind durch schlechtere mechanische Festigkeiten und eine geringere Korrosionsbeständigkeit (Spaltkorrosion) langfristig bruchgefährdet [17, 22, 40, 125]. Dies ist hervorzuheben, da Lötungen ohnehin schon im gesamten Gussobjekt einen *Lucus minoris resistentiae* darstellen und am Häufigsten in der Fügestelle brechen [3, 41, 50, 96]. Der direkte Kontakt zwischen Grundwerkstoff(en) und Lot, die unterschiedliche Legierungen darstellen, birgt zudem die Gefahr der Kontaktkorrosion und somit auch von Unverträglichkeitsreaktionen [1, 23, 50, 89, 102, 125]. Hier muss hinsichtlich der Biokompatibilität auf eine ge-

eignete Lot-Basislegierungs-Kombination geachtet werden [9]. Wenn möglich, sollten Lötstellen verblendet werden, um Korrosionseffekte zu vermeiden [98].

Das Zulöten von Lunkern [121] erscheint wenig sinnvoll, da neben den oberflächlichen noch tiefere zu erwarten sind und der Guss somit insgesamt von schlechter Qualität ist [98]. Zudem ist die Korrosionsstabilität von gelöteten Gusskronen fraglich [9, 41].

Lötverbindungen müssen eine Zugfestigkeit von mindestens 250 MPa gewährleisten [20]. Nach KAPPERT können bei sorgfältiger Durchführung und in Abhängigkeit der Legierungen Werte von 500 MPa erreicht werden [52], VAN BENTHEM berichtet von nur 270 – 350 MPa [103]. Die großen qualitativen Streubreiten sind negativ zu bewerten [26]. Die für die klinische Belastbarkeit nötigen Verbindungsquerschnitte (6 bis 9 mm² [40]) können die Hygiene und Ästhetik des Zahnersatzes beeinträchtigen [55]. Nach SCHÄTZE sollten sie zwecks ausreichender Festigkeit überdimensioniert werden [81]. JUNGO et al. geben zu bedenken, dass Schiedsstellen heutzutage im Misserfolgsfall einer Arbeit Lötungen nicht mehr als geltenden Standard betrachten, auch wenn sie gemäß der Arbeitsanleitung korrekt durchgeführt worden sind [50]. SCHÄTZE resümiert, dass alle Lötungen dem Einstückguss qualitativ unterlegen sind [81].

Mögliche Eigenschaften, die eine Lötverbindung negativ beeinflussen können:

- Bruchgefahr [22, 104]
- Schwindungslunker, die wie Sollbruchstellen wirken [12, 17, 22]; Porositäten, die den Querschnitt schwächen [14, 26, 50, 96, 101]
- Verminderte Zugfestigkeit durch Korrosion [22, 102]; geringere Zugfestigkeit als gelaserte [17, 56, 70, 116] und ungefügte Gerüste [26, 69]
- Korrosionsanfälligkeit mit Gefahr der Spaltbildung [9, 17, 22]; Entmischung der Legierungen mit Lokalelementbildung[81]
- Fragliche biologische und mechanische Eigenschaften der Fügestelle [23, 50]
- Große qualitative Streubreiten der Messwerte, unzureichende Lötsicherheit, geringe Reproduzierbarkeit [17, 22, 56, 81, 96, 101]
- Versprödung durch zu hohe Fügetemperaturen [96]
- Niedriger Füllgrad des Lötspalts [22, 26]
- Schlechte Diffusion zwischen Grundwerkstoff und Lot [17].

Beeinflussende Faktoren für die Qualität einer Lötung:

- Art der Lötung/Technik [11, 69, 95, 116], Fertigkeit des Technikers
- Oberflächenstruktur der zu verlötenden Gerüstenden [75]
- Vorhandensein von Porositäten oder Lunkern [12, 14]
- Temperatur während der Lötung [14]
- Ausmaß der Diffusion zwischen Lot und Grundwerkstoff [116]

2.4.2 Laserschweißen

2.4.2.1 Allgemeines

Das Schweißen bezeichnet das Verbinden zweier Werkstücke unter Energiezufuhr (Wärme und/oder Druck) im plastischen oder flüssigen Zustand mit oder ohne Zusatzwerkstoff [28]. Im Gegensatz zum Löten wird der Soliduspunkt des Werkstoffs beim Schweißen überschritten. Dentallegierungen sind zum Laserschweißen geeignet, wenn sie die in der Norm DIN 13972-2 definierten Anforderungen erfüllen [19]: Eine Zugfestigkeit von mindestens 350 MPa muss gewährleistet sein oder der Wert der Zugfestigkeit muss den Wert der 0,2 %-Dehngrenze des schwächeren Fügeteils erreichen.

In der Zahntechnik werden hauptsächlich Nd:YAG-Laser^a verwendet, die zu den Festkörperlaser zählen. Des Weiteren werden noch Gas- (z. B. CO₂), Farbstoff-, Halbleiter- und chemische Laser unterschieden. Das Mikroplasma-schweißen ist aufgrund der größeren Wärmeeinflusszone in benachbarte Strukturen und der breiteren Schweißnähte im Vergleich zum gepulsten Laserschweißen nachteilig [17, 77]. Beim gepulsten Laser ist die Wärmeleitung durch die kurze Bestrahlungszeit vernachlässigbar. Dies ist erwünscht, da benachbarte Materialien wie Keramik oder Kunststoff somit keinen Schaden nehmen. Neben der Impulsform kann der Laserstrahl noch kontinuierlich (cw – continuous wave) emittiert werden. Durch Leistungsflussdichten ab 10⁶ W/cm² wird ein Tiefschweißeffekt erreicht (Impulsbetrieb). Darunter (ca. 10⁴ W/cm²) spricht man vom Wärmeleitungsschweißen, wozu auch das Mikroplasma-schweißen und das WIG-Schweißen (Wolfram-Inertgas-Schweißen, sog. „Phasern“) zählen.

^a Neodym-dotierter Yttrium-Aluminiumoxid-Granat-Kristall

Die für die Morphologie und damit auch die Penetrationstiefe der Schweißnaht entscheidenden Parameter sind die Impulsenergie, die Impulsdauer, die Impulswiederholungsfrequenz, der Überlappungsgrad der Schmelzzonen/Schweißpunkte, der Fokussdurchmesser sowie die Legierungseigenschaften, die Oberflächenbeschaffenheit (Reflexion) und die geometrischen Verhältnisse der Fugestelle [4, 52, 103]. Je nach Anwendungsfall können die Schweißparameter variieren. Die jeweils richtige Einstellung ist maßgeblich für den Erfolg. Ebenso hervorzuheben ist die Schutzgasatmosphäre während der Schweißung.

Titan spielt hier eine wichtige Rolle, da es durch seine relativ geringe Wärmeleitfähigkeit und hohe Laserstrahl-Absorption gute Voraussetzungen zum Schweißen bietet [109]. Mit diesem Werkstoff kann der Forderung nach nur einem Metall in der Mundhöhle gut Rechnung getragen werden [115].

In Anbetracht der Anforderungen an Fügetechniken entsprechend der Normen sind die Schweißtechniken, besonders das Laserschweißen, den Lötungen überlegen [17, 41, 72] (s. Kap. 2.4.2.3).

Die Schweißbarkeit eines Werkstoffs ist von folgenden Faktoren abhängig [62, 98]:

- Schweißeignung: chemische und physikalische Eignung des Werkstoffs
- Schweißsicherheit: Parameter, die die Geometrie und Umgebung der Schweißnaht sowie Kräfteinwirkungen beinhalten
- Schweißmöglichkeit: fertigungsbedingte Faktoren wie Vor- und Nachbereitung der Naht, Erfahrung des Zahntechnikers.

2.4.2.2 Funktionsprinzip des Lasers

Die Abkürzung bedeutet "light amplification by stimulated emission of radiation", d.h. "Lichtverstärkung durch induzierte Emission von Strahlung". Folgende Charakteristika unterscheiden ihn vom normalen Licht:

- extrem hohe Energiedichte
- räumliche und zeitliche Kohärenz (Wellen stehen in einer festen Phasenbeziehung zu einander)
- Monochromasie.

Ein Laser hat folgende Hauptbestandteile:

- Das laseraktive Material (hier Nd:YAG)
- Die Pumpe
- Der Resonator

Das laseraktive Material wird durch Absorption von Energie (hier mittels optischer Strahlung der Pumpe) von seinem energiearmen Grundzustand auf ein höheres Energieniveau gebracht. Beim Übergang zurück in den Grundzustand werden Photonen emittiert, die exakt die Energiedifferenz dieser Zustände haben. Bei der hier vorliegenden stimulierten Emission muss das höhere Energieniveau stärker besetzt sein als der Grundzustand, damit eine Verstärkung erfolgen kann ("Besetzungsinversion"). Im Resonator befinden sich planparallele Spiegel mit auf die Wellenlängen abgestimmtem Abstand (Resonanzbedingung). Hier werden die selektierten Wellen maximal verstärkt, indem sie ihn mehrfach durchlaufen. Die emittierten Lichtquanten haben die gleiche Frequenz, Phase und Richtung [24, 52].

2.4.2.3 Vorteile

- Der Impulsbetrieb des Lasers führt zu einer vernachlässigbaren Wärmeleitung, so dass benachbarte Materialien (Kunststoff, Keramik) keinen Schaden nehmen (Alternative zum Löten nach keramischem Brand). Daher ist das Fügen auf dem Meistermodell möglich [17, 62, 77, 103].
- Erhöhte Korrosionsbeständigkeit durch Vermeidung weiterer Legierungen (Lote), vergleichbare Korrosionsbeständigkeit zwischen Schweißnaht und Gusslegierung, daher größere biologische Unbedenklichkeit und Dauerfestigkeit [17, 52, 62, 89, 103, 125]
- Geringere qualitative Streubreiten der Fügstellen als beim Löten, d.h. hohe Reproduzierbarkeit und Schweißsicherheit [23, 41, 55]
- Hohe Festigkeit der Fügstelle, daher Möglichkeit der grazileren und hygienischeren Gestaltung [3, 5, 55, 70]; Zerreifestigkeitswerte im Bereich des Ausgangsmaterials, deutlich höher als die der Lötungen [17, 23, 116]
- Fehlen von Lunkern, übergangsfreie Metallgefüge [17, 103]

- Wegfall von Arbeitsschritten und Zusatzmaterialien im Vergleich zum Löten (Zeit- und Kostenersparnis) [17, 23, 62]
- Fügen von verschiedenen Gusslegierungen mit unterschiedlichen Schmelzintervallen (Hybridschweißungen) [50, 103]

2.4.3 Kleben

Beim Kleben werden zwei oder mehrere Werkstoffe, die gleich- oder verschiedenartig sein können, miteinander verbunden, ohne dass deren Gefüge dabei verändert wird. Vorweg geht eine Oberflächenbehandlung der zu verklebenden Teile.

Von Vorteil ist, dass dieses Fügeverfahren ohne starke thermische oder mechanische Beanspruchung der beteiligten Strukturen geschieht, so dass Keramik- oder Kunststoffverblendungen hierbei keinen Schaden nehmen. Da der Klebstoff keinen Strom leitet, besteht nicht die Gefahr der Bildung eines Lokalelements wie nach einer Lötung. Auch schwer zu bearbeitende Materialien (gehärtete Metalle, Glas) können verklebt werden. Passungen können durch Verkleben ebenso erreicht werden [122]. Deswegen hat das Kleben in erheblichem Maße Einzug in die zahntechnische Verarbeitung gefunden und ist somit hinsichtlich der Korrosion eine sinnvolle Alternative zum Löten.

Nachteilig sind die Festigkeitswerte von Klebungen, die oftmals deutlich unter den Eigenfestigkeiten der Werkstoffe liegen. Zudem sind sie auf lange Sicht nicht konstant, sondern nehmen durch physikalische und chemische Beanspruchung im Mund im Laufe der Zeit ab.

Die notwendige Vorbehandlung der Oberfläche ist aufwendig. Ein rein mechanischer Metall-Kunststoff-Verbund ist aufgrund von Polymerisationsschrumpfung und unterschiedlichen Ausdehnungsverhalten nicht stabil. Die metallischen Verbundflächen müssen gereinigt und aktiviert werden, damit sie hinreichend benetzbar sind (Mikroretention). Anschließend wird über anorganische Konditionierung (Silikatisieren/Silanisieren) oder organische Primer eine chemische Bindung zwischen der Legierung und dem Klebstoff erreicht. Erst dann ist die Verbundfestigkeit unter den Bedingungen des Mundmilieus ausreichend [71]. Maßgeblich für die Haltbarkeit der Verklebung sind die Adhäsion an den Phasengrenzflächen, sowie die Kohäsion (innere Festigkeit) des Klebstoffs. Eine Diffusion zwischen Fügepart und Zusatzwerkstoff findet hier nicht

statt [41]. Es werden Schmelz-, Reaktions- und lösungsmittelhaltige Klebstoffe unterschieden [35, 45].

3 Material und Methode

3.1 Materialien

3.1.1 Verwendete Legierungen

Für die Herstellung der Prüfkörpergerüste wurden drei verschiedene EMF-Aufbrennlegierungen auf Cobalt-Chrom- bzw. Nickel-Chrom-Basis sowie die dazu geeigneten Lote und Schweißzusatzwerkstoffe verwendet. Diese sind Produkte der Fa. BEGO (Tab. 3, 4 und 5: Herstellerangaben Fa. BEGO):

Legierung	Anwendung	Zusammensetzung [m-%]	Charge (Nr.)
Wirobond [®] 280 (WBA)	Aufbrennlegierung	Co60,2Cr25,0W6,2Mo4,8Ga2,9SiMn	12221
Wirobond [®] LFC (WLF)	Aufbrennlegierung	Co33,0Cr30,0Fe29,0Mo5,0Mn1,0SiNC	11745
Wirocer [®] plus (WEP)	Aufbrennlegierung	Ni65,2Cr22,5Mo9,5NbSiFeMn	12092
Wirobond [®] -Lot	Lot	Co60,5Cr28,5Si4,5Mo3,0FeBC	3061014
Wiron [®] -Lot	Lot	Ni66,0Cr19,0Mo5,5Fe5,0Si3,5B	3070402
Wiroweld [®]	Schweiß-Draht	Co63,5Cr29,0Mo5,5SiMn	7085
Wiroweld [®] NC	Schweiß-Draht	Ni63,8Cr22,1Mo9,1Nb3,0SiFe	31763

Tab. 3: Zusammensetzung und Chargennummern der verwendeten Legierungen, Lote und Schweißzusatzwerkstoffe

Legierung	Wirobond [®] 280	Wirobond [®] LFC	Wirocer [®] plus
Dichte [g/cm ³]	8,5	8,2	8,2
WAK 25 - 500 °C [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	14,0	15,9	13,8
WAK 25 - 600 °C [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	14,2	16,1	14
Vorwärmtemperatur [°C]	900 - 1000	900 – 1000	900 – 950
Gießtemperatur [°C]	1500	ca. 1480	1450
Schmelzintervall [°C]	1360 - 1400	1280 – 1350	1320 – 1365
E-Modul [GPa]	220	ca. 200	Ca. 200
Zugfestigkeit [MPa]	680	950	620
Vickers-Härte (HV10)	280	315	190

Tab. 4: Technische Daten der Aufbrennlegierungen

Legierung	Wirobond®-Lot	Wiron®-Lot
Schmelzintervall [°C]	1100 – 1150	1020 – 1150
Arbeitstemperatur [°C]	1180	1165

Tab. 5: Technische Daten der Lote

3.1.2 Verblendkeramik

Technische Daten der Verblendkeramiken (Herstellerangabe VITA Zahnfabrik):

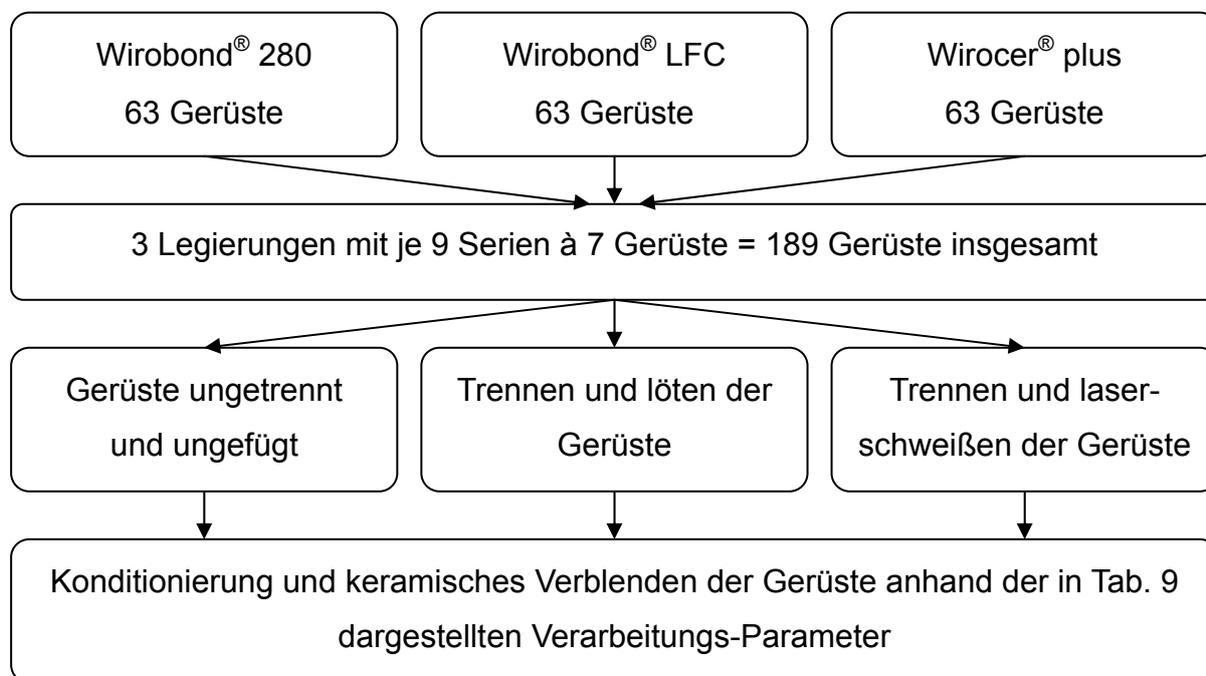
Verblendkeramik Omega 900®	
WAK Opaker (25 - 500 °C) [10^{-6} K^{-1}]	14,3 – 14,5
WAK Dentin (25 - 500 °C) [10^{-6} K^{-1}]	13,4 – 13,9
Dichte Dentin [g/cm^3]	2,4
Biegefestigkeit Dentin ISO 9693 [MPa]	101
Haftverbund Opaker ISO 9693 [MPa]	47
verwendete Chargen	Paste Wash Opaque: Nr. 18240
	Paste Opaque: Nr. 26840
	Dentine A3,5: Nr. 7582

Tab. 6: Technische Daten und Chargennummern der Keramik Omega 900®

Verblendkeramik Response®	
WAK Opaker (25 - 500 °C) [10^{-6} K^{-1}]	15,6 - 15,8
WAK Dentin (25 - 500 °C) [10^{-6} K^{-1}]	15,0 - 15,5
Dichte Dentin [g/cm^3]	ca. 2,5
Biegefestigkeit Dentin ISO 9693 [MPa]	ca. 118
Haftverbund Opaker ISO 9693 [MPa]	ca. 51
Verwendete Chargen	Paste Opaque OP2: Nr. 7691
	Dentine 3M2: Nr. 7274

Tab. 7: Technische Daten und Chargennummern der Keramik Response®

3.2 Herstellung der Prüfkörper



Tab. 8: vereinfachte Darstellung der Prüfkörper-Herstellung ohne variierende Parameter

In dieser Arbeit wurden auf Basis von drei verschiedenen Legierungen neun Serien mit jeweils sieben Prüfkörpern hergestellt (vgl. Tab. 8). Das ergibt insgesamt 189 Prüfkörper. Die sieben Prüfkörper je Serie und Legierung unterliefen die Arbeitsschritte immer zusammen, so dass eine Vergleichbarkeit für alle sieben Prüfkörper jeweils gegeben ist. Die Herstellung erfolgte immer durch dieselbe Person (Ausnahme: Laserschweißungen).

		Arbeitsschritt				Washbrand	Opakerbrand	1. Dentinbrand	2. Dentinbrand	Glanzbrand
		Löten	Laserschweißen	Fräsen	Abstrahlen (250 µm)					
Serie	0 (Referenz)	-	-	✓	✓					
	1	-	-	✓	-					
	2	-	-	-	✓					
	3	✓ WBA + WLF mit Wirobond-Lot, WEP mit Wiron-Lot gelötet	-	✓	✓					
	4	✓ wie Serie 3, mit Überschuss Flussmittel gelötet	-	✓	✓ zusätzliche Kontamination mit Flussmittel nach Abstrahlen					
	5	✓ wie Serie 3, mit Überschuss Lot im Verblendbereich	-	✓	✓			✓		
	6	-	✓ WBA + WLF mit Wiroweld, WEP mit Wiroweld NC geschweißt	✓	✓					
	7	-	✓ wie Serie 6, Schweißnaht einseitig belassen	✓	✓					
	8	-	✓ wie Serie 6, Überschuss Schweißzusatzst off im Verblendbereich	✓	✓					

Tab. 9: Bearbeitung nach Arbeitsschritten. ✓: durchgeführt, -: nicht durchgeführt WBA:

Wirobond® 280, WLF: Wirobond® LFC, Wirocer® plus

3.2.1 Herstellung der Metallgerüste

Sieben Polyacrylamidplättchen mit den ungefähren Abmessungen $3 \cdot 0,5 \cdot 25 \text{ mm}^3$ wurden über Wachsprofilstäbe zirkulär um einen 4 mm starken Gusskanal angestiftet (s. Abb. 1). Die Platzierung dieser Modellation fand in einer Muffel der Größe 3 statt:

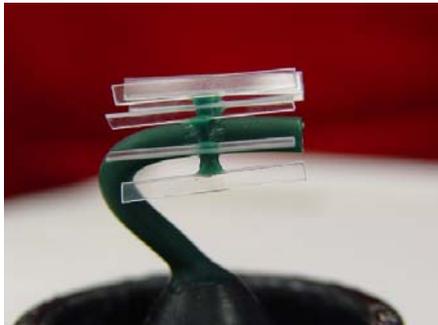


Abb. 1: Wachsmodellation vor dem Einbetten

30 min nach dem Einbetten wurden die Muffeln bei $950 \text{ }^\circ\text{C}$ (Wirobond[®] 280 und Wirocer[®] plus) bzw. $900 \text{ }^\circ\text{C}$ (Wirobond[®] LFC) für 60 min in den Vorwärmofen gestellt (schnelles Aufheizen). Der Guss fand durch die Flammanschleuderguss-Technik statt (verwendete Geräte: s. Tab. 18). Nach dem Abkühlen wurden die Gussobjekte ausgebettet, durch Abstrahlen von der Einbettmasse befreit und die Plättchen abgetrennt. Das Zurückschleifen der Gerüste erfolgte gemäß DIN EN ISO 9693 [18] auf folgende Maße mit Toleranzbereichen: Länge $25,0 \pm 0,5 \text{ mm}$, Breite $3,0 \pm 0,1 \text{ mm}$, Dicke $0,50 \pm 0,05 \text{ mm}$. Die Herstellung der Prüfkörper war bis zu diesem Schritt für alle Serien bis auf Serie 2 (auf der Verblendseite nicht gefräst) identisch und erfolgte nach Herstellerangabe.

