

5 DISKUSSION

5.1 Fehlerbetrachtung

Fehler bei der Herstellung der Proben können sich verändernd auf die Materialeigenschaften von Legierung und Keramik oder die Ausbildung des Haftverbundes auswirken. Damit können die Testergebnisse negativ beeinflusst werden.

Ähnliche Effekte sind von einer fehlerhaft gewählten Versuchsanordnung zu erwarten. Die Ursachen für verschiedene Fehler sollen im Folgenden diskutiert werden.

5.1.1 SCHWICKERATH-TEST

5.1.1.1 Herstellung der SCHWICKERATH-PLÄTTCHEN

Die Anfertigung der Prüfkörper für den Materialtest nach DIN EN ISO 9693 [25] erfolgt in Anlehnung an die labortypischen Verfahrensweisen für die Herstellung von Zahnersatz. So werden eventuelle Verfahrensfehler ebenso in das Material eingetragen, wie es bei der täglichen Arbeit in der Zahntechnik vorkommen kann.

Der Guss darf nicht überhitzt werden. Bei dem beschriebenen Verfahren an der Induktionsgusschleuder HFS-3VAC entscheidet der Techniker während visueller Kontrolle der Schmelze durch ein Sichtfenster über den Gusszeitpunkt.

Eine überhitzte Schmelze macht sich durch vermehrte Oxidbildung bemerkbar. Der verarbeitende Techniker hat einen erhöhten Aufwand beim Abstrahlen des Gussobjektes nach dem Ausbetten. Für den Haftverbund bedeutet die starke Oxidation der Oberfläche eine dicke Oxidschicht, deren mechanische Stabilität nicht sichergestellt ist. Metall-Keramik-Frakturen ereignen sich in diesem Fall in der Verbundzone.

Wird die Schmelze überhitzt, kann es zur Veränderung des Gefüges innerhalb des Gussstückes kommen. Das Legierungsgefüge wird grobkörniger und Gaseinschlüsse durch Kohlenstoffaufnahme oder andere Komponenten sind die Gefahr. Als Folge treten Poren, Risse und veränderte physikalische Eigenschaften des Metalls auf [70]. Beim SCHWICKERATH-TEST kann dann nicht mehr mit dem vom Legierungshersteller angegebenen E-Modul, welcher in die Berechnung des Koeffizienten k mit einfließt, gerechnet werden.

Gasblasen stören den Verbund zur Keramik, vor allem während des Aufbrennens der Verblendschicht. Deshalb werden alle vorbereiteten Plättchen unmittelbar nach Ausarbeiten und Abstrahlen auf homogene Oberflächenbeschaffenheit kontrolliert. War dies einmal nicht der Fall, wurden die betreffenden Gerüste aussortiert. Obwohl für die Untersuchung nur 50 verblendete Plättchen nötig sind, sind daher im Vorfeld 56 Plättchen gegossen worden.

Alle Gussmuffeln werden nach ihrer Entnahme aus der Schleuder mit der Muffelzange langsam auf einem Rost auf Zimmertemperatur abgekühlt. Dazu muss mit einer Zeit von circa einer Stunde gerechnet werden. Aufbrennlegierungen sollten nicht zu schnell abgekühlt werden [70].

Die Verarbeitung von Altmetall ist durch die Verwendung von chargenreiner Legierung ausgeschlossen worden. Zuvor schon einmal vergossenes Material sollte bei Nichtedelmetalllegierungen nie ein zweites Mal eingesetzt werden. Im Gegensatz zu den edelmetallhaltigen Legierungen gibt es hier kein wirtschaftliches Argument. Der Anteil der oxidierten Bestandteile ist so hoch, dass die Gefahr des gestörten Legierungsgefüges mit ungünstigeren Eigenschaften besteht. Der verarbeitende Betrieb verlässt damit auch die Forderungen des Medizinproduktegesetzes nach Anwendung geprüfter Materialien.

Für die Ausarbeitung der metallischen Oberflächen stehen verschiedene rotierende Instrumente zur Verfügung. Für Verblendlegierungen werden keine Siliziumkarbidschleifer angeraten [75, 148]. Verbleibende Rückstände können zu Gasblasen beim Keramikbrand führen. Die Bearbeitung der Metalloberflächen erfolgt mit Hartmetallfräsen und keramisch gebundenen Steinchen in eine Richtung. Im Anschluss werden alle Plättchen manuell mit Aluminiumoxid abgestrahlt. Auf die Verwendung des Umlaufstrahlers ist bewusst verzichtet worden, um keine zusätzlichen Fremdpartikel auf die Oberfläche aufzubringen. Die Mikroretentionen, die durch das Strahlmittel entstehen, erhöhen die Benetzbarkeit der Verblendfläche und können die Haftfestigkeitswerte steigern.

Vor dem Verblenden sind die Proben nochmals mit dem Dampfstrahler abgedampft worden. Damit sollten eventuelle oberflächliche Verunreinigungen entfernt werden. Die Metallplättchen dürfen nur noch mittels einer Klemmpinzette transportiert werden und sollten unmittelbar nach der Reinigung verblendet werden. So kann sich die aktivierte Oberfläche positiv am Metall-Keramik-Verbund beteiligen.

Der Auftrag der ersten Opakerschicht erfolgt dünn zur vollständigen Benetzung der Metalloberfläche. Erst der zweite Auftrag hat das Ziel die Gerüstfarbe abzudecken. Er wurde deshalb deckend aufgetragen. Für den Haftverbund ist der erste, der Washbrand, der entscheidende Brand.

Die Qualität der keramischen Schicht ist für den SCHWICKERATH-TEST von geringerer Bedeutung. Der Test zielt vor allem auf die Untersuchung der Verbindung zwischen Metall und Keramik ab. Dennoch sollten die technischen Vorgaben vom Hersteller zur korrekten Verarbeitung auch der Keramik eingehalten werden. Die Keramik wird innerhalb der Messlehre aufgetragen, verdichtet und überschüssige Flüssigkeit wird abgesaugt. Danach wird die Keramik nach Herstellerangaben gebrannt und überarbeitet. Obwohl die Herstellung der SCHWICKERATH-PROBEN ein rationelles Verfahren darstellt, ist Wert auf saubere Verarbeitung gelegt worden, denn nur so bleiben die Ergebnisse vergleichbar.

5.1.1.2 Prüfkörpergeometrie

Für die Herstellung der Metallplättchen werden Kunststoffplatten mit genormter Stärke verwendet. Die geringen Abweichungen in der Plättchendicke von 0,02 mm können durch die Expansion der Einbettmasse, Kontraktion des Metalls nach dem Guss oder einen Fehlereintrag während der Bearbeitung verursacht worden sein.

In die Auswertung der Haftverbundfestigkeitswerte in Megapascal geht dieser Fehler nicht ein. Durch die Verwendung des Koeffizienten k , der aus dem Diagramm der DIN EN ISO 9693 [25] stammt, ist es gestattet Plättchen mit Stärken zwischen 0,45 mm und 0,55 mm in die Untersuchung mit einzubeziehen [26]. Für dünnere oder dickere Plättchen besteht die Möglichkeit, den Koeffizienten über Extrapolation zu ermitteln.

Der Koeffizient k ermittelt sich aus der Plättchendicke d in Millimetern und dem Elastizitätsmodul der betreffenden Legierung in Megapascal. Da der Ablesefehler von „ k “ in einer Größenordnung von circa 10 % des Messwertes liegt, kann von einer homogenen Dicke der Metallplättchen ausgegangen und ein einheitlicher Wert von „ k “ vorausgesetzt werden. Um diesen Fehler zu minimieren, sind die Koeffizienten „ k “ für die entsprechenden Plättchenstärken in der vorliegenden Arbeit auf mathematischem Weg berechnet worden.

Die Breite der Proben hat linearen Einfluss auf die Ergebnisse, das heißt aus einer Verdopplung der Prüfkörperbreite resultiert eine Verdopplung der Bruchkraft [62].

