

Richtig gerechnet statt mutig geraten bringt Verblendung von Zirkoniumdioxidgerüsten auf Metallkeramikniveau

Ursache von Chipping bei keramisch verblendeten Kronen und Brücken identifiziert – DeguDent legt wissenschaftliche Studien zu Chipping vor



Ein Abplatzen der Verblendkeramik tritt erfreulich selten auf. Herstellerunabhängig kommt dem Effekt („Chipping“) aber bei Zirkoniumdioxidrestaurationen eine etwas größere Bedeutung zu als bei Metallkeramik. Eine theoretisch fundierte Behandlung dieses Problems mit experimentellem Nachweis hat nun zu optimierten Empfehlungen für die Abkühlung nach dem Aufbrennen der Verblendung geführt – eine verblüffend komplexe Rechenaufgabe, ein klares Ergebnis speziell für das Zirkoniumdioxid-System *Cercon/Cercon ceram kiss* und eine überzeugende Bestätigung der gewonnenen Erkenntnisse in Simulationen einer 15-jährigen Tragezeit.

Kürzlich hat Prof. Dr. Thomas Kerschbaum, Köln, eine grundlegende

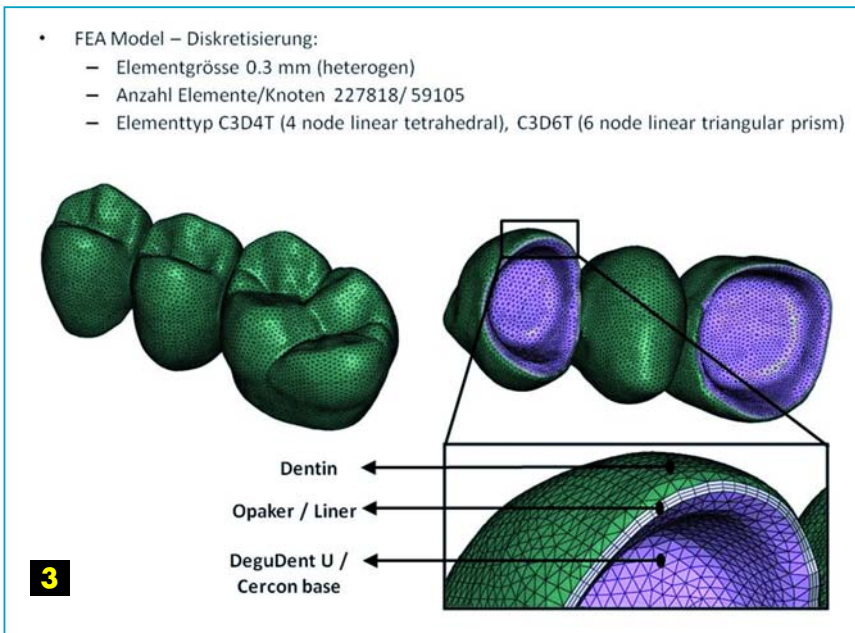
Studie zu Zirkoniumdioxidrestaurationen veröffentlicht [1]. Darin stellt er ganz auf den niedergelassenen Zahnarzt ab, der nach einer alltags-tauglichen Formel für den Erfolg seiner Zirkoniumdioxidrestaurationen sucht. Kerschbaum hat über ein zahntechnisches Labor Zugriff auf die Patientenkarteeien von drei Zahnarzt-Kunden erhalten und konnte damit fünf Jahre Praxiserfahrungen (2002 bis 2006) mit *Cercon* auswerten. Bei den zahngetragenen Restaurationen registrierte Prof. Kerschbaum insgesamt 8 Prozent Ausfälle, was er bei einem noch neuen Verfahren mit einem innovativen Werkstoff wie Zirkoniumdioxid als durchaus in Ordnung bewertete – zumal die Ursachen für etwaiges Versagen eher im Chipping (Abschilferung der Verblendkeramik) als in etwaigen Gerüstbrüchen zu suchen seien. Dabei kann das Abplatzen der



