

# Mechanische Eigenschaften von Empress 2

## Zusammenfassung

Seit kurzem ist als Weiterentwicklung der Dentalkeramik IPS-Empress das System Empress 2 auf dem Markt. Ziel der vorliegenden Studie war es zu überprüfen, wie sich die mechanischen Eigenschaften des Empress-2-Werkstoffs von denen des Empress-1-Werkstoffs unterscheiden. Dazu wurden von beiden Werkstoffsystemen folgende Werkstoffkennwerte ermittelt: Biegefestigkeit, Weibullmodul, Risszähigkeit, Elastizitätsmodul, Vickershärte und die Parameter des unterkritischen Risswachstums.

Es zeigte sich, dass Empress 2 im Vergleich zu Empress 1 eine deutlich höhere initiale Biegefestigkeit und Risszähigkeit (Kurzzeitfestigkeit) aufweist. Das bruchmechanische Verhalten bei Belastung über einen längeren Zeitraum, d. h. die Langzeitfestigkeit, ist nach Aussage der Lebensdaueranalyse ebenfalls verbessert, jedoch nicht in dem Masse, in dem die Kurzzeit-Biegefestigkeit verbessert wurde.

Acta Med Dent Helv 4: 141–145 (1999)

**Schlüsselwörter:** Empress 2, Kurzzeitfestigkeit, Langzeitfestigkeit, unterkritisches Risswachstum, statistische Ausfallwahrscheinlichkeit

Zur Veröffentlichung angenommen: 4. Juni 1999

Korrespondenzadresse:

Dr.-Ing. Horst Fischer, Klinik für Zahnärztliche Prothetik, Lehr- und Forschungsgebiet Zahnärztliche Werkstoffkunde, Universitätsklinikum der RWTH Aachen, Pauwelsstrasse 30, D-52074 Aachen  
Tel.: ++49-241-8089896, Fax: ++49-241-8089896  
e-mail: h.fischer@rwth-aachen.de

HORST FISCHER und RUDOLF MARX

Klinik für Zahnärztliche Prothetik, Lehr- und Forschungsgebiet Zahnärztliche Werkstoffkunde, Universitätsklinikum Aachen

## Einleitung

Der dentalkeramische Werkstoff IPS-Empress hat sich seit seiner Markteinführung 1989 klinisch bewährt. Vorteile des Empress-Systems sind die u. a. von BRODBECK et al. (1995) beschriebene sehr gute Ästhetik, der u. a. von BIENIEK (1993) nachgewiesene gute Randschluss und die von WOHLWEND (1987) entwickelte teilautomatisierte Prozesstechnik im Pressofen. Ausserdem beweist die mittlerweile schon relativ lange klinische Erprobung eine ausreichende Langzeitstabilität.

BIENIEK & MARX (1994) belegten durch ihre Studie, dass Empress 1 wie alle anderen dentalkeramischen Werkstoffe aus Feldspatkeramik nur eine Biegefestigkeit hat, die im unteren Drittel des Spektrums aller Dentalkeramiken liegt. Dadurch sind die klinisch empfohlenen Indikationen auf Veneers, Inlays und Kronen im Front- und Seitenzahnbereich beschränkt. Brücken im Front- und Seitenzahnbereich sind als experimentelle Anwendungen zu werten. Aus diesem Grund wurde nach Möglichkeiten gesucht, die Materialeigenschaften von Empress 1 weiterzuentwickeln. Dieses weiterentwickelte Produkt wurde unter dem Namen «Empress 2» eingeführt.

In der vorliegenden Studie wurde eine umfassende Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der beiden Empress-Varianten durchgeführt. Mit Hilfe der ermittelten Kennwerte ist eine zuverlässige mechanische Bewertung der beiden Werkstoffe und ihre wechselseitige Abgrenzung möglich. Die klinische Bedeutung dieser Bewertung wird diskutiert.

## Material und Methode

Folgende Kennwerte wurden ermittelt: Biegefestigkeit als Weibullfestigkeit  $\sigma_{63,21\%}$ , d. h. der Biegebruchspannung, bei der statistisch 63,21% der Prüfkörper einer Charge versagen (MUNZ & FETT 1989), Weibullmodul  $m$ , Risszähigkeit  $K_{Ic}$ , Elastizitätsmodul  $E$ , Vickershärte  $HV$  und die Parameter des unterkritischen Risswachstums  $n$  und  $A^*$ . Die kennwertbezogenen Dimensionen und Anzahlen der Prüfkörper sowie die Spezifikationen der verwendeten Testmethoden sind in Tabelle I aufgelistet.

Tab. I Zu ermittelnde Werkstoffkennwerte, Dimensionen und Anzahl der Prüfkörper sowie verwendete Testmethoden.