Abweichungen in der Länge der Prüfkörper können vernachlässigt werden, da die Durchbiegung wesentlich von der eingestellten Auflagenweite bestimmt wird.

Durch die Verwendung einer Messingschablone für die Verblendung müssen alle messtechnischen Vorgaben der DIN EN ISO 9693 [25] eingehalten werden. Die annähernde Gleichartigkeit der Proben ist bei zügiger, gleichmäßiger und korrekter Verarbeitung gewährleistet.

5.1.1.3 Messfehler

Als Vorschubgeschwindigkeit des Biegestempels für den Drei-Punkt-Biegeversuch nach SCHWICKERATH ist 1 mm/min gewählt worden. Die Variation der Prüfgeschwindigkeit im Bereich von 0,5 mm/min bis 1,5 mm/min, wie in der DIN EN ISO 9693 vorgegeben, hat keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die Haftfestigkeitswerte. Das konnte KHALOUF mit seiner Untersuchung belegen [66].

Da die Wahl der Kraftabfallsgrenze zwischen 5 % und 30 % keine Veränderung an den gemessenen Bruchkraftwerten zur Folge hat, wurde für diese Untersuchung ein mittlerer Wert von 15 % gewählt [66].

Die Proben werden zur Messung manuell von der prüfenden Person zwischen den Auflagen mit der Weite von 20 mm positioniert. Dabei kann es zu leichten Differenzen bei jeder erneuten Messung kommen. Um diesen Fehler zu minimieren, ist die exakte Mitte und davon ein Abstand von je 10 mm an jeder Probe im Vorfeld mit einem Folienstift markiert worden.

Da jede Probe eine Nummer trägt, können alle Plättchen zügig nacheinander geprüft werden. Jedem Prüfkörper wird die genaue Metallwandstärke, die zuvor an drei Stellen gemessen wurde, zugeordnet. Die Berechnung der Haftfestigkeit aus der ermittelten Bruchkraft F erfolgt über den Koeffizienten k , der neben dem Elastizitätsmodul die Plättchendicke d enthält.

5.1.2 VOSS-TEST

5.1.2.1 Herstellung der Kronen

Gemeinsamer Sinn und Ziel des VOSS-TESTS und des Abschrecktests ist es möglichst originale keramisch verblendete Metallkronen, wie sie in jedem Dentallabor hergestellt werden können, zu prüfen. Fehler durch die Laborroutine oder beim Herstellungsverfahren werden sich daher auch bei der Anfertigung der Proben ereignen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Vergleich der Prüfverfahren. Es erscheint sinnvoll für beide Tests die gleichen Prüfkörper zeitgleich aus dem gleichen Material, unter den gleichen Bedingungen, mit den gleichen Abmessungen herzustellen. Dazu sind insgesamt 100 identische Kronen geschaffen worden.

In Vorbereitung auf den Guss werden jeweils fünf in Wachs modellierte Käppchen in eine Muffel der Größe 3 eingebettet. Die Art und Weise der Anstiftung, Einbettung, Aushärtung der Einbettmasse und des Vorwärmens richtet sich nach den allgemeingültigen Vorgaben für die Herstellung von keramisch verblendetem Zahnersatz. Die manuellen Fähigkeiten und das nötige Fachwissen dazu hat jeder ausgebildete Zahntechniker. Werden die Angaben zu Vorwärm- und Haltezeiten, die der Hersteller für die Verarbeitungstechnologie angibt, eingehalten, können hier Fehler minimiert werden.

Nach dem Guss und dem Ausbetten in vorhergehend beschriebener Weise werden alle Gerüste überarbeitet. Der Guss wird auf Vollständigkeit kontrolliert. Ein Fehlen von Kronenrandanteilen zeigt Fehler in der Modellation, beim Anstiften oder in der Gusstechnologie an. Hier muss davon ausgegangen werden, dass auch das Gefüge der Legierung verändert ist. Fehlerhafte Versuchsergebnisse durch einen gestörten Haftverbund wären die Folge. Fehlgüsse sind auszusortieren und nicht durch Lötung oder Laserschweißen wiederherzustellen.

Um gleichartige Gerüststärken zu erhalten, werden alle Käppchen an fünf Stellen (mesial, distal, labial, palatinal und incisal) auf eine gleichmäßige Schichtdicke von 0,3 mm kontrolliert und in erforderlichen Fällen reduziert. Die einheitliche Metallstärke ist Voraussetzung für die identischen Kronen nach der Verblendung. Überschüssiges oder fehlendes Metall soll nicht durch verschiedene Schichtstärken der Keramik ausgeglichen werden. Nicht einzuschätzende Schrumpfungen mit Spannungen in der

Keramik wären die Folge [9, 129]. Insbesondere die Ergebnisse des Abschrecktests wären hier betroffen.

Die Verblendung der VOSS- und Abschrecktestkronen erfolgt in der gleichen Art wie auch die Verblendung der SCHWICKERATH-PLÄTTCHEN anhand der Verarbeitungsanleitung für die Verblendkeramik [138].

Zwei Opakerbränden (Wash- und Grundmassebrand) folgen zwei Dentinbrände nach Vorschrift und abschließend der Glanzbrand. Diese Abfolge lässt sich bei der Herstellung der Prüfkörper leicht einhalten, da weniger auf Farb- und Formwirkung der Krone zu achten ist. In der täglichen Praxis hingegen ist es nicht selten, dass zwei Opakerbrände nicht ausreichen, um das grünlich schimmernde Metallgerüst von Nichtedelmetallkronen ausreichend gut abzudecken. Dann mischt der Techniker den Washopaker dickflüssiger an oder nimmt auch mal einen dritten Brand vor.

Die erste Keramiksicht wird im Überschuss aufgetragen, denn die Brennschrumpfung muss einkalkuliert werden. Da diese teilweise unterschiedlich, je nach Keramikverarbeitung und -stärke ausfällt, kann es ungeübten Technikern passieren, dass noch ein dritter Dentinbrand zur Korrektur fehlender Anteile erforderlich wird. Vermehrte Brände erhöhen die Leucitbildung und damit den Wärmeausdehnungskoeffizienten der Keramik. Übermäßige Brände wirken sich auch nachteilig auf die Transparenz und Farbintensität der Dentalkeramik aus, weil die Keramik glasig schmilzt [16, 59, 69].

Spannungen, Sprünge und Abplatzungen können aus dem veränderten Wärmeausdehnungskoeffizienten an der Krone resultieren. Das ist der Fall, wenn der Techniker schon nach der Entnahme aus dem Ofen die defekte Krone erblickt.

Auch die Abkühlphase nach den Keramikbränden hat entscheidenden Einfluss auf die Entstehung von Spätsprüngen in der Keramik [80]. Eine langsame Abkühlung steigert den WAK über die Leucitbildung. Eine gewisse Differenz der Wärmeausdehnungskoeffizienten von Legierung und Keramik ist jedoch für den Haftverbund (Druckspannung) nötig. So muss ein Kompromiss zwischen der Abkühlgeschwindigkeit und dem WAK gefunden werden. Bei Nichtedelmetalllegierungen hat die langsame Abkühlung eine ganz besondere Bedeutung, weil das Metall nur eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt. Die Gefahr von Sprüngen ist sonst schnell gegeben.

Da für VOSS- und Abschrecktest 100 gleiche Kronen hergestellt werden, lässt sich der Fehler der übermäßigen Brandführung vermeiden. Durch die hohe Anzahl der Proben stellt sich eine Routine ein und kein zusätzlicher Brand wird erforderlich.

5.1.2.2 Maßhaltigkeit der Kronen

Auch die folgende Darstellung bezieht sich auf die gemeinsame Anfertigung der VOSS- und der Abschrecktestkronen.

Zunächst erschien es nicht einfach 100 gleichartige Kronen zu schaffen. Die gleiche Verblendung sollte über eine Form aus Silikon erreicht werden. Diese Methode gelang nicht. Die geschichtete ungebrannte Keramik zerfiel teilweise beim Anlegen oder Abnehmen der Form, so dass sich diese Art der Kronenherstellung als unzweckmäßig erwies.

