

D. Parkot<sup>1</sup>, A. Kirsten<sup>1</sup>, K. Möllers<sup>1</sup>, W. Pätzold<sup>1</sup>, H. Fischer<sup>1</sup>

# Simulation des Einflusses von Gerüstgeometrie und Okklusion auf die Lebensdauer vollkeramischer Restaurationen



D. Parkot

*Simulation of the influence of connector design and occlusion on the long-term reliability of all-ceramic restorations*

**Einführung:** Der Einsatz der CAD/CAM-Technologie gestattet nicht nur die präzise Herstellung dentaler vollkeramischer Restaurationen. Aus den konstruierten Geometriedaten können auch realitätsnahe Finite-Elemente-Modelle erstellt und zur Vorhersage der mechanischen Langzeit-zuverlässigkeit bereits vor der Herstellung genutzt werden. Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung des Einflusses verschiedener Gerüstgeometrien einer vollkeramischen Seitenzahnbrücke sowie der Okklusionsverhältnisse auf die Spannungsverteilung und die daraus resultierende Lebensdauer mit Hilfe numerischer Methoden.

**Material und Methode:** Die Finite-Elemente-Analyse wurde mittels des Softwarepakets ANSYS 12.0 durchgeführt. Dabei wurde die Geometrie des Gerüsts einer vollkeramischen dreigliedrigen Seitenzahnbrücke (14–16) bei gleicher Außenkontur der Verblendung variiert und die Spannungsverteilung ermittelt. Die Brücke wurde mit konstanter, auf verschiedene Kontaktpunkte auf der Okklusalfäche des Brückenzwischengliedes verteilter Last beaufschlagt. Aufbauend auf den ermittelten Spannungsverteilungen wurde die Lebensdauer der Brücke mit der Software CARES/Life abgeschätzt.

**Ergebnisse:** Die Variation der Gerüstgeometrie und der Okklusion führte zu unterschiedlichen Spannungsverteilungen innerhalb der Brücke. Mit abnehmendem Gerüstquerschnitt sanken die Spannungen im Gerüstmaterial. Allerdings wurde gleichzeitig ein signifikanter Anstieg der Spannungen innerhalb der Verblendkeramik beobachtet.

**Schlussfolgerung:** Die Berechnungen zeigen, dass die Lebensdauer der Brücken erheblich von der Langzeitzuverlässigkeit der Verblendkeramik beeinflusst wird. Außerdem hän-

**Introduction:** The application of CAD/CAM-systems allows precise manufacturing of all-ceramic dental restorations. The geometric data of digitally constructed designs can be used to create realistic finite element (FE) models to predict their long-term reliability before the manufacturing process. The objective of the presented work was to numerically investigate how the framework design of an all-ceramic dental prosthesis influences the resulting stress distribution and thereby the long-term reliability.

**Material and Method:** The finite element analysis was performed using the commercial software ANSYS 12.0 (Ansys, Canonsburg, PA, USA). The framework geometry of an all-ceramic three-unit-bridge (14–16) was varied while the outer shape of the veneering was kept constant. The load was applied at multiple contact points at the occlusal surface of the pontic. Based on the calculated stress distributions, the long-term reliability of the restorations was estimated using the Software CARES/Life (Connecticut Reserve Technologies, Gates Mills, Ohio, USA).

**Results:** Variations in the framework geometry and the occlusion led to different stress distributions within the restoration. The stresses in the framework material decreased with the reduction of the framework size. However, at the same time, an increase of the stresses within the veneering material was observed.

**Conclusion:** The long-term reliability of the restorations is mainly influenced by the reliability of the veneering ceramic material. Moreover, the resulting stresses are mainly influenced by the framework geometry and the load application. Simulation can help in identifying a maximum stress level within the veneering material in order to gain a desired

<sup>1</sup> Zahnärztliche Werkstoffkunde und Biomaterialforschung (ZWBf), Universitätsklinikum RWTH Aachen

Peer-reviewed article: eingereicht: 21.10.2011, revidierte Fassung akzeptiert: 05.01.2012

DOI 10.3238/dzz.2012.0510-0516

gen die resultierenden Spannungen maßgeblich von der Geometrie des Gerüsts und der Krafteinleitung ab. Für eine vorgegebene gewünschte Lebensdauer einer dreigliedrigen Seitenzahnbrücke kann anhand der Simulationen ein maximal zulässiges Lastspannungsniveau innerhalb der Verblendkeramik identifiziert werden. Dies kann als Kriterium für die geometrische Auslegung der Restauration bereits vor der Herstellung genutzt werden.