Werkstoffkennwert	Dimensionen der Prüfkörper	Anzahl der Prüfkörper	Verwendete Testmethode
Biegefestigkeit $\sigma_{63,21\%}$	1,5 x 3,0 x 30,0 mm <sup>3</sup>	30	Vier-Punkt-Biegetest nach DIN EN 843-1
Weibullmodul m	1,5 x 3,0 x 30,0 mm <sup>3</sup>	30	Vier-Punkt-Biegetest nach DIN ENV 843-5
Risszähigkeit $K_{Ic}$	3,0 x 6,0 x 30,0 mm <sup>3</sup>	10	Biegetest am gekerbten Quader nach DIN-Entwurf 51109
Elastizitätsmodul E	3,0 x 9,0 x 40,0 mm <sup>3</sup>	3	Resonanzfrequenzmethode nach DIN ENV 843-2
Vickershärte HV	3,0 x 9,0 x 40,0 mm <sup>3</sup>	5	Indentermethode nach DIN ENV 843-4
Risswachstums-koeffizient n	1,5 x 3,0 x 30,0 mm <sup>3</sup>	90	dynamischer Biegetest nach DIN ENV 843-3
Risswachstums-koeffizient A*	1,5 x 3,0 x 30,0 mm <sup>3</sup>	90	dynamischer Biegetest nach DIN ENV 843-3

Die Biegefestigkeit wurde nach der technischen Norm für Hochleistungskeramiken DIN EN 843-1 (1995) im Vier-Punkt-Biegeversuch ermittelt. Die Prüfkörper wurden mittels SiC-Papier bis zu einer Rauheit der Oberflächen von  $R_{max} < 2 \mu m$  geschliffen. Die Rauheit wurde mit Hilfe eines Tastschnittgerätes (Perthometer 6SP, Feinprüf Perthen, Göttingen) überprüft. Die Last-/Stützrollenabstände der Biegeeinheit betragen 12/24 mm. Die Traversen-Vorschubgeschwindigkeit der weggesteuerten Prüfmaschine (Typ Z030, Zwick, Ulm) wurde gemäss DIN-Vorgabe so gewählt, dass die Prüfkörper innerhalb von 5–15 s zerbrachen. Die Vier-Punkt-Biegevorrichtung war so beschaffen, dass die in der DIN-Vorschrift geforderten Freiheitsgrade für die Auflager erfüllt wurden.

Die Weibullmodule wurden aus den Ergebnissen der Biegefestigkeit mittels weibullstatistischer Rechenmethoden gemäss DIN ENV 843-5 (1997) bestimmt. Als Verteilungsfunktion  $F_i$  für die statistische Auswertung (Weibull-Analyse) wird in diesem Normentwurf folgender Ansatz vorgeschlagen:

$$F_i = \frac{i - 0,5}{n}, \tag{1}$$

wobei i die Laufvariable der Proben der nach der Messwertgrösse aufsteigend sortierten Biegefestigkeiten der analysierten Charge angibt.

Die Risszähigkeit wurde im Biegetest am gekerbten Quader ermittelt. Die Prüfkörper wurden gemäss DIN-Entwurf 51109 (1991) 30% gekerbt. Der Kerbgrund hatte eine Breite von ca. 40  $\mu m$ . Die Prüfgeschwindigkeit wurde wie beim Biegetest so gewählt, dass die Proben innerhalb von 5–15 s zerbrachen.

Der Elastizitätsmodul wurde durch die Resonanzfrequenzme-

Tab. II Ergebnisse der ermittelten Werkstoffkennwerte von Empress 1 und Empress 2

Werkstoffkennwert	Empress 1 (Opazität OII)	Empress 2
Biegefestigkeit $\sigma_{63,21\%}$	111 MPa	290 MPa
Weibullmodul m	10	10
Risszähigkeit $K_{Ic}$	1,2 MPam <sup>0,5</sup>	2,5 MPam <sup>0,5</sup>
Elastizitätsmodul E	67 GPa	96 GPa
Vickershärte HV	374	404
Risswachstumskoeffizient n	25	20
Risswachstumskoeffizient A*	4,9•10 <sup>-3</sup> m/sec	6,6•10 <sup>-4</sup> m/sec

thode nach DIN ENV 843-2 (1998) mit Hilfe eines FFT-Analysators (Typ MK4-1, Grindosonic, Köln) bestimmt. Bei dieser Methode wird ein Prüfkörper durch einen mechanischen Stoss (Kugel) zu Schwingungen angeregt. Ein piezoelektrischer Taster, der mit der Probe kontaktiert wird, registriert die Schwingungsantwort. Mit Hilfe einer rechnergestützten Auswertung kann aus der Periodendauer der detektierten Biegeeigenschwingung der Elastizitätsmodul bestimmt werden.