Um dennoch möglichst identische Proben herzustellen, wird das Metallgerüst in oben beschriebener Art kontrolliert und die Verblendschichtstärke ebenso mittels Tasterzirkel geprüft und gegebenenfalls korrigiert. Eine zusätzliche Hilfe ist das mehrfach doublierte Modell, auf dem gearbeitet wird. Durch die Nachbarzähne gibt es eine grobe Orientierung für die incisale, labiale und palatinale Ausdehnung der Keramik. Approximal wird auf die Herstellung der Kontaktpunkte geachtet.

5.1.2.3 Messfehler

Für den VOSS-TEST müssen im Vorfeld Stümpfe hergestellt werden, auf die die Kronen aufzementiert werden und anschließend die Prüfung durchlaufen können.

Man benötigt ein Material, welches gießfähig ist und dennoch eine hohe Festigkeit aufweist. Für die Untersuchung wurde deshalb die Kobalt-Chrom-Modellgusslegierung WIRONIUM PLUS (BEGO, Bremen, Deutschland) mit einer Vickers-Härte (HV 10) von 340 und einem Elastizitätsmodul von 220.000 MPa ausgesucht.

Da die Herstellung der Stümpfe einigen Kraftaufwand beansprucht, werden 10 von ihnen hergestellt. So kann je eine Serie mit 10 Kronen zementiert und getestet werden. Die Metallstümpfe werden demzufolge viermal wieder verwendet und an einigen war bei der letzten Prüfung eine leichte Verbiegung am Schaft festzustellen.

Es muss in Erwägung gezogen werden, dass die maximal möglichen Kräfte, bezogen auf den Querschnitt des Metallschaftes der Stümpfe, von den eingesetzten Kräften an der Prüfmaschine übertroffen wurden. Das Metall hat mit Verbiegung reagiert.

Die Untersuchungen von VOSS zeigen, dass die ungünstigste Belastung, die ein Zahn erfährt, im Winkel von 45° stattfindet [139]. Getestete Kronen, die axial belastet werden, halten höheren Kräften stand. Aus diesem Grund ist die Versuchsanordnung mit der schiefen Ebene gewählt worden. So können die Kräfte gemessen werden, denen die Krone in jedem Fall widersteht.

5.1.3 PÜCHNER-TEST

5.1.3.1 Herstellung der PÜCHNER-STÄBCHEN

Die Herstellung der PÜCHNER-STÄBCHEN erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden die beiden metallischen Enden des Prüfkörpers im labortypischen Gussverfahren mit den gleichen Materialien und Geräten, wie sie auch für die anderen drei Versuche verwendet wurden, hergestellt. Nach der Überarbeitung der Oberfläche werden die Verblendflächen genau auf Lunker kontrolliert. An fünf der einzelnen Enden waren Poren sichtbar, diese wurden aussortiert. Derartige Lunker bergen die Gefahr, dass hier die Keramik keinen optimalen Haftverbund eingehen kann. Ein Verschleifen macht keinen Sinn, weil derartige Lunker meist in der Tiefe aufbrechen. Da die Proben möglichst gleichartig sein sollen und solche Fehler im Vorfeld auch in der Realität zu erkennen und zu eliminieren sind, wird keine Verfälschung von Ergebnissen der Testung vorgenommen.

Das Einbringen der Keramik zwischen die Metallhälften erwies sich als sehr schwierig. Schließlich gelang es beide Teile mit der Keramik zu verbinden. Dazu mussten beide metallischen Hälften des Prüfkörpers separat mit Keramik beschichtet werden, um anschließend direkt in der Form vor dem Brand zusammengeführt zu werden.

Bei dieser Methode kann die ungebrannte Keramik nicht wie vorgesehen durch Riffeln verdichtet werden. Es erfolgt der Einschluss von Luftblasen, die zum Teil an den Frakturflächen bei Auswertung des Testes sichtbar wurden.

Die vorbereitete Form gestattet es den beiden Prüfkörperenden der Brennschrumpfung beim keramischen Brand spannungsarm zu folgen.

5.1.3.2 Prüfkörpergeometrie

Die PÜCHNER-STÄBCHEN erfordern für jeden Probekörper zwei massive metallische Enden. Da diese Endstücke im Gussverfahren hergestellt werden, entstehen auch bei korrekter Verarbeitung Schwindungslunker. Das Gussstück hat einen Durchmesser von 5 mm und ist demnach stärker als der Anstiftgusskanal. Bei der Abkühlung der Schmelze kontrahiert das flüssige Metall an der dicksten Stelle vermehrt und flüssiges Metall kann nicht mehr ausreichend nachgesogen werden. Auch durch richtige Anstifttechnik können derartige Lunker nicht vollständig vermeiden werden. Wenn sich der Lunker inmitten des Metallanteils und nicht an der Oberfläche befindet, ist nicht von einer Veränderung der Testergebnisse auszugehen.

Durch die vorgefertigten Kunststoffröhrchen mit einem Querschnitt 5 mm ist gewährleistet, dass alle Proben eine Haftverbundfläche von 19,6 mm² aufweisen.

Die Ösen für die Aufhängung der Proben in der Prüfmaschine sind gleich anmodelliert worden. Das vereinfacht zwar die Prüfkörperherstellung, birgt aber die Gefahr einer Verkantung während des Versuches.

5.1.3.3 Messfehler

Damit die Proben in der Prüfmaschine nicht verkanten oder zusätzliche Spannungen erfahren, muss eine kardanische Aufhängung gewählt werden. Diese gelenkige Verbindung sichert, dass die Zugkräfte ausschließlich zur Zerstörung des Verbundes zwischen Metall und Keramik aufgewendet werden.

5.1.4 Abschrecktest

5.1.4.1 Herstellung der Kronen

Die Kronen für den Abschrecktest sind aus Gründen der Vergleichbarkeit im Zusammenhang mit den Kronen für den VOSS-TEST hergestellt worden. Von den insgesamt 100 Proben werden 50 Prüfkörper vor Einlagerung in die Lösungen für den entsprechenden Test abgeteilt.

5.1.4.2 Maßhaltigkeit der Kronen

Der Fehler von verschiedenen Abmessungen der Kronen wird auf dieselbe Weise minimiert wie beim VOSS-TEST.

5.1.4.3 Messfehler

Beim Abschrecktest erfolgt keine Kraftmessung. Es werden vielmehr Temperaturdifferenzen, die ein Metall-Keramik-System übersteht, gemessen. Die Versuchsbedingungen sind willkürlich gewählt worden. Der Abbruch des Testes findet bei 165 °C statt. Es bleiben unbeschädigte Kronen. Bei weiterer Temperatursteigerung würden irgendwann alle Prüfkörper Sprünge aufweisen.

Da die Prüfung fortlaufend durchgeführt wird, ist peinlich genau auf die Beibehaltung der Temperatur des Wasserbades zu achten. Dies wird durch die permanente Kontrolle mit einem Thermometer und das regelmäßige Zurückstellen des Becherglases in den Kühlschrank gewährleistet.

Die optische Kontrolle wird unter einem Stereomikroskop durchgeführt, was die Genauigkeit der rein visuellen Beobachtungen erhöht.

5.2 Diskussion der Messwerte

5.2.1 SCHWICKERATH-TEST

In der Drei-Punkt-Biegeprüfung werden Messwerte zwischen 35 MPa und 37 MPa erreicht.

Diese ermittelten Verbundfestigkeiten liegen damit alle insgesamt im mittleren Bereich derer, die in der Literatur angegeben sind. Für verblendete Nichtedelmetalllegierungen werden dort Werte zwischen 27 MPa und 44 MPa genannt [4, 24, 66, 109, 111]. Die kritische Größe von 25 MPa wird dabei sowohl von den eigenen als auch von den Literaturwerten überschritten.

Die Brüche verlaufen durch die Keramik, dicht entlang der Haftverbundzone. Damit wird die hohe Qualität der Verbindung Metall und Keramik belegt. Die Zugfestigkeit der Keramik an der Probenunterseite ist geringer als die Haftverbundfestigkeit. Dieser Bruchlinienverlauf ist das typische Bild für den Test nach DIN EN ISO 9693 [25].