(Dtsch Zahnärztl Z 2012, 67: 510–516)

*Schlüsselwörter: Zirkonoxid, vollkeramische Brücke, Spannungsanalyse, Finite-Elemente-Analyse, Versagenswahrscheinlichkeit, Langzeitzuverlässigkeit, Simulation*

## Einführung

Die CAD/CAM-Technologie hält immer weiter Einzug in die Fertigung von dentalen Restaurationen. Der Einsatz von etablierten Simulationstechnologien im zahnärztlichen Bereich ist daher eine konsequente Weiterentwicklung. So können die Vorteile einer numerischen Auslegung mechanisch beanspruchter Teile bereits vor der Fertigung in der Planungsphase von Zahnersatz Anwendungen finden. Die Finite-Elemente-Methode hat bereits vor mehr als fünf Dekaden Einzug in ingenieurwissenschaftliche Anwendungen gefunden und hat sich in den letzten Jahren, bedingt durch die verfügbare Rechenleistung, enorm ausgebreitet. Im Bereich zahnmedizinischer Anwendungen wurden insbesondere in den letzten 10 Jahren zahlreiche Studien über die numerische Ermittlung von Spannungsverteilungen in zahnärztlichen Versorgungen veröffentlicht [1, 4–6, 10, 15, 21, 26]. Der Einfluss der spezifischen Eigenschaften quasi-spröder Werkstoffe auf die Lebensdauer der Restaurationen wurde jedoch bisher nur in wenigen Arbeiten berücksichtigt [7, 18].

Die Verwendung keramischer Werkstoffe für zahnärztliche Restaurationen erlebte mit dem Einsatz von hochfesten Oxidkeramiken (Aluminiumoxid und Zirkonoxid) einen Durchbruch und findet immer mehr Einsatz insbesondere in dem hochbelasteten Bereich der Prämolaren oder Molaren [3, 20, 24–26]. Durch ihre mechanischen Eigenschaften, die sich deutlich von denen metallischer Werkstoffe unterscheiden, erfordert die numerische Simulation vollkeramischer Restaurationen den Einsatz von Methoden, die über die klassische Finite-Elemente-Analyse der entstehenden Span-

long-term reliability. This can be used as a criterion for the geometric design of the restoration prior to manufacturing.

*Keywords: zirconia, all-ceramic fixed dental prosthesis, stress analysis, finite element analysis, failure probability, long-term reliability, simulation*

nungsverteilungen hinausgeht. Einhergehend mit der hohen Festigkeit und Härte weisen Keramiken eine hohe Sprödigkeit auf. Bedingt durch ihre Mikrostruktur, die stets Poren und Mikrorisse beinhaltet, ist diese Werkstoffklasse besonders anfällig für Zugspannungen, da diese die Rissöffnung und –ausbreitung begünstigen. Die Festigkeit dieser Werkstoffe weist eine statistische Streuung auf, die der Weibullverteilung [27] folgt. Aus diesem Grund lässt sich bei einer definierten Belastung nur eine statistische Wahrscheinlichkeit für das Versagen des Bauteils angeben. Zusätzlich entstehen bereits bei geringen Belastungen kleinste Risse, die über eine längere Beanspruchungsdauer hinweg wachsen können. Dieser als unterkritisches Risswachstum bekannte Effekt führt mit der Zeit zu einer deutlichen Absenkung der Festigkeit und somit auch der Lebensdauer der Bauteile [2, 7, 8, 16]. Die Größe eines keramischen Bauteils hat ebenfalls einen Einfluss auf dessen Bruchwahrscheinlichkeit. Da die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines kritischen Fehlers mit der Größe des Bauteils zunimmt, sinkt dessen mechanische Zuverlässigkeit mit ansteigendem beanspruchten Bauteilvolumen [16]. Anfang der 1990er Jahre entwickelte die NASA die Postprocessing-Software CARES/Life, welche diese speziellen Eigenschaften keramischer Werkstoffe berücksichtigt und so die Finite-Elemente-Analyse um die statistischen Effekte quasispröder Werkstoffe erweitert [17]. Sie findet bisher vorwiegend Anwendung in der Auslegung von Bauteilen für Hochtemperaturanwendungen, wurde aber auch bereits zur Durchführung von Lebensdauerprognosen zahnärztlicher Versorgungen eingesetzt [7, 18].