Die Vickershärte wurde im Härteeindruckverfahren nach Vickers (Pyramide mit 136° zueinander geneigten Flächen) gemäss DIN ENV 843-4 (1994) mit einem Härteprüfgerät (Typ 3212001, Zwick, Ulm) ermittelt. Als Prüfkörper wurden die Proben, aus denen der Elastizitätsmodul ermittelt wurde, verwendet. Es wurde pro Werkstoff ein Mittelwert aus n=10 Eindringmustern an 5 Prüfkörpern (je 2 Eindringmuster pro Prüfkörper) berechnet. Die Prüflast betrug 50 Newton. Nach Eindringen des Indenters wurde die zu prüfende Oberfläche für die Dauer von 15 s belastet.

Die Risswachstumskoeffizienten n und A\* wurden im dynamischen Biegeversuch nach DIN ENV 843-3 (1996) ermittelt. Als Lastraten wurden gewählt: 10<sup>-2</sup>, 10<sup>-1</sup>, 10<sup>0</sup>, 10<sup>1</sup> und 10<sup>2</sup> MPa/s. Die Belastung der Prüfkörper erfolgte über eine Vier-Punkt-Biegeeinrichtung auf einer Universal-Prüfmaschine (Typ Z030, Zwick, Ulm). Die Versuchsbedingungen entsprachen, soweit nicht anders erwähnt, denjenigen der Biegefestigkeitsversuche. Die Prüfmaschine wurde bei diesem Test jedoch im «closed-loop» gefahren, um konstante Lastraten, d. h. konstante Spannungsanstiegsgeschwindigkeiten zu realisieren.

Alle Werkstoffprüfungen wurden an Luft (65% relative Luftfeuchte) bei 23 °C durchgeführt.

## Resultate

In Tabelle II sind die Ergebnisse für Empress 1 und Empress 2 gegenübergestellt. In Abbildung 1 sind die (Kurzzeit-)Festigkeitsverteilungen der beiden Empressvarianten in ein Weibulldiagramm eingetragen. Abbildung 2 stellt werkstoffbezogen drei Kennwerte graphisch einander gegenüber. Einerseits sind die Werte für die Biegefestigkeit und für die Risszähigkeit dargestellt, andererseits sind die Zugspannungswerte notiert, die der Werkstoff tolerieren würde, wenn gefordert wird, dass bei

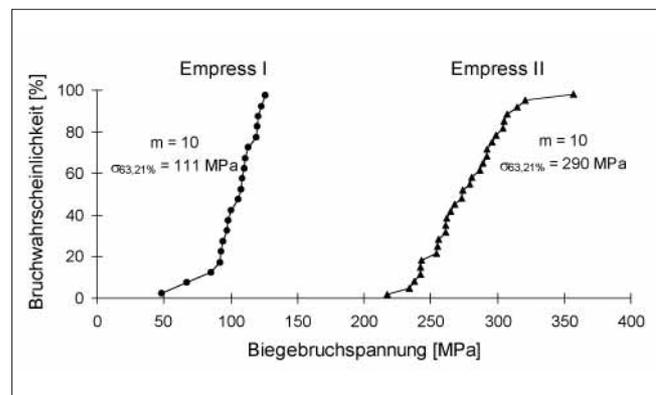


Abb. 1 Verteilung der Biegebruchspannungen (Biegefestigkeit) der beiden Empressvarianten in einem linearen Weibulldiagramm. Aufgetragen ist die Bruchwahrscheinlichkeit in % über der für jeden Prüfkörper gemessenen Biegebruchspannung in MPa. Zusätzlich sind die Weibullparameter, der Weibullmodul m und die Weibullfestigkeit  $\sigma_{63,21\%}$  für die beiden Messreihen eingetragen.