überreicht durch

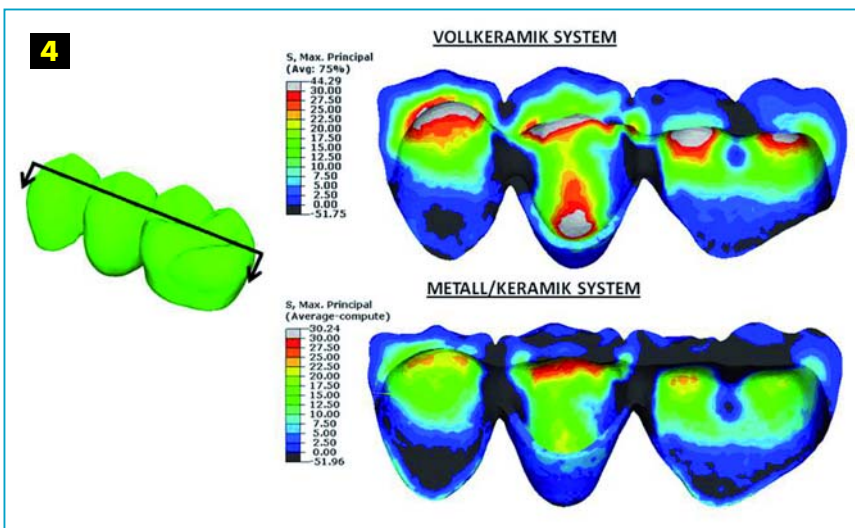
DeguDent

A Dentsply International Company



Die verkleinerte anatomische Zahnform – für eine gleichmäßige Unterstützung der Verblendkeramik – ist hier „state of the art“ (Abb. 1 und 2).

Trotz der guten Ergebnisse ist es natürlich wünschenswert, die im Vergleich leicht höheren Chippingquoten bei Zirkoniumdioxidrestorationen an die der klassischen Metallkeramik anzugleichen. Als erste Frage muss geklärt werden, warum anscheinend Vollkeramikrestorationen anfälliger für Chipping der Verblendkeramik sind als Metallkeramiken. Eine Ursache könnten die unterschiedlichen Wärmekapazitäten beziehungsweise -leitfähigkeiten bei Oxidkeramiken im Unterschied zu Metallkeramiken sein. Die Anfangsthese lautete: Es gibt einen Unterschied beim Abkühlverhalten von Vollkeramik im Vergleich zur Metallkeramik. Um diese Hypothese zu beweisen, muss eine sehr saubere Simulation der auftretenden mechanischen und thermischen Spannungen während des Verblendprozesses (Ofenbrand) durchgeführt werden. Denn die Abkühlung nach dem Aufbrennen der Verblendung ist womöglich der kritische Verarbeitungsschritt. Dazu muss eine grundsätzlich neue Art von Modellrechnungen verwendet werden, die bisher so für dentale „Baulemente“ noch nie gerechnet wurde.



Verblendkeramik für den Frontzahnbereich und bei Brücken bis zu den Prämolaren sogar zahlenmäßig als vernachlässigbar angesehen werden. Zusammenfassend stellte Kerschbaum fest:

- Verbinder und Kappen aus Zirkoniumdioxid sind sehr bruchfest. In den dokumentierten Ausnahmefällen sind die Frakturen in der Regel kurz nach der Eingliederung aufgetreten. Dies weist auf technische Fehler bei der Herstellung beziehungsweise Präparati-

on hin, die nicht dem Werkstoff oder dem System anzulasten sind.

- Misserfolge dürften auch auf individuelle Fehler des behandelnden Zahnarztes zurückzuführen sein, wobei zurzeit noch unklar ist, an welcher Stelle des Behandlungsregimes diese liegen. Ein Kardinalfehler wäre jedoch ein Einschleifen ohne Wasserkühlung und der Verzicht auf eine anschließende Oberflächenpolitur.
- Das Hauptaugenmerk aber liegt auf der zahntechnischen Gerüstgestaltung und der werkstoffgerechten Verarbeitung.

Solche Aufgaben zu „rechnen“ ist viel schwieriger, als man im ersten Moment denken mag. Rechenmodelle für Deformationen bei verschiedenen Materialien gibt es schließlich schon lange, zum Beispiel für Crash-Tests in der Autoindustrie. Aber ein Zahn oder eine Restauration sind ein komplexeres System: Während man beim Auto näherungsweise mit nur einem Werkstoff rechnen darf, sind es bei einer Restauration mindestens Gerüst, Liner, Dentin – und damit schon drei verschiedene Schichten. In der von DeguDent in Auftrag gegebenen wissenschaftlichen Studie wurden die numerischen Simulationen durch sogenannte Finite-Element-Analysen berechnet. Dabei

wird ein komplexer Körper in Untervolumina aufgeteilt und die Spannungen an den Knotenpunkten berechnet (siehe Abb. 3).