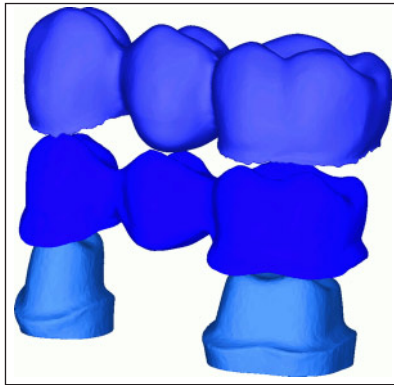
Ziel der vorgestellten Studie war die Untersuchung von Geometrievariatio-

nen sowie unterschiedlicher Belastungssituationen auf die resultierende Lebensdauer von keramischen Brückenkonstruktionen. Die Kombination der klassischen Finite-Elemente-Analyse mit dem anschließenden Postprocessing mittels CARES/Life sollte dabei nicht nur die auftretenden Spannungsverteilungen aufzeigen, sondern konkrete Aussagen zu Versagenswahrscheinlichkeiten nach bestimmten Belastungsdauern liefern, die als anwendungsgerechtes Orientierungskriterium für die CAD-Planung von Versorgungen dienen können.

## Material und Methode

Die numerischen Untersuchungen wurden exemplarisch an einer vollkeramischen Seitenzahnbrücke zwischen 14 und 16 durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden die präparierten Pfeilerzähne optisch eingescannt und das Gerüst sowie die Verblendung virtuell konstruiert. Die CAD-Geometrie ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Scandaten der Pfeilerzähne wurden zervikal knapp unterhalb der Präparationsgrenze abgeschnitten und die Schnittfläche verschlossen. Scanunregelmäßigkeiten wurden mit Hilfe der Software 3matic (Materialise, Leuven, Belgien) ausgebessert und das Oberflächennetz als Standard Tessellation Language (STL) Datensatz exportiert.

Um den Einfluss der Gerüstgeometrie auf die resultierenden Spannungsverteilungen zu untersuchen, wurden drei unterschiedliche Varianten des Gerüsts generiert, die sich aus einer sukzessiven Reduktion der Außenabmessung des Verbinderdurchmessers in Schritten von 0,25 mm ergaben. Da-

