**Zusammenfassung**

Metallische und keramische Materialien haben sehr spezifische Eigenschaften und verhalten sich deshalb in der Mundhöhle unterschiedlich. Die für die klinische Anwendung wichtigsten Eigenschaften werden erläutert und ihre Messmethoden beschrieben. Im Hinblick auf den klinischen Einsatz werden anhand dieser Daten Anhaltspunkte für die Auswahl geeigneter Materialien gegeben.

Indizes

Elastizitätsmodul, Dehngrenze, Bruchdehnung, Härte, Biegefestigkeit, Bruchzähigkeit, Metall-Keramik-Verbund

Mechanische Eigenschaften metallischer und keramischer Werkstoffe

Jens Fischer

Zahnärztliche Rekonstruktionen sollen fehlendes Gewebe aufgrund zerstörter anatomischer Strukturen unter funktionellen und ästhetischen Gesichtspunkten ersetzen. Der Langzeiterfolg dentaler Rekonstruktionen wird maßgeblich durch die technischen Eigenschaften der Materialien bestimmt. Die Rekonstruktionen verbleiben häufig über Jahrzehnte in der Mundhöhle, die verwendeten Materialien sind in dieser Zeit den vielfältigen Belastungen der oralen Umgebung ausgesetzt und müssen im wässrigen Milieu ihre Funktion dauerhaft erfüllen, ohne dass von ihnen gesundheitliche Risiken ausgehen dürfen. Deshalb wird einerseits eine ausreichende mechanische Festigkeit gefordert, dann aber auch eine gute chemische Beständigkeit und biologische Verträglichkeit, damit der Werkstoff möglichst gar nicht in Lösung geht und doch in Lösung gegangene Bestandteile keine unerwünschten biologischen Reaktionen verursachen.

Die charakteristischen Werkstoffeigenschaften haben also einen großen Einfluss auf die Langzeitstabilität der Rekonstruktion. Metallische und keramische Werkstoffe verhalten sich in ihren Eigenschaften grundsätzlich verschieden und müssen demzufolge hier auch getrennt voneinander betrachtet werden.

Einleitung

Metallische Werkstoffe

Bei den mechanischen Eigenschaften der metallischen Werkstoffe lassen sich grundsätzlich die reversiblen elastischen und die irreversiblen plastischen Verformungen einerseits sowie die Härte andererseits unterscheiden. Die Härte ist als derjenige Widerstand definiert, der dem Eindringen eines anderen, härteren Körpers entgegengesetzt wird. Der Härtewert wird in der praktischen Anwendung häufig synonym gebraucht für die Festigkeit eines Werkstoffs, aber die üblicherweise verwendete Härteangabe nach Vickers gibt lediglich einen Hinweis auf die plastische Verformbarkeit und kann deshalb für die Bewertung des Werkstoffverhaltens nur bedingt herangezogen werden.

Elastisches und plastisches Verhalten. Elastische Verformung setzt voraus, dass im Werkstück oder im Prüfkörper Kräfte wirksam werden, die zwar die Atome auseinanderzerrten, aber keine atomaren Bindungen lösen. Lässt die Kraft nach, so gehen die Atome in ihre Ausgangsposition zurück. In einem makroskopischen Modell kann man sich die Atome mit Federn verbunden vorstellen. Nach dem Ende der Krafteinwirkung schnellen die Atome aufgrund der Federwirkung in ihre Ruheposition zurück.

Bei Anwendung größerer Kräfte werden die Atombindungen zunehmend getrennt und neue Bindungen mit benachbarten Atomen geknüpft, woraus ein Gleiten der Atomenebenen gegeneinander resultiert. Die Gleitvorgänge beginnen an Kristallgitterdefekten, so genannten Versetzungen, wo die Aktivierungsenergie relativ niedrig ist. Durch das Gleiten wandern die Versetzungen an die Korngrenzen und werden so herausgearbeitet. Da die Versetzungen Voraussetzung für die Verformbarkeit sind, wird der Werkstoff mit zunehmender Verformung spröde und reißt. Verstärkt wird dieses Phänomen durch Gitterverspannungen aufgrund der bei der Verformung wirkenden Kräfte.

Die mechanischen Eigenschaften metallischer Werkstoffe werden im Zugversuch gemessen. Exakt bemaßte, hantelförmige Prüfkörper (Abb. 1) werden mit ihren dicken Enden in die Spannbacken einer Zugmaschine eingespannt und bis zum Zerreißen gespannt. Während der Messung wird ein kontinuierliches Kraft-Weg-Diagramm aufgezeichnet, das bei bekanntem Querschnitt des dünnen Anteils des Prüfkörpers und der Ausgangslänge in ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm umgerechnet werden kann. Aus diesem Diagramm lassen sich wichtige charakteristische Kenndaten des jeweiligen Werkstoffs ermitteln (Abb. 2): Während des linearen Anstiegs der Messkurve verhält sich

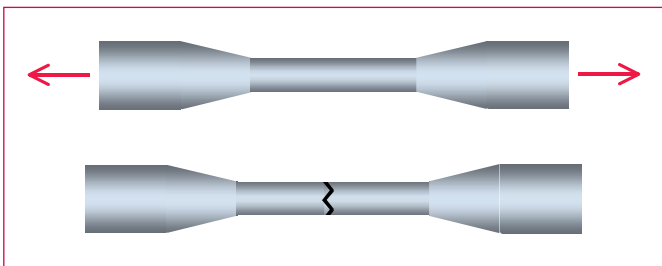


Abb. 1 Die Zugproben.