Zu diskutieren bleiben die verschiedenartigen Vorbedingungen in Form von trockener Aufbewahrung, Wasserlagerung und Korrosionslösung.

In den vorliegenden Ergebnissen des SCHWICKERATH-TESTS wird kein Unterschied zwischen den Serien nachgewiesen. Korrosionslösung und Wasser haben keinen Einfluss auf die Haftverbundfestigkeit.

Dieses Endergebnis steht im Gegensatz zu den Aussagen der Untersuchung von DERFERT. Hier konnten bei der gleichen Werkstoffkombination WIROBOND C/VITA OMEGA 900 Wechselwirkungen zwischen Korrosionsmedium und Metall-Keramik-Verbund festgestellt werden [24]. Um den Verbund zu beeinflussen, muss der korrosive Angriff an der Grenzfläche zwischen Metall und Keramik stattfinden. Bei der Verblendung des Gerüsts wird mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit die Verbundzone mit Glas bedeckt sein. Solange diese Deckschicht nicht durch Fräsen, Schleifen oder Polieren entfernt wird, kann dort kein korrosiver Angriff stattfinden.

Es bleibt zu bemerken, dass bei der rasterelektronischen Untersuchung Porositäten im Metall sowie Blasen innerhalb der Verbundzone gefunden wurden [24]. Hier muss eventuell nach Verarbeitungsfehlern gesucht werden.

Der Kobalt-Chrom-Legierung WIROBOND C wird auch bei LINDIGKEIT eine hohe Korrosionsresistenz bescheinigt [80]. In Experimenten von SCHWICKERATH selbst konnte der Nachweis erbracht werden, dass es sehr wohl Nichtelegierungen gibt, die den Angriff von Korrosionslösungen bei einem pH-Wert von „2“ ohne Minderung der Verbundfestigkeit überstanden haben [114].

Der Kombination WIROBOND C/VITA OMEGA 900 als Nichtelegierungsverbindung kann auch vorliegend eine hohe Korrosionsresistenz innerhalb der Metall-Keramik-Verbundzone bestätigt werden.

Es kann also davon ausgegangen werden, dass die hier gewählte Materialkombination korrekt verarbeitet wurde. Diese Feststellung soll auch grundlegende Annahme bei der Diskussion der folgenden Versuche sein.

Bei der statistischen Auswertung der Einzelerien des SCHWICKERATH-TESTS zeigen sich nur geringe Standardabweichungen von 3 MPa bis 6 MPa. Da die Standardabweichung als Maß für die Abweichung der Einzelwerte von der Grundgesamtheit gilt, ist bei der vorliegenden Untersuchung von einer hohen Genauigkeit auszugehen.

5.2.2 VOSS-TEST

Die Spannweite der publizierten VOSS-ähnlichen Versuchsanordnungen reicht von gemessenen 300 N bis 5171 N. Die Autoren verwenden verschiedene Materialien, verschiedene Kronenformen und verschiedene Prüfwinkel und –methoden, was diese weite Streuung erklären soll [32, 39, 61, 62, 71, 74, 86, 97, 117, 119, 133, 140]. Der geringe Wert entstammt einer Prüfung mit Titanverblendkronen. Das Mittel für verblendete Nichtedelmetallfrontzahnkronen liegt ungefähr bei 1200 N. Die eigenen Werte bewegen sich in einem Bereich von 1400 N bis 2836 N und liegen damit im oberen Drittel der erfassten Literaturwerte.

Ein Grund für die erreichten Werte kann zum einen die Kronenform selbst sein. Es werden vollverblendete Kronen für den mittleren Schneidezahn getestet. Die Belastung erfolgt hier auf die gesamte Breite der Schneidekante und nicht nur auf die Spitze des Eckzahnes. Eine größere Fläche erfordert mehr Kraft, um den gleichen Druck auszuüben, womit die hohen Werte zu erklären sind.

Die Werte in den einzelnen Serien zeigen relativ hohe Streuungen zwischen 14 % und 37 %. Als Ursache kommen die nur bedingt einheitlichen Kronen in ihrer geometrischen Gestaltung in Betracht. Durch manuelle Herstellung kann es nie vollkommen gelingen hundertprozentig identische Metall-Keramik-Kronen anzufertigen.

Auch THOLEY und MARX halten fest, dass die Ergebnisse bei dieser Art der Untersuchung immer von Kraftangriffspunkt und Richtung der Kraft bestimmt werden [83, 130]. Durch die leichte Variabilität in der Kronenform können die recht hohen Variationskoeffizienten verursacht werden.

Die Bruchlinien gehen durch alle Schichten. Teilweise verlaufen sie innerhalb der Keramik und erreichen dann die Verbundzone. Hier zeigt sich, dass die Druckfestigkeit der Keramik recht hoch und das nächst schwächere Glied der Haftverbund selbst ist. Ein derartiger Test eignet sich, um Aussagen über den Metall-Keramik-Verbund zu treffen.

Die Einlagerung der Proben in Wasser und den Korrosionsflüssigkeiten verursacht einen leichten Abfall in den gemessenen Kräften, die zur Zerstörung der Verblendung nötig sind. Signifikant ist die Abnahme zwischen der trocken gelagerten Serie und den restlichen Gruppen. Die zehn trockenen Kronen werden als erste auf die Stümpfe aufzementiert und der Prüfung unterzogen. Durch die Wiederverwendung kommt es zu einer leichten Verbiegung der Stümpfe, wie

beschrieben. Damit lassen sich eventuelle Schwankungen der Messergebnisse erklären.

Der SCHWICKERATH-TEST kann keine Veränderung auf die Struktur der Keramik nachweisen. Die Eigenschaften des Verblendmaterials bleiben unberücksichtigt (vgl. 2.2.2.3 Eignung der Verfahren). Die hier vorliegende Testung nach VOSS deutet allerdings auf eine signifikante Abnahme der Druckscherfestigkeit zwischen den in Wasser und den in Korrosionslösung gelagerten Proben hin. Es scheint, als hätte sich durch Lösungsprozesse die Struktur der Keramik in der Natriumchlorid/Milchsäurelösung verändert und mit Verminderung ihrer Druckfestigkeit reagiert. Dieser Zusammenhang sollte durch zahlenmäßig umfangreichere Tests abgeklärt werden, da dentalen Keramiken im allgemeinen hohe Hydrolysefestigkeiten bestätigt werden [58, 59, 73, 84, 106].

5.2.3 PÜCHNER-TEST

Zugversuche für den Haftverbund Metall-Keramik sind in der aktuellen Literatur weniger häufig anzutreffen als Biege- oder Scherprüfungen, was durchaus an der schwierigen Prüfkörperherstellung liegen kann.

In den Veröffentlichungen werden die Zugfestigkeitswerte mit 5 MPa bis 63 MPa angegeben [43, 90, 98, 110]. Im Durchschnitt liegen sie bei 25 MPa bis 30 MPa. PÜCHNER selbst verzeichnet Angaben mit der großen Spannweite 50 – 450 kp/cm², entsprechend 5 – 45 MPa. Die hier erreichten Werte liegen mit 31 MPa bis 33 MPa im angegebenen Bereich und dicht beieinander, was für eine gleichmäßige Prüfkörperherstellung spricht.

Die Brüche verlaufen alle, bis auf drei Ausnahmen, innerhalb der Keramik. Es wird also ersichtlich, dass die Eigenfestigkeit der Keramik weitaus geringer ist als der Keramikverbund an sich. Damit wird auch in Frage gestellt, inwieweit mit einer derartigen Versuchsanordnung überhaupt Aussagen zum Metall-Keramik-Verbund getroffen werden können.