Die Gerüste der Serien 0 bis 2 wurden nicht getrennt. Die Trennung der Gerüste der Serien 3 bis 8 erfolgte mittig.

Die Hälften der Löt-Serien 3 bis 5 wurden an den zu fügenden Enden mit 3 bar abgestrahlt. In der Behelfsform plan liegend wurden sie im Abstand von 0,2 mm über eine Wachsbrücke fixiert (s. Abb 2). Als Abstandshalter diente Zinnfolie mit der entsprechenden Dicke des Abstands. Für die Herstellung der Lötblöcke dienten Schablonen aus Polyether, in denen das Einbetten der Gerüsthälften mit Löt-Einbettmasse stattfand (s. Abb.3).



Abb. 2: Fixierung der Gerüsthälften mit definiertem Abstand



Abb. 3: fixierte Prüfkörper in Löt-Einbettmasse

Nach Entfernen des Waxes von den Fügeflächen wurden diese mit Flussmittel bestrichen (Vorbereitung: s. Abb. 4). Das Vorwärmen der Lötblöcke fand bei 300 °C 20 min statt. Im Anschluss daran wurden die Gerüsthälften mit der Flamme gelötet (Aceton-Propan-Pentan-Sauerstoff-Gemisch).

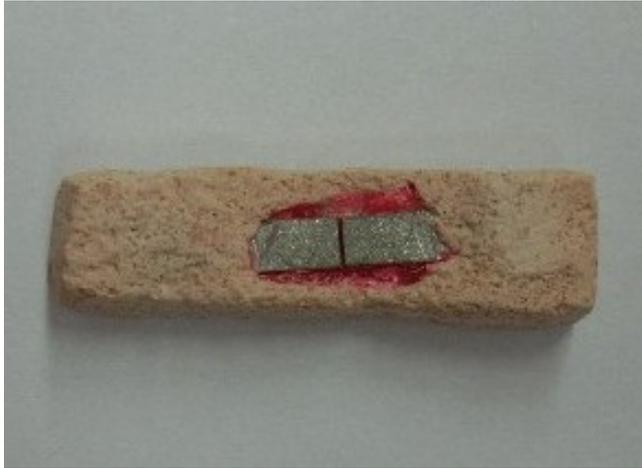


Abb. 4: Gerüsthälften zum Löten freigelegt

Abweichend von den Herstellerangaben wurde bei den Serien 4 und 5 Lot über den gesamten Verblendbereich verteilt. Serie 4 wurde zusätzlich nach dem Abstrahlen und vor dem Verblenden mittig mit Flussmittel kontaminiert.

Das Laserschweißen der Hälften der Serien 6 bis 8 fand bei der Firma BEGO unter Verwendung von Schweißzusatzwerkstoffen statt. Die Schweißparameter waren 270 V, 7,5 ms und Fokus 0,7. Abweichend von den Herstellerangaben wurde bei Serie 7 mittig die Schweißraupe belassen und nicht mit der Fräse reduziert. Der Schweißzusatzstoff wurde bei Serie 8 über den gesamten Verblendbereich verteilt, d.h. es wurde in diesem gesamten Bereich geschweißt.

Das Zurückschleifen mit der Fräse erfolgte bei den Serien 4, 5 und 8 von der Unterseite der Gerüste, damit die Bedeckung durch Lot bzw. Schweißzusatzstoff nicht verloren geht.

Mit Ausnahme der Serien 1 und 2 wurden alle Serien vor dem keramischen Verblenden mit Hartmetallfräsen bearbeitet und abgestrahlt (250 µm Korngröße, 3,5 bar).

Die Dickenmessung der Gerüste fand vor dem Abstrahlen vor dem Verblendvorgang statt. Von drei Messstellen (links, mittig, rechts) pro Gerüst wurde der Durchschnittswert für die Dicke herangezogen.

Im Folgenden sind die variierten Parameter der Serien dargestellt:

- Beschreibung der Serien:

Serie 0: Referenz (ungefügt)

Serie 1: ungefügt, nicht abgestrahlt

Serie 2: ungefügt, nicht gefräst, abgestrahlt

Serie 3: gelötet, nach Herstellerangabe bearbeitet

Serie 4: gelötet, Lot verschmiert, mit Flussmittel kontaminiert

Serie 5: gelötet, Lot verschmiert

Serie 6: lasergeschweißt, nach Herstellerangabe bearbeitet

Serie 7: lasergeschweißt, Schweißraupe belassen

Serie 8: lasergeschweißt, Schweißzusatzstoff überschüssig

3.2.2 Verblenden mit Keramik

Legierung	Verblendkeramik
Wirobond [®] 280, Wirocer [®] plus	Omega 900 [®]
Wirobond [®] LFC	Response [®]

Tab. 10: Kombinationen der Verbundpartner

Der 8-mm-breite Verblendbereich wurde in der Behelfsform auf dem eingespannten Gerüst markiert. Nach dem Abstrahlen (außer Serie 1) begann das Verblenden mit keramischen Massen gemäß Angabe des Keramikherstellers und der Norm DIN EN ISO 9693 [18]. Die Abfolge und die Brandführung sind in den Tab. 9 sowie 11 und 12 dargestellt. Sieben Prüfkörper je Serie und Legierung durchliefen die Brandfolgen gemeinsam. Die aufgebrannten Keramikblöcke erreichten nach Sinterung und Zurückschleifen die Abmessung $8 \cdot 1 \cdot 3 \text{ mm}^3$ (Maße s. Abb. 5).

Brenntabellen 11 und 12 (Empfehlung der Fa. VITA für IVOCLAR Programat P90):

Brand	B	A	S	T	H	V1	V2
Washbrand Paste	500	67	6	900	3	600	899
Grundmassebrand Paste	500	67	6	900	2	600	899
1. Dentinbrand	600	50	6	900	1	600	899
2. Dentinbrand	600	48	6	890	1	600	899
Glanzbrand	600	75	3	900	2		

Tab. 11: Brenntabelle Omega[®] 900

Brand	B	A	S	T	H	V1	V2
Washbrand Paste	400	67	6	800	2	400	799
Grundmassebrand Paste	400	67	6	800	2	400	799
1. Dentinbrand	400	63	6	780	1	400	779
2. Dentinbrand	400	63	6	780	1	400	779
Glanzbrand	400	95	3	780	2		

Tab. 12: Brenntabelle Response[®]

B = Bereitschaftstemperatur [°C]
A = Aufheizrate [°C/min]
S = Schließzeit [min]
T = Brenntemperatur [°C]
H = Haltezeit [min]
V1 = Beginn Vakuum [°C]
V2 = Ende Vakuum [°C]

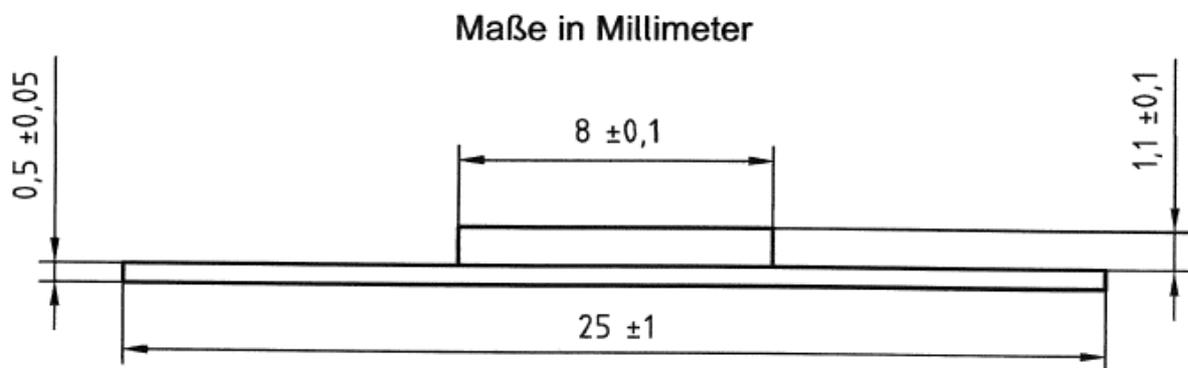


Abb. 5: Prüfkörperdarstellung aus DIN EN ISO 9693 [18].

3.3 Prüfmethode

3.3.1 Hauptversuch

Der Dreipunkt-Biegeverbundtest erfolgte nach DIN EN ISO 9693. Er wurde immer von derselben Person an derselben Universalprüfmaschine (Typ Z010, Fa. ZWICK) durchgeführt.

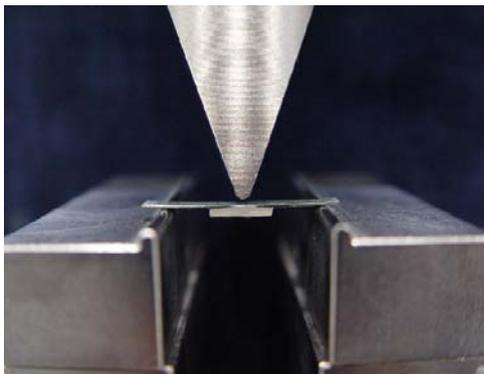


Abb. 6: Prüfkörper beim Dreipunkt-Biegeverbundtest

Der Auflagen-Abstand betrug 20 mm. Die Prüfkörper wurden mit der Keramik-Seite nach unten aufgelegt und so platziert, dass die Druckfinne (Radius = 1 mm) mittig hinsichtlich des Keramik-Blocks auf die Metall-Seite trifft (Markierung). Die Vorschub-Geschwindigkeit betrug 1 mm/min. Der zeitliche Verlauf der aufgewendeten Kraft wurde durch einen Computer in einem Diagramm aufgezeichnet. Bei einem Kraftabfall von 15 %, bei dem sich die Keramik vom Metall ablöste (Verbundversagen), wurde die Kraft F_{Bruch} registriert.

3.3.2 Auswertung des Ergebnisses

Die Scher-Verbundfestigkeit errechnete sich aus der beim Verbundversagen gemessenen Kraft F_{Bruch} durch folgende Formel:

$$\tau_v = k \cdot F_{\text{Bruch}}$$

τ_v = Scher-Verbundfestigkeit [MPa], k = Koeffizient k [mm^{-2}]

Der Auflagenabstand ist konstant. Aus der Formel der Bruchkraft F_{Bruch} wird der Einfluss der Gerüstdicke d deutlich, den d in der dritten Potenz auf F_{Bruch} hat:

$$F_{\text{Bruch}} = \frac{4 \cdot E \cdot b \cdot f \cdot d^3}{l^3}.$$

E = Elastizitätsmodul der Legierung [MPa], b = Gerüstbreite [mm], f = Durchbiegung des Prüfkörpers, d = Gerüstdicke [mm], l = Auflagenabstand [mm]

Der benötigte Wert des Koeffizient k geht aus der Funktion von Gerüstdicke d_M und dem E-Modul der Legierung E_M hervor:

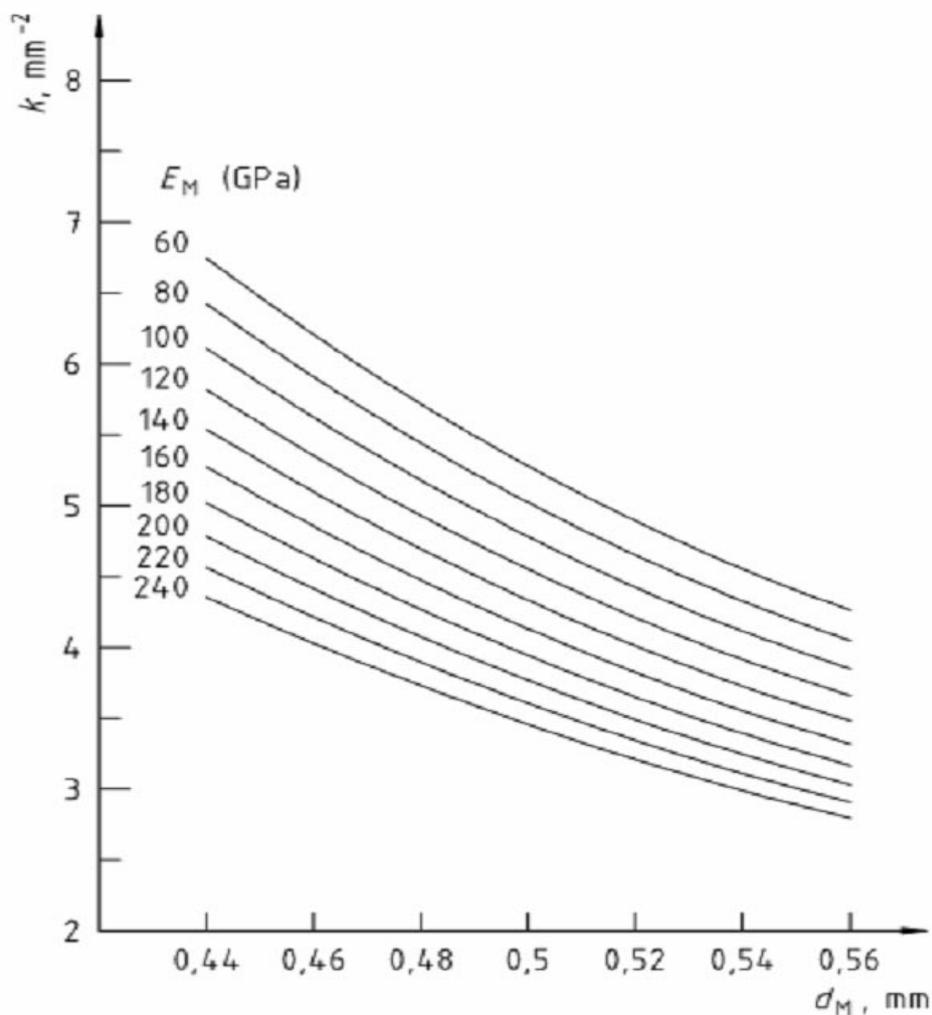


Abb. 7: Funktion des Koeffizient k in Abhängigkeit des E-Moduls

3.3.3 Mikroskopische Untersuchungen

Um mögliche Zusammenhänge zwischen der Beschaffenheit der Verbundzone, der Verbundfestigkeit und den unterschiedlichen Herstellungsarten finden zu können, wurden die Prüfkörper optisch in der Aufsicht und im Längsschliff beurteilt. Ziel dieser Untersuchung war es, mögliche Unterschiede zwischen den Verbundzonen der verschiedenen Serien und dem Bruchverlauf zu finden. Die Herstellungsweise könnte einen Einfluss auf die Art des Bruchs (adhäsiv/kohäsiv) und damit auch auf die Verbundfestigkeit haben. Zur Auswahl kamen die Prüfkörper mit der niedrigsten Verbundfestigkeit je Legierung und Serie.

Es kann untersucht werden, ob beim Dreipunkt-Biegeverbundtest ein Versagen der Verbund-Partner zum Kraftabfall im Spannungs-Dehnungs-Diagramm führte oder ob die Eigenfestigkeit der Keramik überschritten wurde. Der teilweise anhaftende Keramikblock wurde für die Aufsichtuntersuchung manuell entfernt. Diese gibt Auskunft über die Quantität von Keramik-, Opaker und Metalloxidresten bzw. freigelegter Metalloberfläche.

Mit der Schliffeinbett-Technik konnte die Verbundzone von der Seite betrachtet werden. Beurteilt wurden der Bruchspaltverlauf und das Vorhandensein von Unregelmäßigkeiten. Betrachtet wurden die Prüfkörper von der Aufsicht-Untersuchung. Zudem wurden Prüfkörper mit Keramikblock eingebettet.

Die Prüfkörper wurden in einem Stereo-Auflichtmikroskop in 11-, 46- und 120-facher Vergrößerung betrachtet und fotografiert.

3.4 Statistische Verfahren

Für jede Legierung wurde je Serie eine beschreibende Statistik erstellt. Die einzelnen Werte sind tabellarisch im Anhang (Kap. 8.2) aufgeführt. Die Statistik enthält:

- Mittelwert
- Median
- Minimum
- Maximum
- Standardabweichung
- Variationskoeffizient.

Die vergleichende Statistik fand jeweils innerhalb einer Legierung zwischen allen Serien statt. Gemäß der allgemeinen Konvention wurde die Irrtumswahrscheinlichkeit auf 5 % festgesetzt ($p = 0,05$). Ist p kleiner als 0,05, wurde die Nullhypothese verworfen. Diese besagt, dass alle Werte einer gemeinsamen Grundgesamtheit angehören und Unterschiede zufällig sind. Um zu ermitteln, ob zwischen den verglichenen Gruppen statistisch signifikante Unterschiede vorhanden sind ($p < 0,05$), wurde zuerst pro Legierung global getestet - mit Hilfe der einfaktoriellen Varianzanalyse (oneway ANOVA). Hiermit können im Gegensatz zum T-Test nach STUDENT mehr als zwei Gruppenmittelwerte simultan verglichen werden. Voraussetzung hierfür ist deren Normalverteilung, die vorher durch den KOLMOGOROV-SMIRNOV-Test bestätigt wurde. Die einfaktorielle Varianzanalyse war für die Serien aller drei Legierungen jeweils global signifikant ($p < 0,05$), sodass Post-Hoc-Mehrfachvergleiche notwendig wurden.

Bei den Post-Hoc-Tests kamen unterschiedliche Verfahren zur Anwendung:

- Der LEVENE-Test ergab im Falle der Serien von Wirobond[®] 280 eine homogene Verteilung der Varianzen ($p > 0,05$), sodass die Vergleiche nach der SCHEFFÉ-Prozedur durchgeführt wurden.
- Die Serien der Legierungen Wirobond[®] LFC und Wirocer[®] plus zeigten eine inhomogene Verteilung der Varianzen (LEVENE-Test signifikant, $p < 0,05$). Für die Vergleiche kam die Methode nach GAMES und HOWELL zur Anwendung.

Die Ergebnisse sind in Kreuztabellen dargestellt (Tab. 13 bis 15).

Zur genaueren Beschreibung der statistischen Verfahren wird hier auf Lehrbücher der Statistik verwiesen [78, 111].

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse des Dreipunkt-Biegeverbundtests nach SCHWICKERATH

Die Einzelwerte und die beschreibende Statistik sind im Anhang zu finden. Der Übersichtlichkeit halber sind Box-Plot-Diagramme erstellt worden. In diesen Diagrammen finden sich neben den Box-Plots auch Kreise und Sterne, die Ausreißer bzw. Extremwerte darstellen. Sie fließen in die Statistik mit ein. Die Mehrfach-Paarvergleiche sind tabellarisch dargestellt.

4.1.1 Ergebnisse Wirobond® 280

Die Mittelwerte der einzelnen Serien befinden sich zwischen 33 und 45 MPa. Somit liegen für diese Legierung alle Serien über dem in der Norm DIN EN ISO 9693 [18] geforderten Wert größer als 25 MPa. Die Variationskoeffizienten bewegen sich zwischen 5,5 und 10,8 %.

Den niedrigsten Mittelwert von 33 MPa erreichte die Serie 1 (ungefügt, nicht abgestrahlt) und mit einem Variationskoeffizienten von 10,8 % auch die größte Streuung. Den im Mittel höchsten Haftwert ergab Serie 5 (gelötet, Lot verschmiert) mit 45 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 8,6 %. Die Kontrollserie 0 liegt bei 41 MPa und einem Variationskoeffizienten von 5,9 %. Die anderen Löt-Serien weisen Mittelwerte von 44 MPa und einen Variationskoeffizienten von 6,0 % bei Serie 4 (gelötet, Lot verschmiert, Kontamination mit Flussmittel) auf, sowie 43 MPa und einen Variationskoeffizienten von 8,0 % bei Serie 3 (gelötet, nach Herstellerangabe bearbeitet). Die nach Herstellerangabe lasergeschweißte Serie 6 zeigt einen Mittelwert von 40 MPa und einen Variationskoeffizienten von 7,1 % auf. Das Belassen einer Schweißraupe führte bei Serie 7 zu einer Verbundfestigkeit von 40 MPa im Mittel und einem Variationskoeffizienten von 5,5 %. Bei Serie 8 (lasergeschweißt, Schweißzusatzstoff überschüssig) wurde ein Mittelwert von 44 MPa ermittelt bei einem Variationskoeffizienten von 9,0 %. Serie 2 (ungefügt, ungefräst, abgestrahlt) ergab einen Mittelwert von 38 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 5,5 %.

Beim Vergleich der Mittelwerte ergaben die Löt-Serien relativ hohe Verbundfestigkeiten wie auch Serie 8. Die Kontrollserie 0 liegt im mittleren Bereich aller Mittelwerte. Die lasergeschweißten Serien 6 und 7 liegen knapp unter der Kontrollserie, genau so wie Serie 2. Serie 1 weist im Vergleich zu allen anderen Mittelwerten einen deutlich niedrigeren Wert auf.

Mit Ausnahme von Serie 2 zeigt Serie 1 statistisch signifikante Unterschiede mit allen anderen Serien.