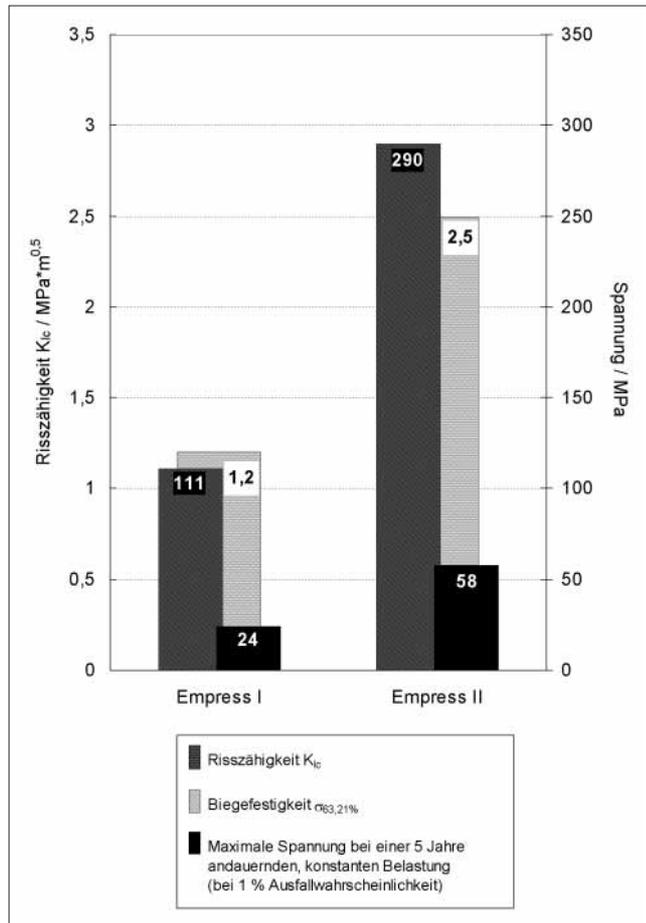


Abb. 2 Graphische Gegenüberstellung der Risszähigkeit, der Biegefestigkeit und der Zugspannungswerte, mit denen der Werkstoff beansprucht werden kann, sodass bei einer fiktiv angenommenen statischen, i. e. andauernden, nicht intermittierenden Belastung 1% einer Charge des jeweiligen Werkstoffs frakturieren.

einer fiktiv angenommenen statischen, i. e. andauernden, nicht intermittierenden Belastung über 5 Jahre höchstens 1% einer Charge des jeweiligen Werkstoffs frakturiert.

## Diskussion

Mit Hilfe der hier durchgeführten umfassenden werkstoffkundlichen Charakterisierung kann das mechanische Kurz- und Langzeitverhalten der untersuchten Werkstoffe im Rahmen einer bruchmechanischen Modelluntersuchung beurteilt werden. Die Biegefestigkeit von Empress 2 konnte im Vergleich zu Empress 1 annähernd um den Faktor 3 gesteigert werden. Dies bedeutet, dass der neue Empresswerkstoff spontan, d. h. unter Kurzzeitaspekten deutlich höher mechanisch beanspruchbar ist. Der unveränderte Wert für den Weibullmodul deutet allerdings darauf hin, dass das für jede Keramik spezifische Fehlstellenpektrum im Vergleich der beiden Empressvarianten unverändert geblieben ist. Je grösser der Weibullmodul ist, desto geringer ist die Streuung der Fehlverteilung im Werkstoff und damit letztlich die Streuung der Festigkeitswerte (MUNZ & FETT 1989). Nach MARX & WEBER (1997) liegt ein Weibullmodul von 10 im für Dentalkeramiken üblichen Bereich. Hochleistungskeramiken wie z. B. Aluminiumoxid ( $Al_2O_3$ ) oder Zirkonoxid ( $ZrO_2$ ), die sich ebenfalls bereits im dentalprothetischen Bereich

Tab. III Korrelation von Elastizitätsmodul und Festigkeit im Vergleich verschiedener Werkstoffe

Werkstoff	Elastizitätsmodul E [GPa]	Festigkeit $\sigma$ [MPa]
Polyethylen weich (PE)	0,5	23 <sup>1)</sup>
Polyamid 11 (PA)	1,0	56 <sup>1)</sup>
Empress 1	67	111 <sup>2)</sup>
Empress 2	96	290 <sup>2)</sup>
Baustahl St 37	210	500 <sup>1)</sup>
Zirkonoxid ( $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ stab.)	220	950 <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Zugfestigkeit, <sup>2)</sup> Biegefestigkeit

Quellen: PE, PA: MICHAELI (1991), St 37: N. N. / DUBBEL (1995),  $ZrO_2$ : MAIER (1995)

etabliert haben, weisen nach den Untersuchungen von Fischer et al. (1998) in Übereinstimmung mit den Angaben des Informationszentrums Technische Keramik (1998) deutlich höhere Weibullmodule (bis 20) auf. Die Grösse des Weibullmoduls, d. h. die Streuung der Festigkeitswerte, hat eine wichtige Bedeutung, da die mechanische Zuverlässigkeit als umso geringer einzuschätzen ist, je kleiner der Weibullmodul ist.

Die Biegefestigkeit wird durch eine Vielzahl von Randbedingungen beeinflusst. So ist die ermittelte Biegebruchspannung insbesondere abhängig von folgenden Parametern: Oberflächenrauheit und Planparallelität der Probenoberflächen, Geometrie der Lasteinleitung (3- oder 4-Punkt-Biegeeinrichtung), Kontaktbedingungen an den Stütz- und Lastrollen der Biegeeinheit, Traversengeschwindigkeit (Lastrate) der Prüfmaschine und Umgebungsmedium. Deshalb treten oft Diskrepanzen zwischen den von verschiedenen Prüflabors dokumentierten Biegefestigkeitswerten ein und desselben Werkstoffs auf.

