

5 Diskussion

5.1 Versuche zu DIN 13 914

5.1.1 Einfluß von Fehlern bei der Prüfkörperherstellung und Biegeprüfung

5.1.1.1 Einfluß des Verbundflächenwinkels auf Biegefestigkeit und Bruchverlauf

In der DIN 13 914 wird gefordert, daß die Verbundfläche rechtwinklig zur Längsachse des Prüfkörpers liegen soll (gemeint ist querschnittsparallel, d. h. mit einem Winkel von 0° zum Querschnitt). Toleranzen werden nicht angegeben. Bei der Herstellung der Prüfkörper kommt es jedoch, bedingt durch ungenaues Einbringen der Zähne in den Kunststoffteig oder durch Verpressen, zu mehr oder weniger großen Winkeln zwischen der Verbundfläche und dem Prüfkörperquerschnitt, die sich auch beim Beschleifen der 10 mm x 10 mm x 25 mm großen Rohlinge auf das Sollmaß von 4 mm x 4 mm x 15 mm in den meisten Fällen nicht vollständig korrigieren lassen, so daß die Ausbeute an Prüfkörpern mit dem Idealwinkel von 0° sehr gering ist.

Der Winkel zwischen Verbundfläche und Querschnitt entspricht dem Prinzip der Schäftung, das aus der Fügetechnik bekannt ist und dort zur Steigerung der Verbundfestigkeit bewußt eingesetzt wird [49]. Durch Schäftung wird erstens eine Vergrößerung der Verbundfläche erreicht, zweitens wird die Verbundfläche eher mit günstigeren Scherkräften, als mit Zugkräften belastet, drittens wird erreicht, daß Kräfte nicht in der Ebene der Verbundfläche einwirken, sondern in einem möglichst großen Winkel auf die Verbundfläche treffen, wodurch adhäsive Brüche vermieden werden.

Entsprechend wurde bei zunehmenden Winkeln eine positive Verfälschung der Meßwerte erwartet. So stellte sich die Frage, welchen Einfluß die Größe des Winkels auf die Verbundfestigkeitsmessung hat und auf die Häufigkeit von Brüchen mit adhäsivem Anteil, die hier als Maß der Validität angenommen wird.

Daher wurden auch Prüfkörper mit sehr großen Winkeln nicht verworfen, sondern der Biegeprüfung zugeführt.

Dabei wurden die Prüfkörper nach der Größe ihrer Verbundflächenwinkel drei etwa gleich großen Gruppen zugeordnet, die sich bei 3° und 10° voneinander abgrenzen. Der Grenzwinkel von 3° wurde gewählt, weil bei diesem Winkel die Verbundfläche mit dem bloßen Auge als schräg stehend erkannt wird. Ab einem Winkel von 10° wurden deutliche Verfälschungen der Meßwerte erwartet. Die drei Gruppen mit Winkeln von 0° bis 3° , 3° bis 10° und 10° bis 42° zeigten im U-Test nach MANN-WHITNEY jedoch keine signifikanten Unterschiede der Biegefestigkeit.

Daß sich in der hier durchgeführten Untersuchung der Verbundflächenwinkel nicht stärker durch höhere Festigkeitswerte bemerkbar macht, ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß die mittlere Festigkeit der verwendeten Einzelkomponenten der Festigkeit des Verbundes relativ ähnlich ist. Bei Verbundsystemen, in denen die Festigkeit des Verbundes deutlich schwächer ist, als die Festigkeit der Einzelkomponenten, muß bei größeren Verbundflächenwinkeln mit einer positiven Verfälschung der Meßwerte gerechnet werden.

Auch geht mit größeren Verbundflächenwinkeln eine zunehmend kohäsive Bruchcharakteristik einher, d. h.: je größer der Verbundflächenwinkel, desto weniger folgt der Bruch der Verbundfläche. Gemessen wird in diesen Fällen eher die Festigkeit der Einzelkomponenten als die Festigkeit des Verbundes, die eigentlich gemessen werden soll, was eine Abnahme der Validität bedeutet (siehe 5.3).

Die Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 muß also, hinsichtlich der Lage der Verbundfläche im Prüfkörper, als relativ fehleranfällig bezeichnet werden.