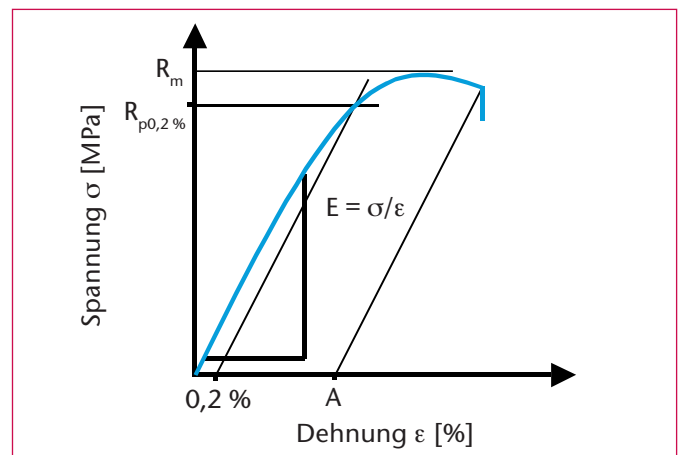


Abb. 2 Ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm.



der Werkstoff elastisch, das heißt jede Verformung ist reversibel. Die Längenänderung des Materials ist in diesem Bereich proportional zur Kraft und gehorcht dem Hooke'schen Gesetz. Die Steigung der Kurve in diesem Abschnitt ergibt den Elastizitätsmodul (Abkürzung: E), der ein Maß für die Steifigkeit des Werkstoffs darstellt:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Das heißt die Dehnung ε im Werkstück ist proportional zur angelegten mechanischen Spannung σ . Da die Dehnung immer auf die Ausgangslänge des Prüfkörpers bezogen wird, ist der Dehnungswert dimensionslos und wird in % angegeben. Die Spannung wiederum berechnet sich aus der angelegten Kraft F dividiert durch den Querschnitt a:

$$\sigma = F/a$$

und hat somit die Einheit N/mm^2 , was gleichbedeutend ist mit MPa. Je höher der Elastizitätsmodul ist, umso mehr Kraft benötigt man also für eine bestimmte elastische Verformung.

Die beginnende Abflachung der Kurve deutet auf eine erste plastische, das heißt irreversible Verformung der Legierung hin. Da hier das rein proportionale Verhalten von Spannung und Dehnung endet, wird dieser Punkt als Proportionalitätsgrenze (franz.: résistance proportionnelle, Abkürzung R_p) oder als Dehngrenze bezeichnet. Der Prüfkörper verlängert sich mit zunehmender Kraft unproportional schnell und die Kurve sinkt demzufolge ab. Der exakte Beginn des plastischen Fließens ist aus der Messkurve nur relativ schwer zu ermitteln. Deshalb wurde ein Punkt als Dehngrenze definiert, bei dem bereits eine geringe, aber deutlich feststellbare plastische Deformation eingesetzt hat. Für die Dentallegierungen wurde derjenige Punkt gewählt, bei dem eine Deformation von 0,2 % der Ausgangslänge erfolgt ist. Dieser Wert ergibt sich durch die Konstruktion einer Parallelen zum linearen Anstieg der Messkurve durch den Abszissenwert 0,2 %. Im Schnittpunkt der Parallelen mit der Messkurve wird der zugehörige Spannungswert ermittelt und als Wert für die Dehngrenze angegeben.

Im Zenit der Messkurve wird die maximale Zugfestigkeit erreicht (franz.: résistance maximale, Abkürzung R_m). Der irreversible Anteil der Dehnung beim Zerreißen der Zugprobe wird als Bruchdehnung bezeichnet (franz.: allongement, Abkürzung A). Sie ist ein Maß für die Sprödigkeit des Materials: Eine niedrige Bruchdehnung deutet auf eine hohe Sprödigkeit hin, sichtbar dadurch, dass der Prüfkörper rasch nach dem Erreichen der maximalen Festigkeit bereits zerreißt.

Härte metallischer Werkstoffe. Die Härte ist als derjenige Widerstand definiert, den ein fester Körper dem Eindringen eines anderen härteren Körpers entgegensetzt. In der Zahnmedizin ist die Prüfung nach Vickers üblich (Abb. 3). Eine Diamantnadel mit einem Pyramidenwinkel von 136° wird mit einer definierten Kraft auf die zu prüfende Oberfläche gedrückt und dort eine bestimmte Zeit gehalten. Üblich ist die Belastung der Diamantnadel mit einer Kraft von 5 kp und einer Haltezeit von 30 s, um dem Material genügend Zeit zum plastischen Fließen zu geben.