Bei den drei Proben, bei denen die Verbundzone mit Haftoxidresten an der Fraktur beteiligt ist, bleibt zu überlegen, wodurch die Verbindung gestört wird. Die Haftoxide belegen, dass der Bruch durch die Oxidschicht erfolgt. Als Ursache kommen nur die technischen Schwierigkeiten durch die komplizierte Verbindung der Metallenden mit der keramischen Masse in Betracht. Beim Brand kommt es zur Kontraktion der Keramik. Die Stäbchen werden in vorbereiteten Formen gebrannt. Dabei soll die

Keramik spannungsfrei kontrahieren können. Wahrscheinlich ist das nicht in allen Fällen ausreichend möglich.

Innerhalb der Serien zeigen sich große Streumaße. Die Variationskoeffizienten bewegen sich zwischen 21 % und 39 %. Obwohl immer die Keramik frakturiert, ist die Beschaffenheit der Keramik nicht gleichmäßig genug. Dentalkeramiken sind spröde Materialien. Bei spröden Materialien führt eine Zugbelastung schnell zur Überschreitung der Zerreißfestigkeit. Zusätzliche Inhomogenitäten in der Struktur können der Ausgangspunkt für Risse sein.

Durch die Spannungskonzentration in der Nähe der Unregelmäßigkeit erfolgt eine Rissausbreitung. Das unterkritische Risswachstum erklärt ein plötzliches Versagen nach Dauerbelastung von keramischen Restaurationen. Laut FISCHER/MARX kann das feuchtwarme Milieu des Mundes ein Risswachstum fördern [31]. Patienten beschreiben deshalb Keramikfrakturen meist nicht sofort nach Eingliederung des Zahnersatzes, sondern nach einiger Zeit des Tragens der Restauration.

Nach den Vorstellungen des Risswachstums sind Effekte durch Feuchtlagerung zu erwarten.

Die in Korrosionslösung gelagerten Prüfkörper erreichen etwas niedrigere Zerreifestigkeitswerte als die in Wasser gelagerten Proben. Die statistische Auswertung kann jedoch keine Signifikanz nachweisen. Es ist anzunehmen, dass keinerlei Einfluss von Wasser oder Korrosionslösung auf die Zerreißfestigkeit der Keramik ausgeübt wurde.

5.2.4 Abschrecktest

Das 1981 entworfene Verfahren für den Abschrecktest ist mehrmals modifiziert worden und wird inzwischen gern und für viele Materialkombinationen eingesetzt [2, 32, 71, 87, 109, 138]. Metall-Keramik-Verblendkronen aus Edelmetall- und Nichtedelmetalllegierungen, Titan- und Galvanokronen, Vollkeramikronen und Brücken werden mit diesem Test untersucht. Je nach getesteter Kombination ereignen sich die ersten Ausfälle der Kronen bei 105 °C bis bei 165 °C. Bei dem hier vorgestellten Test fallen die ersten Keramikdefekte bei einer Temperatur von 150 °C auf. Das entspricht ungefähr den Versuchsergebnissen von ANUSAVICE, der den Test zum ersten Mal 1981 so veröffentlichte [2].

Die Keramikdefekte sind ausschließlich Sprünge. Abplatzungen gibt es nicht. Soweit es beurteilbar erscheint, ereignen sich die Frakturen innerhalb der Keramik. Inwieweit

die Haftverbundzone beteiligt ist, kann durch diesen Versuch so nicht gesagt werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Sprünge auf die keramische Verblendschicht beschränkt sind. Anderenfalls wären Absprengungen ganzer Keramikscherben sichtbar.

An den Überlebensraten ist zu erkennen, dass Temperaturdifferenzen zwischen 105 °C, 120 °C und 135 °C und dem Abschrecken in 5 °C kaltem Wasser die Kronen nicht verändern. Es gibt keine sichtbaren Defekte. Erst im Bereich von 150 °C kommt es vereinzelt zu Sprüngen an der Verblendung. Da bei 165 °C alle Serien Schäden aufweisen, kann gesagt werden, dass das der kritische Temperaturbereich ist, den diese Dentalkeramik nicht mehr spannungsfrei toleriert. Die Temperaturschranken liegen dabei alle außerhalb des klinisch relevanten Bereiches. Der Test erlaubt daher Aussagen zu technischen Einflüssen auf die Frakturresistenz der Verblendkeramik.

Der Abschrecktest gibt wenig Informationen über die Verbundfestigkeit. Er ist eine Messmethode zur Beurteilung von internen Spannungen. Diese hängen unter anderem von der Modellation (scharfe Kanten) und von den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Verbundpartner ab. Nur bei vergleichsweise schwachen Verbänden erscheint ein Versagen dort möglich.

Durch die feuchte Lagerung der Kronen in Wasser beziehungsweise in Korrosionslösung wird kein Unterschied im Bruchverhalten ersichtlich. Die prozentualen Anteile der „überlebenden Kronen“ aller Serien bewegen sich in Bereichen von 30 % bis 70 %. Die Frakturlinien ergeben keine typischen Bilder. Korrosionsmedium oder Wasser verändern die thermische Resistenz der Metall-Keramik-Kronen nur gering.

Die Auswertung der Überlebensfunktionen über den LOGRANK-TEST ergibt eine signifikante Abhängigkeit zwischen der „drei Monate in Korrosionslösung“ gelagerten Gruppe und der „sechs Monate in Korrosionslösung“ gelagerten Reihe. Hier sollte die geringe Probenzahl und das Vertrauensniveau von 0,05 kritisch betrachtet werden.

5.2.5 Vergleich der Versuche

Der Metall-Keramik-Verbund kommt durch das Zusammenwirken von chemischen, mechanischen und zwischenmolekularen Kräften zustande.

Alle vier Versuche sollen der Untersuchung und Quantifizierung des Haftverbundes zwischen Metall und Keramik bei verblendeten Restaurationen dienen. Dabei ist zu klären, inwieweit Vergleichbarkeit zwischen den Versuchen gegeben ist.

Die Ergebnisse des Drei-Punkt-Biegetestes nach SCHWICKERATH zeigen eine starke Abhängigkeit von der Verarbeitung. Haftoxidstärke oder Gefügestand der Legierung können durch die Verarbeitungstechnologie beeinflusst werden. Dieser Versuch misst vorrangig die Qualität der chemischen Verbindung. Über den SCHWICKERATH-TEST sind sich auch mehrere Autoren einig. Bei diesem Verfahren wird die reine Keramikhaftung zum Metall gemessen [62, 80].

Der Anteil der Van-der-Waals-Kräfte unterstützt den Verbund, da die Kräfte bei der Anfertigung der Plättchen die Benetzbarkeit verbessern. Sie bewirken aber keine Zunahme der Haftfestigkeit beim Verlust der anderen Mechanismen. Die geringste Bedeutung besitzt der Teil der mechanischen Kräfte, wie die Kontraktionskräfte. Bei den SCHWICKERATH-PLÄTTCHEN schrumpft die Keramik in anderer Weise auf das Gerüst als bei einem Kronenkäppchen. Das Käppchen hat eine andere Form als die Metallscheibe.

Der VOSS-TEST ist ein sehr praxisnaher Versuch. Reale Kronen werden in den Test einbezogen. Der Anteil an chemischer Haftung, mechanischen Komponenten (Adhäsion, Kohäsion) sowie die zwischenmolekularen Kräfte werden gleichermaßen geprüft. Verarbeitungsfehler, die den chemischen Verbund verändern, wirken sich im Experiment genauso negativ aus wie in der Realität. Durch den Versuchsaufbau werden die Adhäsionskräfte zwischen Metall und Keramik ebenso wie die Kohäsionsanteile innerhalb der Keramik getestet. Inwieweit die Eigenfestigkeit der Keramik hauptsächlich geprüft wird, kann nicht beantwortet werden.

Der PÜCHNER-TEST ist aufgrund der vorliegend erzielten Frakturbilder sehr kritisch zu bewerten. Der Bruch ereignet sich in aller Regel in der Keramik, meist ohne Beteiligung der Mischzone zwischen Metall und Keramik. Beim PÜCHNER-TEST werden durch Versuchsanordnung, Prüfkörpergeometrie und die Materialeigenschaft der keramischen Masse keine am Metall-Keramik-Haftverbund beteiligten Kräfte gemessen. Bestimmt wird hier primär die Zugfestigkeit der Keramik.