5.1.1.2 Einfluß von Positionierungsfehlern auf die Biegefestigkeit

Nach DIN 13 914 sollen die Prüfkörper bei der Biegeprüfung so ausgerichtet werden, daß die Verbundfläche mittig von der Druckfinne belastet wird. Die exakt mittige Ausrichtung ist jedoch in der Praxis kaum möglich.

Bei Vorversuchen traten, beim Versuch, die Prüfkörper zentrisch zu positionieren, mittlere Positionierungsfehler $< 0,15$ mm und maximale Fehler $< 0,3$ mm auf. Um den Einfluß dieser Ungenauigkeiten auf die Biegefestigkeit zu untersuchen, wurden Prüfkörper nach vorheriger zentrischer Positionierung mit Hilfe einer Stellschraube bewußt um 0,5 mm exzentrisch verschoben. Dieses Maß wird ohne Hilfsmittel vom intakten Auge als deutlich exzentrisch wahrgenommen.

Bei Prüfkörpern, die mit normalvernetzten Kunststoffzähnen hergestellt wurden, bewirkte eine Verschiebung des Kraftangriffspunktes um 0,5 mm in Richtung des Zahnanteils des Prüfkörpers keine signifikante Änderung der Biegefestigkeit. Bei einer Verschiebung in Richtung des Kunststoffanteils jedoch erhöhte sich die Biegefestigkeit signifikant ($\alpha = 0,01$).

Bei Prüfkörpern, die mit hochvernetzten Kunststoffzähnen hergestellt wurden, bewirkte eine Verschiebung um 0,5 mm weder in die Zahn- noch in die Kunststoffrichtung eine signifikante Veränderung der Biegefestigkeit gegenüber der zentrisch belasteten Vergleichsgruppe.

Die Untersuchungen mit normalvernetzten Kunststoffzähnen zeigen, daß bereits eine Ungenauigkeit von 0,5 mm bei der Positionierung dazu führen kann, daß neben der Festigkeit des Verbundes die Festigkeit des benachbarten Kunststoffes gemessen wird, was zu einer Verfälschung der Messwerte und Abnahme der Validität führt. In dieser Hinsicht ist also der Biegeversuch nach DIN 13 914 relativ fehleranfällig. Daher ist besondere Sorgfalt bei der zentrischen Ausrichtung der Prüfkörper unter der Druckfinne erforderlich.

5.1.2 Reproduzierbarkeit anhand des Einflusses von in der DIN 13 914 nicht oder schlecht definierten Parametern bei der Prüfkörperherstellung

Zusammenfassend läßt sich aufgrund der durchgeführten Untersuchung für die Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 sagen, daß keine Abhängigkeit der Prüfergebnisse von den Parametern erkennbar ist, die in dieser Prüfnorm nicht oder schlecht definiert sind. Dies deutet auf eine gute Reproduzierbarkeit der Prüfmethode hin. Die Ergebnisse zu den einzelnen Prüfparametern werden im folgenden diskutiert.

5.1.2.1 Einfluß des Prüfkörperquerschnitts auf Biegefestigkeit und Bruchverlauf

Nach der DIN 13 914 sollen die Prüfkörper einen Querschnitt und damit eine Verbundfläche von etwa 4 mm x 4 mm haben. Toleranzen sind nicht definiert. Beim Freihandschleifen der Prüfkörper treten auch bei sorgfältiger Arbeitsweise zum Teil erhebliche Untermaße auf. Um festzustellen, ob der Querschnitt der Prüfkörper die Biegefestigkeit beeinflusst, wurden auch Prüfkörper mit unbeabsichtigt entstandenen, sehr kleinen Querschnitten nicht verworfen, sondern in den Biegeversuch einbezogen. Zusätzlich wurden Prüfkörper mit Übermaßen hergestellt. Die drei Prüfkörpergruppen mit starkem Untermaß, ungefähigem Sollmaß und starkem Übermaß zeigten keine signifikanten Unterschiede der Biegefestigkeit. Die Biegefestigkeit ist in den betrachteten Grenzen vom Querschnitt des Prüfkörpers quasi unabhängig. Dasselbe gilt für die Häufigkeit von Brüchen mit adhäsivem Anteil als Maß der Validität.