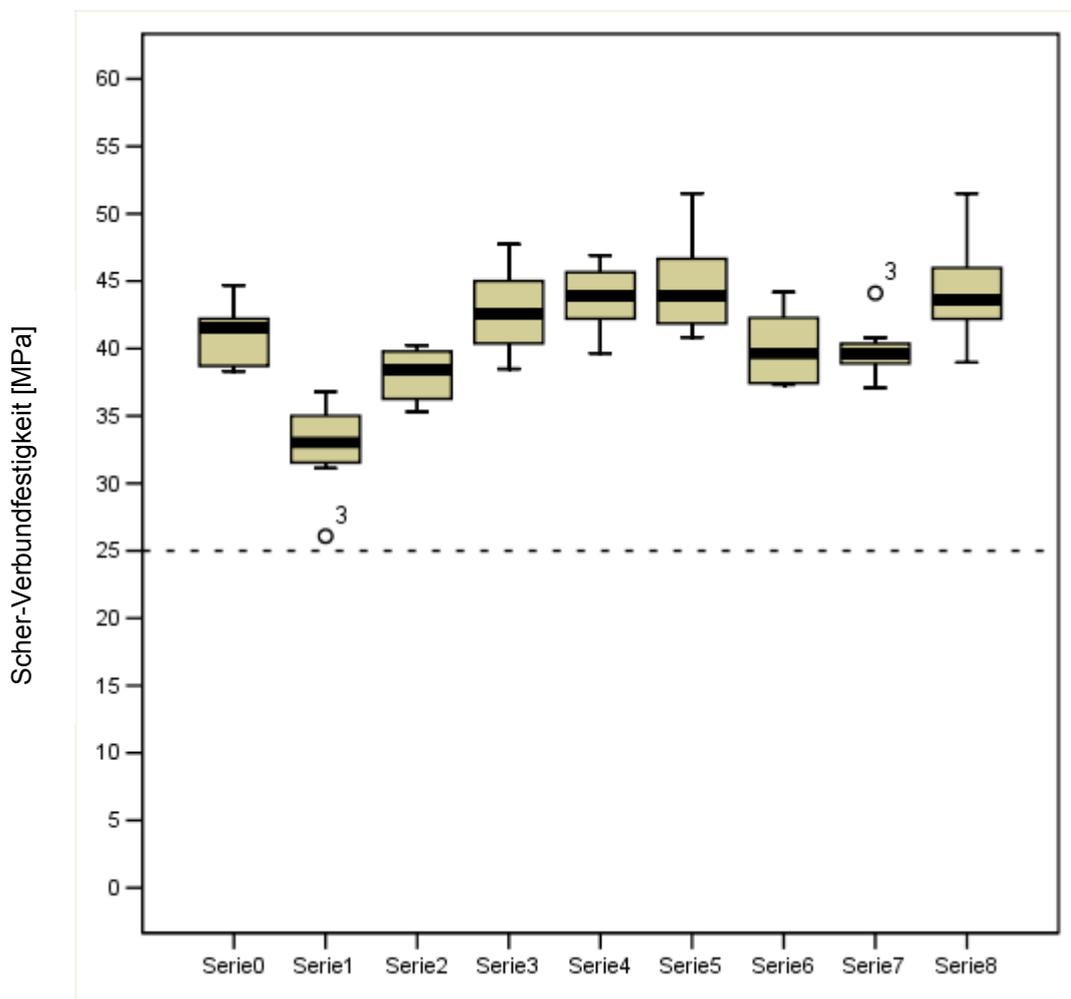


Abb. 8: Box-Plot-Darstellung der Scher-Verbundfestigkeiten von Wirobond® 280 mit Omega® 900. Werte oberhalb von 25 MPa gelten als klinisch sicher (horizontale Linie).

Beschreibung der Serien:

Serie 0: Referenz (ungefügt)

Serie 1: ungefügt, nicht abgestrahlt

Serie 2: ungefügt, nicht gefräst, abgestrahlt

Serie 3: gelötet, nach Herstellerangabe bearbeitet

Serie 4: gelötet, Lot verschmiert, mit Flussmittel kontaminiert

Serie 5: gelötet, Lot verschmiert

Serie 6: lasergeschweißt, nach Herstellerangabe bearbeitet

Serie 7: lasergeschweißt, Schweißraupe belassen

Serie 8: lasergeschweißt, Schweißzusatzstoff überschüssig

Serie	Serie								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	-	0,006	0,920	0,995	0,930	0,700	1,000	1,000	0,815
1	**	-	0,261	0,000	0,000	0,000	0,021	0,027	0,000
2	n.s.	n.s.	-	0,401	0,168	0,050	0,990	0,994	0,085
3	n.s.	***	n.s.	-	1,000	0,993	0,945	0,921	0,999
4	n.s.	***	n.s.	n.s.	-	1,000	0,752	0,700	1,000
5	n.s.	***	n.s.	n.s.	n.s.	-	0,433	0,380	1,000
6	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-	1,000	0,566
7	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-	0,509
8	n.s.	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-

n. s.: nicht signifikant *: $p < 0,05$ **: $p < 0,01$ ***: $p < 0,001$ Tab. 13: Mehrfach-Paarvergleiche der Serien von Wirobond[®] 280 (SCHEFFÉ-Prozedur)

4.1.2 Ergebnisse Wirobond® LFC

Bei dieser Legierung wurden hinsichtlich der Verbundfestigkeit Mittelwerte zwischen 15 und 36 MPa bestimmt. Die Serien 1 und 8 erfüllen nicht die Bedingungen der Norm DIN EN ISO 9693 [18], wonach vier von sechs Prüfkörpern je Serie eine Verbundfestigkeit von mehr als 25 MPa aufweisen müssen. In den Serien 6 und 7 befindet sich jeweils ein Wert, der kleiner als 25 MPa ist, was aber im Rahmen der Norm liegt. Die Variationskoeffizienten liegen zwischen 5,1 und 97,1 %.

Serie 3 (gelötet, nach Herstellerangabe bearbeitet) erreichte mit 36 MPa den höchsten Mittelwert bei einem Variationskoeffizienten von 9,0 %. Den niedrigsten Mittelwert weist Serie 8 (lasergeschweißt, Schweißzusatzstoff überschüssig) mit 15 MPa auf bei einem Variationskoeffizienten von 97,1 %, der mit Abstand die größte Streuung innerhalb einer Serie darstellt. Drei Proben hatten eine Verbundfestigkeit von 0 MPa, da die Keramikablösung schon vor der Prüfung stattfand. Die mittlere Verbundfestigkeit der Kontrollserie 0 ist 35 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 9,3 %. Die beiden anderen Löt-Serien weisen Mittelwerte von 33 MPa und einen Variationskoeffizienten von 7,7 % bei Serie 4 (gelötet, Lot verschmiert, Kontamination mit Flussmittel) auf, sowie 31 MPa und einen Variationskoeffizienten von 6,7 % bei Serie 5 (gelötet, Lot verschmiert). Die zwei anderen lasergeschweißten Serien verteilen sich uneinheitlich: Serie 6 (lasergeschweißt, nach Arbeitsanweisung) ergab im Mittel 33 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 24,9 %, der Mittelwert von Serie 7 (lasergeschweißt, Schweißraupe belasten) liegt bei 30 MPa und der Variationskoeffizient bei 11,9 %. Jeweils ein Wert von Serie 6 und 7 erreichte nicht die erforderlichen 25 MPa. Serie 2 (ungefügt, abgestrahlt, nicht gefräst) ergab 36 MPa und einen Variationskoeffizienten von 5,1 % und Serie 1 (gefräst, nicht abgestrahlt) 21 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 34,0 %.

Beim Vergleich der Mittelwerte weisen die nach Herstellerangabe gefertigten Proben sowie Serie 2 die höchsten Werte auf. Serie 1 und 8 erreichten die mit Abstand niedrigsten Werte.

Statistisch signifikante Unterschiede zeigt Serie 1 mit den Serien 0, 2, 3 und 4. Außerdem sind Serie 2 und 5 signifikant.

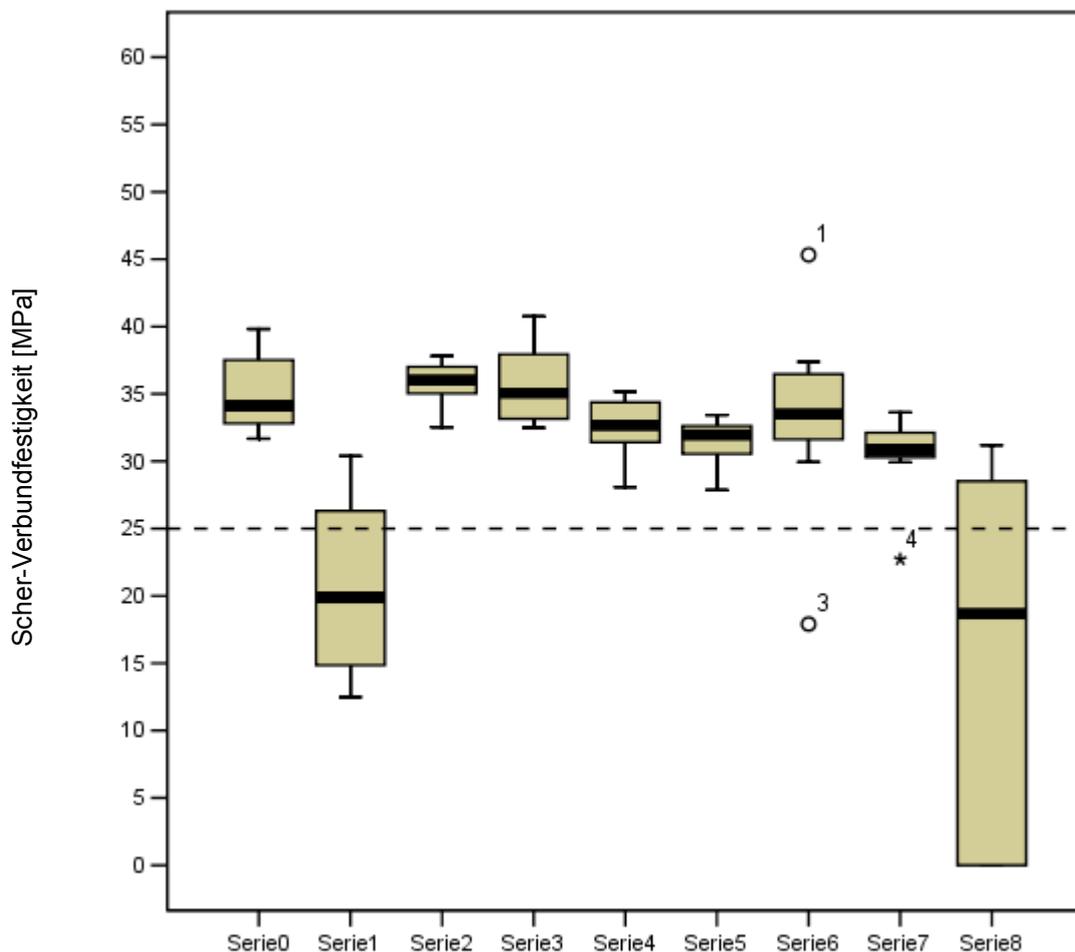


Abb. 9: Box-Plot-Darstellung der Scher-Verbundfestigkeiten von Wirobond® LFC mit Response®. Werte oberhalb von 25 MPa gelten als klinisch sicher (horizontale Linie).

Beschreibung der Serien:

Serie 0: Referenz (ungefügt)

Serie 1: ungefügt, nicht abgestrahlt

Serie 2: ungefügt, nicht gefräst, abgestrahlt

Serie 3: gelötet, nach Herstellerangabe bearbeitet

Serie 4: gelötet, Lot verschmiert, mit Flussmittel kontaminiert

Serie 5: gelötet, Lot verschmiert

Serie 6: lasergeschweißt, nach Herstellerangabe bearbeitet

Serie 7: lasergeschweißt, Schweißraupe belassen

Serie 8: lasergeschweißt, Schweißzusatzstoff überschüssig

Serie	Serie								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	-	0,016	1,000	1,000	0,724	0,291	0,999	0,259	0,128
1	*	-	0,014	0,012	0,049	0,078	0,148	0,140	0,989
2	n.s.	*	-	1,000	0,216	0,024	0,994	0,084	0,113
3	n.s.	*	n.s.	-	0,500	0,162	0,996	0,158	0,113
4	n.s.	*	n.s.	n.s.	-	0,987	1,000	0,901	0,211
5	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	-	0,999	0,998	0,260
6	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-	0,989	0,230
7	n.s.	-	0,326						
8	n.s.	-							

n. s.: nicht signifikant *: $p < 0,05$ **: $p < 0,01$ ***: $p < 0,001$

Tab. 14: Mehrfach-Paarvergleiche der Serien von Wirobond® LFC (Methode nach GAMES und HOWELL)

4.1.3 Ergebnisse Wirocer® plus

Die Mittelwerte der einzelnen Serien liegen zwischen 11 MPa und 45 MPa. Die Variationskoeffizienten ergaben Werte zwischen 6,8 und 71,4 %. Serie 1 (gefräst, nicht abgestrahlt) erfüllt nicht die Anforderung der Norm DIN EN ISO 9693 [18], wonach mindestens vier von sechs Prüfkörpern eine Verbundfestigkeit größer als 25 MPa aufweisen müssen. Serie 6 enthält einen Wert unter 25 MPa, was aber innerhalb der Norm liegt.

Serie 5 (gelötet, Lot verschmiert) lieferte mit 45 MPa den höchsten Mittelwert bei einem Variationskoeffizienten von 10,5 %. Den niedrigsten Wert ergab Serie 1 mit 11 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 71,4 %. Die Referenzserie 0 nimmt innerhalb der Mittelwerte mit 43 MPa eine Mittelstellung ein, der Variationskoeffizient liegt bei 7,2 %. Knapp darunter liegt Serie 3 (gelötet, nach Arbeitsanweisung) mit 42 MPa und einem Variationskoeffizienten von 7,0 %. Die anderen Löt-Serien befinden sich von den Mittelwerten her dicht an der Referenzserie 0: 41 MPa und ein Variationskoeffizient von 7,0 % wurde bei Serie 3 (gelötet, nach Herstellerangabe bearbeitet) ermittelt sowie 43 MPa und ein Variationskoeffizient von 11,3 % im Falle von Serie 4 (gelötet, Lot verschmiert, Kontamination mit Flussmittel). Serie 7 (lasergeschweißt, Schweißraupe belassen) lieferte einen Mittelwert von 41 MPa bei einem Variationskoeffizienten von 6,8 %. Die anderen Schweißserien führten bei Serie 8 (Schweißzusatzstoff überschüssig) zu einer mittleren Verbundfestigkeit von 37 MPa und einem Variationskoeffizienten von 6,9 %, bei Serie 6 (lasergeschweißt, nach Arbeitsanweisung) zu 34 MPa und einem Variationskoeffizienten von 45,0 %. Serie 2 (ungefügt, abgestrahlt, ungefräst) erreichte einen Mittelwert von 44 MPa bei einem Variationskoeffizienten 6,9 %.

Die Löt-Serien 4 und 5 sowie Serie 2 erreichten vergleichsweise hohe Werte. Die Referenzserie 0 befindet sich im mittleren Wertebereich. Knapp darunter liegen Serie 3 und die lasergeschweißten Serien. Serie 1 lieferte mit Abstand den niedrigsten Mittelwert.

Statistisch signifikante Unterschiede bestehen zwischen Serie 1 und allen anderen Serien, mit Ausnahme von Serie 6. Außerdem sind die Paarvergleiche zwischen Serien 0 und 8, 2 und 8 sowie 5 und 8 signifikant.

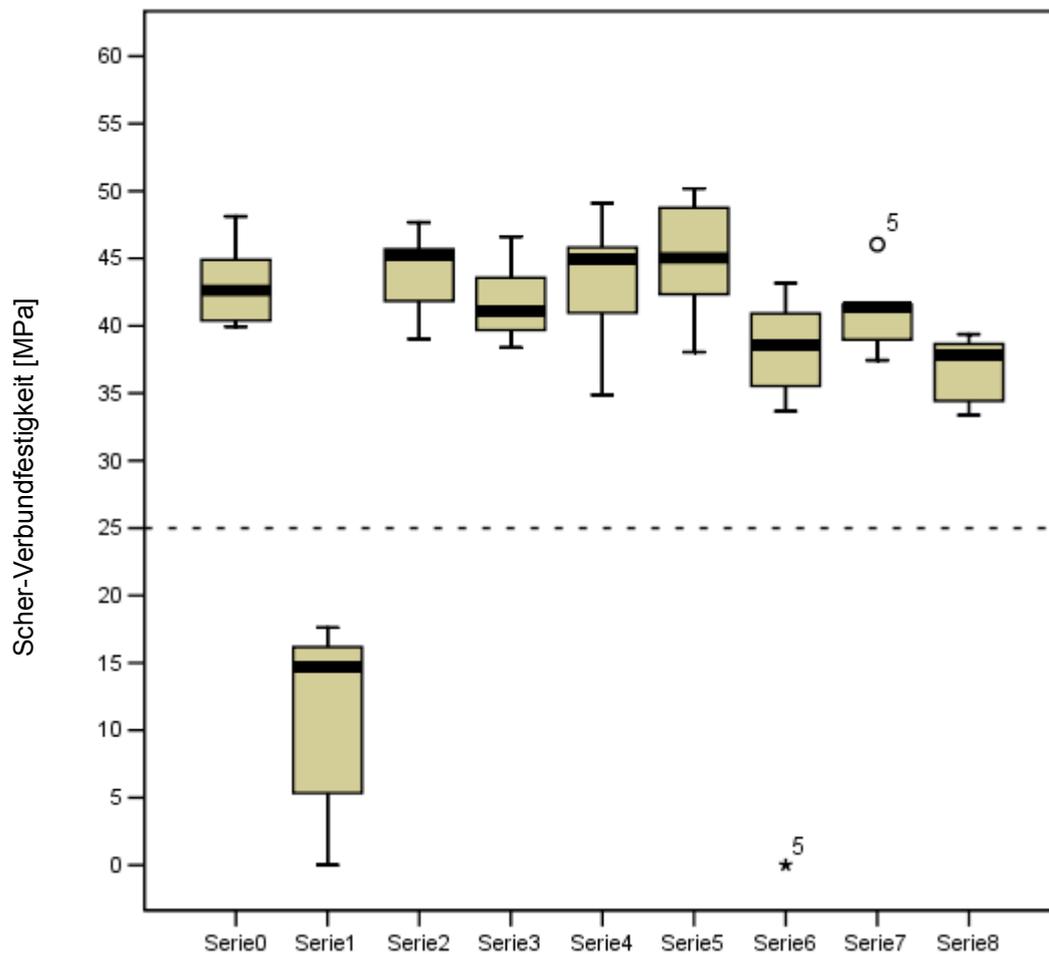


Abb. 10: Box-Plot-Darstellung der Scher-Verbundfestigkeiten von Wirocer® plus mit Omega® 900. Werte oberhalb von 25 MPa gelten als klinisch sicher (horizontale Linie).

Beschreibung der Serien:

Serie 0: Referenz (ungefügt)

Serie 1: ungefügt, nicht abgestrahlt

Serie 2: ungefügt, nicht gefräst, abgestrahlt

Serie 3: gelötet, nach Herstellerangabe bearbeitet

Serie 4: gelötet, Lot verschmiert, mit Flussmittel kontaminiert

Serie 5: gelötet, Lot verschmiert

Serie 6: lasergeschweißt, nach Herstellerangabe bearbeitet

Serie 7: lasergeschweißt, Schweißraupe belassen

Serie 8: lasergeschweißt, Schweißzusatzstoff überschüssig

Serie	Serie								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	-	0,000	1,000	0,996	1,000	0,984	0,765	0,885	0,025
1	***	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,087	0,000	0,001
2	n.s.	***	-	0,917	1,000	0,999	0,696	0,611	0,009
3	n.s.	***	n.s.	-	0,998	0,810	0,857	0,999	0,074
4	n.s.	***	n.s.	n.s.	-	0,997	0,775	0,959	0,152
5	n.s.	***	n.s.	n.s.	n.s.	-	0,617	0,559	0,038
6	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-	0,913	0,999
7	n.s.	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-	0,175
8	*	**	**	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	-

n. s.: nicht signifikant *: $p < 0,05$ **: $p < 0,01$ ***: $p < 0,001$

Tab. 15: Mehrfach-Paarvergleiche der Serien von Wirocer[®] plus (Methode nach GAMES und HOWELL)

4.2 Oberflächenuntersuchungen

4.2.1 Aufsicht

Innerhalb der Legierungen zeigen die Serien 0, 2, 3, 6 und 8 keine auffälligen optischen Unterschiede: Die Metalloberfläche ist überwiegend von Oxid bedeckt, teilweise sind Stellen von blankem Metall zu sehen, vereinzelt finden sich Nester von Opaker-Resten. Hier liegen insgesamt adhäsive Bruchverläufe in Kombination mit kohäsiven vor. Der Bruch verläuft innerhalb der Verbundzone. Kohäsive Anteile finden sich im Randbereich, wo der Bruch begann und Keramikreste zu finden sind. Keine der ausgesuchten Proben wies einen Vertikalriss in der Keramik nach dem Dreipunkt-Biegeverbundtest auf.

Zwischen den Legierungen fällt auf, dass die oben genannten Serien der Legierung Wirocer[®] plus etwas weniger Oxid- und Opaker-Anteile und mehr blanke Metall-Bereiche aufweisen als die von Wirobond[®] 280. Umgekehrt verhält es sich bei Wirobond[®] LFC: Hier sind im Vergleich zu Wirobond[®] 280 mehr Oxid- und Opaker-Reste, jedoch weniger blanke Metall-Anteile auf der Metalloberfläche vorhanden.