Die Angabe der Härte bezieht sich auf die Fläche des Eindrucks im Material, die sich aufgrund der definierten Form der Diamantnadel aus der gemessenen Diagonalen (d) des Eindrucks mittels der Formel

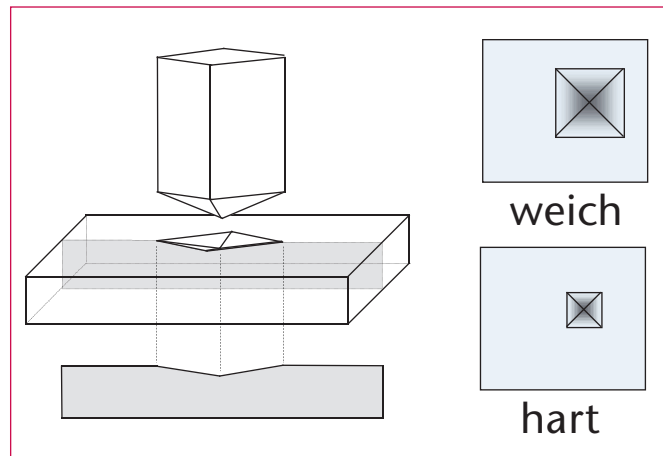


Abb. 3 Die schematische Darstellung zur Messung der Vickers-Härte.

$$HV = \frac{f \text{ [kp]}}{A} = \frac{f \text{ [N]}}{(9,81 d^2)/[2 \sin (136^\circ/2)]}$$

berechnen lässt. Zur Vereinfachung für die praktische Anwendung sind Tabellen verfügbar, in denen bei Kenntnis der gemessenen Breite des Eindrucks direkt der Härtewert abgelesen werden kann. Die Angabe erfolgt bei einer gemessenen Härte von beispielsweise 175 wie folgt: 175 HV5/30. Das heißt bei einer Belastung mit 5 kp und Halten der Belastung über 30 s ergab sich eine Diagonale des Eindrucks, die in der Tabelle den Wert 175 liefert. Die Angabe ist dimensionslos, da die Einteilung der Belastung in kp beibehalten wurde und eine Umrechnung in Newton zu ungewohnten Härtewerten führt.

Aushärtung. Unter Aushärtung werden die Auswirkungen einer Wärmebehandlung verstanden, durch die die mechanischen Eigenschaften der Legierung infolge innerer Zustandsänderungen im Sinne einer Verfestigung verändert werden, ohne dass sichtbare Änderungen des Gefüges erkennbar sein müssen oder die Legierung eine Veränderung der Zusammensetzung erfährt. Die Aushärtung erfolgt im Allgemeinen über die Ausscheidung einer zweiten Phase innerhalb eines zunächst homogenen Mischkristalls. Voraussetzung für die Ausscheidungshärtung ist die eingeschränkte, temperaturabhängige Löslichkeit zweier Legierungskomponenten, die es ermöglicht, durch Abschrecken übersättigte Mischkristalle herzustellen. Knapp unterhalb der Solidustemperatur liegt in diesen Systemen ein homogener Mischkristall vor, der durch Abschrecken eingefroren werden kann. Durch die gute Lösung beider Legierungskomponenten ist die Legierung in diesem Zustand weich. Aufgrund der geringen Bewegungsenergie der Atome bei niedrigeren Temperaturen und dem raschen Durchfahren des Temperaturintervalls bis Raumtemperatur kann sich dieser Zustand spontan nicht ändern, die homogene Mischung bleibt bestehen, obwohl sie thermodynamisch betrachtet instabil ist. Dieser Zustand wird als metastabil bezeichnet. Für den Zustand bei Raumtemperatur sind die Kristalle nun an einer Legierungskomponente übersättigt. Durch Aufheizen auf eine mittlere Temperatur erhalten die Atome aber soviel Bewegungsenergie, dass sich durch Diffusion, das heißt durch Platzwechsel der Atome untereinander, Bereiche herausbilden können, die dem jeweiligen Gleichgewicht bei der herrschenden Temperatur entsprechen.



chen. Das heißt, es bilden sich innerhalb bestehender Kristalle Anreicherungen der zweiten Legierungskomponente. Wird die beginnende Wanderung der Atome durch Abkühlung der Legierung wieder unterbunden und bleibt sie in einem Stadium stecken, in dem noch keine komplette Einstellung des Gleichgewichts erfolgt ist, so resultieren kleine Ansammlungen von Atomen, die zu Gitterstörungen und Gitterverspannungen und deshalb zu einer Verfestigung der Legierung führen. Da auch eine Steigerung der Härte zu beobachten ist, wird von Ausscheidungshärtung oder einfach Aushärtung gesprochen. Eine zu hohe Temperatur oder eine zu lange Anlasedauer für den Aushärtungsprozess führt zu einer so genannten Überhärtung mit vollständiger Entmischung und zum Größenwachstum der Ausscheidungen, wodurch der Aushärtungseffekt verloren geht. Die Folge der Aushärtung ist eine Erhöhung der Dehngrenze und der Härte, nicht aber des Elastizitätsmoduls, da diese Eigenschaft zustandsunabhängig ist.

Die modernen Legierungen sind so eingestellt, dass sie nach dem Guss selbst aushärten. Dies trifft insbesondere auf die aufbrennfähigen Legierungen zu.