Die Einhaltung des in der DIN 13 914 geforderten Prüfkörperquerschnitts verdient daher nur niedrige Priorität. Wichtiger erscheint es, beim ohnehin technisch schwierigen Beschleifen der Prüfkörper, die Aufmerksamkeit auf Planparallelität der Längsflächen und Rechtwinkligkeit des Querschnitts zu richten, da Abweichungen hiervon in ihrem Einfluß auf die Biegefestigkeit kaum abschätzbar sind.

5.1.2.2 Einfluß der Abtragsmenge auf die Biegefestigkeit

In der DIN 13 914 wird gefordert, daß die Zahnbasis mit einem Hartmetallfräser aufgeraut werden soll. Diese Maßnahme ist aus zwei Gründen sinnvoll. Zum einen erfolgt das Beschleifen der Zahnbasen bei der Prothesenherstellung im Labor schon aus Gründen der Anpassung der Kunststoffzähne regelmäßig. Zum anderen können bei der Herstellung geschichteter Zähne dünne Lagen besonders stark vernetzten Materials auch an die Basis gelangen und so die Verbundfestigkeit herabsetzen. Vom Hersteller der hier verwendeten normalvernetzten Zähne wird das Beschleifen der Zahnbasen aus eben diesem Grund ausdrücklich empfohlen.

Die DIN 13 914 beschreibt jedoch nicht, wieviel Material beim Aufrauen abgetragen werden soll bzw. darf. Wird nur wenig Material abgetragen, so behält die Zahnbasis ihre Krümmung, was die Bestimmung der flächenbezogenen Größe "Biegefestigkeit" erschwert. In diesem Fall muß mit großem Aufwand die reale Größe der gekrümmten Oberfläche bestimmt werden, oder man nimmt die Ungenauigkeiten in Kauf, die dadurch entstehen, daß man die ermittelte Bruchkraft auf den ebenen Prüfkörperquerschnitt bezieht, und damit die durch die Krümmung entstehende Oberflächenvergrößerung vernachlässigt. Es scheint daher genauer und einfacher zu sein, gerade so viel Material abzutragen, daß die Zahnbasis eingeebnet wird. Für das normalvernetzte Zahnfabrikat konnte gezeigt werden, daß sich Zähne mit eingeebneter Basis in ihrer Verbundfestigkeit nicht signifikant von solchen unterscheiden, deren Basis lediglich angeraut wurde, bzw. gänzlich unbehandelt blieb ($\alpha = 0,05$).

5.1.2.3 Einfluß des Fräsers auf die Biegefestigkeit

Auch die Art der zum Anrauen der Zahnbasis zu verwendenden Hartmetallfräser ist in der DIN 13 914 nicht spezifiziert. Die Vermutung lag nahe, daß Fräser mit unterschiedlicher Größe und Anzahl von Schneiden auch unterschiedliche Grade von mikroretentiv wirksamer Rauigkeit, Gefügauflockerung und Oberflächenvergrößerung produzieren und damit auch unterschiedliche Biegefestigkeiten bewirken. Die Untersuchung an Prüfkörpern mit normalvernetzten

Kunststoffzähnen, deren Basis mit Fräsern unterschiedlich feiner Struktur aufgeraut und zum Teil anschließend glatt poliert wurden, ergab keine signifikanten Unterschiede der Biegefestigkeit zwischen diesen Gruppen ($\alpha = 0,05$). Ob die Art des Aufrauhs auch bei verbundschwächeren Kunststoffzähnen ohne Einfluß ist, bleibt offen. Es erscheint daher sinnvoll, die Art des zu verwendenden Schleifmittels eindeutig festzulegen. Sofern die genaue Spezifikation von Fräsern aufgrund fehlender Standardisierung Schwierigkeiten bereitet, bietet sich die Festlegung von Schleifpapier definierter Körnung an.

5.1.3 Validität anhand der Häufigkeit von Brüchen mit adhäsivem Anteil

Obwohl in der DIN 13 914 nicht vorgesehen, wurde auch hier die Art der Bruchverläufe erfaßt.