Diese Unterschiede sind jedoch nur gering ausgeprägt. Analoges gilt umgekehrt für die Rückseite des abgelösten Keramikblocks:

Wirobond [®] 280	Legierungsoberfläche (oben) überwiegend von Oxid bedeckt, teilweise Stellen von blankem Metall, vereinzelt Nester von Opaker-Resten (vierfache Vergrößerung)	
Wirocer [®] plus	Legierungsoberfläche (oben) enthält weniger Oxid- und Opaker-Anteile und mehr blanke Metallbereiche als Wirobond [®] 280 (vierfach)	
Wirobond [®] LFC	Legierungsoberfläche (oben) enthält mehr Oxid- und Opaker-Anteile und weniger blanke Metallbereiche als Wirobond [®] 280 (vierfach)	

Tab. 16: Vergleich der Bruchflächen der drei verschiedenen Legierungen

Serie 1 aller Legierungen zeigt die nahezu vollständige Ablösung von Oxid und Opaker von der Metalloberfläche. Es sind fast keine Opaker- oder Keramik-Reste zu finden. Die Unterseite des Keramik-Blocks ist mit Oxid bedeckt, der adhäsive Bruch verläuft zwischen Metalloberfläche und Oxidschicht (s. Abb 11):

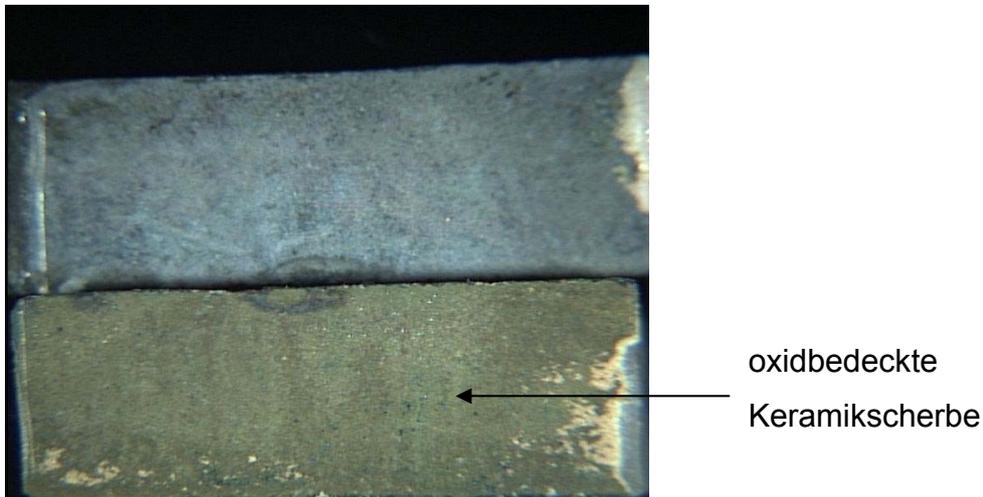


Abb. 11: Serie 1 (Wirobond[®] 280), 11-fach

Serie 5 der Legierungen zeigt, dass im lotbedeckten Gebiet mehr blankes Metall auf dem Gerüst und auf der Unterseite des Keramikblocks mehr Oxid zu sehen ist, als im Bereich der Basislegierung. Der Übergang (rechts) ist im Falle von Wirobond[®] 280 deutlich zu erkennen (s. Abb. 12, der Bruch im Keramikblock kam beim manuellen Ablösen zustande):

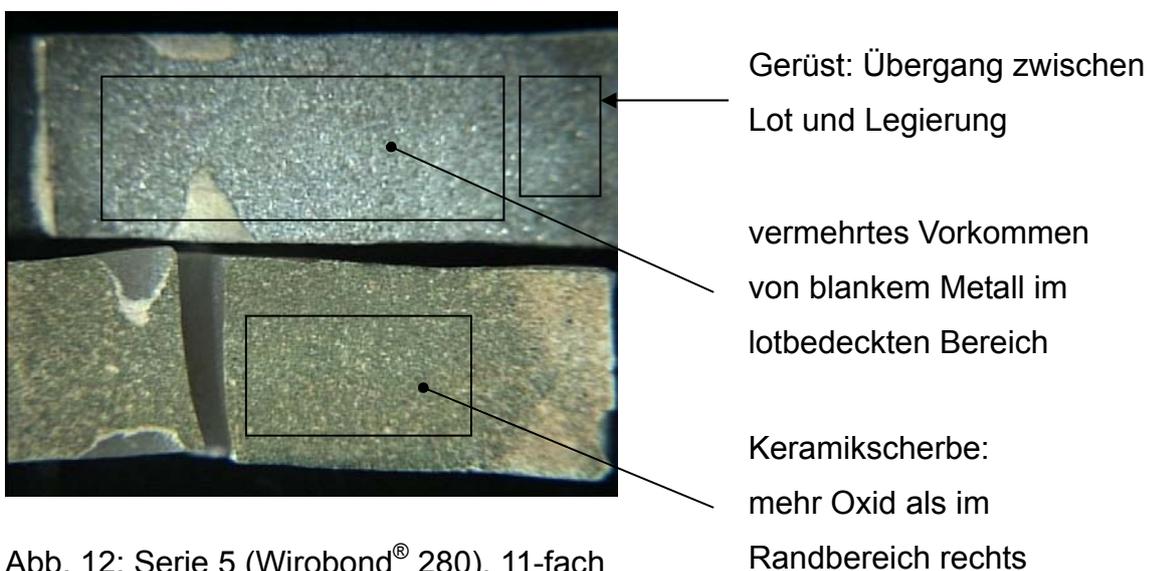


Abb. 12: Serie 5 (Wirobond[®] 280), 11-fach

Serie 4 aller Legierungen entspricht Serie 5 mit zusätzlicher Kontamination durch Flussmittel. Die Metalloberfläche präsentiert sich im nicht-kontaminierten Bereich im Übergangsbereich von Lot und Grundlegierung wie Serie 5. Im mittleren Bereich sind Keramik-Reste aufgelagert, die durch das Flussmittel infiltriert sind in den Farben Grün, Gelb und Schwarz. Darin auffällig sind viele homogen verteilte Gaseinschlüsse. Durch die Verunreinigung kann man hier von einem kohäsiven Bruchverlauf in der Keramik sprechen (s. Abb. 13):

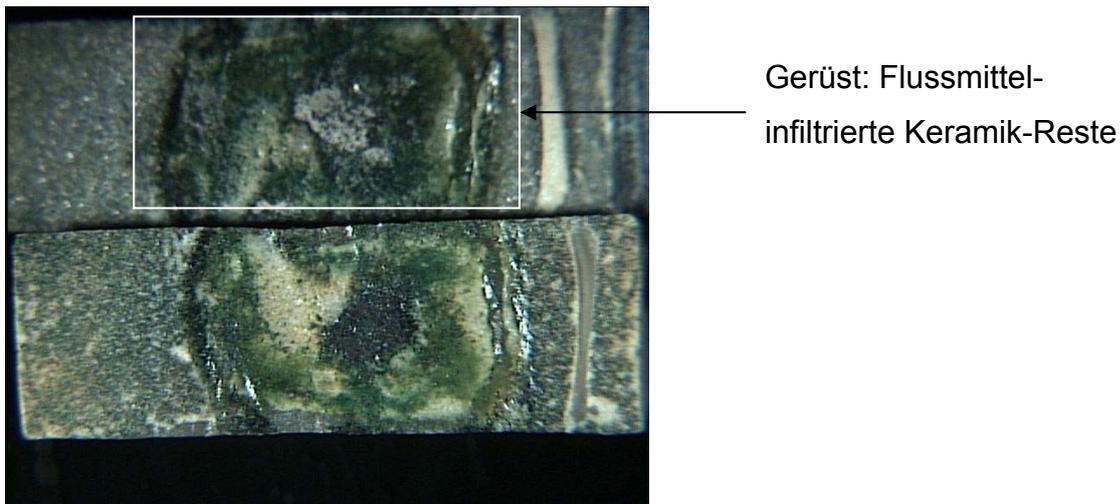


Abb. 13: Serie 4 (Wirobond[®] 280), 11-fach

Bei Serie 7 aller Legierungen befindet sich im mittleren Bereich über der Schweißraupe ein Keramik-Rest, der nach dem manuellen Ablösen übrig blieb (kohäsiver Anteil im Bruchverlauf). Der restliche Verblendbereich zeigt einen Bedeckungsgrad der Legierungsoberfläche wie die Serien 0, 2, 3, 6 oder 8. Die Keramikscherbe ist beim manuellen Entfernen gebrochen (s. Abb. 14):

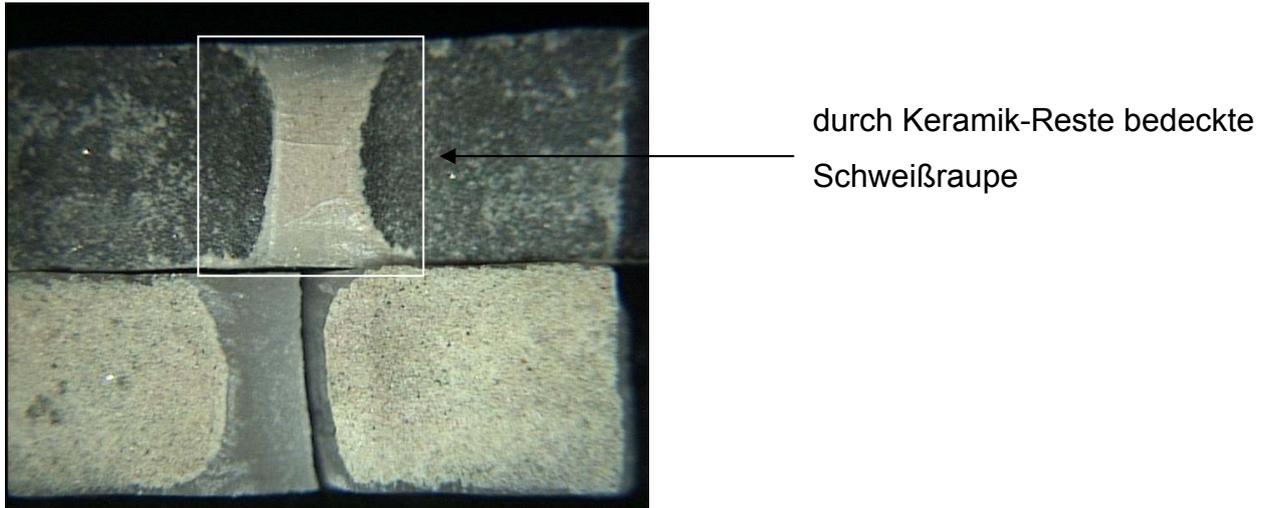


Abb. 14: Serie 7 (Wirobond[®] LFC), 11-fach

4.2.2 Längsschliffe – Keramikblock abgelöst

Bei der Betrachtung der Prüfkörper mit abgelöstem Keramikblock von der Seite sind hinsichtlich der Verbundzone zwischen den Serien keine Unterschiede vorhanden, die eine zusätzliche Erkenntnis zur Aufsicht liefern. Die Serien 0, 2, 3, 5, 6, 7 und 8 zeigen vereinzelte Opaker-Reste auf der abgestrahlten Legierungsoberfläche (s. Abb. 15):

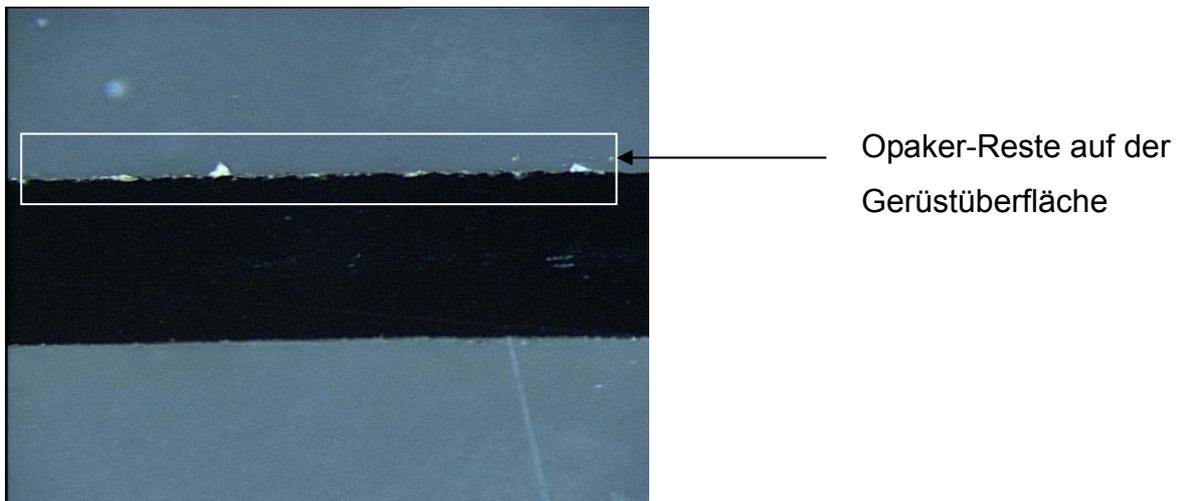
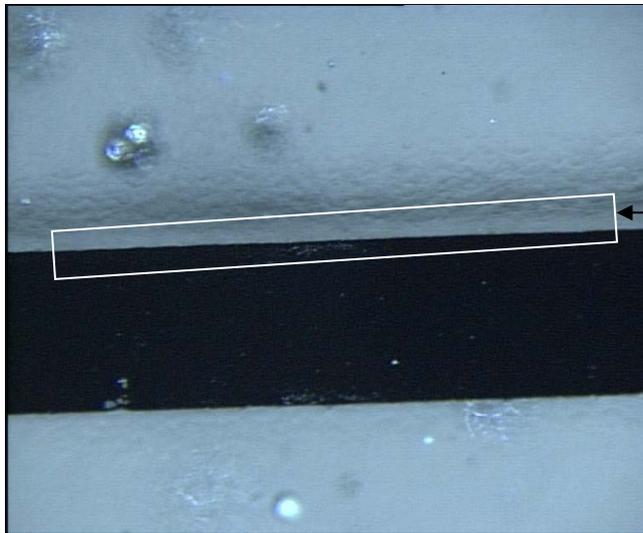


Abb. 15: Serie 2 (Wirocer[®] plus), 46-fach

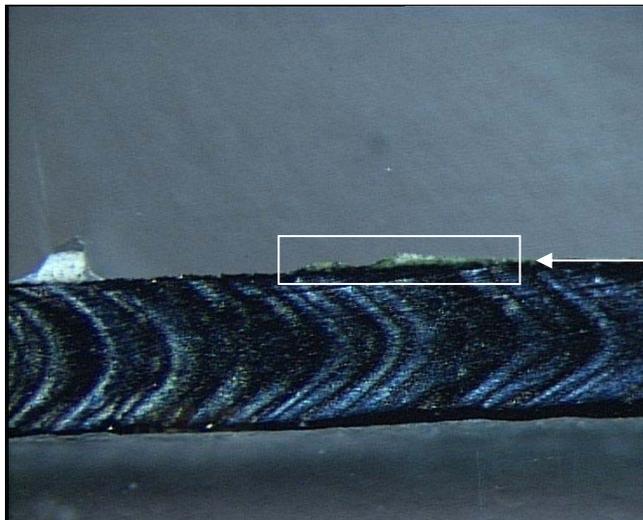
Serie 1 aller Legierungen ist weitestgehend frei von Opaker- und Keramik-Resten:



Gerüstoberfläche
ohne Opaker-Reste

Abb. 16: Serie 1 (Wirocer[®] plus), 46-fach

Serie 4 aller Legierungen hat zusätzlich aufgelagerte Keramik-Reste, die mit Flussmittel infiltriert sind:



Flussmittel-infiltrierte
Keramik-Reste

Abb. 17: Serie 4 (Wirobond[®] 280), 46-fach

4.2.3 Längsschliffe – mit Keramikblock

Bei den Prüfkörpern ohne abgelösten Keramikblock kann der Bruchlinien-Verlauf beobachtet werden. Dieser zeigt sich wiederum im Sinne einer adhäsiv-kohäsiven Kombination: Der Bruch begann am Rande des Keramik-Blocks in der Dentin-Keramik bzw. im Opaker, um dann in einer Ebene zwischen Opaker und Legierung weiter zu verlaufen (s. Abb. 18). Mit Ausnahme von Serie 1 und 4 konnten ein veränderter Bruchlinien-Verlauf oder ein vermehrtes Vorkommen von Mikroporositäten in der Opaker-Masse oder Keramik zwischen gefügten und ungefügten Serien nicht beobachtet werden. Serie 1 zeigt einen adhäsiven Bruch, der zwischen Legierungsoberfläche und Oxidschicht verläuft.

Vertikal-Brüche durch die Mitte des Keramikblocks traten nicht auf.

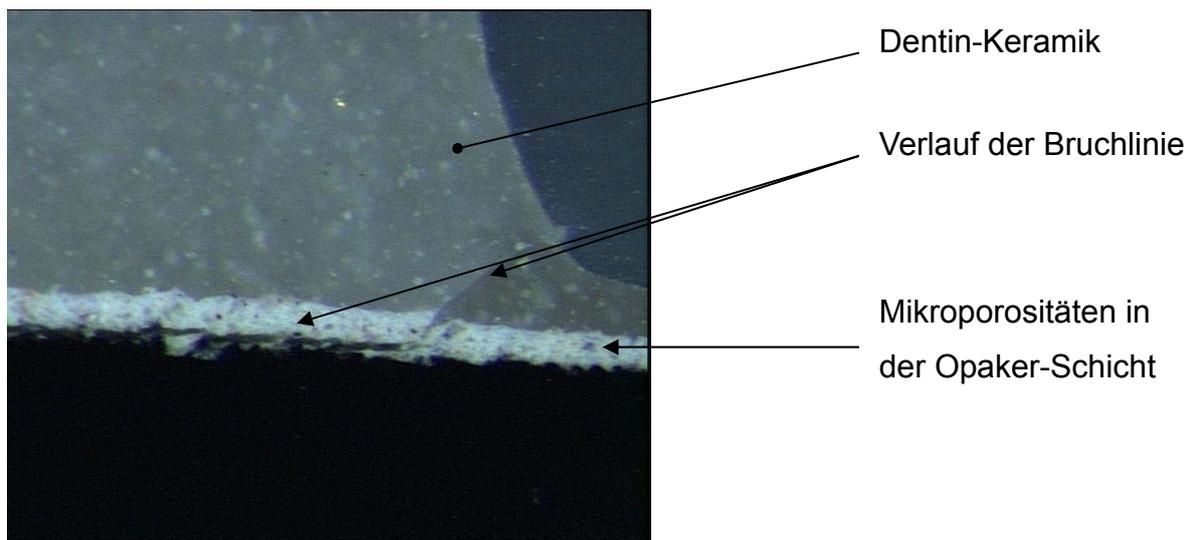


Abb. 18: Serie 4 (Wirocer[®] plus), 120-fach

Serie 4 zeigt die Infiltration von Flussmittel in die Opaker-Masse und ein erhöhtes Vorkommen von Porositäten in diesem Bereich. Lunker in der Lötfläche sind ebenfalls vorhanden (s. Abb. 19):

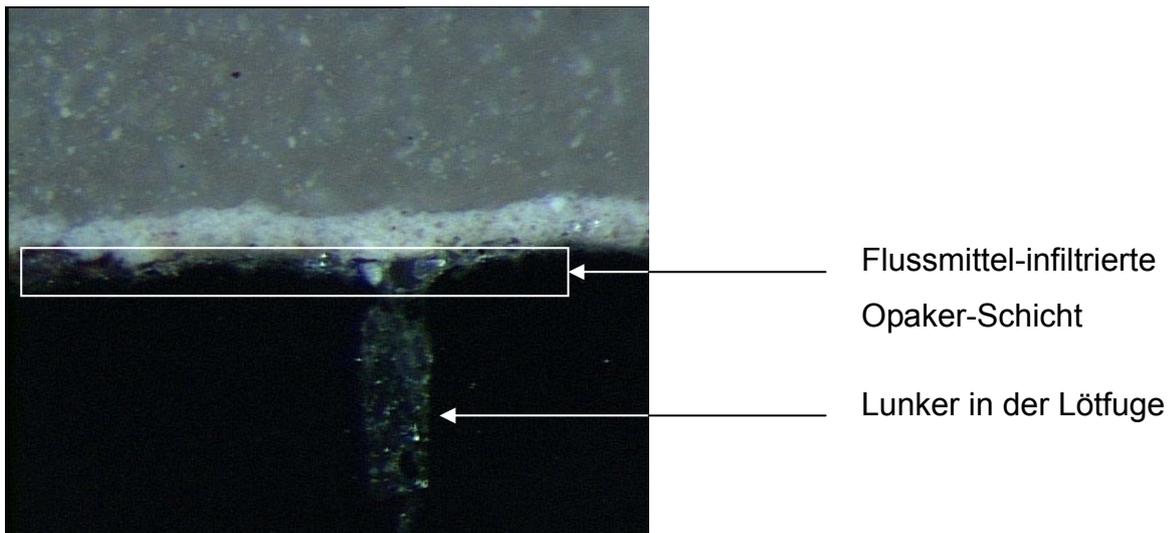


Abb. 19: Serie 4 (Wirocer[®] plus), 120-fach

Bei Serie 8 der Legierung Wirobond[®] LFC zeigt der Keramikblock nach den keramischen Bränden eine konvexe Form zur Legierungs-Seite hin. Zwischen Gerüst-Oberfläche und Keramik-Block entsteht ein Spalt (s. Abb. 20):

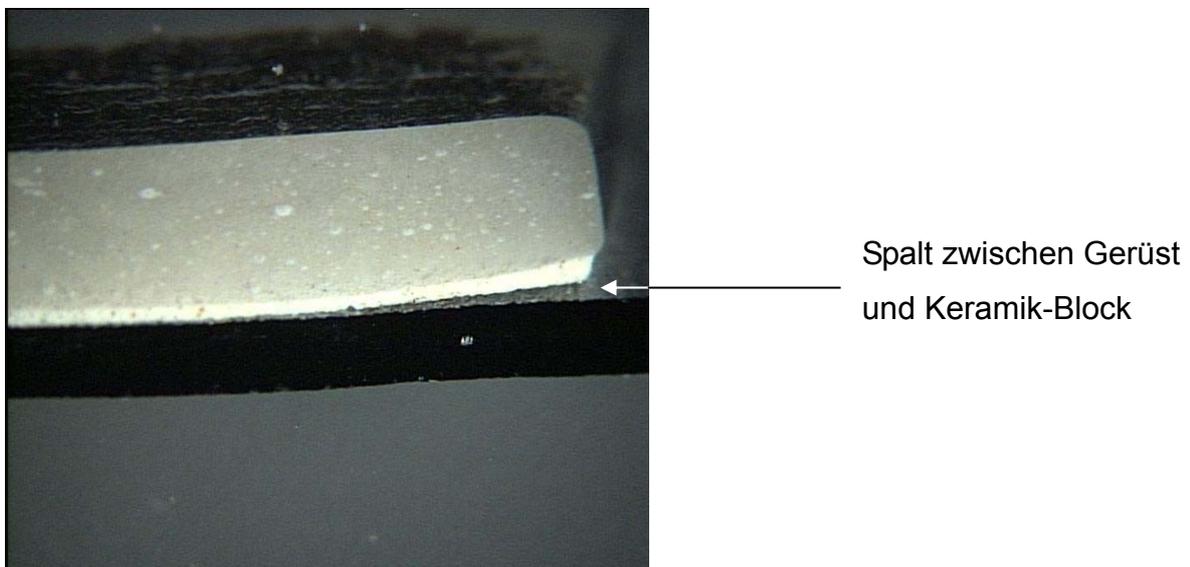


Abb. 20: Serie 8 (Wirobond[®] LFC), 11-fach

5 Diskussion

5.1 Fehlerdiskussion

5.1.1 Prüfkörperherstellung

Bei den ausgewählten Legierungen und Keramiken handelt es sich um relativ häufig verwendete Produkte. Des Weiteren sind die verwendeten Legierungen von den Zusammensetzungen her korrespondierenden EMF-Legierungen anderer Hersteller ähnlich, so dass die Untersuchungsergebnisse übertragbar erscheinen.

Um Fehler bei der Herstellung der Prüfkörper zu vermeiden, wurde eine Probeserie aller drei Legierungen vor Beginn der eigentlichen Prüfkörperherstellung angefertigt. Zudem wurden Probelötungen von Prüfkörperhälften durchgeführt, um qualitativ möglichst hochwertige Lötverbindungen ohne Porositäten zu erreichen. Dies diente außerdem zur Verfahrensoptimierung, um eine möglichst standardisierte, gleichmäßige und fehlerfreie Herstellung zu ermöglichen. Physikalische und chemische Eigenschaften sind prinzipiell von den Herstellern vorgegeben, insofern sind die Ergebnisse stark vom Verarbeiter abhängig [79]. Verarbeitungsfehler einzelner Prüfkörper verfälschen die Messergebnisse und minimieren somit ihre Vergleichbarkeit und Aussagekraft. MIETKO weist auf die starke Abhängigkeit der Ergebnisse von der Verarbeitung beim Dreipunkt-Biegeverbundtest hin [67].

Bei der Herstellung sind dieselben Geräte für die Produktion aller Prüfkörper zur Anwendung gekommen. Alle Arbeitsschritte wurden immer durch dieselbe Person durchgeführt. Eine Ausnahme hiervon war das Laserschweißen der Prüfkörperhälften, das von einem Zahntechniker im Hause der Firma BEGO ausgeführt wurde. Die für das Laserschweißen nötige Erfahrung machte das notwendig. Einheitliche Chargen der jeweiligen Materialien kamen zum Einsatz, um herstellerbedingte Abweichungen auszuschließen.