Dies wurde nun in den Modellen berücksichtigt. Darüber hinaus wurde nicht – wie vielfach als Näherung üblich – die Simulation auf Körper mit zahntechnisch angenäherten Geometrien angewendet, sondern auf reale Geometrien dreigliedriger Brücken, im vorliegenden Fall eine Seitenzahnbrücke vom ersten Prämolaren auf den ersten Molaren (siehe Abb. 1 und 2). Auch wurden mehr Parameter als Input vorgelegt, deren Temperaturabhängigkeit von Raumtemperatur bis zur Verblendtemperatur erst durch aufwendige Messungen bestimmt werden musste – konkret: Wärmeausdehnungskoeffizient, E-Modul, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Viskoelastizität. Gerade die letztgenannte Größe hat sich als ungemein wichtig erwiesen, berücksichtigt sie doch das unterschiedliche Verhalten eines Werkstoffs wie Glas, je nachdem, ob eine Belastung kurz und heftig auf ihn einwirkt oder sanft, aber über einen längeren Zeitraum. Ein Extrembeispiel ist „Zauberknete“, mit der man wie mit einem Ball Tischtennis spielen kann, die jedoch bei längerem Liegen auf dem Tisch unter dem ständigen Einfluss der Schwerkraft zerfließt.

Ein bisschen von dieser Zauberknete-Eigenschaft steckt auch in Verblendkeramiken, wie die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen. DeguDent hat sie zusammen mit der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen durchgeführt. Der Aufwand wird allein dadurch deutlich, dass er die Rechenkapazität der Maschinenbau-Fakultät sprengte – man musste das Datenmaterial ins zentrale Universitäts-Rechenzentrum einspeisen.

Es wurden sowohl die Daten für das Abkühlverhalten des Systems *Cercon base/Cercon ceram kiss* als auch für das metallkeramische Vergleichssystem *Degudent U/Duceram Kiss* durchgerechnet. Zunächst erga-

ben sich für die vollkeramische Variante höhere maximale Zugspannungen bei der Verblendkeramik auf der Außenfläche. Die berechneten Zugspannungen, die an der Grenzfläche „Gerüst/Verblendung“ entstehen, haben diese Vermutung erhärtet: Rund 30 Megapascal (MPa) waren es unter Verwendung üblicher Abkühlverfahren bei Metallkeramik, bei Zirkoniumdioxid-Vollkeramik jedoch 44 MPa (Abb. 4).

Diese nur um ca. 14 MPa höhere Zugspannung bei Vollkeramiken scheint auf den ersten Blick gar nicht so unterschiedlich zu Metallkeramiken zu sein, da die Festigkeiten der Keramik bei ca. 80 MPa bei Zugbelastung liegen. Aber die Studie von Kerschbaum zeigt ja auch kein signifikant abweichendes Verhalten der Verblendkeramik bei Vollkeramiken als bei Metallkeramiken. Aber diese 14 MPa mehr können bei extremen Situationen (zum Beispiel zu dünne Wandstärken im Gerüstmaterial, keine verkleinerte anatomische Form des Zirkoniumdioxidgerüsts und damit eine erhöhte Verblendkeramiksichtstärke, Tangentialpräparation oder falscher Bissstellung) zu einem statistisch früheren Versagen führen als bei Metallkeramiken. Oder klarer ausgedrückt: Die Verarbeitungsbandbreite und die Fehlertoleranz sind durch die 14 MPa verringert, beziehungsweise die in der Verarbeitungs-

leitung beschriebenen Prozesse müssen strikt eingehalten werden.

Ein sehr interessantes Nebenresultat wird in **Abbildung 4** deutlich: Auf der Verblendkeramikoberfläche existieren Zug- und Druckspannungen nebeneinander. In der Regel wird eine Verblendkeramik in ihrem Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) so eingestellt, dass dieser leicht unterhalb des WAK des Gerüsts liegt. Dies sorgt in der Verblendkeramik für eine gewünschte Druckspannung, da diese in einem Glas deutlich höher liegen darf als die kritischere Zugspannung. Meistens ist die maximale Druckspannungsbeltung vor einem Bruch der Verblendkeramik sogar etwa zehnmal so hoch wie die entsprechende Zugspannung, die zum Versagen führt.