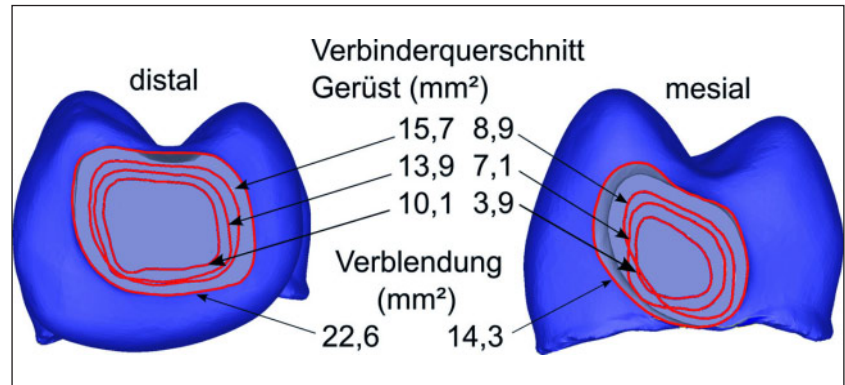


**Abbildung 1** CAD-Geometrie der untersuchten Seitenzahnbrücke.

**Figure 1** CAD geometry of the investigated dental prosthesis.

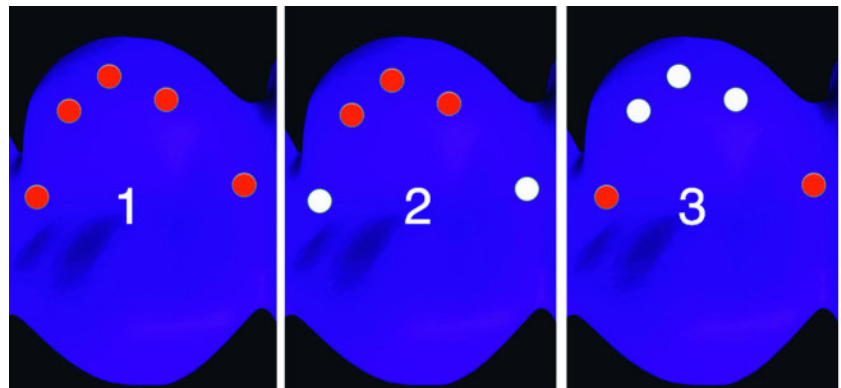
bei ergaben sich die Querschnitte der Verbinder zu  $8,9 \text{ mm}^2$  mesial und  $15,7 \text{ mm}^2$  distal im Fall des großen Gerüsts,  $7,1 \text{ mm}^2$  mesial und  $13,9 \text{ mm}^2$  distal im Fall des mittleren Gerüsts sowie  $3,9 \text{ mm}^2$  mesial und  $10,1 \text{ mm}^2$  distal für das kleinste Gerüst. Die Verblendung wies an gleicher Stelle einen Querschnitt von  $22,6 \text{ mm}^2$  distal und  $14,3 \text{ mm}^2$  mesial auf, siehe auch Abbildung 2. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Gerüstgeometrien der Einfachheit halber als klein, mittel und groß bezeichnet. Die Außengeometrie der Verblendung wurde in allen betrachteten Fällen konstant gehalten, wodurch sich folglich unterschiedliche Dicken des Verblendmaterials ergaben. Die digitale Präparation der Daten wurde mit der Modellationssoftware FREEFORM 10.0 (SensAble Technologies, Woburn, Massachusetts) durchgeführt. Die CAD-Modelle wurden mittels der krümmungsbasierten Vernetzungssoftware ANSYS ICEM CFD (CFX Berlin Software, Berlin, Deutschland) unter Verwendung von Tetraederelementen vernetzt. Da die Verblendkeramik bedingt durch ihre im Vergleich zum Gerüst geringe Dicke im Bereich der Verbinder sehr fein vernetzt werden musste, wurden pro Modell zwischen 200.000 und 300.000 Elemente verwendet.

Die gesamte numerische Untersuchung bestand aus zwei Simulationsstufen. Zunächst wurde eine Finite-Elemente-Analyse der Brücke bei unterschiedlichen Belastungsszenarien durchgeführt, um die in den verwendeten Materialien entstehende Spannungsverteilung jeweils zu ermitteln. Zu



**Abbildung 2** Oro-vestibulärer Schnitt durch die Verbinder der untersuchten Seitenzahnbrücke.

**Figure 2** Oro-vestibular cut through the connectors of the investigated dental prosthesis.



**Abbildung 3** Kontaktpunkte für die unterschiedlichen untersuchten Lastfälle. Die belasteten Punkte sind rot gekennzeichnet.

**Figure 3** Contact points for the various investigated loading cases. The loaded points are highlighted in red.

diesem Zweck wurden die Knoten auf der zervikalen Schnittfläche des Modells in ihren Freiheitsgraden eingeschränkt, so dass weder eine translatorische noch eine rotatorische Bewegung der Pfeilerzähne möglich war. Die unterschiedlichen Werkstoffe waren an ihren Grenzflächen fest miteinander verbunden. Zur Untersuchung verschiedener Okklusionsbedingungen wurde eine konstante Last von 600 N auf verschiedenen Kontaktpunkten der Okklusionsfläche des Brückenzwischenstückes beaufschlagt (Abb. 3).