Hinweise für die Praxis

Elastizitätsmodul: Maß für die Steifigkeit eines Materials

Der Elastizitätsmodul von Edelmetalllegierungen liegt im Bereich von 100 bis 120 GPa. Das entspricht den Werten, die für Verblendkeramiken gemessen werden. Das heißt, bei Belastung einer Brücke werden sich metallisches Gerüst und keramische Verblendung im elastischen Bereich in etwa gleich verformen, weil sie die gleiche Steifigkeit aufweisen. Bei edelmetallfreien Legierungen liegt der Elastizitätsmodul mit 200 GPa etwa doppelt so hoch, sodass das Metallgerüst wesentlich steifer ist als die Keramik. Grundsätzlich ist ein solcher Steifigkeitssprung in einer Konstruktion nicht so günstig, klinisch ergibt sich aber nach heutigem Kenntnisstand kein Unterschied in der Überlebensrate.⁶

Für Modellgussgerüste wird ein hoher Elastizitätsmodul angestrebt, damit das Gerüst bei geringer Materialstärke trotzdem eine ausreichende Steifigkeit aufweist. So kann eine vergleichsweise kleine Dimensionierung des Gerüsts insbesondere in störenden Bereichen wie sublingual oder palatinal realisiert werden. Auch die ästhetische Einbuße bei sichtbaren Klammern ist begrenzt, wenn der Elastizitätsmodul hoch ist und damit die Klammern grazil gestaltet werden können.⁷

Dehngrenze: Spannung, bei der eine erste plastische (bleibende) Deformation stattfindet

Je höher die Dehngrenze ist, umso sicherer ist man, dass sich der Werkstoff unter Kaulast nicht plastisch verformt. Dies muss vor allem bei Brücken- und Modellgussgerüsten beachtet werden. Für Brücken wird eine Dehngrenze von mindestens 450 bis 500 MPa empfohlen, das ist ein Wertebereich, den Edelmetalllegierungen im Allgemeinen problemlos erreichen, edelmetallfreie Legierungen erreichen zum Teil sogar deutlich höhere Werte.

Für Modellgussgerüste werden üblicherweise edelmetallfreie Legierungen verwendet, die Dehngrenzen im Bereich von 800 MPa aufweisen. So ist gewährleistet, dass sich die Gerüste trotz der grazilen Gestaltung nicht plastisch verformen.

Bruchdehnung: Maß für die Sprödigkeit eines Materials

Je höher die Bruchdehnung ist, umso leichter lässt sich eine Legierung kalt verformen. Legierungen mit einer Bruchdehnung von 2 % sind sehr spröde, solche mit einer Bruchdehnung von etwa 10 % oder höher duktil.

Aufgrund der kovalenten Metall-Sauerstoff-Bindungen fehlen den Keramiken die von den Metallen her gut bekannten elastischen und plastischen Eigenschaften. Keramik zählt deshalb zu den spröden Materialien und reagiert besonders empfindlich auf Zugbelastungen, während Druckbelastungen weitaus besser toleriert werden. Die Ursache der geringen Zugfestigkeit ist in der verarbeitungsbedingten Entstehung von Mikrorissen an der Oberfläche zu sehen. Bei Zugbelastung kommt es zu Spannungsspitzen an den Rissenden, die die Bindungskräfte in der Keramik übersteigen und eine Rissausbreitung in die Glasphase hinein bewirken (Abb. 4). Die Festigkeit keramischer Werkstoffe wird in der Zahnmedizin mittels verschiedener Biegeversuche bestimmt. Dabei wird ein Prüfkörper jeweils bis zum Bruch belastet. Angewendet werden der Dreipunkt-

Keramische Werkstoffe

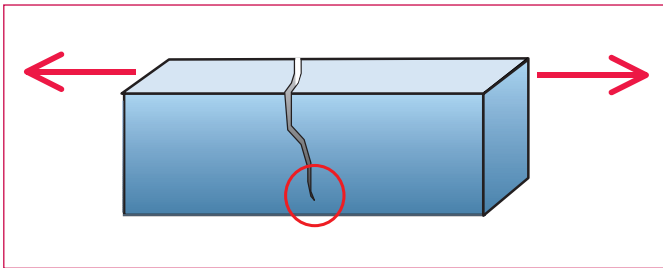


Abb. 4 Die schematische Darstellung zur Rissausbreitung in keramischen Bauteilen bei Zugbelastung.

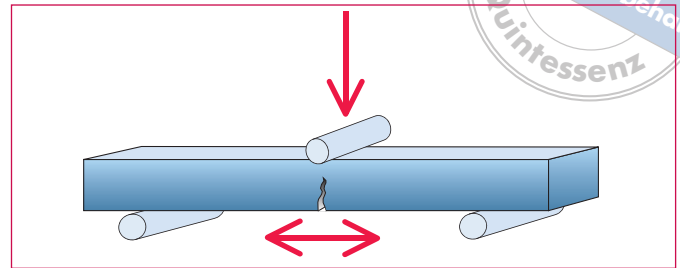


Abb. 5 Die schematische Darstellung des Dreipunkt-Biegeversuchs.

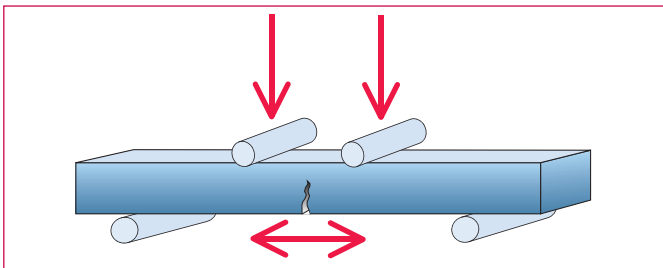


Abb. 6 Die schematische Darstellung des Vierpunkt-Biegeversuchs.