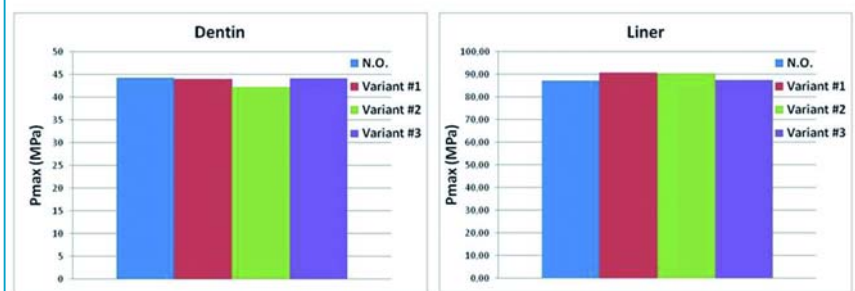
Die Simulation zeigt nun aber auch Bereiche mit Zugspannungen an, sowohl für die Metallkeramik als auch für die Vollkeramik. Das „Bauchgefühl“ hätte uns gesagt: „Die Zugspannungen bei intakten, quasi ungefährdeten Brückengerüsten liegen bei Null.“ An diesem Beispiel wird deutlich, dass das „Bauchgefühl“ bei solch komplexen Fragestellungen aber auch bei vermeintlichen Lösungsansätzen ohne wissenschaftliche Absicherung zu falschen Annahmen führen können.

– Modellvarianten:

- Variante #1 : Tg(Liner)= 595°C , Tg(Dentin) = 528°C
- Variante #2 : Tg(Liner)= 595°C , Tg(Dentin) = 595°C
- Variante #3 : Tg(Liner)= 645°C , Tg(Dentin) = 528°C

5

1. Hauptspannung (MPa) bei 25°C

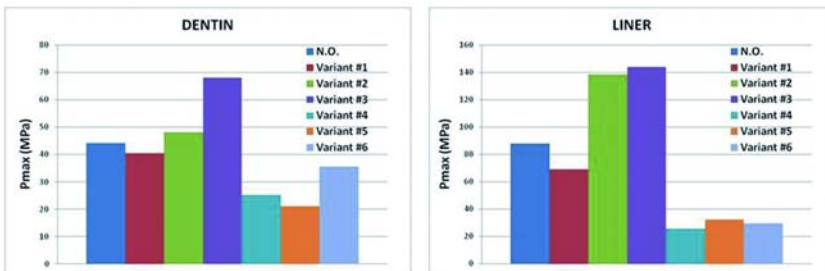


— Modellvarianten:

- Variante #1 : WAK Liner -0.5 $\mu\text{l/K}$
- Variante #2 : WAK Liner +0.5 $\mu\text{l/K}$
- Variante #3: WAK Dentin -0.7 $\mu\text{l/K}$
- Variante #4: WAK Dentin +0.9 $\mu\text{l/K}$
- Variante #5: WAK Dentin +0.5 $\mu\text{l/K}$, WAK Liner -0.5 $\mu\text{l/K}$
- Variante #6: WAK Dentin +0.9 $\mu\text{l/K}$, WAK Liner -0.5 $\mu\text{l/K}$

6

1. Hauptspannung (MPa) bei 25°C



- Eine Änderung des WAK hatte eine Minimierung der Zugspannungen zur Folge, wenn die Differenz der WAKs zwischen Gerüst und Verblendkeramik verringert wurde (Abb. 6). Dabei verringert sich aber auch die gewünschte Druckspannung.
- Eine Änderung der Abkühlrate hatte einen signifikanten Einfluss auf die maximale Zugspannung des Glases (Abb. 7 bis 9).

Interessanterweise zeigt eine Anhebung des WAK-Werts auf $9,8 \times 10^{-6}/\text{K}$ die geringste Zugspannung. Nun sollte man meinen, eine Verblendkeramik für Zirkoniumdioxid sollte somit möglichst einen hohen WAK haben. Reale Versuche mit solchen Keramiken zeigen aber ein Versagen der Verblendung schon innerhalb des Abkühlvorgangs, das heißt, die Verblendkeramik kam mit Abplatzungen schon aus dem Ofen. Warum?