Im Biegeversuch nach DIN 13 914 brachen 69% der Prüfkörper mit Verbundflächenwinkeln $< 3^\circ$ mit adhäsivem Anteil, d.h. mit Beteiligung der Verbundfläche (siehe Abb. 29), während 31% rein kohäsiv brachen, also ohne Beteiligung der Verbundfläche.

Der relativ hohe Anteil adhäsiver Brüche kann als Ausdruck einer hohen Validität der Prüfmethode nach DIN 13 914 angesehen werden. Grundsätzlich muß jedoch auch die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, daß der hohe Anteil adhäsiver Brüche dadurch zustande kommt, daß bei den hier verwendeten Materialien die Festigkeit des Verbundes schwach ist in Relation zur Festigkeit der Einzelkomponenten des Verbundsystems.

5.1.4 Unterscheidungsvermögen anhand der Diskrimination unterschiedlicher Zahnfabrikate

Das in der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 vorgesehene Prüfkriterium ist die Biegefestigkeit. Bei der Beurteilung der Verbundfestigkeit nach diesem Kriterium zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen normalvernetzten und hochvernetzten Zähnen. Dies steht im Widerspruch zum Ergebnis der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336.

5.2 Versuche zu DIN EN ISO 3336

5.2.1 Einfluß von Fehlern bei der Prüfkörperherstellung und Biegeprüfung

Die Fehleranfälligkeit der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 ist quantitativ kaum zu erfassen und wurde hier nicht weiter untersucht.

Auf folgende Fehlerquellen sei hier jedoch hingewiesen:

Da bei der Montage der Kunststoffzähne an der Einbetthilfe Wachs verwendet wird, können durch ungenügendes Ausbrühen Wachsreste auf den Verbundflächen zurückbleiben, was allgemein als einer der häufigsten Gründe für adhäsives Versagen angesehen wird. Bei der Durchführung von Verbundfestigkeitsprüfungen offenbart sich ein solcher Verfahrensfehler nicht durch niedrige Bruchkräfte, da diese, gemäß den Prüfvorschriften, nicht gemessen werden.

Als methodischer Fehler ist die Abhängigkeit des Prüfergebnisses von der Festigkeit des Zahnes und des Kunststoffes zu nennen.

5.2.2 Reproduzierbarkeit anhand des Einflusses von in der DIN EN ISO 3336 nicht oder schlecht definierten Parametern bei der Prüfkörperherstellung

Der Einfluß von Unsicherheitskomponenten kann durch Überlegung beurteilt werden. Meßabweichungen aufgrund der Standardunsicherheit durch Untersuchungseinfluß (Appraiser Variation) können erheblich sein [19]. Wie weit und in welcher Position die Kunststoffzähne bei der Prüfkörperherstellung vom Prothesenkunststoff gefaßt werden sollen, ist in der DIN EN ISO 3336 nur ungefähr beschrieben und so der Gestaltung des Untersuchers überlassen. Insofern beeinflusst dieser in weiten Grenzen die Größe der Verbundfläche, den Kraftangriffspunkt und den Winkel bezüglich des Kraftvektors, auch variieren diese Parameter mit der Zahnform und -größe. Da das Prüfergebnis wesentlich von diesen ungenügend definierten Prüfparametern abhängt, ist die Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 schlecht reproduzierbar.

5.2.3 Validität anhand der Häufigkeit von Brüchen mit adhäsivem Anteil

Bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 brachen nur 19% der Prüfkörper mit Beteiligung der Verbundfläche (siehe Abb. 29). Die restlichen 81% brachen rein kohäsiv nur durch den Zahn.

Dieses Ergebnis stimmt überein mit den Untersuchungen von POLYZOIS und DAHL, die bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 von sechs Frontzahngarnituren verschiedener Hersteller keine adhäsiven, 30% Brüche mit adhäsiver Beteiligung und 70% rein kohäsive Brüche im Zahn verzeichneten [45].

Die relativ geringe Anteil adhäsiver Brüche kann als Ausdruck einer geringen Validität der Prüfmethode nach DIN EN ISO 3336 angesehen werden oder bedeuten, daß der Verbund stark ist in Relation zu den Einzelkomponenten des Verbundsystems.