Um das mechanische Kurzzeitverhalten zuverlässiger zu charakterisieren, ist es deshalb sehr wichtig, zusätzlich zur Biegefestigkeit auch die Risszähigkeit zu bestimmen, denn die Risszähigkeit ist die leichter reproduzierbare, da präparationsunabhängigere Messgrösse. Der Messwert der Risszähigkeit wird z. B. nicht beeinflusst von der Oberflächenbeschaffenheit der Probe. Es wird beim Risszähigkeitsversuch letztlich getestet, bei welcher Last sich der Riss am Kerbgrund (Sollbruchstelle) ausbreitet und zum Bruch der Probe führt, denn die Risszähigkeit charakterisiert den Widerstand, den ein Werkstoff einem sich ausbreitenden Riss entgegensetzt. Je kleiner der Wert für die Risszähigkeit ist, desto spröder und damit rissanfälliger ist ein Werkstoff. Versuchstechnisch kritisch ist deshalb nur die Breite des Kerbgrundes. Bei einer Breite  $> 100 \mu m$  wird ein Wert gemessen, der über der wahren Risszähigkeit liegt; d. h. der Werkstoff ist real spröder, als das Ergebnis vortäuscht. Bei der vorliegenden Studie konnte eine Rissgrundbreite von ca.  $40 \mu m$  realisiert werden. Die ermittelten Werte repräsentieren daher die realen Risszähigkeiten.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die Risszähigkeit von Empress 2 mehr als doppelt so hoch ist wie die von Empress 1. Dies bedeutet eine deutliche mechanische Verbesserung. Der Elastizitätsmodul der neuen Empress-Variante ist 40% grösser als der von Empress 1. Ein höherer E-Modul hat Vor- und Nachteile: Vorteilhaft ist die mit wachsendem E-Modul zunehmende, beim Kauen natürlich wichtige Formstabilität. Nachteilig ist die geringere elastische Dehnung und damit die wachsende Affinität, Spannungen aufzunehmen. Dieser grundlegende Zusammenhang wird durch das Hooksche Gesetz beschrieben. Dieses Gesetz lautet:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2)$$

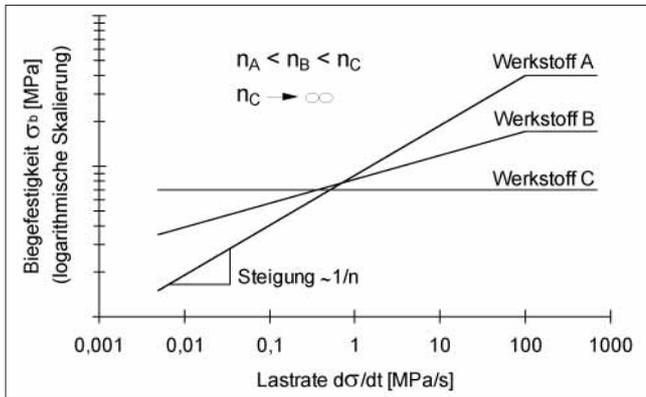


Abb. 3 Prinzipielle Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Lastrate, i. e. des Anstiegs der Beanspruchung im Werkstoff pro Zeitintervall.

mit  $\sigma$  als Spannung,  $E$  als Elastizitätsmodul und  $\varepsilon$  als elastische Dehnung. Der lineare Zusammenhang zeigt an, dass ein Material bei gleichbleibender Dehnung umso stärker beansprucht («gestresst») wird, je höher der werkstoffspezifische Elastizitätsmodul ist. Festigkeit und  $E$ -Modul eines Werkstoffs sind also eng miteinander verknüpft. Besitzt ein Werkstoff eine höhere Festigkeit als ein anderer Werkstoff, ist in der Regel auch sein Elastizitätsmodul höher im Vergleich zu diesem anderen Werkstoff. Dies veranschaulicht Tabelle III exemplarisch für einige Werkstoffe aus den drei Werkstoffgruppen Metalle, Polymere und Keramiken.

Die Härte ist neben anderen Parametern derjenige, der Einfluss auf das Abrasionsverhalten eines Werkstoffs hat. Vorteilhaft für das mastikatorische System ist eine Härte, die etwas niedriger liegt als die des Schmelzes, um die natürliche Hartschicht der okkludierenden Zähne zu schonen. Nach den Untersuchungen von ESSER et al. (1998) beträgt die Vickershärte von natürlichem Schmelz ca. 170 MPa. Beide Empressvarianten liegen damit deutlich oberhalb dieses Wertes.