Dennoch war es nicht möglich, identische Prüfkörper herzustellen. Der kombiniert manuelle und maschinelle Arbeitsprozess der Herstellung entspricht jedoch in vielen Punkten dem Laboralltag. Die menschliche Fehlerquelle der manuellen Bearbeitung komplett durch eine maschinelle Herstellung zu ersetzen, erscheint hinsichtlich der Übertragbarkeit der Ergebnisse wenig praxisnah. Gleichwohl stellt der Mensch im Herstellungspro-

zess in Abhängigkeit seiner Fertigkeiten und Tagesform eine nicht zu unterschätzende Fehlerquelle dar [117]. Abgesehen von einigen Serien mit hoher Streuung, ausgelöst durch vereinzelte Ausreißer oder Extremwerte bzw. absichtlich fehlerhafte Abstimmung der WAK der Verbundpartner, sprechen die niedrigen Variationskoeffizienten zwischen 5,1 und 11,9 % für sorgfältiges Arbeiten und vergleichbare Ergebnisse.

Die Anfertigung der Metallgerüste (vor dem Fügen) erfolgte genau nach den Empfehlungen des Herstellers. Für eine Chargenreinheit wurde kein Altmetall wieder vergossen. Das Gießen durch die Flamm Schleuderguss-Technik birgt Fehlerquellen: die ungenauere Temperaturführung mit der Flamme im Vergleich zum temperaturgesteuerten Aufheizen durch Induktion sowie der subjektive Zeitpunkt der Schleuder-Auslösung. Es kann leicht zur Überhitzung der Schmelze kommen, was porösere Güsse und Gefüge-Veränderungen nach sich ziehen kann, die schlechtere physikalische und chemische Eigenschaften hervorrufen können [98]. Die Verkaufszahlen von Flammguss Schleudern sind rückläufig [6]. Nichtsdestotrotz kommt diese Gusstechnik im Laboralltag noch häufig zum Einsatz und ist damit praxisnah. Nach visueller Kontrolle wurden Gerüste mit Unregelmäßigkeiten und Fehlerstellen (Lunker, zu geringe Dimensionen, etc.) aussortiert. Das Fräsen der Oberfläche auf der Verblendseite (außer Serie 2) und an der Unterseite erfolgte immer in gleicher Richtung, um den Verschluss von Porositäten zu vermeiden [79]. Auf die Verwendung einer Parallelschleifmaschine alternativ zum Fräsen mit der Hand wurde aufgrund der Praxisferne hier verzichtet. Siliciumcarbid-Schleifer können Rückstände auf der Metalloberfläche hinterlassen, deswegen wurden Hartmetall-Fräsen verwendet [121]. Zudem weisen HOHMANN und HIELSCHER darauf hin, dass beim schneidenden Abtragen der Oberfläche Luftporen vermieden werden [44]. Das anschließende Abstrahlen (außer Serie 1) erfolgte mit gleichem Strahl-druck, -mittel, -winkel, -abstand und in gleicher Körnung. Abstrahlen und Abdampfen sind für den Verbund von entscheidender Bedeutung (vgl. Kap. 2.3.1).

Die Lötungen erfolgten gruppenweise je Serie, um zu gewährleisten, dass alle Serien bestimmte Arbeitsschritte in den gleichen Zeitintervallen durchlaufen. Trotz hoher Sorgfalt und Vereinheitlichung erscheint es unmöglich, identische Fügeergebnisse zu erhalten, allein schon durch die ungenaue Temperaturführung der Flamme (vgl. Kap. 2.4.1). Dennoch ist diese Füge-technik weit verbreitet [41]. Auf die hohe Streuung hinsichtlich der Fügequalität und deren Auswirkungen wurde in Kap. 2.4.1 hingewiesen. Zudem

sind die geometrischen Verhältnisse getrennter Gerüste nach DIN EN ISO 9693 [18] für das Löten nicht optimal, da die Fügeflächen hier relativ klein und schmal sind [40]. Wie auch nach dem Gießen zu Anfang, wurden mangelhaft gelötete Gerüste nicht weiter verwendet. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass sich unter der Oberfläche Lunker verbergen – sowohl im Fugebereich (vgl. Abb 19) als auch im restlichen Teil des Plättchens. Dies hätte u. U. Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Gerüste. Es wurden die vom Hersteller angegebenen E-Moduln für die Bestimmung der Scher-Verbundfestigkeit herangezogen. In Abhängigkeit des Gussverfahrens und der Qualität der Fugestellen sind Abweichungen hiervon denkbar. KAPPERT et al. machen darauf aufmerksam, dass durch Verarbeitungsfehler beim Gießen Absenkungen des E-Moduls von 30 – 50 % des Herstellerwerts möglich sind [54]. NIKELLIS et al. berichten in ihrer Arbeit von signifikant niedrigerer Härte und niedrigerem E-Modul von Wiron[®]-Lot im Vergleich zu Wiron[®] 99 [73]. Da die E-Moduln der hier verwendeten Lote vom Werk aus nicht angegeben werden, sind weitere Untersuchungen zur genauen Klärung notwendig. In einigen Serien der vorliegenden Arbeit kamen unterschiedliche Mengen Lot zur Anwendung. Im Falle von geringeren E-Moduln der Lote ist insbesondere bei den Serien überschüssiger Lot-Anwendung (Serien 4 und 5) mit einer Verringerung von Härte und E-Modul insgesamt zu rechnen. Durch die Verwendung der vom Hersteller angegebenen E-Moduln der Grundlegierungen muss eventuell ein systematischer Fehler bei der Berechnung der Scher-Verbundfestigkeit eingeräumt werden. Da jedoch vergleichsweise hohe Verbundfestigkeiten erreicht wurden, ist dieser Effekt möglicherweise aufgrund der nur dünnen Lot-Schichten eher gering.

Beim Laserschweißen war es nicht immer möglich, die Gerüste völlig ohne Verzüge zu schweißen. Besonders deutlich wurde dies bei Serie 8, da hier Schweißnähte im gesamten Verblendbereich nebeneinander liegen. Derartige Schweißmuster sind keine gängige Laborpraxis, sollen aber den maximalen Effekt auf den Metall-Keramik-Verbund illustrieren. Weil die Geometrie der Gerüste für das Auftragen der keramischen Massen wichtig ist und sie auch von der Norm her für den Dreipunkt-Biegeverbundtest vorgegeben ist, sind die Verzüge manuell leicht korrigiert worden. Dies könnte eventuell Auswirkungen auf die Materialeigenschaften des Metall-Plättchens gehabt haben. Dem widersprechen jedoch die Variationskoeffizienten der Serie 8 (9,0 % bei Wirobond[®] 280 bzw. 6,9 % bei Wirocer[®] plus) mit Ausnahme der Legierung Wirobond[®] LFC. Bei letzterer wird die sehr hohe Werte-Streuung durch das Missverhältnis der WAK-Abstimmung

der Verbundpartner begründet (vgl. Tab. 17). WEGENER gibt zu bedenken, dass das Laserschweißen die E-Moduln beeinflussen könnte, wozu weitere Untersuchungen notwendig sind [110].

Das Verblenden mit keramischen Massen erfolge von den Arbeitsschritten her immer je Serie insgesamt, um verschiedene Bedingungen innerhalb einer Serie zu vermeiden. Qualitätsmindernde Pausen wurden vermieden. So fand das Auftragen des Wash-Opakers unverzüglich nach dem Abstrahlen statt. Die Anzahl der Brände entsprach den Empfehlungen des Herstellers, um Änderungen des WAK der Keramik zu vermeiden. Alle sieben Prüfkörper durchliefen die Brände gemeinsam. Im Keramikofen können lokal unterschiedliche Temperaturen auftreten, wovon jedoch alle Serien in gleicher Weise betroffen sind. Die Brandführung erfolgte entsprechend der digitalen Programmierung und Herstellerangabe, so dass eventuelle Fehler bei allen Serien in gleichem Maße aufgetreten wären. Dies sei besonders für den Abkühlvorgang erwähnt, der hinsichtlich der Ausbildung des WAK der Keramik von Bedeutung ist (vgl. Kap. 2.2). Die keramischen Massen wurden je Serie angemischt, um einen gleichartigen Schicker aufzutragen. Die verwendeten Pasten-Opaker haben den Vorteil der einheitlichen Konsistenz gegenüber denen, die anzumischen sind. Die Keramik-Schichtung fand für alle Serien in derselben Behelfsform statt. Diese diente auch zur Kontrolle, dass die Maße entsprechend DIN EN ISO 9693 [18] genau eingehalten wurden.

Aufgrund des Zeit- und Kostenumfangs zählt jede Serie nicht mehr als sieben Proben. Ein größerer Probenumfang hätte statistisch sicherere Aussagen geliefert. Bei Serien mit hohen Streuungen der Messwerte hat dies zur Folge, dass Signifikanzen in den Paarvergleichen verschiedener Serien statistisch schwerer nachweisbar sind trotz vergleichsweise hoher Differenzen der Messwerte. D. h., dass keine Signifikanz bei starker Streuung auftritt, obwohl die Mittelwertunterschiede relativ groß sind. Dies ist bezüglich der Mehrfachpaarvergleiche zu erwähnen.

5.1.2 Eignung der Methode

Der Dreipunkt-Biegeverbundtest nach SCHWICKERATH ist der internationale Standard zur Prüfung dentaler restaurativer Metall-Keramik-Systeme [18]. Es stehen viele Vergleichswerte zur Verfügung. Er liefert reproduzierbare und präzise Ergebnisse aufgrund der relativ einfachen Herstellung der Prüfkörper [60]. Generell können komplexe Geo-

metrien von Prüfkörpern bei Verbundfestigkeitstests zu hohen Streuungen der Messwerte führen [51, 79]. FISCHER bezeichnet den Test als eine genaue Methode, die metall-keramische Verbundfestigkeit zu bestimmen [30]. Nach KAPPERT et al. gibt das Testverfahren Auskunft über die Qualität der Haftung, d. h. bezüglich der chemischen Verbundreaktionen und Oberflächenbeschaffenheit [54]. Insofern scheint der Dreipunkt-Biegeverbundtest bei der Aufgabenstellung dieser Arbeit, den Einfluss variiertes gelöteter bzw. lasergeschweißter Oberflächen auf die Haftfestigkeit zur Keramik zu untersuchen, ein geeignetes Verfahren zu sein. Vorteilhaft ist, dass unterschiedliche E-Moduln von Legierungen bei der Berechnung der Verbundfestigkeit Berücksichtigung finden [110]. Von Nachteil ist, dass die physikalischen Eigenschaften der Keramik nicht beachtet werden. Somit sollten unterschiedlichen Legierungen nur in Verbindung mit sehr ähnlichen Verblendkeramiken verglichen werden [65]. Nicht simuliert werden extraaxiale Kraftkomponenten, wie sie in situ vorkommen, da die Belastung bei diesem Versuch nur unidirektional erfolgt. Hierfür sind noch andersartige Versuchsaufbauten erforderlich.

Da der Dreipunkt-Biegeverbundtest ein In-vitro-Versuch ist, sind anschließende Vergleiche mit klinischen Daten unerlässlich [98]. Es kann keine sofortige klinische Einsatztauglichkeit bestätigt werden. Je nach Versuchsaufbau werden unterschiedliche Eigenschaften geprüft und unterschiedliche Belastungen simuliert. Metall-Keramik-Systeme können auf vielfältige Weise versagen [67]. Daher sind Ergebnisse verschiedener Testverfahren nicht immer miteinander vergleichbar, ergänzen sich aber gegenseitig. Generell machen viele verschiedene In-vivo- und In-vitro-Tests die Verwendbarkeit eines Metall-Keramik-Systems umso aussagekräftiger.

5.1.3 Messfehler

Da die Dicke der Gerüste die Bruchkraft in der dritten Potenz beeinflusst (s. Kap. 3.3.2), wurde mit einer Mikrometerschraube vermessen und der Wert an mehreren Stellen je Gerüst kontrolliert. Messungenauigkeiten hinsichtlich der Dicke haben einen größeren Einfluss als bezüglich der Breite, deren Effekt auf die Verbundfestigkeit nur linear ist. Entsprechend des Rundens auf zwei signifikante Stellen, liegt der Fehler hier bei 0,01 mm. Alle Gerüste befanden sich von ihren Dimensionen her in den geforderten Toleranzen der Norm DIN EN ISO 9693 [18]. Der Auflagenabstand fließt ebenso in der dritten Potenz in die Bruchkraft ein. Er war voreingestellt auf 20 mm. Falls Abweichungen da-

von vorgelegten hätten, wären alle Serien gleichermaßen betroffen. Damit es zu einer genau mittigen Belastung beim Abscherversuch kommt, wurden die Prüfkörper vorher entsprechend markiert. Weitere Voraussetzung ist, dass sich die Prüfmaschine – insbesondere die Kraftmessdose – in einem einwandfreien Zustand befindet. Durch eine technische Überholung kurz vor den Versuchen ist hiervon auszugehen.

Für die Errechnung der Scher-Verbundfestigkeit wird der Koeffizient k verwendet (vgl. Kap 3.3.2). Allgemein ist es die übliche Methode, den Wert graphisch zu bestimmen. Hier tritt ein systematischer Ablesefehler in der Größenordnung von $0,1 \text{ mm}^{-2}$ auf. Genau lässt er sich nicht bestimmen, da der wahre Wert von k unbekannt ist.

Für Fehler hinsichtlich des E-Moduls vgl. Kap. 5.1.1!

5.2 Diskussion der Ergebnisse

5.2.1 Diskussion der Messwerte

Abgesehen von einigen Serien mit simulierten Verarbeitungsfehlern, erreicht der Großteil der Serien Verbundfestigkeitswerte im Bereich der Literatur-Vergleichswerte [58, 67, 83, 85, 120].

Beschreibung der Serien:

Serie 0: Referenz (ungefügt)

Serie 1: ungefügt, nicht abgestrahlt

Serie 2: ungefügt, nicht gefräst, abgestrahlt

Serie 3: gelötet, nach Herstellerangabe bearbeitet

Serie 4: gelötet, Lot verschmiert, mit Flussmittel kontaminiert

Serie 5: gelötet, Lot verschmiert

Serie 6: lasergeschweißt, nach Herstellerangabe bearbeitet

Serie 7: lasergeschweißt, Schweißraupe belassen

Serie 8: lasergeschweißt, Schweißzusatzstoff überschüssig

5.2.1.1 Ungefügte Serien

Die ungefügten Serien 0 bis 2 der drei Legierungen zeigen ein uneinheitliches Bild: Die jeweilige Referenzserie 0 erreicht zwar nicht den höchsten Mittelwert innerhalb aller Serien, jedoch stellt sie eine günstige Kombination zwischen niedriger Streuung und relativ hoher Verbundfestigkeit dar. Dies ist qualitativ wünschenswert und spricht für die vom Hersteller angegebenen Verarbeitungsparameter.

Serie 1 aller Legierungen zeigt die mitunter höchsten Variationskoeffizienten und niedrigsten Mittelwerte, besonders deutlich bei Wirobond® LFC und Wirocer® plus als Verbundpartner. Die Mittelwerte sind überwiegend signifikant niedriger im Vergleich zu den anderen Serien. Höhere Variationskoeffizienten gehen mit einer Erniedrigung der Verarbeitungsbreite einher, d.h., die Wahrscheinlichkeit, einen qualitativen Misserfolg zu erzielen, steigt [79], was als ungünstig zu bewerten ist. Bei Serie 1 ist die Oberfläche durch das Fräsen zwar aufgeraut worden, jedoch ist es dem Wash-Opaker offenbar nicht möglich, dort ausreichend auszufließen. Die schlechtere Benetzbarkeit dieser Oberfläche war auch beim Auftragen visuell feststellbar. So wird ein mit dem Abstrahlen vergleichbarer Retentionsgewinn hier nicht erzielt. Entsprechende Rautiefen werden nicht erreicht [117]. SCHWICKERATH spricht in diesem Zusammenhang von einem ausgesprochen schlechten Verbund mit der Gefahr von keramischen Abplatzungen [87]. HOFSTEDE et al. berichten von Keramik-Ablösungen vom Metall im Falle nicht gestrahlter Oberflächen [43]. Die Bedeutung des Abstrahlens für den Verbund wurde in Kap. 2.3.1 erläutert.

Serie 2 ist von der Streuung der Werte her mit der Referenz-Serie vergleichbar. Der Mittelwert liegt leicht darunter, jedoch nicht signifikant. Es kann nicht behauptet werden, dass fehlendes Fräsen einen vergleichbaren Effekt auf den Verbund hat wie fehlendes Abstrahlen. Die reinigende, aufrauende und aktivierende Wirkung des Abstrahlens scheint entscheidend zu sein.

5.2.1.2 Gelötete Serien

Die gelöteten Serien 3 bis 5 weisen im Großen und Ganzen Mittelwerte auf Ebene der Referenzserie auf. Im Metall-Keramik-System von Wirobond® 280 sind sie etwas erhöht, bei Wirobond® LFC liegen sie leicht darunter. Signifikante Unterschiede gibt es jedoch nicht.

Im Falle von höheren Werten im Vergleich zu Serie 0 kann vermutet werden, dass der Verbund durch ein quantitativ und qualitativ höheres Angebot an Oxiden leicht verbessert ist [98]. Die großflächige Bedeckung der Verbundfläche durch Lot bei Serie 5 von Wirobond® 280 und Wirocer® plus hat im Rahmen dieser Versuche nicht zu einer Erniedrigung der Verbundfestigkeit geführt. Das Ergebnis steht somit im Widerspruch zur Feststellung von HOFER und FISCHER, dass die Verbundfestigkeit zur Keramik nicht mehr gewährleistet ist, wenn die gelötete Fläche größer als 1 mm² ist [40]. Allerdings ist unbekannt, welche Legierungen und Versuche ihrer These zugrunde liegen.

Entsprechungen zur vorliegenden Arbeit gibt es mit den Ergebnissen von NIKELLIS et al. und SCHÄFER [73, 80].

Wirobond®-Lot wurde zum Fügen sowohl von Wirobond® 280 als auch von Wirobond® LFC verwendet. Im Falle von Wirobond® LFC ist mit zunehmender Lotbedeckung eine leichte Abnahme der Verbundfestigkeit festzustellen. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass Wirobond®-Lot und die keramischen Massen von Response® (Fa. VITA) keine optimale Abstimmung hinsichtlich ihrer WAK besitzen. Der WAK von Wirobond®-Lot ist unbekannt, orientiert sich jedoch an den Modellguss-Legierungen, womit ein Wert von ca. $15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ angenommen werden kann (vgl. auch Tab. 17). Zwischen Wirobond® LFC und Wirobond®-Lot befände sich somit ein Unterschied von ca. $1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Es könnte an der geringen Schichtdicke des Lotes liegen, dass ein ungünstiger WAK-Einfluss auf die Wärmedehnung des Gerüsts insgesamt vergleichsweise gering ausfällt.

Es scheint von der jeweiligen Materialpaarung abzuhängen – speziell der Art des Lotes, welcher Einfluss auf die Verbundfestigkeit insgesamt besteht. Da WAK und E-Modul des hier verwendeten Lotes von Werksseite her nicht angegeben sind, können diese einen ungünstigen Einfluss haben. Im Rahmen dieser Arbeit hat jedoch selbst die über-

schüssige Anwendung von Lot keinen ungünstigen Einfluss auf die Verbundfestigkeit gezeigt. Auf die Problematik des hier zur Berechnung der Verbundfestigkeit verwendeten E-Moduls wurde in Kap. 5.1.1 eingegangen. NIKELLIS et al. weisen in ihrer Studie darauf hin, dass der E-Modul von Wiron[®]-Lot im Vergleich zur Gerüstlegierung Wiron[®] 99 signifikant niedriger ist [73]. Diese Feststellung hat zur Folge, dass eine überschüssige Anwendung von Wiron[®]-Lot den E-Modul des Gerüsts insgesamt senkt. Das Gerüst ist dann gegenüber elastischen Deformationen weniger widerstandsfähig, was die Gefahr von keramischen Abplatzungen und Verbundversagen erhöht. Eine Erniedrigung des E-Moduls des Gerüsts ist prinzipiell ungünstig für Metall-Keramik-Systeme. Vor diesem Hintergrund sollte eine überschüssige Lot-Anwendung unterlassen werden.

Wider Erwarten hatte die mittige Kontamination des Verblendbereichs durch Flussmittel nach dem Abstrahlen bei Serie 4 die mittlere Verbundfestigkeit nicht herabgesenkt. Dieses Ergebnis ist jedoch vorerst mit Zurückhaltung zu betrachten und mag im Versuchsaufbau begründet liegen. Ein möglicher Grund für diese relativ hohen Werte könnte sein, dass der für den Bruchbeginn entscheidende Randbereich des Keramikblocks außerhalb der mittigen Kontamination lag. Von Interesse wäre bei zukünftigen Untersuchungen die Verunreinigung eben dieses Bereichs, denn die visuelle Schädigung des Verbunds ist ansonsten offensichtlich (vgl. Kap. 4.2 und 5.2.2).

5.2.1.3 Lasergeschweißte Serien

Die lasergeschweißten Serien 6 bis 8 der Legierungen Wirobond[®] 280 und Wirocer[®] plus sowie Serie 6 und 7 von Wirobond[®] LFC ergaben mittlere Verbundfestigkeiten auf dem Niveau von Serie 0. Dennoch ist Serie 8 der Legierung Wirocer[®] plus zur Referenzserie signifikant. Dies könnte jedoch mathematisch-statistisch durch niedrige Streumaße bedingt sein.

Da Grundlegierung und Schweißzusatzstoff von der Zusammensetzung her sehr ähnlich sind, bestätigte sich die vorherige Annahme, dass sich hinsichtlich des Verbunds keine wesentlichen Unterschiede zur Referenz-Serie ergäben. Somit wären existierende Unterschiede herstellungsbedingt bzw. zufälliger Natur. Bei Serie 7 ist mit einem höheren E-Modul insgesamt zu rechnen, da die mittige Schweißraupe die durchschnittli-

che Plättchen-Dicke erhöht. Mit diesem Hintergrund ist das Ergebnis entsprechend zu betrachten. Andernfalls kann hier nicht von einem ungünstigen Einfluss einer belassenen Schweißraupe auf den Verbund insgesamt gesprochen werden.

Serie 8 zeigt die ungünstigsten Werte in Bezug auf das Streumaß und die Verbundfestigkeit innerhalb des Metall-Keramik-Systems Wirobond® LFC. Wegen des hohen Variationskoeffizienten sind die Mehrfachpaarvergleiche jedoch mathematisch-statistisch bedingt nicht signifikant. Als Ursache für diese Werte kann die ungünstige WAK-Abstimmung zwischen dem Schweißzusatzstoff Wiroweld® und den keramischen Massen aus der Response®-Serie angenommen werden:

Generell sollte der WAK der Legierung größer sein als der der Keramik (vgl. Kap. 2.2.1). Bei einem entsprechendem Anteil Wiroweld® im Gerüst mit einem angenommenen WAK von $15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und $15,0$ bis $15,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ hinsichtlich der Verblendkeramik Response® wäre dieser Sachverhalt nicht mehr gegeben.