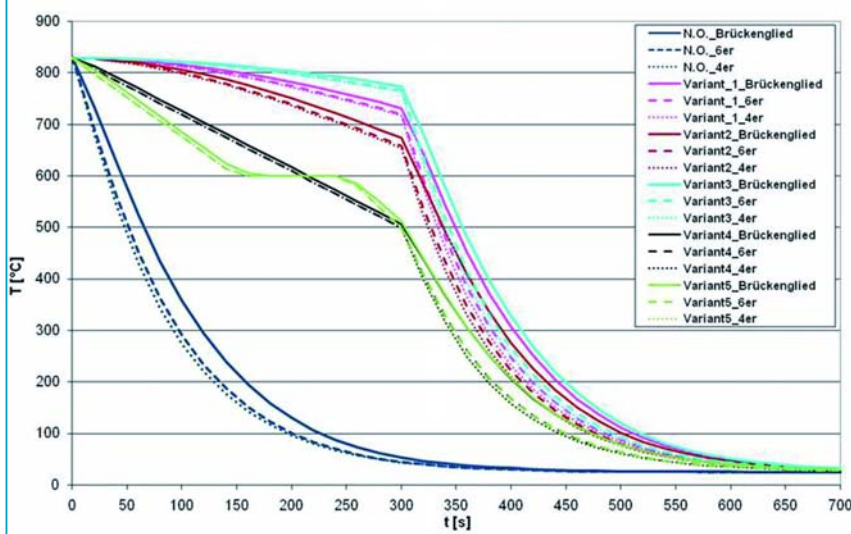
Die Ursache zeigte uns ebenfalls die Simulation: Bei der Abkühlung durchlief die Zugspannung unterhalb der Glastemperatur ein Maximum, welches oberhalb der maximalen Zugspannungsbelastung der Keramik lag und somit zum Versagen führen musste.

Dieses Beispiel zeigt ganz klar zwei Fakten: Erstens ist die Güte und somit Vorhersagefähigkeit der Simulation ausgezeichnet und zweitens ist dieses Verhalten aufgrund einfacher Vorstellungen und Formeln nicht ersichtlich. Die für den Zahntechniker entscheidenden Optimierungsmöglichkeiten zeigen aber die Ergebnisse der unterschiedlichen Abkühlraten. Der Clou dabei: Es darf nicht einfach „aus dem Bauch heraus“ vorsichtiger, zum Beispiel über einen beliebig längeren Zeitraum, abgekühlt werden. Stattdessen gibt es spezifische Haltetemperaturen und Kühlgeschwindigkeiten in den dazwischenliegenden Phasen.

Zwar besteht das Ziel grundsätzlich darin, die Zugspannungen in der fertigen Brücke zu minimieren. Zusätzlich muss man

Optimierung des Abkühlungsprofils

7



Zurück zum Thema „Verarbeitungsbandbreite und Fehlertoleranz“: Es lässt sich festhalten, dass unabhängig von der speziellen Verblendkeramik die Verarbeitung bei Zirkoniumdioxidrestorationen sensibler ist als bei Metallkeramik. Die Ursache kann in der unterschiedlichen Wärmekapazität und -leitfähigkeit der unterschiedlichen Gerüstmaterialien liegen. Wie ließe sich aber eine Optimierung erreichen, mit der eine Angleichung möglich würde? Auch hier

gibt die Simulation eine Antwort. Es wurden unterschiedliche Parameter für die Verblendkeramik simuliert: Brenntemperatur (beziehungsweise Glastemperatur) und WAK einerseits und alternative Abkühlraten andererseits. Folgende Resultate ergaben sich daraus:

- Eine Änderung der Brenntemperatur hatte keinen Einfluss auf die maximale Zugspannung in der Verblendkeramik (Abb. 5).

jedoch darauf achten, beim Abkühlvorgang die Druckspannung nicht zu stark zu verringern, während die Zugspannung durch eine geänderte Abkühlung gesenkt wird, da hohe Druckspannungen die Verblendkeramik schützen. Während der gesamten Durchführung gibt es immer wieder kritische Phasen, in denen ein Temperatur- beziehungsweise Zeit-Puffer wünschenswert ist. Das lässt sich dank des verfeinerten Modells heute richtig rechnen. Richtig raten lässt es sich kaum, dafür gibt es umso mehr Möglichkeiten, mit mutigem Raten danebenzuliegen und die Lebensdauer einer Zirkoniumdioxidrestauration dadurch zu gefährden.