5.2.4 Unterscheidungsvermögen anhand der Diskrimination unterschiedlicher Zahnfabrikate

Das in der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 vorgesehene Prüfkriterium ist der Bruchverlauf. Bei der Beurteilung der Verbundfestigkeit nach diesem Kriterium zeigten sich keine Unterschiede zwischen normalvernetzten und hochvernetzten Zähnen. Dies steht im Widerspruch zum Ergebnis der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914.

Die bei der DIN EN ISO 3336 zusätzlich ermittelten Bruchkräfte waren, wie die Biegefestigkeiten bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914, bei den normalvernetzten Zähnen signifikant höher, als bei den hochvernetzten.

5.2.5 Inkonsistente Meßergebnisse

Obwohl dies nicht in der DIN EN ISO 3336 vorgesehen ist, wurden bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach dieser Norm im Rahmen dieser Untersuchung neben dem Bruchverlauf auch die Bruchkräfte ermittelt. Dabei zeigten mittlere Incisivi und Canini, deren Schneidekanten stärker dimensioniert sind als die der

seitlichen Incisivien, signifikant höhere Bruchkräfte, sowie einen erheblich größeren Anteil von Brüchen mit adhäsiver Beteiligung.

Adhäsives Versagen jedoch zeigt nach DIN EN ISO 3336 einen unzureichenden Verbund an. Aufgrund des Bruchverlaufs, des eigentlichen Prüfkriteriums der DIN EN ISO 3336, erscheinen also gerade die Prüfkörper mit mittleren Incisivi und Canini schwächer, da sie aufgrund des stärkeren Querschnitts ihrer Schneidekanten, an denen ja die Prüfkraft angreift, häufiger mit adhäsiver Beteiligung brechen, als die seitlichen Incisivi, bei denen, bis auf eine Ausnahme, der Bruch stets im Bereich der schwach dimensionierten Schneidekante erfolgte.

Aus diesem Ergebnis läßt sich ableiten, daß alle Kunststoffzähne, deren Schneidekante schwach genug dimensioniert ist oder die eine hinreichend geringe Eigenfestigkeit aufweisen, eben aufgrund dieser Eigenschaften regelmäßig die Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 bestehen, da der Bruch mit großer Wahrscheinlichkeit kohäsiv innerhalb des Zahnes stattfindet und dadurch rein adhäsive Brüche, die nach DIN EN ISO 3336 mangelhafte Verbundfestigkeit anzeigen, ausgeschlossen sind.

Die Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 beinhaltet also einen methodischen Fehler, da sie die Verbundfestigkeit lediglich in Relation zur Festigkeit der Schneidekante des Zahnes bemißt, wobei letztere allerdings unbekannt bleibt, da die Festigkeitsprüfung des Zahnes selbst nicht Bestandteil dieser Prüfmethode ist.

5.3 Vergleich der Validität der Verbundfestigkeitsprüfungen nach DIN 13 914 und DIN EN ISO 3336 anhand der Häufigkeit von Brüchen mit adhäsivem Anteil

Die Eigenschaft einer Prüfmethode, genau das zu messen, was sie messen soll, wird als Validität bezeichnet. Grundsätzlich muß davon ausgegangen werden, daß sich nur bei Brüchen mit Beteiligung der Verbundfläche (adhäsive Brüche oder Brüchen mit adhäsivem Anteil) die Verbundfestigkeit im Meßergebnis niederschlägt. Bei Brüchen ohne Beteiligung der Verbundfläche

(rein kohäsive Brüche) hingegen wird nicht die Verbundfestigkeit gemessen, sondern lediglich die Festigkeit des Zahnes oder des Kunststoffes.

Bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 brachen 69% der Prüfkörper mit Verbundflächenwinkeln $< 3^\circ$ mit adhäsiver Beteiligung. Auch die rein kohäsiven Brüche verliefen zumindest in der Nähe der Verbundfläche.

Bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 hingegen traten nur in 19% der Fälle Brüche mit adhäsiver Beteiligung auf. Die rein kohäsiven Brüche verliefen weitab von der Verbundfläche im Bereich der Schneidekante.