Der WAK von Wiroweld® in Tab. 17 ist eine ungefähre Angabe der Fa. BEGO. Grundlage der Zusammensetzung des Schweißdrahts Wiroweld® sind die Modellguss-Legierungen der Fa. BEGO. In Anlehnung an diese wird von einem entsprechenden WAK für den Schweißdraht ausgegangen.

Wirobond® 280	14,0	Wirobond® LFC	15,9
Omega 900®	13,4 - 13,9	Response®	15,0 - 15,5
Wirobond®-Lot, Wiroweld® ca. 15			

Tab. 17: WAK 25 - 500 °C [10^{-6} K^{-1}]

Im Unterschied zu Serie 5 ist hier zu bemerken, dass nach dem Durchschweißen der Einfluss des Zusatzstoffs auf die Wärmedehnung des Gerüsts und damit auf den Verbund wahrscheinlich deutlich größer ist als beim überschüssigen Löten, bei dem nur eine oberflächliche, dünne Schicht vermutet werden kann.

Zu den Ergebnissen anderer Autoren in Kap. 2.3.2.2 ist zu sagen, dass es sich entweder um andere Metall-Keramik-Kombinationen und/oder andere Versuchsaufbauten handelt, so dass Vergleiche nur sehr eingeschränkt möglich bis nicht zulässig sind.

WEGENER verwendete zwar die gleiche Verblendkeramik, jedoch in Verbindung mit Edelmetall-Legierungen. Zudem wurde ohne Verwendung von Zusatzstoff im gesamten Verblendbereich lasergeschweißt. Seinen Untersuchungen nach hatte das Laserschweißen überwiegend keinen Einfluss auf die Verbundfestigkeit [110]. Unter Beachtung der Versuchsparameter sind gewisse Übereinstimmungen mit dem Ergebnis der vorliegenden Arbeit feststellbar.

5.2.2 Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchung

Die Betrachtung der Prüfkörper in der Aufsicht diente der Bestimmung des Bedeckungsgrades der Metallgerüste mit Oxid- und Opaker- bzw. Keramik-Resten. Ziel hiervon war, eine eventuelle Korrelation zwischen den ermittelten Haftwerten und den simulierten Verarbeitungstechniken zu finden.

Mit Hilfe der Schliffeinbett-Technik konnte die Verbundzone von der Seite betrachtet werden. Beurteilt wurden der Bruchspaltverlauf sowie das Vorkommen von Porositäten und anderen Unregelmäßigkeiten. Ziel war es, mögliche Unterschiede zwischen den Serien zu finden und sie in einen Zusammenhang mit den verschiedenen Verarbeitungstechniken zu bringen.

Kritisch ist anzumerken, dass jeweils nur zwei Prüfkörper von sieben pro Serie untersucht wurden. Jedoch kamen diejenigen mit den niedrigsten Verbundfestigkeiten zur Auswahl. Es ist davon auszugehen, dass hier am ehesten Fehler zu vermuten sind im Gegensatz zu den Prüfkörpern, die höhere Messwerte erreichten. Bei den Längsschliffen ist anzumerken, dass Veränderungen nur in der beschliffenen Schicht gesehen werden konnten.

Keine der ausgesuchten Proben wies einen Vertikalriss in der Keramik nach dem Dreipunkt-Biegeverbundtest auf, jedoch einen Spalt in der Verbundzone. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der ermittelte Wert der Verbundfestigkeit nicht durch einen Bruch innerhalb des Keramik-Blocks im Sinne einer Überschreitung der keramischen Eigenfestigkeit zustande kam, sondern durch ein Versagen innerhalb der Verbundzone. Porositäten in der Verbundzone konnten nicht immer vermieden werden. Dies könnte an einem nicht optimalen Absaugen überschüssiger Flüssigkeit liegen, da der Brennvorgang an sich gemäß Herstellerempfehlungen erfolgte.

Nach SCHWARZ et al. treten im Bereich der Verblendungs-Enden aufgrund der abrupten Querschnitts-Änderung des Prüfkörpers Spitzen-Spannungen auf [84]. In Folge dessen ist die Spannungs-Verteilung in diesem kritischen Bereich für die Bruchentstehung maßgeblich. Generell begann der Bruchverlauf im Randbereich entweder innerhalb der Keramik oder knapp darunter in der Opaker-Schicht und setzte sich dann in der Verbundzone fort. Insofern kann von einem gemischt adhäsiv-kohäsiven Verlauf gesprochen werden. Im Randbereich verblieben schmale Streifen von Keramik und Opaker, bei Serie 7 auch mittig im Bereich der Schweißraupe. Der restliche Verblendbereich zeigt im Allgemeinen eine abgestrahlte, raue Legierungsoberfläche mit glänzenden Metallanteilen, Oxidbedeckungen und vereinzelt Resten von Opaker-Masse. Zu diesem Ergebnis kamen auch KOCHS und WÖGLER [58, 117]. Hiervon wichen einige Serien ab:

Bei Serie 1 aller Legierungen ist eine nahezu komplette Ablösung des Keramik-Blocks mit Oxidschicht von den Gerüstoberflächen festzustellen. Die Mittelwertunterschiede zu den Referenz-Serien und zu den meisten anderen Serien sind signifikant. In diesem Sinne kann hier von einer Korrelation zwischen nicht abgestrahlten Gerüst-Oberflächen und niedrigeren Verbundfestigkeiten gesprochen werden. In ähnlicher Weise bestätigen dies die Studien von HOFSTEDÉ et al. und WÖGLER [43, 117].

Die Serien 3, 4 und 5 weisen im Kontakt-Bereich zwischen Lot und Opaker-Masse mehr blanke Metall-Anteile auf als im Bereich der Grundlegierung. Umgekehrt verhält es sich auf der Unterseite des Keramik-Blocks: Hier sind mehr Oxid-Anteile in dem Areal vorhanden, die Kontakt zum Lot hatten. Im Widerspruch zu diesem Ergebnis steht die Studie von GALINDO et al. [32]. Die Vergleichbarkeit ist allerdings fraglich, da in deren Arbeit eine Palladium-Legierung und Gold-Lot in einem modifizierten Versuchsaufbau zur Anwendung kamen. In der vorliegenden Arbeit könnte vermutet werden, dass sich zwischen Opaker-Massen und den Oxiden der Lote eine stärkere Bindung entwickelte als zu den Oxiden der Grundlegierung. Bei den Legierungen Wirobond[®] 280 und Wirocer[®] plus sind die Mittelwerte der Serien 3, 4 und 5 auf dem Niveau der Referenz-Serie oder liegen darüber; die Unterschiede sind jedoch nicht signifikant. Bei Wirobond[®] LFC erreichen die Mittelwerte der Serien 3, 4 und 5 Werte auf Ebene der Referenz-Serie oder sie liegen leicht darunter, wie bei Serie 5 deutlicher zu sehen ist. Dies mag am ungünstigen Einfluss des niedrigeren WAK von Wirobond[®]-Lot im Vergleich zu den keramischen

Massen der Response[®]-Serie liegen, der bei großflächiger Bedeckung durch das Lot deutlicher werden könnte. Eine genaue Angabe der WAK der Lote durch den Hersteller war leider nicht möglich.

Serie 4 zeigt im Bereich der Kontamination mit Flussmittel Reste von Keramik und Opaker. Das Flussmittel führte zu Verfärbungen und zur Bildung von Blasen bei den keramischen Bränden. Es ist anzunehmen, dass diese poröse Struktur der Keramik eine niedrigere Kohäsion besitzt und somit der Bruch nicht in der Verbundzone verläuft, sondern durch die infiltrierten Bereiche der Keramik und des Opakers. Also kann in der kontaminierten Zone von einem kohäsiven Bruch gesprochen werden. Obwohl die Serie 4 aller getesteten Legierungen die Norm DIN EN ISO 9693 mit vergleichsweise hohen Verbundfestigkeiten erfüllte, ist die Schwächung der keramischen Struktur offensichtlich. Die vom Hersteller angegebenen physikalischen Eigenschaften sind nicht mehr gewährleistet. Es sollte somit nicht der Schluss gezogen werden, dass derartige Verunreinigungen keine Beeinträchtigung für das Metall-Keramik-System darstellen. Weitere Untersuchungen mit anderen Testverfahren sind notwendig.

Ein typisches Bild für eine fehlerhafte Abstimmung der WAK stellt Serie 8 der Legierung Wirobond[®] LFC dar (vgl. Abb. 20) [48]. Der WAK von Wiroweld[®] ist nicht größer als der der Verblendkeramik Response[®]. Zu dieser Problematik vgl. Kap. 5.2.1.3 und Tab. 17! Im Gegensatz zur Serie 5 von Wirobond[®] LFC, bei der Wirobond[®]-Lot als oberflächliche Schicht den WAK des Gerüsts insgesamt nur gering beeinflusst, scheint bei Serie 8 der WAK des Schweiß-Drahts Wiroweld[®] großen Einfluss zu haben. Dies mag an der Füge-technik des Laserschweißens liegen, bei der der Liquiduspunkt der Legierungen überschritten wird. Da der gesamte Verblendbereich durchgeschweißt wurde, ist von einem hohen Anteil des Schweißzusatzstoffs auszugehen. Es resultieren die konvexe Form des Keramik-Blocks sowie mangelhafte Werte hinsichtlich der Verbundfestigkeit.

Die mikroskopischen Untersuchungen zeigten, dass es weder in der Aufsicht noch im seitlichen Anschliff der Prüfkörper Unterschiede im Vergleich zur Referenzserie gibt, die auf das Löten bzw. Laserschweißen als Füge-technik an sich zurückzuführen sind. Auffälligkeiten gab es bei einigen simulierten Verarbeitungsweisen, die von den Herstellerangaben abwichen. Generelle Korrelationen zwischen den mikroskopischen Unterschieden und den Messwerten im Sinne einer allgemeinen Tendenz konnten nicht gefunden werden.

5.3 Klinische Bedeutung und Schlussfolgerung

5.3.1 Für den Zahntechniker

Abgesehen von bestimmten Serien der Legierungen Wirobond[®] 280, Wirobond[®] LFC und Wirocer[®] plus werden normgerechte Verbundwerte erreicht [18], die auf dem Niveau der Literatur-Vergleichswerte liegen [58, 67, 83, 85, 120]. Diese EMF-Legierungen bieten somit einen preiswerten Vorteil gegenüber Edelmetall-Legierungen. Vom Arbeitsaufwand sind sie mit Edelmetall-Legierungen vergleichbar, teilweise wird ihre ungünstigere Spanbarkeit jedoch bemängelt.

Das Verblenden von gelöteten Bereichen führt im Rahmen dieser Studie zu ausreichenden Verbundfestigkeiten auf dem Niveau von ungefügten Gerüsten. Selbst das flächige Verschmieren von Lot scheint nicht zu ungünstigeren Werten zu führen. Hiermit wird jedoch keine allgemeingültige Aussage zum Verbund auf gelöteten Gerüsten gemacht. Ob dieses Ergebnis auf andere Lot-Legierungs-Kombinationen übertragbar ist, muss durch weiterführende Studien geklärt werden. Es sollte darauf geachtet werden, möglichst geeignete und artgleiche Lote zu verwenden. WAK und E-Modul der Lote können unbekannt sein, für den Verbund und die mechanische Widerstandskraft des Gerüsts ist ihre Eignung jedoch entscheidend. Zur Risikominimierung sollten Lotflächen möglichst klein gehalten werden. Die Kontamination durch Flussmittel erniedrigte in diesem Versuchsaufbau den Haftverbund nicht. Dennoch ist die strukturelle Beeinträchtigung der keramischen Massen durch das Flussmittel offensichtlich, so dass eine gründliche Entfernung ratsam ist. Für den Zahntechniker ist ansonsten der zeitliche Mehraufwand ausschlaggebend, den das Löten mit sich bringt. Darüber hinaus ist die mechanische Qualität der Fügestelle unsicherer zu bewerten als beim Laserschweißen, welches technisch günstiger steuerbar ist.

Das keramische Verblenden der simulierten lasergeschweißten Oberflächen führte zu zufriedenstellenden Verbundfestigkeiten in Höhe der ungefügten Serien. Als vorteilhaft stellt sich die nahezu identische Zusammensetzung der Zusatzwerkstoffe im Vergleich zur Basislegierung heraus. Hierdurch kann davon ausgegangen werden, dass E-Modul und WAK der Zusatzwerkstoffe gegenüber der Basislegierung sehr ähnlich sind. Werden von der Zusammensetzung her ungeeignete Zusatzwerkstoffe verwendet, führen ungeeignete WAK der Verbundpartner zu ungenügenden Verbundfestigkeiten und ho-

hen Streuungen der Werte (vgl. Serie 8 der Legierung Wirobond[®] LFC). Für die Zahntechnik sind die Qualität der Fügestelle und die Zeitökonomie beim Laserschweißen als günstig zu bewerten.

Zu geringe Rautiefen durch fehlendes Abstrahlen führen zu niedrigen bis ungenügenden Verbundfestigkeiten und erhöhen die Streuung der Werte (s. Serie 1). Hiermit sinkt die Wahrscheinlichkeit, ein qualitativ hochwertiges Ergebnis zu erhalten. Die Metall-Keramik-Systeme der Legierungen Wirobond[®] LFC und Wirocer[®] plus sind dabei ungünstiger zu bewerten als das von Wirobond[®] 280. Dem Abstrahlen kommt somit eine entscheidende Bedeutung zu. Die ausschließlich adhäsiven Bruchmuster ergänzen diese These dahingehend, dass das Versagen in der Verbundzone stattfand und nicht innerhalb der keramischen Massen.

Bei einem Verbundversagen auf gefügten Gerüsten sollte bei der Fehlersuche nicht nur betrachtet werden, dass es sich um eine Fügestelle handelt. Von größerer Bedeutung ist, dass bei der Herstellung alle Verbundpartner von ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften möglichst auf einander abgestimmt sind und eine ausreichende Konditionierung der Gerüstoberfläche stattfand.

5.3.2 Für den Zahnarzt und Patienten

Schweißzusatzstoffe erfüllen die Anforderung, den Gerüstlegierungen hinsichtlich ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften möglichst ähnlich zu sein. Dies gilt damit auch für die WAK und E-Moduln. Bei Loten ist aufgrund der veränderten Zusammensetzung hier mit Abweichungen zu rechnen. Da für den Zahnarzt und für den Patienten ein langfristig intakter Verbund im Vordergrund steht, bietet die lasergeschweißte Verbindung hier mehr Sicherheit.

Hinsichtlich der biologischen Unbedenklichkeit wird durch die Verwendung von Schweißzusatzstoffen im Gegensatz zu Loten zudem der Forderung der Reduktion der Legierungsvielfalt in der Mundhöhle Rechnung getragen, selbst wenn sich gelötete Bereiche vollständig unter einer keramischen Verblendung befinden und korrosive Angriffe durch das Mundhöhlen-Milieu prinzipiell ausgeschlossen sind.

Von den mechanischen Eigenschaften her sind lasergeschweißte Fügstellen günstiger zu bewerten als gelötete. Dies ist hinsichtlich der Langlebigkeit des Zahnersatzes für Zahnarzt und Patient von hohem Interesse, da ein Bruch des Gerüsts innerhalb der Fügstelle durch die zyklischen Kaubelastungen einen grundsätzlichen Misserfolg darstellt. Ein intaktes gefügtes Gerüst ist Grundvoraussetzung für einen stabilen Metall-Keramik-Verbund.

5.3.3 Ausblick

Von Interesse wäre bei zukünftigen Untersuchungen die genaue Bestimmung der E-Moduln und WAK der in dieser Arbeit verwendeten Lote. Hinsichtlich des E-Moduls kann dann beurteilt werden, ob es bei einer Lot-Anwendung zu einer Veränderung des Gesamt-E-Moduls des Gerüsts kommt. Gegebenenfalls würden dann im vorliegenden Versuchsaufbau andere Verbundfestigkeiten resultieren, da in der vorliegenden Arbeit mit dem E-Modul der Grundlegierung gerechnet wurde. Die genaue Kenntnis des WAK würde aufzeigen, welchen genauen Wert das Lot als Partner im Metall-Keramik-Verbund hat.

Des Weiteren sollte untersucht werden, ob es durch Verunreinigungen der Verblend-Oberfläche weiterhin zu Verbundfestigkeiten auf dem Niveau von Referenz-Serien kommt. Dies kann beim vorliegenden Versuchsaufbau durch Kontamination des Randbereichs der Verblendung geschehen, wo der Bruch entsteht, oder durch andere Versuchsaufbauten.

Trotz zufriedenstellender Ergebnisse, die in dieser Arbeit durch Lötungen erreicht worden sind, ist das Laserschweißen in vielerlei Hinsicht das sicherere und modernere Fügeverfahren, dem der Vorzug gegeben werden sollte.

6 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, experimentell zu untersuchen, welchen Einfluss das Löten bzw. Laserschweißen auf die Scher-Verbundfestigkeit von Metall-Keramik-Systemen hat. Zur Anwendung kamen die EMF-Legierungen Wirobond[®] 280, Wirobond[®] LFC und Wirocer[®] plus, die Verblendkeramiken Omega 900[®] bzw. Response[®] sowie entsprechende Lote bzw. Schweißzusatzstoffe. 189 Prüfkörper wurden entsprechend DIN EN ISO 9693 angefertigt [18]. Dies ergab aus drei Legierungen jeweils acht Serien mit wiederum jeweils sieben Prüfkörpern.

Die Gerüste der ersten drei Serien blieben ungefügt: als Referenz, Gerüst nicht abgestrahlt bzw. Gerüst nicht gefräst. Drei weitere Serien wurden gelötet: nach Arbeitsanweisung, Lot verschmiert und mit Flussmittel kontaminiert bzw. nur Lot verschmiert. Die letzten drei Serien wurden lasergeschweißt: nach Arbeitsanweisung, Schweißraupe belassen, Schweißzusatzstoff überschüssig. Gefügt wurde vor dem keramischen Verblenden.

Die Ermittlung der Verbundfestigkeit erfolgte durch den Dreipunkt-Biegeverbundtest nach SCHWICKERATH. Im Anschluss wurden ausgesuchte Prüfkörper in der Aufsicht hinsichtlich ihres Bedeckungsgrades und im seitlichen Anschliff bezüglich des Bruchlinienverlaufs und eventueller Unregelmäßigkeiten untersucht.

Fast ausnahmslos zeigte sich, dass die simulierten Fügetechniken keinen signifikanten Einfluss auf die Verbundfestigkeit haben. Bei den gelöteten Serien führte die Kontamination mit Flussmittel nicht zu niedrigeren Haftfestigkeiten, was aber im Versuchsaufbau begründet zu liegen scheint. Ebenso wurde die Verbundfestigkeit durch das flächige Verschmieren von Lot nicht erniedrigt. Da Lote andere WAK und E-Moduln als die Basislegierungen besitzen, haben sich die geprüften Werkstoff-Kombinationen als günstig für den Verbund erwiesen. Das Laserschweißen der Gerüste ergab keine veränderten Haftfestigkeiten, mit Ausnahme von der überschüssigen Anwendung von einem Schweißzusatzstoff, der einen ungeeigneten WAK besaß. Überwiegend signifikant niedrige Werte weisen hingegen die Serien auf, bei denen die Gerüste vor dem Verblenden nicht abgestrahlt wurden.

Die Untersuchung der Bruchflächen ergab hauptsächlich gemischt adhäsiv-kohäsive Brüche. Auf nicht abgestrahlten Oberflächen war das Bruchmuster adhäsiv, die konta-

minierten Serien wiesen durch Flussmittel infiltrierte Keramik-Reste auf. Von der Seite betrachtet wurden bezüglich der gefügten Serien keine abweichenden Bruchlinienverläufe oder Unregelmäßigkeiten festgestellt, mit Ausnahme der Flussmittel-Reste. Eine generelle Korrelation zwischen der Höhe der Verbundfestigkeit und den oberflächlichen Keramik-Resten bzw. den Bruchlinien-Verläufen konnte hinsichtlich der gefügten Serien nicht gefunden werden.

6.1 Summary

The aim of this experimental study was to investigate the influence of brazing and laser welding on the shear-bond strength of metal-ceramic alloys. According to DIN EN ISO 9693, 189 patterns were cast in the non-precious alloys Wirobond[®] 280, Wirobond[®] LFC, and Wirocer[®] plus, veneered with Omega 900[®] or Response[®] ceramics, yielding eight groups with seven specimens each.

The unveneered frameworks of the first three groups were not divided and joined: serving as a control, a non-blasted, and a non-milled group. In the next three groups the frameworks were divided and brazed: according to the manufacturer's instructions, application of the brazing material all-over the area to be veneered with flux contamination, and without contamination. In the last three groups the frameworks were divided and laser-welded: according to the manufacturer's instructions, leaving a welding bead, and welding filler material application all-over the area to be veneered. Ceramic veneering was performed after the joining procedures.

The specimens were subjected to SCHWICKERATH's 3-point flexural test. Selected samples were investigated under the microscope for residual ceramics on the surface and for irregularities in the metal-ceramic interface from a lateral view.

Almost all groups revealed no significant influence on the bond strength by the simulated joining procedures. As for the brazed groups, contamination with flux did not lower the bond strength, maybe caused by the test set-up or by how these samples were contaminated. The bond strength was not lowered either by all-over application of brazing material under the veneered surface. Since brazing materials and parent metals show differences both in modulus of elasticity and thermal expansion, the selected combination of materials was beneficial for the bond. Laser welding of the frame works did not result in different bond strengths, except for the all-over application of a welding filler material with an unsuitable thermal expansion coefficient. Most non-blasted samples had significantly lower values of bond strength.