Die Vorhersagbarkeit der Simulation ist erstaunlich gut, das Ergebnis – also die spezielle Temperaturführung während der Abkühlungsphase – eindeutig. Für eine Empfehlung und mit der damit verbundenen Verpflichtung gegenüber dem Zahntechniker sollte eine

8	Dentin
Nicht Optimierte Variante (N.O.)	44.3
Variante #1	37.2
Variante #2	30.8
Variante #3	38.9
Variante #4	28.9
Variante #5	24.6

praktische Überprüfung erfolgen. Die regulären Kausimulationen zur Kompatibilitätsüberprüfung von Verblendkeramik/ Gerüst-Kombinationen, wie sie bei Degudent nach dem Verfahren der Universität

Regensburg [5] durchgeführt werden, reichen für die Bestätigung nicht aus.

Erst in der Zusammenarbeit mit der Universität Heidelberg in aggressiveren Kausimulator-Studien, die den Zeitbereich der damit abgeprüften Tragezeit in vivo deutlich verlängern, konnten die Ergebnisse der RWTH Aachen überprüft werden[4]. Der dabei verwendeten beschleunigten Lebensdauer-Simulation lag eine theoretische Tragezeit von 15 Jahren zugrunde, üblich sind bei Kausimulationen sonst fünf Jahre. Die Ergebnisse zeigt die **Abbildung 8**. Durch das modifizierte Abkühlverhalten hat das Vollkeramiksystem die gleiche Bandbreite in der Fehlertoleranz wie Metallkeramiksysteme.

Das exakt optimierte und nunmehr empfohlene Brennprogramm mit Abkühlung ist für *Cercon ceram Kiss* in der **Tabelle** dar-

BILDLEGENDE

Abb. 1 und 2: Reale dreigliedrige Brücke als Vorlage für die Berechnungen. Gerüst aus Cercon base (Abb. 1) – verblendet mit Cercon ceram kiss (Abb. 2)

Abb. 3: Dreigliedrige Brücke in digitaler Form mit ca. 230.000 Knoten und Dreischichtaufbau (Gerüst Cercon base, Liner und Cercon ceram kiss Dentin beziehungsweise Degudent U, Duceram Kiss Opaker und Duceram Kiss Dentin)

Abb. 4: Spannungsverteilungen bei Vollkeramikbrücke im Vergleich zur Metallkeramikbrücke. In schwarz die Druckspannungen und in Farbe die Zugspannungen

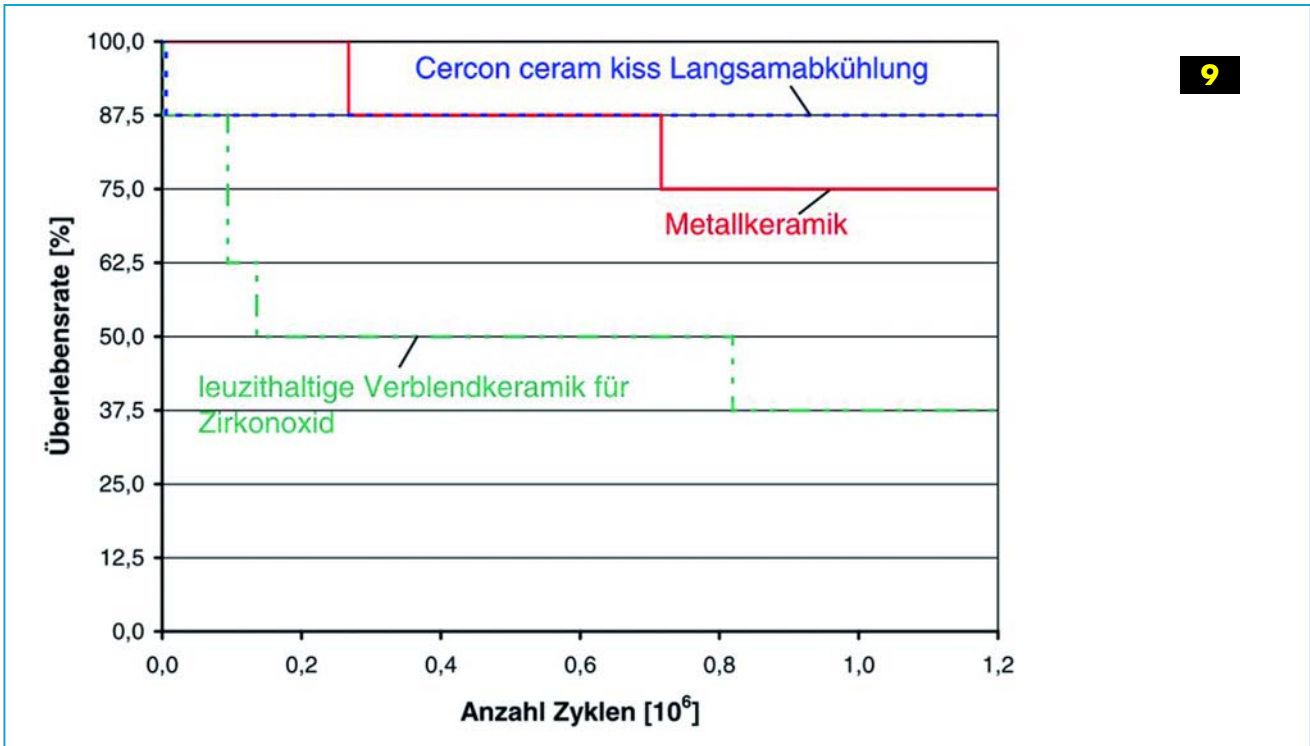
Abb. 5: Abhängigkeit der maximalen Zugspannung (1. Hauptspannung) auf der Verblendkeramikoberfläche von der Glas-temperatur T_g (und somit der Brenntemperatur)