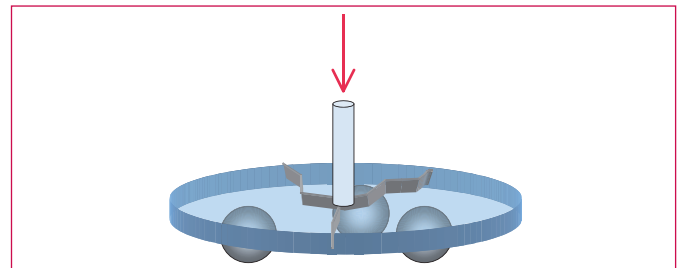


Abb. 7 Die schematische Darstellung des biaxialen Biegeversuchs.

Biegeversuch (Abb. 5), der Vierpunkt-Biegeversuch (Abb. 6) und der biaxiale Biegeversuch (Abb. 7).

Bei der Bestimmung der Biegefestigkeit entsteht auf der der Lasteinleitung gegenüberliegenden Seite des Prüfkörpers eine Zugzone, in den Abbildungen 5 und 6 durch die Doppelpfeile unter den Prüfkörpern symbolisiert. Da Keramiken Zugbelastungen wegen der Mikrorisse nicht so gut tolerieren wie Druckbelastungen, wird ein an der Unterseite des Prüfkörpers entstehender oder vorhandener Riss zum Versagen des Prüfkörpers führen. Der Dreipunkt-Biegeversuch ist einfach durchzuführen, hat aber den Nachteil, dass zufällig unter dem Druckstempel in der Zugzone vorhandene Risse zu einem vorzeitigen Versagen führen und damit die Streuung der Messwerte größer wird. Der Vierpunkt-Biegeversuch vermeidet diesen Nachteil, indem ein größeres Volumen in der Zugzone liegt, nämlich der gesamte Prüfkörperbereich zwischen den beiden Druckstempeln. Bei beiden Biegeprüfungen werden Balkenproben eingesetzt. Kantendefekte haben in diesen Messungen einen großen Einfluss. Der biaxiale Biegeversuch umgeht die Einflüsse von Kanteneffekten, indem eine runde scheibenförmige Probe zentral belastet wird. So entstehen die Spannungsspitzen nicht an den Kanten, sondern im Zentrum der Probe und es wird eher die Eigenschaft des kompakten Materials geprüft. Der Dreipunkt-Biegeversuch liefert etwas höhere Werte als der Vierpunkt-Biegeversuch, die Werte des biaxialen Biegeversuchs liegen dazwischen.³

Der Elastizitätsmodul keramischer Werkstoffe kann aus den Biegeversuchen ermittelt werden, wenn man die Durchbiegung in der Messung miterfassen kann.

Neben der Biegefestigkeit und dem Elastizitätsmodul ist die Risszähigkeit ein weiterer wichtiger Parameter für die Charakterisierung keramischer Werkstoffe. Es wird in diesem Fall aber nicht das Versagen des Materials aufgrund von zufällig vorhandenen Rissen

gemessen, sondern es wird an der Unterseite des Prüfkörpers vor der Messung ein definierter Riss erzeugt, indem mit einer feinen Klinge eine Kerbe in den Prüfkörper gesägt wird. Aus der Kraft beim Bruch und dem nach dem Bruch auszumessenden Restquerschnitt kann die Bruchzähigkeit berechnet werden. Die Einheit der Bruchzähigkeit ist $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

Keramische Werkstoffe verhalten sich in Bezug auf die Versagenswahrscheinlichkeit anders als Metalle. Während bei Metallen die Festigkeitswerte einer Serie von Bauteilen in einer Gauß'schen Verteilung um den Mittelwert herum liegen, also gleichmäßig viele Messwerte höhere und niedrigere Werte annehmen, ist die Situation bei der Keramik etwas anders. Hier können aufgrund von Oberflächendefekten einzelne Bauteile eine deutlich niedrigere Festigkeit aufweisen und frühzeitig versagen (Abb. 8). Deshalb muss die Keramik eine hohe Zuverlässigkeit haben, die in der so genannten Weibull-Statistik abgeschätzt wird. Dazu wird der doppelte Logarithmus der Bruchwahrscheinlichkeit $\ln\ln[1/(1-F)]$ gegen die gemessene Festigkeit aufgetragen. Die Steigung der resultierenden Ausgleichsgeraden ist dann ein Maß für die Zuverlässigkeit und wird als Weibull-Parameter m angegeben.

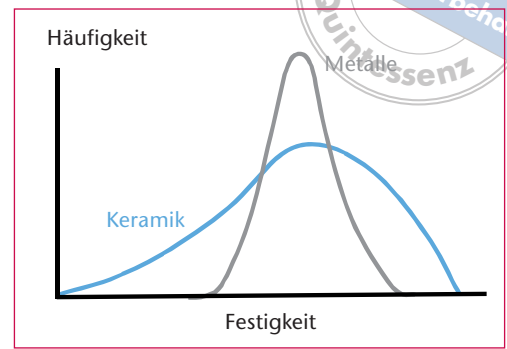


Abb. 8 Die schematische Darstellung zur Festigkeitsverteilung bei Prüfserien aus metallischen und keramischen Bauteilen.