Der Biegefestigkeitswert definiert die initiale Festigkeit, d. h. er repräsentiert das mechanische Kurzzeitverhalten eines Werkstoffs. Gerade Keramiken neigen aber als spröde Werkstoffe zu unterkritischem Risswachstum. Das bedeutet, dass sich Mikrorisse langsam im Material ausbreiten können. Derartige Mikrorisse können zu einer solchen Länge anwachsen, dass das keramische Bauteil schliesslich bei Lasten frakturiert, die den Werkstoff weit unterhalb der Biegefestigkeit beanspruchen. Die Geschwindigkeit  $v$ , mit der ein solcher Mikroriss wächst, i. e. die Rissverlängerung da im Zeitintervall  $dt$  ist gegeben durch (FETT & MUNZ 1991)

$$v = \frac{da}{dt} = A^* \left( \frac{K_I}{K_{Ic}} \right)^n \quad (3)$$

mit  $A^*$  und  $n$  als Parameter des unterkritischen Risswachstums,  $K_I$  als Spannungsintensitätsfaktor und  $K_{Ic}$  als kritischer Spannungsintensitätsfaktor, i. e. als Risszähigkeit. Gleichung 3 verdeutlicht, dass sich ein Mikroriss umso schneller in einem Werkstoff ausbreitet

1. je kleiner die Risszähigkeit  $K_{Ic}$  ist,
2. je kleiner  $n$  ist (da  $K_I$  immer kleiner bzw. im Grenzfall gleich  $K_{Ic}$  ist) und
3. je grösser  $A^*$  ist.

Ausgehend vom Niveau der initialen Biegefestigkeit, i. e. der Inertfestigkeit, bestimmen die vom Umgebungsmedium (Feuchte und Temperatur) abhängigen Parameter  $K_{Ic}$ ,  $n$  und  $A^*$

im Zusammenspiel die Veränderung des Festigkeitsverhaltens über einen längeren Zeitraum. Den grössten Einfluss dieser drei Parameter hat der Koeffizient  $n$ , da sich dieser Zahlenwert exponentiell auf die Rissgeschwindigkeit  $v$  auswirkt. Die Bedeutung des Koeffizienten  $n$  wird in Abbildung 3 veranschaulicht. In der Grafik ist die prinzipielle Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Lastrate (Anstieg der Beanspruchung im Werkstoff pro Zeitintervall) dargestellt, wie sie im dynamischen Biegetest ermittelt wird. Je geringer die Lastrate ist, i. e. je länger der Werkstoff gestresst wird, desto geringer ist die Beanspruchungsgrenze (Biegefestigkeit). Je stärker die Biegefestigkeit mit abnehmender Lastrate abfällt, i. e. je grösser die Steigung des sich ergebenden Geradenabschnitts ist, desto stärker ist der Einfluss der unterkritischen Rissausbreitung. Da sich der Risswachstumskoeffizient  $n$  umgekehrt proportional zur Steigung verhält (Steigung  $\sim 1/n$ ) bedeutet dies, dass ein Werkstoff eine umso grössere Neigung zum unterkritischen Risswachstum hat, je kleiner der Risswachstumskoeffizient  $n$  ist. Ab einem Spannungsanstieg von ca. 100 MPa/s wird die Biegefestigkeit unabhängig von der Lastrate (Geradenabschnitt als Parallele zur  $x$ -Achse), da bis zum Bruch kein unterkritisches Risswachstum mehr auftreten kann. Dies ist der Bereich der erwähnten Inertfestigkeit.

Abbildung 3 macht deutlich, dass ein Werkstoff mit einer hohen initialen Festigkeit und einem kleinen  $n$ -Wert (Werkstoff A) nach einem längeren Zeitraum auf das gleiche oder sogar unter das Festigkeitsniveau eines anderen Werkstoffs fallen kann, der zwar eine geringere initiale Festigkeit, dafür aber einen grösseren Risswachstumskoeffizienten  $n$  aufweist (Werkstoff B). Bezüglich der Langzeitfestigkeit ideal verhält sich Werkstoff C, da dieser auch nach sehr langer Belastungszeit, i. e. bei sehr kleiner Lastrate, seine initiale Festigkeit (Inertfestigkeit) zu 100% behält. Ein solches zeitunabhängiges Festigkeitsverhalten existiert aber insbesondere für keramische Werkstoffe real nicht.