Dieses Ergebnis kann zunächst sowohl auf die Validitätseigenschaften der untersuchten Prüfmethode, als auch auf die Festigkeitseigenschaften der untersuchten Verbundsysteme zurückgeführt werden.

Bezogen auf die Prüfmethode deutet der größere Anteil adhäsiver Brüche bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 auf die überlegene Validität dieser Methode.

Bezogen auf die Festigkeitseigenschaften der Verbundsysteme deutet der unterschiedliche Anteil adhäsiver Brüche darauf hin, daß bei den nach DIN 13 914 geprüften Prüfkörpern die Festigkeit des Verbundes in Relation zur Festigkeit der Einzelkomponenten des Verbundsystems deutlich schwächer ist, als bei den nach DIN EN ISO 3336 geprüften Prüfkörpern.

Nun konnte aber im Rahmen dieser Untersuchung gezeigt werden, daß weder die geringfügig unterschiedlichen Polymerisationsmodi noch die unterschiedliche Oberflächenbehandlung der Zahnbasen einen signifikanten Einfluß auf die Biegefestigkeit haben. Daher muß davon ausgegangen werden, daß die Festigkeit des Verbundes in Relation zur Festigkeit der Einzelkomponenten des Verbundsystems sich für die nach DIN 13 914 und DIN EN ISO 3336 hergestellten Prüfkörper nicht unterscheidet.

Wenn sich aber der deutliche Unterschied des Anteils adhäsiver Brüche nicht auf die Festigkeitseigenschaften der Prüfkörper zurückführen läßt, kann nur die Schlußfolgerung richtig sein, daß der größere Anteil adhäsiver Brüche bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 aufgrund der höheren Validität dieser Prüfmethode zustande kommt.

Allgemein läßt sich sagen, daß man eine hohe Validität bei Verbundfestigkeitsprüfungen dadurch erreicht, daß man den Bruch mittels einer dazu geeigneten Versuchsanordnung im Bereich der zu prüfenden Verbundfläche determiniert. Dazu ist es erforderlich, daß die bei Belastung im Prüfkörper erzeugte Spannung im Bereich der Verbundfläche am höchsten ist.

Bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 wird dies durch die Positionierung der Druckfinne und die Kraffteinleitung in der Ebene der Verbundfläche erreicht.

Die Ursache der geringen Validität der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 ist darin zu sehen, daß diese Prüfmethode den Kraftangriff an der schwächsten Stelle des Zahnes, nämlich an der Schneidekante vorschreibt. Dadurch wird der Bruch an eben dieser Stelle determiniert. Die Schneidekante erhält auf diese Weise ungewollt die Funktion einer Sollbruchstelle, weitab von der eigentlich zu untersuchenden Verbundfläche.

5.4 Vergleich des Unterscheidungsvermögens der Verbundfestigkeitsprüfungen nach DIN 13 914 und DIN EN ISO 3336 anhand der Diskrimination unterschiedlicher Zahnfabrikate

Bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 zeigt sich anhand des vorgesehenen Prüfkriteriums (Biegefestigkeit) ein signifikanter Unterschied zwischen normalvernetzten und hochvernetzten Zähnen.

Bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 zeigt sich anhand des vorgesehenen Prüfkriteriums (Bruchverlauf) kein Unterschied zwischen normalvernetzten und hochvernetzten Zähnen.

Da sich, wie in 5.3 bereits dargelegt, allein aus der unterschiedlichen Herstellungsweise und Form der Prüfkörper keine unterschiedlichen Festigkeiten des Verbundes ergeben, die Verbundfestigkeit für beide Arten von Prüfkörpern also als gleich anzusehen ist, stehen die Ergebnisse der beiden Prüfmethoden im Widerspruch.

Aufgrund der widersprüchlichen Ergebnisse der beiden Prüfmethoden müssen zwei Möglichkeiten in Betracht gezogen werden.

Entweder besteht zwischen Prüfkörpern mit normal- und hochvernetzten Zähnen ein tatsächlicher Unterschied der Verbundfestigkeiten, der bei der Prüfmethode nach DIN 13 914, nicht jedoch bei der Prüfmethode nach DIN EN ISO 3336 sichtbar wird, oder es besteht kein tatsächlicher Unterschied der Verbundfestigkeiten, was durch die Prüfmethode nach DIN EN ISO 3336 adäquat abgebildet wird, während die Prüfmethode nach DIN 13 914 fälschlicherweise einen Unterschied anzeigt.