Allerdings lassen sich indirekt Rückschlüsse auf die Verbundfestigkeit ziehen. Diese muss oberhalb der gemessenen Zugfestigkeit der Keramik liegen, da ein Versagen nur in der Keramik beobachtet worden ist.

Über die anteilmäßige Verteilung der Verbundkräfte kann nur spekuliert werden. Aufgrund der axialen Kraftereinwirkung erscheint der Anteil der Retention eher gering zu sein. Die Haftung durch Aufschumpfen scheint ebenfalls von untergeordneter Bedeutung zu sein. Der chemischen Bindung kann hier der überwiegende Teil am Verbund zugeordnet werden.

Die Belastung im Abschrecktest zielt nicht zuerst auf den Metall-Keramik-Verbund an sich ab. Es besteht zwar die Vorstellung, Metall und Keramik werden sich bei Temperaturdifferenzen aufgrund der verschiedenen Materialeigenschaften trennen, die Frage wie hoch diese Temperaturextreme sein müssen, ist aber nicht geklärt.

Die Ergebnisse des Abschrecktests werden durch WAK-Differenzen beeinflusst. Zu stark voneinander abweichende Wärmeausdehnungskoeffizienten produzieren Restspannungen, die sich dann bei thermischer Belastung negativ auswirken. So kann es bei Durchführung eines zusätzlichen keramischen Brandes plötzlich zum Sprung der Keramik kommen.

Bei der Gesamtbetrachtung aller vier Testverfahren unter dem Gesichtspunkt der chemischen Belastung können keine übereinstimmenden Auswirkungen festgestellt werden.

In SCHWICKERATH-, PÜCHNER- und Abschrecktest verändern Wasser und Korrosionslösung die Messwerte nicht. Im VOSS-TEST vermindert die Lagerung in den Lösungen die ermittelten Druckfestigkeitswerte. Diese Differenzen sollten jedoch durch weitere Untersuchungen, wie zuvor erwähnt, erst bekräftigt werden. Denn auch die statistische Analyse der einzelnen Verfahren auf einen gemeinsamen Zusammenhang kann keine Korrelation nachweisen.

5.2.5.1 Vergleich der Kräfte

Der SCHWICKERATH-TEST untersucht die Verbindung der Keramik mit dem Metall unter Biegebeanspruchung. Im Mund tritt Biegebelastung in Form von Zug- und Druckspannung, insbesondere an Brücken und deren Verbindern, auf. Nicht beachtet werden bei der experimentellen Untersuchung die kaufunktionell hinzukommenden extraaxialen Komponenten. An Höckerabhängen oder Palatinalflächen entstehen

nicht unerhebliche Scherkräfte bei Kau- und Artikulationsbewegungen. Diese müssen durch einen andersartigen Versuchsaufbau ermittelt werden.

Durch den VOSS-TEST werden auch die extraaxialen Kräfte auf den Metallkeramikverbund untersucht. Die okklusal einwirkende Kraft zergliedert sich hier in eine axiale Druckkomponente und eine entlang der Metall-Keramik-Grenze wirkende Scherkraft. Da die belastete Fläche nicht eindeutig bestimmt ist, wird die Kraft in Newton angegeben und ist auf dieser Basis nur stark eingeschränkt mit dem SCHWICKERATH-TEST vergleichbar. Es muss nach anderen Vergleichskennzahlen gesucht werden.

Durch die nur bedingt einheitlichen Kronen stellt die Art der Bruchlinie: Fraktur innerhalb der Keramik oder mit Bezug zur Metall-Keramik-Grenzschicht kein verlässliches Unterscheidungsmerkmal dar. Eine Alternative für ein genau definiertes Kriterium ist die Vorgabe einer maximal möglichen Kaukraft in Newton und die konkrete Vorgabe eines „Normstumpfes“, wie ihn VOSS beschreibt [140].

Der PÜCHNER-TEST prüft geometrisch gut festgelegte Proben. Die Angabe einer Verbundfestigkeit in Newton pro Quadratmillimeter oder Megapascal ist möglich. Damit ist eine grundsätzliche Vergleichbarkeit gegeben. Die erzielten Werte entsprechen aber nicht der Zerreißfestigkeit des Metall-Keramik-Verbundes, sondern vielmehr der Zugfestigkeit der Keramik allein. Deshalb erfolgt der Bruch in aller Regel im Zentrum der Keramik. Ursache für die geringe Zugfestigkeit, die unterhalb der Verbundfestigkeit liegt, ist die schon erwähnte Sprödigkeit von Keramiken.

Der Abschrecktest arbeitet nicht mit Angabe einer Kraft. Maßstab sind die Überlebensfunktionen der keramisch verblendeten Kronen nach einer thermischen Belastung. Die Beobachtungen werden an der Temperaturschwelle von 165 °C zensiert, das heißt alle „überlebenden“ Kronen werden notiert. Die Bewertung der Spätsprünge erfolgt zeitlich getrennt davon.

Abschließend lässt sich feststellen, dass einzelne Tests zwar die Angabe einer Festigkeit (Haftfestigkeit, Zugfestigkeit) in Megapascal erlauben, aber dennoch keine direkte Vergleichbarkeit gegeben ist. Jeder Versuch prüft andere Eigenschaften.

Wie mit den Regressionsanalysen gezeigt wurde, korrelieren die Ergebnisse der unterschiedlichen Prüfverfahren nicht miteinander. Dies deckt sich auch mit den zu beobachtbaren Schäden. Keramisch verblendete Metallgerüste können auf vielfältige Art und Weise versagen. Hinter den verschiedenen Versagensarten (Sprünge, Abplatzungen, etc.) stehen unterschiedliche Mechanismen. So muss zwischen der

Verbundfestigkeit und Spannungen, die im Inneren des Metall-Keramik-Systems entstanden sind, unterschieden werden. Letztere werden am ehesten durch den Abschrecktest erfasst. Die anderen Prüfverfahren, die in dieser Arbeit verwendet wurden, beachten mehr den eigentlichen Verbund zwischen Metall und Keramik.

5.2.5.2 Praktikabilität der Versuche

Um die vier verschiedenen Verfahren zu untersuchen, sind für jeden Test 50 Prüfkörper nötig. Die Herstellung und der Versuchsaufbau der vier verschiedenen Verfahren gestalten sich unterschiedlich.

Die Plättchen nach SCHWICKERATH lassen sich einfach anfertigen. Man benötigt relativ wenig Legierung und keramische Masse, so dass sich auch Edelmetalllegierungen ohne übermäßige Kosten prüfen lassen. Ohne viel Aufwand lassen sich sieben bis zehn Plättchen in einer Muffel gießen. Die Verblendung erfolgt über eine Schablone. Dieser Arbeitsschritt geht schnell und garantiert einheitliche, klar geometrisch definierte Prüfkörper.

Für die anschließende Prüfung ist eine Universalprüfmaschine, wie sie in der Materialentwicklung für dentale Werkstoffe in aller Regel vorrätig ist, erforderlich. Mit der entsprechenden Software lässt sich der SCHWICKERATH-TEST einfach und zügig durchführen.

Der VOSS-TEST orientiert sich an naturnahen Kronen. Durch die Herstellung von Einzelkronen hält sich Material- und Werkzeugverschleiß in Grenzen. Und selbst bei ungeübten Personen wird sich aufgrund der Probenzahl, nach der Anfertigung einiger Kronen, Routine beim Arbeiten einstellen. Durch die fehlende Normung jedoch ist die eigentliche Kronenform schwer reproduzierbar. Innerhalb des einzelnen Tests haben die Proben noch eine hohe Gleichartigkeit. Schwierig wird der Vergleich bei Untersuchungen von verschiedenen Personen, verschiedenen Verblendarten (nur labial, circolär) und verschiedenen Zahnformen (Schneidezahn, Eckzahn, Prämolare).