Abbildung 2 ist zu entnehmen, dass Empress 2 im Vergleich zu Empress 1 über einen fiktiv angenommenen Zeitraum von fünf Jahren mit einer etwas mehr als doppelt so hohen permanenten Zugspannung (58 MPa im Vergleich zu 24 MPa; ca. 140% Steigerung) gestresst werden kann, wenn bei beiden Werkstoffen die gleiche Annahme für die Ausfallwahrscheinlichkeit (1%) zugrunde gelegt wird. Das Diagramm zeigt jedoch auch, dass diese Langzeitbeanspruchbarkeit von Empress 2 nicht im gleichen Masse wie die (Kurzzeit-)Biegefestigkeit gesteigert werden konnte (290 MPa im Vergleich zu 111 MPa; ca. 160% Steigerung). Aus Tabelle II ist zu entnehmen, dass Empress 2 zwar einen um etwa eine Grössenordnung kleineren Risswachstumskoeffizienten  $A^*$  hat, was sich positiv auf die Langzeitfestigkeit auswirkt (vgl. Gleichung 3). Empress 2 besitzt aber auch einen um 5 Zähler kleineren Risswachstumskoeffizienten  $n$ . Im Sinne der oben beschriebenen Zusammenhänge beschleunigt dies das unterkritische Risswachstum in dem Masse, dass trotz der ca. 160% höheren initialen Festigkeit von Empress 2 die Langzeitbeanspruchbarkeit auf 5 Jahre gerechnet nur ca. 140% besser ist.

Da Diskrepanzen zwischen den in verschiedenen Prüflabors ermittelten (Kurzzeit-)Biegefestigkeitswerten von Empress 2 bestanden, wurde von uns über die dokumentierten Testreihen hinaus eine Biegefestigkeitsprüfung an einer weiteren Empress-2-Charge durchgeführt. Die Prüfkörper dieser zusätzlichen Charge wurden im Gegensatz zu den Prüfkörpern für die oben dokumentierten Tests vom Hersteller selbst fertig präpariert. Die erhaltenen Einzelmesswerte wurden im Gegensatz zu oben in Anlehnung an die Dentalnorm DIN 13925 gemäss der Statistik nach Gauss ausgewertet. Ausserdem wurde der Biegetest entsprechend der Dentalnorm mit Drei-Punkt-Belastung und

nicht wie in der technischen DIN EN 843-1 empfohlen mit Vier-Punkt-Belastung durchgeführt. Damit ergab sich eine mittlere Biegefestigkeit von  $417 \pm 39$  MPa. Es konnte gezeigt werden, dass die Prüfkörper dieser letzten Charge druckeigenbeanspruchungsbehaftet waren. Diese Druckeigenbeanspruchungen wurden vermutlich beim Beschleifen der Prüfkörper in der Werkstoffoberfläche induziert. Nur an eigenspannungsfreien Prüfkörpern lässt sich im Biegetest aber die reale Werkstofffestigkeit ermitteln. Eine differenzierte Darstellung dieser Problematik und deren klinischer Bedeutung wird zur Zeit für eine Veröffentlichung vorbereitet.

## Schlussfolgerung

Der Nachfolger des seit 1989 etablierten dentalkeramischen Werkstoffs IPS-Empress, Empress 2, zeigt bessere mechanische Werte als sein Vorgänger. In Bezug auf das mechanische Kurzzeitverhalten übertrifft Empress 2 den Werkstoff Empress 1 deutlich. Die Biegefestigkeit konnte annähernd um den Faktor 3, die Risszähigkeit um den Faktor 2 gesteigert werden. Der um ca. 40% grössere Elastizitätsmodul von Empress 2 ist mechanisch allerdings eher nachteilig. Die Härten der beiden Empressvarianten sind miteinander vergleichbar und liegen deutlich über der Härte des Schmelzes.

Es konnte im Rahmen des Rechenmodells gezeigt werden, dass auch die Langzeitfestigkeit von Empress 2 in Bezug auf einen Zeitraum von 5 Jahren verbessert werden konnte. Aufgrund des etwas geringeren Risswachstumskoeffizienten  $n$  von Empress 2 muss diese Keramik jedoch nach längerer Tragedauer stärkere prozentuale Einbussen ihrer initialen Festigkeit hinnehmen als Empress 1. Deshalb könnten sich auch klinisch die statistischen Ausfallwahrscheinlichkeiten der beiden Empressvarianten im Lauf von einigen Jahren tendenziell einander nähern.

## Summary

FISCHER H, MARX R: **Mechanical properties of Empress 2** (in German). *Acta Med Dent Helv* 4: 141–145 (1999)

A modification of the dental all-ceramic system IPS-Empress, the system Empress 2 was recently introduced to the market. The objective of this study was to evaluate the mechanical characteristics of Empress 2 compared to those of Empress 1. The following characteristic properties were evaluated: flexural strength, Weibull modulus, fracture toughness, Young's modulus, Vicker's hardness and the coefficients of subcritical crack growth.