Es sprechen jedoch mehrere gute Gründe für die Annahme, daß die Prüfmethode nach DIN 13 914, nicht aber die Prüfmethode nach DIN EN ISO 3336 den Sachverhalt richtig abbildet.

Zum einen ließen sich bei der Prüfmethode nach DIN 13 914 die unterschiedlichen Ergebnisse kaum erklären, falls man unterstellen würde, daß sie nicht durch tatsächliche Unterschiede der Verbundfestigkeit zustande kommen. Ein zufälliges Zustandekommen dieser Unterschiede ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1 Promille auszuschließen.

Weiterhin zeigten sich die Ergebnisse der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 beim Heranziehen eines weiteren Prüfkriteriums inkonsistent (siehe 5.2.5). Die bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 zusätzlich ermittelten Bruchkräfte waren, ebenso wie die Biegefestigkeiten bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914, bei den Prüfkörpern mit normalvernetzten Zähnen signifikant höher, als bei den Prüfkörpern mit hochvernetzten Zähnen. Die naheliegende Folgerung, daß allein aufgrund des gleichsinnigen Ergebnisses der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 die Aussage der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 schon bestätigt sei, ist allerdings nicht zulässig, da die höheren Bruchkräfte der Prüfkörper mit normalvernetzten Zähnen bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 wegen der überwiegend kohäsiven Bruchlokalisierung im Bereich der Schneidekante lediglich Ausdruck der unterschiedlichen Eigenfestigkeit der Kunststoffzähne ist. Hier ist lediglich festzustellen, daß die Prüfmethode nach DIN EN ISO 3336 bei der Auswertung nach zwei Kriterien, nämlich nach dem vorgesehenen Kriterium Bruchverlauf und dem nicht vorgesehenen Kriterium Bruchkraft, zu widersprüchlichen Ergebnissen kommt.

Schließlich sind die Ergebnisse der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 aufgrund der oben beschriebenen höheren Validität als vertrauenswürdiger einzuschätzen. Dadurch, daß die Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 den Verbund stets nur in Relation zur Festigkeit der Schneidekante des Zahnes ermittelt, diese aber bei beiden hier untersuchten Zahnsorten schwächer war als der Verbund, konnte die Prüfmethode nach DIN EN ISO 3336 die unterschiedlichen Verbundqualitäten der beiden Zahnsorten nicht anzeigen. Es muß daher angenommen werden, daß der Unterschied der Verbundfestigkeiten, der bei der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 gefunden wurde, tatsächlich besteht.

Bei der Prüfmethode nach DIN EN ISO 3336 werden die tatsächlich vorhandenen unterschiedlichen Verbundfestigkeiten des normalvernetzten Kunststoffzahnes (NV) und des hochvernetzten Kunststoffzahnes (HV) nicht abgebildet. Darin, daß dieser Unterschied anhand des vorgesehenen Prüfkriteriums nicht sichtbar wird, zeigt sich das schlechte Unterscheidungsvermögen der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336.

Bei der Prüfmethode nach DIN 13 914 werden die tatsächlich vorhandenen unterschiedlichen Verbundfestigkeiten des normalvernetzten Kunststoffzahnes (NV) und des hochvernetzten Kunststoffzahnes (HV) deutlich abgebildet.

Darin, daß dieser Unterschied sichtbar wird, zeigt sich das gute Unterscheidungsvermögen der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914.

Dies bestätigt die Auffassung von KAWARA et al., nach der die Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 der Verbundfestigkeitsprüfung nach BS 3990 (entspricht DIN EN ISO 3336) aufgrund ihres besseren Unterscheidungsvermögens überlegen ist.

Schließlich erlaubt die höhere Qualität der aus der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 gewonnenen verhältnisskalierten Daten aussagekräftigere statistische Prüfverfahren gegenüber den qualitativ klassifizierten Daten aus der Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336. Prüfmethoden mit Ergebnissen, die lediglich die Qualitäten „gut“ und „schlecht“ unterscheiden, sollten möglichst vermieden werden, da sie nur wenig Information liefern [34].