Hinweise für die Praxis

Der Elastizitätsmodul von Verblendkeramiken und Glaskeramiken liegt bei etwa 100 GPa. Das ist ein Wert, wie wir ihn von den Edelmetalllegierungen her kennen. Zirkoniumdioxid weist einen Wert von etwa 200 GPa auf, vergleichbar mit dem der edelmetallfreien Legierungen. Aluminiumoxid hat eine noch höhere Steifigkeit von 300 GPa. Da aber Aluminiumoxid als Gerüstmaterial nur für Einzelkronen verwendet wird, stört dieser hohe Elastizitätsmodul nicht.

An den Beispielen wird deutlich, dass sich metallische und keramische Werkstoffe in ihrem Elastizitätsmodul nicht unterscheiden. Das unterschiedliche Bruchverhalten hat also nichts mit dem Elastizitätsmodul zu tun.

☞ **Biegefestigkeit:** *mechanische Spannung in einem auf Biegung belasteten Prüfkörper bei Bruch*

Die Biegefestigkeit sollte bei Verblendkeramiken und Vollkeramiken möglichst hoch liegen, um eine ausreichende Sicherheit zu haben bzw. nicht zu dick konstruieren zu müssen. Die Festigkeiten der Verblendkeramiken bewegen sich in einem Bereich von 60 bis 140 MPa .³ Aus der Praxis wissen wir, dass diese Werte ausreichend sind.

Glaskeramiken, die in einem Festigkeitsbereich von 100 MPa rangieren, können heute bedenkenlos für vollkeramische Einzelzahnversorgungen eingesetzt werden.⁹

Gerüstmaterialien liegen in der Festigkeit bei 500 MPa (Aluminiumoxid, InCeram Alumina) bis 1.000 MPa (Zirkoniumdioxid).⁸ Die Brückengröße im Seitenzahngebiet sollte mit diesen Materialien nach heutigem Wissensstand ein Brückenzwischenmitglied nicht überschreiten, bei Zirkoniumdioxid sind zwei Brückenglieder denkbar, aber die Querschnitte müssen dann entsprechend dimensioniert sein.

☞ **Bruchzähigkeit:** *Widerstand, den ein Material der Ausbreitung eines Risses entgegengesetzt. Einheit: $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$*

Neben der Biegefestigkeit sollten die Keramiken eine möglichst hohe Bruchzähigkeit aufweisen. Da die Werte allerdings in den einzelnen Keramikgruppen (Verblendkeramiken, Glaskeramiken, Oxidkeramiken) weitgehend gegeben sind, ist eine gezielte Auswahl hier kaum möglich.

☞ **Weibull-Modul:** *Maß für die Zuverlässigkeit eines Materials*

Ähnlich verhält es sich mit dem Weibull-Modul. Auch hier sind hohe Werte (Größenordnung 10 bis 20) anzustreben, aber die Materialgruppen liefern charakteristische Werte, die sich in den einzelnen Produkten nicht wesentlich unterscheiden.

Die Technik der Metallkeramik wurde 1962 als Gemeinschaftsentwicklung der Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, und der damaligen Degussa (heute DeguDent, Hanau) in Europa eingeführt und hat sich aufgrund ihrer Zuverlässigkeit zur Standardversorgung im Kronen- und Brückenbereich entwickelt. Durch die Kombination des elastischen Werkstoffs Metall, der die mechanische Stabilität gewährleistet, und des spröden Werkstoffs Keramik, der die ästhetischen Anforderungen erfüllt, war eine universell einsetzbare Tech-

**Metallkeramischer
Verbund**



nik entwickelt worden, die auch die Konstruktion von Brücken mit längerer Spannweite erlaubt.

Der Vorteil des metallkeramischen Verbunds gegenüber vollkeramischen Kronen liegt in der Kombination der positiven Eigenschaften der Legierung (hohe Elastizität, hohe Zugfestigkeit, gute Passgenauigkeit) und der Keramik (Ästhetik, hohe Druckfestigkeit, hohe Mundbeständigkeit).

Der Verbund zwischen den ungleichen Partnern Metall und Keramik wird einerseits durch eine mechanische Verzahnung, andererseits durch einen chemischen Verbund erreicht.¹ Durch Anrauen der Legierungsoberfläche entstehen Unterschnitte, in die die Verblendkeramik während des Sinterprozesses hineinfließt. Nach der Erstarrung der Keramik sind dann Legierung und Keramik ineinander verkeilt, sodass eine mechanische Retention an der Oberfläche entsteht. Die chemische Bindung zwischen Legierung und Keramik erfolgt über so genannte Sauerstoffbrücken. Nichtelegmetallbestandteile der Legierung, wie z. B. Indium, Zink oder Zinn, oxidieren an der Oberfläche des metallischen Gerüsts und diese Oxide können nun mit der oxidischen Keramik chemische Bindungen eingehen.