Empress 2 showed higher values for flexural strength and for fracture toughness compared to Empress 1. The long-term strength could be improved as well. The increase of the long-term durability, however, is not as pronounced as the increase of the short-term flexural strength.

## Résumé

Le système Empress 2, évolution de la céramique dentaire IPS-Empress, a été introduit sur le marché depuis peu. Le but de cette étude était d'évaluer les caractéristiques techniques de l'Empress 2 comparées à celles de l'Empress 1. Pour ce faire, les caractéristiques physiques suivantes de chacun des deux systèmes ont été évaluées: résistance à la flexion, module de Weibull, résistance contre la fissuration, module d'élasticité, dureté Vickers et les paramètres de croissance de fissure sous-critique. Il s'avère que l'Empress 2 présente une résistance meilleure à la flexion et une résistance contre la fissuration significativement

plus élevée comparé à l'Empress 1. La solidité à long terme s'avère améliorée, mais dans une proportion moindre que l'amélioration de la résistance à la flexion.

## Literatur

- BIENIEK K: Randspaltbreite bei aktuellen Vollkeramiksystemen. *Phillip J* 10: 223 (1993)
- BIENIEK K W, MARX R: Die mechanische Belastbarkeit neuer vollkeramischer Kronen- und Brückenmaterialien. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 104: 284–289 (1994)
- BRODBECK U, STUDER S, LEHNER C: Sechs Jahre Erfahrung mit einem vollkeramischen Restaurationssystem. *Dent Labor* 43: 1793 (1995)
- DIN 13925: Dentalkeramische Massen. Beuth, Berlin (1988)
- DIN-Entwurf 51109: Prüfung von keramischen Hochleistungswerkstoffen, Ermittlung der Risszähigkeit  $K_{Ic}$ . Beuth, Berlin (1991)
- DIN EN 843-1: Monolithische Keramik, Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur, Teil 1: Bestimmung der Biegefestigkeit. Beuth, Berlin (1995)
- DIN ENV 843-2: Monolithische Keramik, Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur, Teil 2: Bestimmung der elastischen Konstanten. Beuth, Berlin (1998)
- DIN ENV 843-3: Monolithische Keramik, Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur, Teil 3: Bestimmung der Parameter des unterkritischen Risswachstums aus Biegefestigkeitsprüfungen mit konstanter Spannungsrate. Beuth, Berlin (1996)
- DIN ENV 843-4: Monolithische Keramik, Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur, Teil 4: Härteprüfung nach Vickers, Knoop und Rockwell. Beuth, Berlin (1994)
- DIN ENV 843-5: Monolithische Keramik, Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur, Teil 5: Statistische Auswertung. Beuth, Berlin (1997)
- ESSER M, TINSCHERT J, MARX R: Materialkennwerte der Zahnhartsubstanz des Rindes im Vergleich zur humanen Zahnhartsubstanz. *Dtsch Zahnärztl Z* 53: 713–717 (1998)
- FETT T, MUNZ D: Methods of determining subcritical crack growth by static lifetime tests with natural and artificial cracks. *Testing Evaluation* 11: 461–466 (1991)
- FISCHER H, EDELHOFF D, MARX R: Mechanische Beanspruchbarkeit von Zirkonoxid-Wurzelstiften. *Dtsch Zahnärztl Z* 53: 854–858 (1998)
- MAIER H R: Leitfaden technische Keramik: Werkstoffkunde II, Keramik. 3. Aufl. Mainz-Druck, Aachen (1995)
- MARX R, WEBER M: Vollkeramische Kronen- und Brückenmaterialien – Eigenschaften und Anforderungen. 1. Aufl. Universitätsklinikum der RWTH Aachen, Klinik für Zahnärztliche Prothetik, LuFG Zahnärztliche Werkstoffkunde, Selbstverlag, Aachen (1997)
- MICHAELI W: Werkstoffkunde II, Kunststoffe - Verarbeitung und Eigenschaften, 2. Aufl. Verlag J. A. Mayer, Aachen (1991)
- MUNZ D, FETT T: Mechanisches Verhalten keramischer Werkstoffe. Springer, Berlin (1989)
- N N: Brevier Technische Keramik. Informationszentrum Technische Keramik (IZTK) in Zusammenarbeit mit der Technischen Kommission der Fachgruppe Technische Keramik. Verband der keramischen Industrie, Selbstverlag, Selb (1998)
- N N DUBBEL: Taschenbuch für den Maschinenbau, 18. Aufl. Springer, Berlin (1995)
- WOHLWEND A: Verfahren und Ofen zur Herstellung von Zahnersatzteilen. Europäische Patentanmeldung 0 231 773, Anmelder: Etablissement Dentaire Ivoclar (1987)