Abb. 6: Abhängigkeit der maximalen Zugspannung auf der Verblendkeramikoberfläche vom WAK-Wert der Verblendkeramik.

Abb. 7: Verschiedene Abkühlprofile (Varianten 1 bis 5 und nichtoptimierte Variante NO, das heißt normale Abkühlung)

Abb. 8: Maximale Zugspannungen in MPa resultierend aus den verschiedenen Abkühlraten. NO = Nichtoptimierte Variante, das heißt normale Abkühlung

Abb. 9: Unterschiedliches Versagen der Verblendkeramik bei unterschiedlichen Systemen (Duceram Kiss auf NEM, leuzithaltige Verblendkeramik auf Cercon, modifizierte Abkühlrate von Cercon ceram Kiss auf Cercon)



cercon ceram Kiss - Cergo Compact / Press / Pro Fire													
	Trocknen		Schließen	Vorwärmen		Anstieg	Vakuum			Endtemp.	Halten		Kühlen
	°C	min	min	°C	min	°C/min	cont / off	ein °C	aus °C	°C	V min	min	min
Pastenliner1	135	6:00	2:00	575	3:00	55	cont	575	970	970	-	1:00	-
Pastenliner2	135	6:00	2:00	575	3:00	55	cont	575	960	960	-	1:00	-
Dentin 1	135	2:00	3:00	450	3:00	55	cont	450	830	830	-	1:30	6:00
Dentin 2	135	2:00	3:00	450	3:00	55	cont	450	820	820	-	1:30	6:00
Glanzbrand	135	0:00	3:00	450	2:00	55	off	-	-	800	-	1:00	6:00

Tab.: Exakt optimiertes und empfohlenes Brennprogramm mit Abkühlung für Cercon ceram Kiss

FEM, Temperaturabhängigkeit, Wärmekapazität und -leitung

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist ein numerisches Verfahren zur näherungsweise Lösung von komplexen Spannungsberechnungen, die durch einfache Formeln nicht mehr berechnet werden können. Dabei wird das Berechnungsgebiet in eine beliebig große Anzahl Elemente unterteilt. Diese Elemente sind „endlich“ (*finit*, siehe Abb. 2 auf Seite 12) und nicht unendlich (*infini*) klein, die Anzahl der Elemente ist „endlich“ und nicht unendlich. Das Aufteilen des Gebiets in eine bestimmte Anzahl Elemente finiter Größe, die sich mit einer endlichen Zahl von Parametern beschreiben lassen, gab der Methode den Namen „Finite-Elemente-Methode“.

Die Wärmekapazität ist eine Materialeigenschaft und gibt an, wie viel Wärme ΔQ ein Körper pro Temperaturänderung ΔT speichern kann. Diese Größe ist bei Vollkeramiken höher als bei Metallen und Legierungen.

Die Wärmeleitfähigkeit eines Festkörpers ist sein Vermögen, thermische Energie mittels Wärmeleitung in Form von Wärme zu transportieren. Die (spezifische) Wärmeleitfähigkeit in Watt pro Kelvin \times Meter ($W/[K \cdot m]$) ist eine temperaturabhängige Materialkonstante. Vollkeramiken zeigen einen anderen Verlauf der Temperaturabhängigkeit als Legierungen beziehungsweise Metalle.