Während des Brennprozesses werden Endtemperaturen im Bereich von etwa 750 bis 950 °C erreicht. Die Keramik reagiert bei diesen hohen Temperaturen plastisch. In der Abkühlphase nach dem Brand steigt die Viskosität der Keramik an. Unterhalb von 500 °C geht die Keramik in den festen Zustand über.

Beim Erwärmen während des Brennprozesses dehnen sich die Werkstoffe aus. Analog schrumpfen sie während der Abkühlphase. Verschiedene Materialien können eine sehr unterschiedliche Wärmedehnung besitzen. Sind diese Materialien fest miteinander verbunden, so bauen sich bei unterschiedlichem Wärmedehnungsverhalten an der Verbundzone Spannungen auf, die bei Temperaturänderungen zur Verformung des Werkstoffverbunds führen.

Eine Kennzahl für die Wärmedehnung ist der Wärmeausdehnungskoeffizient (WAK), der angibt, um welchen Betrag sich ein Material relativ zur Ausgangslänge bei einer Temperaturerhöhung um 1 K (≈ 1 °C) ausdehnt. Die physikalische Einheit lautet $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$. Bei metallkeramischen Arbeiten ist die Kenntnis der WAK-Werte beider Materialien deshalb von Bedeutung, weil bei zu starker Abweichung der Werte voneinander Spannungen im Verbund aufgebaut werden, die bei dickeren Metallgerüsten zu Abplatzungen und bei dünneren Metallgerüsten zu Verformungen führen können. Technische Misserfolge lassen sich teilweise auf diesen Effekt zurückführen.

Um eine Aussage über die Kompatibilität bestimmter Legierungen und Keramiken treffen zu können, muss der WAK für diese Materialien bestimmt werden. Da die Keramik jedoch erst unterhalb von etwa 500 °C fest ist, genügt es, den WAK bis 500 °C zu kennen.

Metalle zeigen recht unterschiedliche WAK-Werte und insbesondere bei hochschmelzenden Metallen ist eine Korrelation zwischen Schmelzpunkt und WAK zu beobachten. Durch eine geeignete Wahl der Legierungselemente und deren Konzentration kann der WAK einer Legierung also im erforderlichen Bereich eingestellt werden. Insbesondere mit den niedrigschmelzenden Nichtelegmetallen Gallium (Schmelztemperatur 32 °C), Indium (Schmelztemperatur 157 °C), Zinn (Schmelztemperatur 232 °C) und Zink (Schmelztemperatur 420 °C) sowie mit Silber können die WAK-Werte der Legierungen deutlich angehoben werden.

Keramische Werkstoffe reagieren sehr empfindlich auf Zugbelastungen, während Druckbelastungen gut toleriert werden. Deshalb muss beim metallkeramischen Verbund in jedem Fall vermieden werden, dass die Keramik aufgrund unterschiedlicher WAK-Werte unter Zugspannung gerät. Aus diesem Grund wird der WAK der Legierungen stets etwas höher eingestellt als derjenige der Keramiken. Als Faustregel gilt, dass der WAK der Legierung um 10 % höher sein sollte als derjenige der Keramik.² Dann gerät die Keramik beim Abkühlen nach dem Brand aufgrund der stärkeren Schrumpfung der Legierung unter leichte Druckspannung. Diese Druckspannung kann von der Keramik problemlos toleriert werden und muss bei einer Zugbelastung zusätzlich überwunden werden, bevor es zum Bruch kommen kann. Sie bewirkt somit eine Verstärkung der Keramik.² Übliche WAK-Werte der Verblendkeramiken liegen bei 12,0 bis 13,8 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$ im Temperaturintervall von 25 bis 500 °C. Insbesondere aufbrennfähige Legierungen auf der Basis Palladium-Silber zeigen relativ hohe WAK-Werte. Hier kann zur Anpassung des WAK-Wertes der Keramik an denjenigen der Legierung eine langsame Abkühlung nach dem Brand durchgeführt werden, da durch diese Maßnahme in der Keramik ein zusätzliches Wachstum der für die hohe thermische Dehnung der Keramik notwendigen Leuzit-Kristalle erzielt wird, was den WAK-Wert der Keramik um bis zu 0,5 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$ anhebt.¹

Die Prüfung der Festigkeit des metallkeramischen Verbunds wird mit der Rissbeginnprüfung nach Schwickerath durchgeführt.⁵ Diese Prüfmethode ist in der Norm ISO 9693⁴ verankert. Auf Legierungsstreifen wird mittig ein quaderförmiger Keramikblock aufgebrannt und dann von der Gegenseite im Sinne eines Dreipunkt-Biegeversuchs belastet (Abb. 9). Die Kraft F bei beginnender Ablösung der Keramik wird registriert und daraus wird unter Berücksichtigung der Verbundfläche die Verbundfestigkeit berechnet. Der geforderte Mindestwert beträgt 25 MPa.

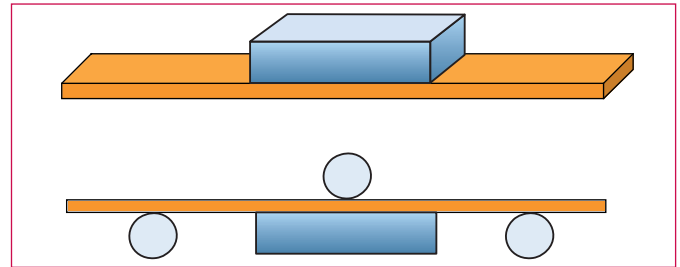


Abb. 9 Die schematische Darstellung des Prüfkörpers für die Rissbeginnprüfung nach Schwickerath (oben) und Versuchsanordnung (unten).