Da die Anfertigung der Prüfkörper in allen Schritten Handarbeit ist, wird auch die Stärke der Verblendschichten, Form und Gestalt der Incisalkante beziehungsweise der Eckzahnschneidekante innerhalb einer Serie immer etwas differieren. Der Kraftangriffspunkt ist so vorher nicht exakt bestimmbar und hohe Streuungen sind die Folge.

Während der Messung unterliegen die Prüfstümpfe einer gewissen Ermüdung (irreversible Verbiegung). Für besser reproduzierbare Ergebnisse wird so die mit erheblichem Aufwand verbundene manuelle Neuanfertigung der Stümpfe nötig.

Der PÜCHNER-TEST erfordert Stäbchen mit kreisrundem Querschnitt. Durch diese Form kann die beteiligte Fläche genau beschrieben werden. Die Prüfkörper sind untereinander identisch. Die Verbindung beider Metallenden ist allerdings problematisch und mit hohem Aufwand verbunden. Im Vorfeld müssen Formen aus feuerfestem Material hergestellt werden.

Trotz gelungener Verbindung zwischen Metall und keramischer Zwischenschicht, besteht die Gefahr von herstellungsbedingten Inhomogenitäten in der Keramik, die erst nach der Prüfung beurteilt werden können.

Die Anordnung der Proben in der Prüfmaschine ist einfach. Durch die gewählte Versuchsanordnung mit der gelenkigen Aufhängung werden Spannungen minimiert.

Der Abschrecktest nutzt die gleiche Kronenform wie auch der VOSS-TEST. In der vorliegenden Untersuchung können so die eingespielten Handlungsabfolgen der Kappchenherstellung und Verblendung zur Rationalisierung genutzt werden. Zusätzlich sind für die mögliche Vergleichbarkeit der Prüfverfahren identische Proben von Vorteil.

Durch die zweckmäßige Prüfkörperherstellung, die sich an der täglichen Laborroutine orientiert, ist die Anfertigung von insgesamt 100 Kronen lediglich mit einigem Zeitaufwand verbunden.

Die Durchführung des Tests ist einfach, erfordert keinen hohen maschinellen Aufwand. Nur ein Keramikofen, ein Kühlschrank und ein Thermometer sind nötig.

5.2.5.3 Realitätsnähe der Versuche

Der SCHWICKERATH-TEST bietet sich für den technischen Einsatz in der Materialforschung an. Mit ihm lassen sich Materialkombinationen wie zum Beispiel eine Verblendkeramik und ihre Legierung prüfen, weil der Test über eine hohe Präzision und Reproduzierbarkeit verfügt.

Da die Ergebnisse von der Verarbeitungstechnologie abhängen, kann der Einfluss verschiedener Vorbehandlungen wie die Oberflächenbehandlung des Gerüsts oder die Beteiligung unterschiedlicher Guss- und Brennbedingungen untersucht werden. Einige Experimente dazu liegen vor [26, 62].

Bei gleichem Verblendmaterial lassen sich gut verschiedene Verbundverfahren vergleichen [83].

Durch die einfache und materialsparende Erzeugung der Proben eignet sich der SCHWICKERATH-TEST auch sehr gut für Edelmetalllegierungen. In vorangegangenen Untersuchungen können dort auch zusätzliche Einflüsse durch Feuchtigkeitseinfluss oder Temperaturbehandlung nachgewiesen werden [114, 134]. Die Realitätsnähe ist offenbar gegeben.

Ungeeignet erscheint der Test aber für moderne Materialien der Zahntechnik, wie etwa die Vollkeramik. Die keramischen Gerüstmaterialien sind spröde Werkstoffe. Bevor es zu einem messbaren Verlust der Verbundfestigkeit zwischen Verblend- und Gerüstkeramik käme, wäre mit einem Bruch der gesamten Konstruktion zu rechnen. Für Keramik ist eine derartige Versuchsanordnung ein Biegetest. Der SCHWICKERATH-TEST berücksichtigt zwar die Eigenschaften des Gerüstmaterials, im Regelfall Metall, nicht jedoch die Charakteristika des Verblendwerkstoffes, denn nur E-Modul und Stärke des Legierungsplättchens finden sich im Koeffizienten k wieder [130].

Für den VOSS-TEST besteht ohne Zweifel Realitätsnähe. Diese wird jedoch durch eine hohe Streuung der Messwerte erkaufft.

Es werden reale Kronen getestet, die unter labortypischen Methoden gefertigt wurden. Die Prüfung erfolgt in einem Winkel, der die natürliche Scherbelastung im Mund nachempfinden soll. Kritisch zu bewerten sind jedoch Kraftangriffspunkt und Kraftangriffswinkel. Hier muss eine Abgrenzung zwischen der Forderung an den Test und der real auftretenden Bissituation gemacht werden. Geprüft wird die Krone an der Incisalkante/Eckzahnspitze. Die Kräfte im Mund wirken jedoch in den meisten Fällen 2 – 6 mm palatinal von der Kaukante entfernt in einem Winkel von ca. 30° [17]. Der VOSS-TEST prüft im 45° -Winkel.

Beim VOSS-TEST ist die Materialforschung nicht auf das Verbundsystem Metall-Keramik beschränkt. Der Test eignet sich genauso für Vollkeramiksysteme, an denen er schon erfolgreich eingesetzt wurde [130].

Der PÜCHNER-TEST kann so nicht als realitätsnah bezeichnet werden. Hier wird auf reine Zugbelastung geprüft. An Zahnersatz treten Zugkräfte nie isoliert auf. Zugspannungen an der basalen Seite von Brückengerüsten werden durch okklusale Druckkräfte hervorgerufen (vgl. 2.2.1 Kräfte).

Beim Vergleich der real auftretenden Temperaturschwankungen im Mund bei Nahrungs- und Flüssigkeitsaufnahme mit den Versuchsbedingungen für den Abschrecktest fällt sofort auf, dass dieser Test nicht dem Nachweis der thermischen Resistenz innerhalb des physiologischen Bereichs dient.

Zweck des Abschrecktests ist es vielmehr, die technischen Fehler, die bei der Herstellung einer Metall-Keramik-Krone entstehen können, aufzudecken. Falsche Brandführung, veränderte Abkühlung, ungleichmäßige Keramikschichtstärke oder gestörte WAK – Differenzen führen zu herstellungsbedingten Spannungen und Sprüngen in der Keramik.

Sofortsprünge zeigen Verarbeitungsfehler an. Diese Informationen helfen dem Techniker bei der Ursachenforschung. Spätsprünge entstehen bei Restspannungen durch Verarbeitungsmängel oder zeigen das mögliche Risswachstum durch Feuchtlagerung an. Sprünge und andere Defekte ereignen sich bei Patienten dann auch nicht sofort.

Der Abschrecktest ist universell einsetzbar. Er eignet sich nicht nur für die Metall-Keramik, sondern ebenso für Vollkeramik oder die Galvanotechnik.

5.2.5.4 Quintessenz der Versuche

Bei der vorliegenden Untersuchung sollen vier Methoden verglichen werden. SCHWICKERATH-, VOSS- und PÜCHNER-TEST sind ihrer Art nach mechanische Testverfahren. Der Abschrecktest zählt zur Gruppe der thermischen Prüfungen. Alle gemeinsam werden Vorbedingungen in Form von chemischer Belastung (Wasser, Korrosionslösung) ausgesetzt. Damit soll der Einfluss der Feuchtlagerung auf alle Proben gleichsam untersucht werden.

Auf den Haftverbund selbst hat keines der Medien eine Auswirkung. Einzig im VOSS-TEST wird eine Abnahme der Stabilität der Keramik deutlich, was im Gegensatz zu den allgemeinen Erwartungen steht und deshalb umfangreichere Tests erfordert.

Die einzelnen Versuche haben unterschiedliche Prüfkörperformen. Verschiedene Kräfte (Druckkräfte, Zugkräfte) kommen zum Einsatz und demzufolge fallen auch die Messergebnisse unterschiedlich aus. Bei den mechanischen Verfahren werden die Ergebnisse zunächst in Newton gemessen. Für den Vergleich können die Werte dann flächenbezogen in eine Festigkeit in Megapascal umgerechnet werden. Beim VOSS-TEST ist die Angriffsfläche nicht bestimmt und deshalb bleibt die Kraftangabe in Newton. Dieser Test entzieht sich dadurch einem Abgleich mit den Ergebnissen

ähnlicher Versuche. Durch die Unterschiedlichkeit der Versuche ist ein Vergleich der Messwerte für den Metall-Keramik-Verbund auch bei THOLEY nur schwer möglich [130].