The investigation of the fracture surfaces showed mostly mixed adhesive-cohesive failures. Adhesive failures were observed on non-blasted samples. The contaminated

groups exhibited residual ceramics infiltrated with flux. As for the joined groups there were no altered fracture lines or irregularities in the metal-ceramic interface observed from a lateral view except for the flux. No general correlation can be declared for the joined groups regarding the residual ceramics or fracture lines and the levels of bond strength.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Angelini E, Pezzoli M, Rosalbino F und Zucchi F (1991): Influence of corrosion on brazed joints' strength, J Dent (Band 19), Nr. 1, Seite 56-61.
- [2] Anthony DH, Burnett AP, Smith DL und Brooks MS (1970): Shear test for measuring bonding in cast gold alloy-porcelain composites, J Dent Res (Band 49), Nr. 1, Seite 27-33.
- [3] Apotheker H, Nishimura I und Seerattan C (1984): Laser-welded vs soldered nonprecious alloy dental bridges: a comparative study, Lasers Surg Med (Band 4), Nr. 2, Seite 207-13.
- [4] Baba N und Watanabe I (2005): Penetration depth into dental casting alloys by Nd:YAG laser, J Biomed Mater Res B Appl Biomater (Band 72), Nr. 1, Seite 64-8.
- [5] Baba N, Watanabe I, Liu J und Atsuta M (2004): Mechanical strength of laser-welded cobalt-chromium alloy, J Biomed Mater Res B Appl Biomater (Band 69), Nr. 2, Seite 121-4.
- [6] Bego (2009): Telefonische Auskunft über aktuelle Verkaufszahlen von Gussgeräten.
- [7] Bertrand C, Le Petitcorps Y, Albingre L und Dupuis V (2001): The laser welding technique applied to the non precious dental alloys procedure and results, Br Dent J (Band 190), Nr. 5, Seite 255-7.
- [8] Breustedt A und Lenz E (1985): Stomatologische Werkstoffkunde, 2. Auflage, Johann Ambrosius Barth, Leipzig.
- [9] Buch D und Strietzel R (1996): Löten und Laserschweißen von Dentallegierungen, Dent Labor (Band 44), Nr. 3, Seite 403-9.
- [10] Buhr U (2007): Goldstandard bei Implantatsuprastrukturen, DZW Zahntechnik (Band 45), Nr. 11, Seite 16-18.
- [11] Butson TJ, Nicholls JI, Ma T und Harper RJ (1993): Fatigue life of preceramic soldered and postceramic soldered joints, Int J Prosthodont (Band 6), Nr. 5, Seite 468-74.
- [12] Carlberg T und Victorin L (1986): Soldering of dental alloys under vacuum by IR-heating, Dent Mater (Band 2), Nr. 6, Seite 279-83.
- [13] Cesar PF, Yoshimura HN, Miranda WG Jr, Miyazaki CL, Muta LM und Rodrigues Filho LE (2006): Relationship between fracture toughness and flexural strength in dental porcelains, J Biomed Mater Res B Appl Biomater (Band 78), Nr. 2, Seite 265-73.
- [14] Cheng AC, Chai JY, Gilbert J und Jameson LM (1994): Investigation of stiffness and microstructure of joints soldered with gas-oxygen torch and infrared methods, J Prosthet Dent (Band 72), Nr. 1, Seite 8-15.
- [15] Dérand T (1995): Porcelain bond to laser-welded titanium surfaces, Dent Mater (Band 11), Nr. 2, Seite 93-5.
- [16] Deselaers R (2001): Der individuelle Schwenkriegel, Quintessenz Zahntech (Band 27), Nr. 4, Seite 380-6.

- [17] Dielert E und Kasenbacher A (1987): Lötungen, Mikroplasma- und Laserstrahlschweißungen an Dentallegierungen, Dtsch Zahnärztl Z (Band 42), Nr. 7, Seite 647-53.
- [18] DIN (2000): DIN EN ISO 9693: Dentale restaurative Metallkeramiksysteme, Beuth, Berlin.
- [19] DIN (2002): DIN 13972-2: Qualitätssichernde Maßnahmen beim Laserschweißen - Teil 2: Laserschweißen von identischen und artgleichen metallischen Dentalwerkstoffen, Beuth, Berlin.
- [20] DIN (2006): DIN EN ISO 9333: Zahnheilkunde - Hartlote, Beuth, Berlin.
- [21] DIN (2006): DIN EN ISO 22674: Zahnheilkunde - Metallische Werkstoffe für fest-sitzenden und herausnehmbaren Zahnersatz und Vorrichtungen, Beuth, Berlin.
- [22] Dobberstein H, Dobberstein H, Kuchar B, Bernhardt W und Zuhrt R (1990): Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung von Bruchflächen der Dentallegierung "Sipal 306" nach Lötung bzw. Laserschweißung, Zahn Mund Kieferheilkd Zentralbl (Band 78), Nr. 6, Seite 513-15.
- [23] Dobberstein H, Dobberstein H, Orlick H und Zuhrt R (1990): Schweißen von Kobalt-Chrom-, Nickel-Chrom- und Silber-Palladium-Legierungen mittels Festkörperlaser, Zahn Mund Kieferheilkd Zentralbl (Band 78), Nr. 3, Seite 259-61.
- [24] Donges A (2006): Der Laser - ein rückgekoppelter optischer Verstärker in Selbsterregung, Laser Journal (Band 4), Nr. 2, Seite 18-20.
- [25] Eichner K (1985): Zahnärztliche Werkstoffkunde und ihre Verarbeitung (Band 2), 5. Auflage, Metallkeramik, Hüthig, Heidelberg.
- [26] Eichner K und Hannak W (1988): Mechanische und mikromorphologische Untersuchungen ungelöteter und gelöteter Dentallegierungen, Dent Labor (Band 36), Nr. 5, Seite 601-11.
- [27] Eichner K und Kappert HF (2000): Zahnärztliche Werkstoffkunde und ihre Verarbeitung (Band 1), 7. Auflage, Thieme, Stuttgart.
- [28] Fahrenwaldt HJ und Schuler V (2006): Praxiswissen Schweißtechnik, 2. Auflage, Vieweg, Wiesbaden.
- [29] Fischer J (2000): Biokompatibilität dentaler Legierungen, Quintessenz Zahntech (Band 26), Nr. 6, Seite 617-32.
- [30] Fischer J (2002): Ceramic bonding to a dental gold-titanium alloy, Biomaterials (Band 23), Nr. 5, Seite 1303-11.
- [31] Freesmeyer WB und Kakelbeck A (2006): Untersuchung zur Verbesserung des passiven Sitzes der implantatgetragenen Suprastruktur an nichtparallelen Implantaten mit Hilfe von Funkenerosion und Passivierung der Schraubkanäle, Implantologie (Band 14), Nr. 2, Seite 157-69.
- [32] Galindo DF, Ercoli C, Graser GN, Tallents RH und Moss ME (2001): Effect of soldering on metal-porcelain bond strength in repaired porcelain-fused-to-metal castings, J Prosthet Dent (Band 85), Nr. 1, Seite 88-94.
- [33] Geis-Gerstorfer J, Rupp F und Scheideler L (2005): Korrosionsprüfung - eine wichtige Basis für die Materialauswahl, Quintessenz Zahntech (Band 31), Nr. 12, Seite 1343-8.

- [34] Geis-Gerstorfer J und Weber H (1987): In vitro corrosion behavior of four Ni-Cr dental alloys in lactic acid and sodium chloride solutions, Dent Mater (Band 3), Nr. 6, Seite 289-95.
- [35] Göbel R und Welker D (2000): Anorganische Legierungs-Kunststoff-Verbundverfahren: Silikatisierung, Silanisierung, Verzinnen, Quintessenz Zahntech (Band 26), Nr. 7, Seite 733-43.
- [36] Graham JD, Johnson A, Wildgoose DG, Shareef MY und Cannavina G (1999): The effect of surface treatments on the bond strength of a nonprecious alloy-ceramic interface, Int J Prosthodont (Band 12), Nr. 4, Seite 330-4.
- [37] Guindy JS, Schiel H, Schmidli F und Wirz J (2004): Corrosion at the marginal gap of implant-supported suprastructures and implant failure, Int J Oral Maxillofac Implants (Band 19), Nr. 6, Seite 826-31.
- [38] Hausch G (2006): Materialkundliche Kriterien für die Auswahl geeigneter Dentallegierungen, Zahn Prax (Band 9), Nr. 8, Seite 434-45.
- [39] Heraeus (1986): Löten, Heraeus Edelmetalle GmbH, Hanau.
- [40] Hofer H und Fischer J (1997): Verarbeitung von Edelmetallegierungen - Mißerfolge und deren Ursachen, Teil 2: Löten, Quintessenz Zahntech (Band 23), Nr. 12, Seite 1513-17.
- [41] Hoffmann A (2007): Kleben, Löten, Schweißen, Quintessenz Zahntech (Band 33), Nr. 12, Seite 1564-78.
- [42] Hoffmann A (2007): Titan als Dentalwerkstoff, Quintessenz Zahntech (Band 33), Nr. 4, Seite 430-42.
- [43] Hofstede TM, Ercoli C, Graser GN, Tallents RH, Moss ME und Zero DT (2000): Influence of metal surface finishing on porcelain porosity and beam failure loads at the metal-ceramic interface, J Prosthet Dent (Band 84), Nr. 3, Seite 309-17.
- [44] Hohmann A und Hielscher W (2003): Lehrbuch der Zahntechnik (Band 3), 3. Auflage, Quintessenz, Berlin.
- [45] Janda R (1992): Kleben und Klebetechniken, Dent Labor, Nr. 3, Seite 409-13.
- [46] Janda R (2006): Gläser, Glaskeramiken und Keramiken, Teil 1, Quintessenz Zahntech (Band 32), Nr. 11, Seite 1264-73.
- [47] Janda R (2007): Silikatkeramiken - Zusammensetzung, Eigenschaften, Anwendung, Wertung: Teil 1, Quintessenz Zahntech (Band 33), Nr. 4, Seite 448-56.
- [48] Janda R (2007): Silikatkeramiken - Zusammensetzung, Eigenschaften, Wertung: Teil 2, Quintessenz Zahntech (Band 33), Nr. 6, Seite 720-30.
- [49] Janda R (2007): Vollkeramiken: Zusammensetzung, Eigenschaften, Anwendung, Wertung, Quintessenz Zahntech (Band 33), Nr. 1, Seite 46-60.
- [50] Jungo M, Wirz J und Schmidli F (1998): Ist Löten ein Kunstfehler?, Quintessenz (Band 49), Nr. 12, Seite 1233-41.
- [51] Kang MS, Ercoli C, Galindo DF, Graser GN, Moss ME und Tallents RH (2003): Comparison of the load at failure of soldered and nonsoldered porcelain-fused-to-metal crowns, J Prosthet Dent (Band 90), Nr. 3, Seite 235-40.
- [52] Kappert HF (1991): Schweißtechnik mit Plasma und Laser, Quintessenz Zahntech (Band 17), Nr. 8, Seite 977-998.
- [53] Kappert HF und Krahl M (2001): Keramiken - eine Übersicht, Quintessenz Zahntech (Band 27), Nr. 6, Seite 668-704.

- [54] Kappert HF, Riedling W und Weyhmann J (1985): Eine vergleichende Studie von drei Methoden zur Untersuchung des Metall-Keramik-Verbundes bei NEM-Legierungen, Dtsch Zahnärztl Z (Band 40), Nr. 11, Seite 1179-86.
- [55] Kasenbacher A und Dielert E (1988): Werkstoffprüfungen an lasergeschweißten bzw. gelöteten Gold- und Co/Cr/Mo-Dentallegierungen, Dtsch Zahnärztl Z (Band 43), Nr. 3, Seite 400-3.
- [56] Klagges G (1983): Untersuchungen von Lötverbindungen der Edelmetall-Legierung Degulor M und der Nichtedelmetall-Legierung Wironit, Zahnmed. Diss., FU Berlin.
- [57] Knabe C und Hoffmeister B (2003): Implant-supported titanium prostheses following augmentation procedures: a clinical report, Aust Dent J (Band 48), Nr. 1, Seite 55-60.
- [58] Kochs J (2008): Einfluss von Mischungsverhältnis und Trocknungsphase der Grundmasse auf die Verbundfestigkeit zwischen edelmetallfreier Legierung und Verblendkeramik, Med. Diss., Charité - Universitätsmedizin Berlin.
- [59] Lenz E (2000): Klinische Bewertung von Dentallegierungen, Interdisziplinäre Zahnheilkunde (Teamwork) (Band 3), Nr. 3, Seite 337-59.
- [60] Lenz J, Schwarz S, Schwickerath H, Sperner F und Schäfer A (1995): Bond strength of metal-ceramic systems in three-point flexure bond test, J Appl Biomater (Band 6), Nr. 1, Seite 55-64.
- [61] Li H, Chen Y, Li Y, Zhao Y, Fu Q und Yang T (2001): Effects of laser welding on ceramic fused to metal, Hua Xi Yi Ke Da Xue Xue Bao (Band 32), Nr. 2, Seite 271-3.
- [62] Lindigkeit J (2006): Schweißungen von CoCr-Legierungen, Dent Labor (Band 54), Nr. 1, Seite 65-8.
- [63] Luthy H, Marinello CP, Reclaru L und Scharer P (1996): Corrosion considerations in the brazing repair of cobalt-based partial dentures, J Prosthet Dent (Band 75), Nr. 5, Seite 515-24.
- [64] Marx H (1988): Zur Frage der Festigkeitsprüfung des Metall-Kunststoff-Verbundes, Dtsch Zahnärztl Z (Band 43), Seite 1024-27.
- [65] Marx R (1993): Moderne keramische Werkstoffe für ästhetische Restaurationen - Verstärkung und Bruchzähigkeit, Dtsch Zahnärztl Z (Band 48), Seite 229-236.
- [66] Marxkors R und Meiners H (2001): Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde, Hanser, München.
- [67] Mietko M (2008): Vergleich verschiedener Prüfmethode zur Bestimmung der Verbundfestigkeit zwischen einer Kobalt-Chrom-Legierung und einer Verblendkeramik, Med. Diss., Charité - Universitätsmedizin Berlin.
- [68] Mirkovic N (2007): Mechanical properties of metal-ceramic systems from nickel-chromium and cobalt-chromium alloys, Vojnosanit Pregl (Band 64), Nr. 4, Seite 241-5.
- [69] Monday JJ und Asgar K (1986): Tensile strength comparison of presoldered and postsoldered joints, J Prosthet Dent (Band 55), Nr. 1, Seite 23-7.
- [70] NaBadalung DP und Nicholls JI (1998): Laser welding of a cobalt-chromium removable partial denture alloy, J Prosthet Dent (Band 79), Nr. 3, Seite 285-90.

- [71] NaBadalung DP, Powers JM und Connelly ME (1998): Comparison of bond strengths of three denture base resins to treated nickel-chromium-beryllium alloy, J Prosthet Dent (Band 80), Nr. 3, Seite 354-61.
- [72] Neumann MO und Lindigkeit J (2005): Mechanische Festigkeit von geschweißten EMF-Legierungen, Quintessenz Zahntech (Band 31), Nr. 9, Seite 966-73.
- [73] Nikellis I, Levi A und Zinelis S (2005): Effect of soldering on the metal-ceramic bond strength of an Ni-Cr base alloy, J Prosthet Dent (Band 94), Nr. 5, Seite 435-9.
- [74] Ortorp A, Jemt T, Bäck T und Jälevik T (2003): Comparisons of precision of fit between cast and CNC-milled titanium implant frameworks for the edentulous mandible, Int J Prosthodont (Band 16), Nr. 2, Seite 194-200.
- [75] Press RJ, Phillips K, Nicholls J und Butson T (2001): Effect of surface treatment on fatigue life of postceramic soldered joints, Int J Prosthodont (Band 14), Nr. 3, Seite 239-44.
- [76] Pumpe M (2008): Einfluss der Dauer und der Temperatur von Oxidbränden auf die Verbundfestigkeit zwischen Keramik und EMF-Legierungen, Med. Diss., Charité - Universitätsmedizin Berlin.
- [77] Roggensack M, Walter MH und Böning KW (1993): Studies on laser- and plasma-welded titanium, Dent Mater (Band 9), Nr. 2, Seite 104-7.
- [78] Sachs L und Hedderich J (2009): Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R, 13. Auflage, Springer, Heidelberg.
- [79] Safikhani M und Strietzel R (2008): Verbund Legierung-Keramik, Dent Labor (Band 56), Nr. 1, Seite 31-8.
- [80] Schäfer A (1987): Der Einfluss von Lot auf die Haftfestigkeit von Metall/Keramik-Systemen, Quintessenz Zahntech (Band 13), Nr. 8, Seite 855-9.
- [81] Schätze C (1985): Mechanische und mikromorphologische Untersuchungen von Lötverbindungen der Nichtedelmetallegerung Wiron 88, Zahnmed. Diss., FU Berlin.
- [82] Schmitz KH und Schulmeyer H (1975): Bestimmung der Haftfestigkeit dentaler metallkeramischer Verbundsysteme, Dent Labor (Band 23), Nr. 12, Seite 1416-20.
- [83] Schnettger A, Zylla IM und Kappert HF (2006): Prüfung der Verbundfestigkeit metall-keramischer Systeme, Quintessenz Zahntech (Band 32), Nr. 7, Seite 732-8.
- [84] Schwarz S, Lenz J und Schwickerath H (1988): Zur Festigkeit des metallkeramischen Verbundes bei der Biegeprüfung, Dtsch Zahnärztl Z (Band 43), Nr. 11, Seite 1152-8.
- [85] Schweitzer DM, Goldstein GR, Ricci JL, Silva NR und Hittelman EL (2005): Comparison of bond strength of a pressed ceramic fused to metal versus feldspathic porcelain fused to metal, J Prosthodont (Band 14), Nr. 4, Seite 239-47.
- [86] Schwickerath H (1988): Zur Festigkeit des metallkeramischen Verbundes bei der Biegeprüfung, Dtsch Zahnärztl Z (Band 43), Seite 1152-58.
- [87] Schwickerath H (1989): Zur Beurteilung der Belastbarkeit von metallkeramischen Restaurationen, ZWR (Band 98), Nr. 5, Seite 434-40.

- [88] Schwickerath H (1993): Zur Passivierung von Dentallegierungen, Quintessenz Zahntech (Band 19), Nr. 4, Seite 403.
- [89] Sestini S, Notarantonio L, Cerboni B, et al. (2006): In vitro toxicity evaluation of silver soldering, electrical resistance, and laser welding of orthodontic wires, Eur J Orthod (Band 28), Nr. 6, Seite 567-72.
- [90] Shell JS und Nielsen JP (1962): Study of the bond between gold alloys and porcelain, J Dent Res (Band 41), Seite 1424-37.
- [91] Sherring-Lucas M (1994): Konstruktionselemente für die Prothetik, Quintessenz, Berlin.
- [92] Shigeto N, Yanagihara T, Murakami S und Hamada T (1991): Corrosion properties of soldered joints. Part II: Corrosion pattern of dental solder and dental nickel-chromium alloy, J Prosthet Dent (Band 66), Nr. 5, Seite 607-10.
- [93] Siebert GK (1989): Dentallegierungen in der zahnärztlichen Prothetik, Carl Hanser Verlag, München.
- [94] Smith TB, Kelly JR und Tesk JA (1994): In vitro fracture behavior of ceramic and metal-ceramic restorations, J Prosthodont (Band 3), Nr. 3, Seite 138-44.
- [95] Sobieralski JA, Schelb E und Prihoda TJ (1990): Torch versus oven preceramic soldering of a nickel-chromium alloy, Quintessence Int (Band 21), Nr. 9, Seite 753-7.
- [96] Staffanou RS, Radke RA und Jendresen MD (1980): Strength properties of soldered joints from various ceramic-metal combinations, J Prosthet Dent (Band 43), Nr. 1, Seite 31-9.
- [97] Strietzel R (1998): Der Nickel-Irrtum, Interdisziplinäre Zahnheilkunde (Teamwork) (Band 1), Nr. 1, Seite 56-61.
- [98] Strietzel R (2005): Die Werkstoffkunde der Metall-Keramik-Systeme, 1. Auflage, Verlag Neuer Merkur, München.
- [99] Strietzel R, Bahr U, Liehr E und Poppinga M (2001): Aufbrennfähige NEM-Legierungen für LFC-Massen, Dent Labor (Band 49), Nr. 10, Seite 1687-93.
- [100] Tauber M und Eykmann R (2006): Gerüstgestaltung für metallkeramische Restaurationen, Teil 2: Physikalische Hinweise zur Gerüstgestaltung, Quintessenz Zahntech (Band 32), Nr. 4, Seite 384-92.
- [101] Townsend LW, Vermilyea SG und Griswold WH (1983): Soldering nonnoble alloys, J Prosthet Dent (Band 50), Nr. 1, Seite 51-3.
- [102] Vahed A, Lachman N und Knutsen RD (2007): Failure investigation of soldered stainless steel orthodontic appliances exposed to artificial saliva, Dent Mater (Band 23), Nr. 7, Seite 855-61.
- [103] Vahl J und van Benthem H (1992): Laser in der Zahnmedizin, Quintessenz, Berlin.
- [104] Vallittu PK (1997): Brazing joints of gold alloy used in porcelain-fused-to-metal restorations and their resistance to deflection fatigue, J Oral Rehabil (Band 24), Nr. 6, Seite 444-8.
- [105] Viennot S, Dalard F, Lissac M und Grosogeat B (2005): Corrosion resistance of cobalt-chromium and palladium-silver alloys used in fixed prosthetic restorations, Eur J Oral Sci (Band 113), Nr. 1, Seite 90-5.

- [106] Voss R (1969): Die Festigkeit metallkeramischer Kronen, Dtsch Zahnärztl Z (Band 24), Nr. 8, Seite 726-31.
- [107] Waddell JN, Payne AG und Swain MV (2006): Physical and metallurgical considerations of failures of soldered bars in bar attachment systems for implant overdentures: a review of the literature, J Prosthet Dent (Band 96), Nr. 4, Seite 283-8.
- [108] Walther R (1994): Vergleichende Untersuchung von vier Abscher-Verfahren zur Prüfung der Haftung Metall-Keramik in Abhängigkeit verschiedener Legierungen, Zahnmed. Diss., FU Berlin.
- [109] Watanabe I und Baba N (2007): Effect of welding parameters on penetration of Nd:YAG laser into cast Ti and Au- and Ag-based alloys, Quintessence Int (Band 38), Nr. 1, Seite 14-9.
- [110] Wegener O (2002): Untersuchungen zum Einfluß des Laserschweißens auf die Haftfestigkeit von Metall-Keramik-Verbundsystemen, Med. Diss., Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- [111] Weiß C und Rzany B (2008): Basiswissen Medizinische Statistik, 4. Auflage, Springer, Heidelberg.
- [112] Wen ZH, Du CS und Zhen DC (1994): The effect of different size of aluminumoxide for sandblasting on bonding strength of porcelain to metal, Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi (Band 29), Nr. 4, Seite 229-31, 255.
- [113] Winkler S und Wongthai P (1986): Increasing the bond strength of metal-ceramic restorations, J Prosthet Dent (Band 56), Nr. 4, Seite 396-401.
- [114] Wirz J, Schmidli F und Jäger K (1991): Korrosionsresistenz von Lötstellen nicht-edelmetallhaltiger Legierungen, Quintessenz Zahntech (Band 17), Nr. 9, Seite 1140-50.
- [115] Wirz J, Schmidli F und Meder M (1994): Laserschweißen von Titan, Quintessenz (Band 45), Nr. 11, Seite 1571-81.
- [116] Wiskott HW, Macheret F, Bussy F und Belser UC (1997): Mechanical and elemental characterization of solder joints and welds using a gold-palladium alloy, J Prosthet Dent (Band 77), Nr. 6, Seite 607-16.
- [117] Wögler R (2004): Einfluss von Verarbeitungsparametern auf die Scher-Verbundfestigkeit zwischen einer Kobalt-Chrom-Legierung und Keramik, Med. Diss., Charité - Universitätsmedizin Berlin.
- [118] Wylie CM, Shelton RM, Fleming GJ und Davenport AJ (2007): Corrosion of nickel-based dental casting alloys, Dent Mater (Band 23), Nr. 6, Seite 714-23.
- [119] Yamamoto M (1986): Metallkeramik, Quintessenz, Berlin.
- [120] Yilmaz H und Dincer C (1999): Comparison of the bond compatibility of titanium and an NiCr alloy to dental porcelain, J Dent (Band 27), Nr. 3, Seite 215-22.
- [121] Yoshizawa K (2006): Oberflächenbearbeitung von Gerüsten in der Metallkeramik, Quintessenz Zahntech (Band 32), Nr. 9, Seite 984-91.
- [122] Zahedi B und Bartels T (2005): Die verklebte Stegversorgung auf Implantaten, Quintessenz (Band 56), Nr. 8, Seite 789-95.
- [123] Zeeck A (1997): Chemie für Mediziner, 3. Auflage, Grundtypen der chemischen Bindung, Urban & Schwarzenberg, München.