Hinweise für die Praxis

☞ **Metallkeramische Verbundfestigkeit:** Summe der mechanischen und chemischen Bindungskräfte zwischen Legierung und Verblendkeramik. Die Verbundfestigkeit zwischen Legierung und Keramik hat einen entscheidenden Einfluss auf den Langzeiterfolg der metallkeramischen Restauration. Sie ergibt sich aus der mechanischen Verzahnung und der chemischen Bindung zwischen beiden Materialien. Die Verbundfestigkeit zwischen Legierung und Keramik wird mittels Rissbeginnprüfung nach Schwickerath bestimmt und muss mindestens einen Wert von 25 MPa aufweisen.

☞ **Wärmeausdehnungskoeffizient (WAK):** Ausdehnung eines Materials im Verhältnis zur Ausgangslänge bei einer Temperaturerhöhung um 1 K. Einheit: $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$ oder 10^{-6} K

Die Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) von Keramik und Legierung müssen aufeinander abgestimmt sein. Als Faustregel gilt, dass der WAK der Keramik eine Einheit ($1 \mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$) unter dem WAK der Legierung liegen soll.

Größere Abweichungen führen zu stärkerer Druckspannung (wenn der WAK der Keramik zu tief ist) oder zu Zugspannungen in der Keramik (wenn der WAK der Keramik höher ist als derjenige der Legierung). In beiden Fällen kann es zu einer Fraktur der Verblendung kommen.

Schlussfolgerungen

Metallische und keramische Werkstoffe verhalten sich unter mechanischer Last grundsätzlich verschieden. Die Kenntnis der charakteristischen Eigenschaften beider Werkstoffe hilft, sie materialgerecht einzusetzen und Fehler aufgrund einer falschen Indikation zu vermeiden. Insbesondere bei der Keramik ist auf eine vorsichtige Ver- und Bearbeitung zu achten, damit die Oberfläche nicht geschädigt und die Entstehung von Mikrorissen vermieden wird. Bei der Auswahl der Materialien sollte aber nicht nur auf die mechanischen Daten geachtet werden. Die Verarbeitbarkeit, die Biokompatibilität, die Ästhetik und die Langzeitstabilität sind weitere Parameter, die über den klinischen Erfolg entscheiden. Das macht die Entwicklung von dentalen Materialien so anspruchsvoll. Eine frühzeitige Vermarktung einer vermeintlich guten Entwicklung ohne ausreichende Tests hat in der Zahnmedizin schon häufiger zu schmerzlichen Erfahrungen geführt. Langjährige gute klinische Erfahrungen oder fundierte klinische Studien sind oft mehr wert als ein hoher Festigkeitswert in einer Hochglanzbroschüre.

Literatur

1. Bagby M, Marshall SJ, Marshall GW Jr. Metal ceramic compatibility: a review of the literature. *J Prosthet Dent* 1990;63:21-25.
2. Coffey JP, Anusavice KJ, DeHoff PH, Lee RB, Hojjatie B. Influence of contraction mismatch and cooling rate on flexural failure of PFM systems. *J Dent Res* 1988;67:61-65.
3. Fischer J, Stawarczyk B, Hämmerle CHF. Biegefestigkeit von Verblendkeramiken für Zirkoniumdioxid. *Quintessenz Zahntech* 2008;34:1138-1145.
4. ISO 9693 Dental ceramic fused to metal restorative materials. Geneva: International Organisation for Standardization, 1999.
5. Lenz J, Schwarz S, Schwickerath H, Sperner F, Schäfer A. Bond strength of metal-ceramic systems in threepoint flexure bond test. *J Appl Biomater* 1995;6:55-64.
6. Pape FW, Voss R. Klinisches Verhalten von NEM-Dentallegierungen nach mehrjähriger Inkorporationszeit. *Dtsch Zahnärztl Z* 1991;46:119-123.
7. Pospiech P. Die prophylaktisch orientierte Versorgung mit Teilprothesen. Stuttgart/New York: Thieme, 2001.
8. Yilmaz H, Aydin C, Gul BE. Flexural strength and fracture toughness of dental core ceramics. *J Prosthet Dent* 2007;98:120-128.
9. Zimmer S, Göhlich O, Rüttermann S, Lang H, Raab WH, Barthel CR. Long-term survival of Cerec restorations: a 10-year study. *Oper Dent* 2008;33:484-487.

Adresse des Verfassers

PD Dr. med. dent. Dr. rer. nat. Jens Fischer, Klinik für Kronen und Brückenprothetik, Teilprothetik und zahnärztliche Materialkunde, Zahnmedizinische Kliniken der Universität Zürich
Plattenstrasse 11, 8032 Zürich, Schweiz
E-Mail: jens.fischer@zzmk.uzh.ch

Abteilung für Zahnärztliche Prothetik, Zahn- Mund- und Kieferklinik, Universität Freiburg
Hugstetter Straße 55, 79106 Freiburg

und Vita Zahnfabrik, Ballyweg 6, 79713 Bad Säckingen