5.5 Methodenkritik

5.5.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Vorschubgeschwindigkeit

Die Belastungsgeschwindigkeiten sind nach DIN 13 914 festgelegt auf $1 \text{ mm min}^{-1} \pm 0,2 \text{ mm min}^{-1}$, nach DIN EN ISO 3336 auf $0,5 \text{ mm min}^{-1}$ bis 10 mm min^{-1} . Damit liegen sie erheblich niedriger, als die Belastungsgeschwindigkeiten beim Kauvorgang. Grundsätzlich wäre es wünschenswert, die Belastungssituation in vivo durch eine höhere Belastungsgeschwindigkeit vor allem in quantitativen Verbundfestigkeitsprüfungen (wie DIN 13 914) besser nachzustellen, da sie erheblichen Einfluß auf das Prüfergebnis haben kann (siehe 2.2.6.9) [41]. Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu anderen Untersuchungen sowie innerhalb dieser Untersuchung wurde für beide Normversuche ein Vorschub von 1 mm min^{-1} gewählt, obwohl die Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN EN ISO 3336 höhere Belastungsgeschwindigkeiten zuläßt.

Methodische Meßfehler

Die realen Biegefestigkeiten bei der Verbundfestigkeit nach DIN 13 914 liegen etwas höher, als die gemessenen. Da die Druckfinne der Prüfvorrichtung nicht mechanisch mit dem Druckstempel der Prüfmaschine verbunden ist, bleibt ihre Masse (90,3 g) bei der Kalibrierung unberücksichtigt. Auf diese Weise werden die Prüfkörper zusätzlich zu der Kraft, die von der Prüfmaschine erzeugt und von der Meßdose erfaßt wird, mit der Gewichtskraft der Druckfinne belastet. Bei der verwendeten Prüfvorrichtung beträgt diese zusätzliche Kraft 0,9 N. Der so verursachte Meßfehler betrug in dieser Untersuchung im Mittel 0,2% und maximal 1,6%. Da davon auszugehen ist, daß die Gewichtskraft der Druckfinne üblicherweise nicht in das Prüfungsergebnis einfließt, wurde sie auch hier nicht berücksichtigt.

Beurteilbarkeit des Bruchverlaufs

Die Beurteilung des Bruchverlaufs ist schwierig, da dünne Schichten des recht transparenten Prothesenkunststoffes, die auf solidem Material des Kunststoffzahnes aufliegen, weder mit dem bloßen Auge noch mit der Lupe sicher erkannt werden. Dies gilt, trotz der größeren Opazität des Zahnmaterials, in ähnlicher Weise für den umgekehrten Fall.

Auch ist die Strenge des Kriteriums nicht definiert, also die Frage, wieviel Fremdmaterial aufliegen darf, um den Bruch beispielsweise noch als „rein adhäsiv“ zu klassifizieren. Eine Nulltoleranz erscheint dabei kaum sinnvoll, da spätestens bei der Beurteilung des Bruchverlaufs mittels eines Elektronenmikroskopes keine rein adhäsiven Brüche mehr zu verzeichnen wären.

In dieser Untersuchung wurden Brüche als „rein adhäsiv“ klassifiziert, wenn für das bloße Auge keine Auflagerungen erkennbar waren, da sich gezeigt hatte, das bei strengem Kriterium (Lupenbetrachtung) nur noch verschwindend wenige Brüche als rein adhäsiv einzuordnen waren, und eine darauf beruhende Klassifizierung keine sinnvolle Unterscheidung gestattet hätte.

5.5.2 Statistische Auswertung

Weder für die Verbundfestigkeitsprüfung nach DIN 13 914 noch für die nach DIN EN ISO 3336 kann eine Normalverteilung angenommen werden, da in beiden Normen die Verwendung dreier unterschiedlicher Zahnarten (I_1 , I_2 und C) vorgeschrieben wird. Für die statistische Prüfung auf Signifikanz wurde daher der nichtparametrische U-Test nach MANN-WHITNEY angewendet.