-
- [124] Zhu JF, He HM, Gao B und Wang ZY (2006): Effects of laser welding on bond of porcelain fused cast pure titanium, *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi* (Band 41), Nr. 4, Seite 236-9.
- [125] Zupancic R, Legat A und Funduk N (2006): Tensile strength and corrosion resistance of brazed and laser-welded cobalt-chromium alloy joints, *J Prosthet Dent* (Band 96), Nr. 4, Seite 273-82.

8 Anhang

8.1 Verwendete Geräte und Zusatzmaterialien

Produkt	Firma
Polyacrylamid-Plättchen	
Wachsprofile 4,0 mm	Bredent
Fräswachs	YETI
Wachsprofilstäbe 1,15 x 1,75 mm	BEGO
Gussringeinlagen	Heraeus-Kulzer
Einbettmasse Bellavest [®] SH	BEGO
Löt-Einbettmasse L36 [®]	Hinrichs
Dubliermasse Reprogum [®]	ESPE
Palapress [®] vario	Heraeus-Kulzer
Zinnfolie 0,2 mm	Dentaurum
Flussmittel Oxynon [®]	DeguDent
Strahlkorund Korox [®] 250	BEGO
Paste Opaque Liquid für OMEGA 900 [®]	VITA
Modelling Fluid für OMEGA 900 [®]	VITA
Opaque Fluid für RESPONSE [®]	VITA
Modelling Fluid für RESPONSE [®]	VITA
Trennscheiben 0,2 mm	Wegold
Hartmetall-Fräsen	Komet
Schleifpapier	Buehler
Diamant-Walze	Komet
Dampfstrahlgerät Aquaclean 3	Degussa
Abstrahlgerät Duostar [®] plus	BEGO
Vakuum-Rührgerät R3	Degussa
Vorwärmofen L5/S	Nabertherm
Flammguss schleuder Motorcast [®] Typ 2	Degussa
Behelfsform	BEGO
Weldmaster	Hager & Werken
LaserStar PW	BEGO
Keramik-Brennofen Programat P90	IVOCLAR
Mikrometer-Schraube	NSK
Universalprüfmaschine Z010	Zwick
Schleifmaschine Phoenix Alpha	Buehler
Stereomikroskop Stemi SV 11	Zeiss

Tab. 18: verwendete Geräte und Zusatzmaterialien

8.2 Messwerte und beschreibende Statistik

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	9,60	0,47	4,0	38,40
2	12,77	0,51	3,5	44,70
3	12,01	0,51	3,5	42,04
4	10,84	0,50	3,6	39,02
5	11,27	0,52	3,4	38,32
6	10,87	0,48	3,9	42,39
7	12,98	0,53	3,2	41,54
Mittelwert			[MPa]	40,91
Median			[MPa]	41,54
Minimum			[MPa]	38,32
Maximum			[MPa]	44,70
Standardabweichung			[MPa]	2,41
Variationskoeffizient			[%]	5,88

Tab. 19: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 0 (Referenz, ungefügt) von Wirobond[®] 280

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	11,50	0,53	3,2	36,80
2	8,69	0,49	3,8	33,02
3	8,15	0,53	3,2	26,08
4	10,88	0,53	3,2	34,82
5	10,04	0,54	3,1	31,12
6	9,78	0,50	3,6	35,21
7	10,31	0,54	3,1	31,96
Mittelwert			[MPa]	32,72
Median			[MPa]	33,02
Minimum			[MPa]	26,08
Maximum			[MPa]	36,80
Standardabweichung			[MPa]	3,52
Variationskoeffizient			[%]	10,77

Tab. 20: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 1 (ungefügt, nicht abgestrahlt) von Wirobond[®] 280

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	10,19	0,51	3,5	35,67
2	11,49	0,51	3,5	40,22
3	11,31	0,52	3,4	38,45
4	11,39	0,54	3,1	35,31
5	11,18	0,50	3,6	40,25
6	11,24	0,51	3,5	39,34
7	10,53	0,51	3,5	36,86
Mittelwert			[MPa]	38,01
Median			[MPa]	38,45
Minimum			[MPa]	35,31
Maximum			[MPa]	40,25
Standardabweichung			[MPa]	2,08
Variationskoeffizient			[%]	5,47

Tab. 21: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 2 (ungefugt, nicht gefräst, abgestrahlt) von Wirobond[®] 280

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	11,06	0,49	3,8	42,03
2	14,04	0,52	3,4	47,74
3	11,83	0,50	3,6	42,59
4	10,13	0,49	3,8	38,49
5	10,19	0,49	3,8	38,72
6	13,26	0,52	3,4	45,08
7	12,84	0,51	3,5	44,94
Mittelwert			[MPa]	42,80
Median			[MPa]	42,59
Minimum			[MPa]	38,49
Maximum			[MPa]	47,74
Standardabweichung			[MPa]	3,41
Variationskoeffizient			[%]	7,98

Tab. 22: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 3 (gelötet, nach Herstellerangabe bearbeitet) von Wirobond[®] 280

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	12,03	0,48	3,9	46,92
2	10,17	0,48	3,9	39,66
3	12,04	0,50	3,6	43,34
4	10,81	0,49	3,8	41,08
5	10,98	0,47	4,0	43,92
6	11,38	0,47	4,0	45,52
7	11,45	0,47	4,0	45,80
Mittelwert			[MPa]	43,75
Median			[MPa]	43,92
Minimum			[MPa]	39,66
Maximum			[MPa]	46,92
Standardabweichung			[MPa]	2,63
Variationskoeffizient			[%]	6,00

Tab. 23: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 4 (gelötet, Lot verschmiert, mit Flussmittel kontaminiert) von Wirobond[®] 280

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	11,29	0,46	4,2	47,42
2	10,13	0,46	4,2	42,55
3	9,36	0,45	4,4	41,18
4	9,28	0,45	4,4	40,83
5	11,77	0,48	3,9	45,90
6	9,98	0,45	4,4	43,91
7	11,71	0,45	4,4	51,52
Mittelwert			[MPa]	44,76
Median			[MPa]	43,91
Minimum			[MPa]	40,83
Maximum			[MPa]	51,52
Standardabweichung			[MPa]	3,83
Variationskoeffizient			[%]	8,55

Tab. 24: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 5 (gelötet, Lot verschmiert) von Wirobond[®] 280

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	10,52	0,46	4,2	44,18
2	9,67	0,45	4,4	42,55
3	9,44	0,46	4,2	39,65
4	10,66	0,51	3,5	37,31
5	10,43	0,50	3,6	37,55
6	10,00	0,46	4,2	42,00
7	9,57	0,48	3,9	37,32
Mittelwert			[MPa]	40,08
Median			[MPa]	39,65
Minimum			[MPa]	37,31
Maximum			[MPa]	44,18
Standardabweichung			[MPa]	2,84
Variationskoeffizient			[%]	7,09

Tab. 25: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 6 (lasergeschweißt, nach Herstellerangabe bearbeitet) von Wirobond[®] 280

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	11,09	0,50	3,6	39,92
2	11,08	0,51	3,5	38,78
3	11,31	0,48	3,9	44,11
4	10,43	0,49	3,8	39,63
5	10,83	0,50	3,6	38,99
6	9,51	0,48	3,9	37,09
7	12,75	0,53	3,2	40,80
Mittelwert			[MPa]	39,90
Median			[MPa]	39,63
Minimum			[MPa]	37,09
Maximum			[MPa]	44,11
Standardabweichung			[MPa]	2,18
Variationskoeffizient			[%]	5,47

Schweißraupe in der Mitte, daher ungefährender Dickenwert

Tab. 26: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 7 (lasergeschweißt, Schweißraupe belassen) von Wirobond[®] 280

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	9,74	0,47	4,0	38,96
2	12,80	0,50	3,6	46,08
3	10,69	0,48	3,9	41,69
4	13,11	0,51	3,5	45,89
5	14,72	0,51	3,5	51,52
6	11,86	0,50	3,6	42,70
7	12,11	0,50	3,6	43,60
Mittelwert			[MPa]	44,35
Median			[MPa]	43,60
Minimum			[MPa]	38,96
Maximum			[MPa]	51,52
Standardabweichung			[MPa]	4,00
Variationskoeffizient			[%]	9,03

Tab. 27: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 8 (lasergeschweißt, Schweißzusatzstoff überschüssig) von Wirobond[®] 280

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	8,50	0,47	4,2	35,70
2	8,55	0,45	4,6	39,33
3	8,51	0,49	3,9	33,19
4	7,20	0,46	4,4	31,68
5	7,05	0,45	4,6	32,43
6	7,41	0,45	4,6	34,09
7	9,05	0,46	4,4	39,82
Mittelwert			[MPa]	35,18
Median			[MPa]	34,09
Minimum			[MPa]	31,68
Maximum			[MPa]	39,82
Standardabweichung			[MPa]	3,27
Variationskoeffizient			[%]	9,28

Tab. 28: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 0 (Referenz, ungefügt) von Wirobond[®] LFC

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	8,68	0,52	3,5	30,38
2	4,87	0,54	3,3	16,07
3	7,73	0,54	3,3	25,51
4	5,52	0,51	3,6	19,87
5	4,01	0,53	3,4	13,63
6	6,95	0,49	3,9	27,11
7	3,47	0,51	3,6	12,49
Mittelwert			[MPa]	20,72
Median			[MPa]	19,87
Minimum			[MPa]	12,49
Maximum			[MPa]	30,38
Standardabweichung			[MPa]	7,04
Variationskoeffizient			[%]	33,97

Tab. 29: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 1 (ungefügt, nicht abgestrahlt) von Wirobond[®] LFC

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	11,12	0,53	3,4	37,81
2	9,86	0,54	3,3	32,54
3	10,64	0,52	3,5	37,24
4	10,82	0,53	3,4	36,79
5	11,05	0,55	3,1	34,26
6	10,53	0,53	3,4	35,80
7	10,91	0,54	3,3	36,00
Mittelwert			[MPa]	35,78
Median			[MPa]	36,00
Minimum			[MPa]	32,54
Maximum			[MPa]	37,81
Standardabweichung			[MPa]	1,83
Variationskoeffizient			[%]	5,12

Tab. 30: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 2 (ungefügt, nicht gefräst, abgestrahlt) von Wirobond[®] LFC

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	11,32	0,51	3,6	40,75
2	10,05	0,49	3,9	39,20
3	8,85	0,50	3,8	33,63
4	8,38	0,49	3,9	32,68
5	9,23	0,50	3,8	35,07
6	10,19	0,51	3,6	36,68
7	9,28	0,52	3,5	32,48
Mittelwert			[MPa]	35,79
Median			[MPa]	35,07
Minimum			[MPa]	32,48
Maximum			[MPa]	40,75
Standardabweichung			[MPa]	3,24
Variationskoeffizient			[%]	9,04

Tab. 31: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 3 (gelötet, nach Herstellerangabe bearbeitet) von Wirobond[®] LFC

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	11,35	0,55	3,1	35,19
2	10,34	0,55	3,1	32,05
3	9,32	0,54	3,3	30,76
4	9,34	0,52	3,5	32,69
5	8,51	0,54	3,3	28,08
6	9,73	0,52	3,5	34,06
7	10,51	0,54	3,3	34,68
Mittelwert			[MPa]	32,50
Median			[MPa]	32,69
Minimum			[MPa]	28,08
Maximum			[MPa]	35,19
Standardabweichung			[MPa]	2,49
Variationskoeffizient			[%]	7,66

Tab. 32: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 4 (gelötet, Lot verschmiert, mit Flussmittel kontaminiert) von Wirobond[®] LFC

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	7,55	0,46	4,4	33,22
2	7,28	0,46	4,4	32,03
3	7,61	0,47	4,2	31,96
4	7,27	0,45	4,6	33,44
5	6,33	0,46	4,4	27,85
6	8,19	0,49	3,9	31,94
7	7,11	0,48	4,1	29,15
Mittelwert			[MPa]	31,37
Median			[MPa]	31,96
Minimum			[MPa]	27,85
Maximum			[MPa]	33,44
Standardabweichung			[MPa]	2,09
Variationskoeffizient			[%]	6,65

Tab. 33: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 5 (gelötet, Lot verschmiert) von Wirobond[®] LFC

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	10,30	0,46	4,4	45,32
2	9,30	0,51	3,6	33,48
3	4,07	0,46	4,4	17,91
4	8,55	0,52	3,5	29,93
5	10,99	0,53	3,4	37,37
6	9,36	0,50	3,8	35,57
7	7,93	0,47	4,2	33,31
Mittelwert			[MPa]	33,27
Median			[MPa]	33,48
Minimum			[MPa]	17,91
Maximum			[MPa]	45,32
Standardabweichung			[MPa]	8,31
Variationskoeffizient			[%]	24,98

Tab. 34: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 6 (lasergeschweißt, nach Herstellerangabe bearbeitet) von Wirobond[®] LFC

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	8,62	0,49	3,9	33,62
2	7,53	0,48	4,1	30,87
3	8,31	0,51	3,6	29,92
4	7,33	0,55	3,1	22,72
5	9,25	0,51	3,6	33,30
6	6,97	0,46	4,4	30,67
7	8,84	0,52	3,5	30,94
Mittelwert			[MPa]	30,29
Median			[MPa]	30,87
Minimum			[MPa]	22,72
Maximum			[MPa]	33,62
Standardabweichung			[MPa]	3,62
Variationskoeffizient			[%]	11,94

Schweißraupe in der Mitte, daher ungefährender Dickenwert

Tab. 35: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 7 (lasergeschweißt, Schweißraupe belassen) von Wirobond[®] LFC

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	4,55	0,48	4,1	18,66
2	0,00	0,52	3,5	0,00
3	0,00	0,45	4,6	0,00
4	7,16	0,50	3,8	27,21
5	8,67	0,51	3,6	31,21
6	0,00	0,49	3,9	0,00
7	7,85	0,50	3,8	29,83
Mittelwert			[MPa]	15,27
Median			[MPa]	18,66
Minimum			[MPa]	0,00
Maximum			[MPa]	31,21
Standardabweichung			[MPa]	14,83
Variationskoeffizient			[%]	97,11

Tab. 36: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 8 (lasergeschweißt, Schweißzusatzstoff überschüssig) von Wirobond[®] LFC

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	9,69	0,46	4,4	42,64
2	11,28	0,49	3,9	43,99
3	11,74	0,48	4,1	48,13
4	8,77	0,45	4,6	40,34
5	10,37	0,49	3,9	40,44
6	10,24	0,49	3,9	39,94
7	11,17	0,48	4,1	45,80
Mittelwert			[MPa]	43,04
Median			[MPa]	42,64
Minimum			[MPa]	39,94
Maximum			[MPa]	48,13
Standardabweichung			[MPa]	3,12
Variationskoeffizient			[%]	7,24

Tab. 37: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 0 (Referenz, ungefügt) von Wirocer[®] plus

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	4,32	0,53	3,4	14,69
2	4,00	0,50	3,8	15,20
3	4,76	0,51	3,6	17,14
4	5,03	0,52	3,5	17,61
5	3,24	0,54	3,3	10,69
6	0,00	0,48	4,1	0,00
7	0,00	0,51	3,6	0,00
Mittelwert			[MPa]	10,76
Median			[MPa]	14,69
Minimum			[MPa]	0,00
Maximum			[MPa]	17,61
Standardabweichung			[MPa]	7,68
Variationskoeffizient			[%]	71,41

Tab. 38: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 1 (ungefügt, nicht abgestrahlt) von Wirocer[®] plus

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	13,71	0,54	3,3	45,24
2	15,38	0,55	3,1	47,68
3	13,30	0,53	3,4	45,22
4	14,88	0,55	3,1	46,13
5	12,71	0,54	3,3	41,94
6	11,48	0,53	3,4	39,03
7	12,65	0,54	3,3	41,75
Mittelwert			[MPa]	43,86
Median			[MPa]	45,22
Minimum			[MPa]	39,03
Maximum			[MPa]	47,68
Standardabweichung			[MPa]	3,03
Variationskoeffizient			[%]	6,90

Tab. 39: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 2 (ungefügt, nicht gefräst, abgestrahlt) von Wirocer[®] plus

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	10,42	0,48	4,1	42,72
2	9,72	0,48	4,1	39,85
3	9,41	0,47	4,2	39,52
4	11,10	0,47	4,2	46,62
5	9,79	0,47	4,2	41,12
6	9,84	0,49	3,9	38,38
7	10,09	0,46	4,4	44,40
Mittelwert			[MPa]	41,80
Median			[MPa]	41,12
Minimum			[MPa]	38,38
Maximum			[MPa]	46,62
Standardabweichung			[MPa]	2,94
Variationskoeffizient			[%]	7,04

Tab. 40: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 3 (gelötet, nach Herstellerangabe bearbeitet) von Wirocer[®] plus

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	10,57	0,54	3,3	34,88
2	10,67	0,51	3,6	38,41
3	10,96	0,48	4,1	44,94
4	13,64	0,51	3,6	49,10
5	11,15	0,48	4,1	45,72
6	10,93	0,47	4,2	45,91
7	11,16	0,49	3,9	43,52
Mittelwert			[MPa]	43,21
Median			[MPa]	44,94
Minimum			[MPa]	34,88
Maximum			[MPa]	49,10
Standardabweichung			[MPa]	4,89
Variationskoeffizient			[%]	11,33

Tab. 41: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 4 (gelötet, Lot verschmiert, mit Flussmittel kontaminiert) von Wirocer[®] plus

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	10,30	0,45	4,6	47,38
2	9,79	0,45	4,6	45,03
3	9,76	0,45	4,6	44,90
4	9,28	0,48	4,1	38,05
5	10,90	0,45	4,6	50,14
6	11,95	0,47	4,2	50,19
7	8,65	0,45	4,6	39,79
Mittelwert			[MPa]	45,07
Median			[MPa]	45,03
Minimum			[MPa]	38,05
Maximum			[MPa]	50,19
Standardabweichung			[MPa]	4,73
Variationskoeffizient			[%]	10,50

Tab. 42: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 5 (gelötet, Lot verschmiert) von Wirocer[®] plus

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	9,89	0,49	3,9	38,57
2	8,63	0,49	3,9	33,66
3	10,76	0,50	3,8	40,89
4	10,39	0,51	3,6	37,40
5	0,00	0,47	4,2	0,00
6	9,75	0,47	4,2	40,95
7	11,36	0,50	3,8	43,17
Mittelwert			[MPa]	33,52
Median			[MPa]	38,57
Minimum			[MPa]	0,00
Maximum			[MPa]	43,17
Standardabweichung			[MPa]	15,09
Variationskoeffizient			[%]	45,03

Tab. 43: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 6 (lasergeschweißt, nach Herstellerangabe bearbeitet) von Wirocer[®] plus

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	9,53	0,48	4,1	39,07
2	11,43	0,53	3,4	38,86
3	10,70	0,52	3,5	37,45
4	10,14	0,48	4,1	41,57
5	13,95	0,54	3,3	46,04
6	10,14	0,48	4,1	41,57
7	9,86	0,47	4,2	41,41
Mittelwert			[MPa]	40,85
Median			[MPa]	41,41
Minimum			[MPa]	37,45
Maximum			[MPa]	46,04
Standardabweichung			[MPa]	2,80
Variationskoeffizient			[%]	6,84

Schweißraupe in der Mitte, daher ungefährender Dickenwert

Tab. 44: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 7 (lasergeschweißt, Schweißraupe belassen) von Wirocer[®] plus

Probe n	Kraft F_{Bruch} [N]	Gerüstdicke d [mm]	k [mm ⁻²]	Verbundfestigkeit τ [MPa]
1	9,70	0,49	3,9	37,83
2	8,95	0,46	4,4	39,38
3	8,24	0,48	4,1	33,78
4	11,12	0,52	3,5	38,92
5	9,23	0,50	3,8	35,07
6	8,14	0,48	4,1	33,37
7	10,97	0,52	3,5	38,40
Mittelwert			[MPa]	36,68
Median			[MPa]	37,83
Minimum			[MPa]	33,37
Maximum			[MPa]	39,38
Standardabweichung			[MPa]	2,53
Variationskoeffizient			[%]	6,90

Tab. 45: Einzelwerte und beschreibende Statistik der Serie 8 (lasergeschweißt, Schweißzusatzstoff überschüssig) von Wirocer[®] plus

8.3 Danksagung

Ich danke Herrn PD Dr. Strietzel für die freundliche Überlassung des Dissertationsthemas sowie für die Unterstützung bei allen Fragen rund um die Promotion.

Den Firmen BEGO und VITA danke ich für die Bereitstellung der verwendeten Materialien.

Ich danke den Mitarbeitern der Firma BEGO: Frau Poppinga für die Durchführung des Dreipunkt-Biegeverbundtests nach SCHWICKERATH und für die Bereitstellung von Informationsmaterialien sowie Herrn ZT Salemka für die Beratung rund um die Labor-Herstellung der Prüfkörper. Herrn ZT Wollschläger danke ich für die Durchführung der Laserschweißungen.

Den Mitarbeitern Herrn Dr. Renz und Fr. Bölling aus der Abteilung für Orale Struktur- und Entwicklungsbiologie des Instituts für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Charité – Universitätsmedizin Berlin danke ich für die freundliche Unterstützung rund um die lichtmikroskopischen Untersuchungen der Prüfkörper.

Des Weiteren bedanke ich mich bei der Firma FORUM Zahntechnik GmbH für die Nutzung des zahntechnischen Arbeitsplatzes zur Herstellung der Prüfkörper sowie Herrn ZT Wardelmann für die Beantwortung zahntechnischer Fragen.

Frau Schulz der Fa. Medistat danke ich für die statistischen Beratungen.

Auch danken möchte ich meinen Eltern und allen Freunden und Bekannten, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben.

8.4 Lebenslauf

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

8.5 Erklärung

Ich, Nicolas Simon, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Einfluss des Lötens bzw. Laserschweißens auf die Verbundfestigkeit von Metall-Keramik-Systemen“ selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.

Berlin, den 30.09.2009

Nicolas Simon