Viskoelastizität

Als Viskoelastizität wird die Eigenschaft von Stoffen genannt, die bei Einwirkung einer Kraft sowohl fließen als auch elastisch verformt werden, wobei das Verhältnis von viskosem zu elastischem Verformungsanteil zeitabhängig ist. Besonders deutlich zeigt die „Hüpf- oder Zauberknete“, ein Silikonpolymer, diese Viskoelastizität: Eine zu einer Kugel geformte Probe zerfließt langsam unter dem Einfluss der Schwerkraft. Bei Einwirkung kurzzeitiger beziehungsweise größerer Kräfte zeigt sich der Ball elastisch: Wirft man ihn gegen die Wand, so prallt er unverformt zurück. Gläser im flüssigen Zustand (Verblendkeramiken) über dem Glaspunkt (T_g) sind viskoelastisch und unterhalb T_g nahezu elastisch. Bei der Berechnung der „einfrierenden“ Spannungen um den Bereich des T_g ist die Einbeziehung der temperaturabhängigen Viskoelastizität wichtig. Bei rein elastischer Rechnung ist die maximale Zugspannung bei Raumtemperatur nur abhängig von der Differenz der WAK von Gerüst und Verblendkeramik.

gestellt. Speziell bei Verwendung eines *Multimat NT Touch&Press*-Ofens ist die einprogrammierte Kühlstufe zu wählen.

Es ist nicht ausgeschlossen, dass die neuartigen Rechenverfahren in Zukunft sogar eine weitere Optimierung der heute verfügbaren Zirkoniumdioxid-Verblendkeramiken ermöglichen werden.

Das grundsätzliche Problem „Chipping“ wurde von DeguDent in Zusammenarbeit mit den Universitäten Aachen und Heidelberg auf der Basis eines grundlegend neuen Ansatzes untersucht. Dabei wurden alle temperaturabhängigen Parameter durch

Messungen bestimmt und die viskoelastischen Eigenschaften der Verblendkeramik mit einbezogen [2, 3]. Auch ging unter anderem erstmals ein Mehrschicht-Modell in umfangreiche Berechnungen ein und lieferte ein optimiertes Abkühlverfahren. Seine konsequente Anwendung dürfte die bereits heute geringe Zahl der Abschliffen von Zirkoniumdioxid-Verblendkeramik zukünftig noch signifikant reduzieren und das ganze Vollkeramiksystem noch robuster machen. Die Ursache für ein erhöhtes Chippingverhalten zeigte sich hier unabhängig vom Verblendkeramiktyp, das

heißt, dies ist ein grundsätzliches Verhalten bei Vollkeramiken.

Bei den Abhilfemaßnahmen gehen allerdings verblendkeramik-spezifische Parameter ein. Dies bedeutet, dass der oben beschriebene Brennablauf nicht ohne Risiko auf andere Zirkoniumdioxid-Verblendkeramiken übertragen werden kann.

**Dr. Markus Vollmann,
Dipl.-Ing. ZTM Carsten Wiesner,
Dr. Lothar Völkl,
Dr. Udo Schusser,
Hanau**

LITERATUR-NACHWEIS

- [1] Kerschbaum Th, Faber FJ, Noll FJ, Keiner M, Hürther W, Schumacher S, Keller E. Komplikationen von Cercon-Restaurationen in den ersten 5 Jahren. *DZZ* 2009;2:81–89.
- [2] Taskonak B, Borges GA, Mecholsky JJ Jr., Anusavice KJ, Moore BK, Yan J. The effects of viscoelastic parameters on residual stress development in a zirconia/glass bilayer dental ceramic. *Dental Materials* 2008;24: 1149–1155.
- [3] DeHoff PH, Anusavice K-J, Götzen N. Viscoelastic finite element analysis of an all-ceramic fixed partial denture. *Journal of Biomechanics* 2006;39:40–48.
- [4] Eser A, Bezold A, Wiesner C, Vollmann M. Optimization of Residual Stresses on All-Ceramic Fixed Partial Dentures Using Finite Element Analysis with Viscoelastic Material Modelling. *Abstract, 22nd European Conference on Biomaterials, Sept 2009, eingereicht.*
- [5] Rosentritt M, Behr M, Gebhard R, Handel G. Influence of stress simulation parameters on the fracture strength of all-ceramic fixed-partial dentures. *Dent Mater* 2006; 22(2):176–182.