Neben identischer Prüfkörpergeometrie, gleichartiger Belastung der Proben fordert PÄSSLER für ein geeignetes Werkstoffprüfverfahren auch die rechnerische Auswertbarkeit und die Reproduzierbarkeit des Experiments (vgl. 2.2.2.3 Eignung der Verfahren) [92].

Hierzu kann festgehalten werden, dass es zwar für jeden Test separat auch ein geeignetes statistisches Verfahren gibt, aber die Regressionsanalyse keine Abhängigkeit in den Serien der verschiedenen Tests untereinander nachweisen kann.

Die Reproduzierbarkeit ist sicherlich beim SCHWICKERATH-TEST am ehesten aufgrund der internationalen Normung gegeben. Für den VOSS- und Abschrecktest wäre das unter Vorgabe von Angaben zu Kronenabmessungen, Versuchsanordnung und Mindestanforderungen auch möglich. Der PÜCHNER-TEST scheitert bisher an der komplizierten Probenherstellung.

Die Frage welcher Haftmechanismus überwiegt, kann nicht abschließend beantwortet werden. Sicherlich ist die Antwort nicht zuletzt von den verwendeten Materialien und der Geometrie der Restaurationen abhängig.

Obwohl nicht Gegenstand dieser Arbeit, lässt sich feststellen, dass die Adhäsion für den eigentlichen Verbund eine untergeordnete Rolle spielt. Für die Benetzung der Oberflächen und somit für den primären Kontakt zwischen Gerüst und Verblendkeramik spielt sie jedoch eine alles überragende Rolle. Ohne ein vollständiges Ausfließen und Benetzen der Oberfläche kann kein Verbund erzielt werden.

Der eigentliche Verbund wird durch die chemischen Bindungen, Retention und das Aufschumpfen ausgemacht. Aufgrund der Ergebnisse des PÜCHNER-TESTS scheint der Anteil der chemischen Bindung sehr hoch zu sein.

Neben dem Verbund zwischen Gerüst- und Verblendmaterial wird die Überlebensrate von Restaurationen auch von internen Spannungen beeinflusst. Diese lassen sich mit dem Abschrecktest erfassen. Dies bedeutet, dass auch bei einer sehr hohen Verbundfestigkeit ein Metall-Keramik-System zerstört werden kann. Wenn die inneren Spannungen (durch ungünstige Modellation) zu hoch werden,

kann es zu einem Versagen kommen. Letztendlich müssen die In-vitro-Untersuchungen mit klinischen Studien überprüft werden.

5.3 Klinische Bedeutung

Ein Vergleich der Verfahren gestaltet sich schwierig. Die Methoden eignen sich unterschiedlich gut für die Überprüfung der Metall-Keramik-Systeme. Konkrete Aussagen zum Metall-Keramik-Verbund, auch in Form von Messwerten, lassen sich nur mit dem SCHWICKERATH-TEST und dem VOSS-TEST treffen.

Das Einsatzgebiet des VOSS-TESTS ist nicht so begrenzt wie das des SCHWICKERATH-TESTS. Der VOSS-TEST eignet sich für die große Bandbreite moderner prothetischer Versorgungsformen wie Vollkeramik, Galvanokronen oder Titanverblendkronen, was bereits schon mehrfach erwähnt wurde. Für diese praktikable Vorgehensweise zur Untersuchung des Haftverbundes und der Stabilität fehlt bisher nur noch die Angabe von Mindestanforderungen. Eine Möglichkeit ist die Formulierung einer Kraft, die sich an den Werten für die maximal möglichen Kaukräfte orientiert. Im Frontzahnggebiet wurden in verschiedenen klinischen Untersuchungen Kräfte in Bereichen zwischen 100 N und 300 N gemessen. Sie fallen damit sehr gering aus. Im Seitenzahnggebiet können Belastungen bis zu 550 N, mit Spitzenwerten bis 1000 N, auftreten. Die vorliegende Materialkombination besteht Belastungen auch nach halbjähriger Lagerung in Korrosionslösung von 1400 N. Ein Mindestmaß von 1000 N würde ausreichende Sicherheit gewährleisten. Dieser Wert wird auch von den meisten VOSS-ähnlichen Versuchsanordnungen mit verschiedenen klinisch bewährten Materialien übertroffen (vgl. 5.2.2 VOSS-TEST).

Soll ein Grenzwert formuliert werden, müsste zuvor die Geometrie des Stumpfes und die Art der Verblendung in einer Prüfvorschrift definiert und festgehalten werden. Die einzelnen Schichten des Verblendmaterials müssten ebenfalls präzise beschrieben sein. Dazu muss auch genau erklärt werden, welche Kronenform mit welchen Abmessungen als Prüfkörper dient. Empfohlen werden kann das Design einer Frontzahnkrone, da sich hier die Kraft auf der ganzen Breite der Incisalkante verteilen kann. Bei einer Eckzahnkrone würde die leicht variable Eckzahnspitze zu Ungenauigkeiten beitragen. Die Wahl des Kraftangriffspunktes sollte den klinischen Gegebenheiten angepasst werden und etwa 3 – 4 mm unterhalb der Schneidekante liegen.

PÜCHNER-TEST und Abschrecktest müssen in Bezug auf die Frage nach der Qualität des Haftverbundes Metall-Keramik sehr differenziert betrachtet werden.

Der PÜCHNER-TEST misst die Zugfestigkeit der Keramik. Dieser Test ist keine Methode zur Kontrolle des Metall-Keramik-Haftverbundes. Die Ergebnisse belegen ausschließlich den Zusammenhang, dass die Verbundfestigkeit zwischen Metall-Keramik hier die Zugfestigkeit der Keramik übertrifft. Die Antwort auf die Stärke des Verbundes kann so nur indirekt lauten: der Haftverbund ist stärker als die Eigenfestigkeit der Keramik. Wie stark die Verbindung Metall-Keramik ist, kann mit dem PÜCHNER-TEST nicht quantifiziert werden.

Der Abschrecktest eignet sich weniger für die Anwendung als präklinischer Test, wenn die Bewährung der Materialien im Munde gefragt ist. Die Temperaturdifferenzen haben keine Verbindung zu den real auftretenden Temperaturunterschieden. Er entspricht vielmehr einer technischen Materialprüfung, mit der nach Verarbeitungsfehlern gesucht werden kann. Veränderungen des WAK zeigen sich in den Testergebnissen.

Vor der Einführung eines neuen Materials müssen materialtechnische Prüfungen durchlaufen werden. Das erleichtert dem Hersteller den Erhalt des CE-Prüfsiegels.

Überlebenszeitstudien für Metall-Keramik-Systeme zeigen durchschnittliche Ausfallraten durch Metall-Keramik-Frakturen in Höhe von 3 % innerhalb einer fünfjährigen Beobachtungsdauer (vgl. 2.2.3 Klinische Situation). Dieser Prozentsatz erscheint gering und belegt die guten klinischen Ergebnisse im Gegensatz zu den in den In-vitro-Tests ermittelten Komplikationsraten. Wobei noch zu bemerken ist, dass nicht jede Keramikfraktur sofort zum Austausch der Krone oder Brücke führt.

Prüfverfahren können daher keine genauen klinischen Prognosen abgeben. Sie sind jedoch für präklinische Materialvergleiche geeignet. Dann können bewährte Materialien mit neuen verglichen werden und im Anschluss daran kann eine Empfehlung für den klinischen Einsatz ausgesprochen werden. Eine Formulierung von Mindestanforderungen soll deshalb immer angestrebt werden. Mit einer Aufnahme ist in den Normen dann auch eine Vergleichbarkeit gegeben.