Die Finite-Elemente-Berechnungen wurden mit Hilfe der Software ANSYS 12.0 (Ansys, Canonsburg, PA, USA) durchgeführt. Die verwendeten Materialeigenschaften wie Elastizitätsmodul  $E$  und Querdehnungszahl  $\nu$  waren  $E = 205 \text{ GPa}$  und  $\nu = 0,31$  für Zirkonoxid [7],

$E = 64 \text{ GPa}$  und  $\nu = 0,21$  für die Verblendkeramik [9] sowie  $E = 18 \text{ GPa}$  und  $\nu = 0,27$  für das Dentin [7]. Quasi-spröde Werkstoffe wie Dentalkeramiken weisen eine hohe Frakturanfälligkeit gegenüber Zugspannungen auf. Da die erste Hauptnormalspannung auf das jeweilige Element bezogen die maximalen Zugspannungen repräsentieren, wurden die ersten Hauptnormalspannungen  $\sigma_1$  als Vergleichskriterium herangezogen.

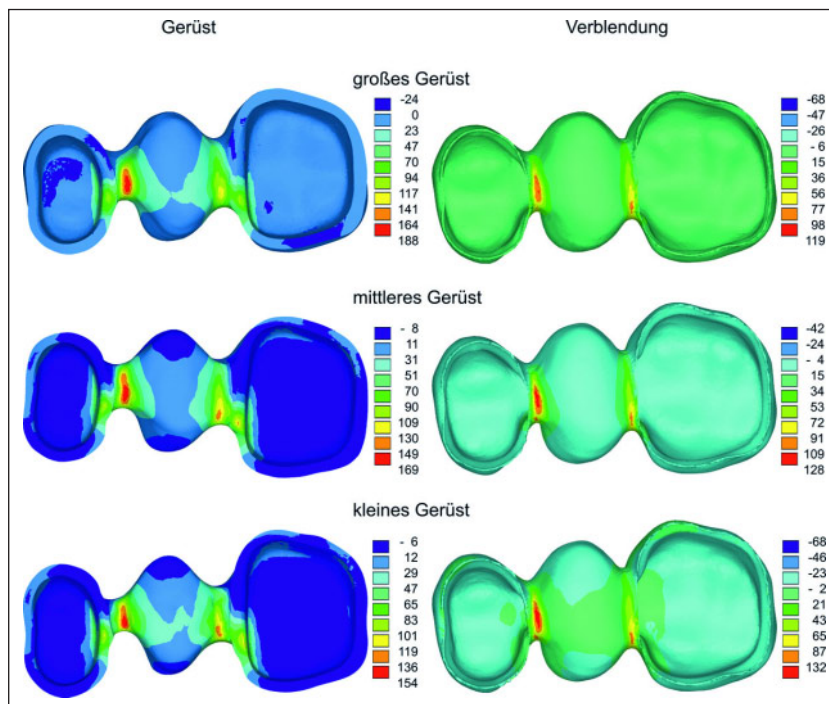
Der zweite Simulationsschritt war die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeiten der Restauration abhängig von der Belastungsdauer. Dazu wurde das Softwarepaket CARES/Life (Connecticut Reserve Technologies, Gates Mills, Ohio, USA) verwendet. Dieses berechnet aus den exportierten Spannungsverteilungen die Versagenswahrscheinlichkeit  $F$  für jeden Werk-

stoff unter Berücksichtigung des unterkritischen Risswachstums und des Größeneffektes. Hierbei spielt die absolute Höhe der gewählten Belastung zur Ermittlung der Spannungsverteilung im ersten Simulationsschritt keine Rolle, da diese lediglich normiert auf die Geometrie übertragen wird. Die Berechnung wurde unter Verwendung des sogenannten *Principle of Independent Action* (PIA) durchgeführt, welcher sich für mehrachsige Spannungszustände gut eignet und alle Hauptnormalspannungen berücksichtigt [12]. Die für diese Simulationen benötigten Werkstoffparameter Charakteristische Festigkeit  $\sigma_0$ , Weibullmodul  $m$  sowie die Parameter des unterkritischen Risswachstums  $n$  und  $B$  waren für den Gerüstwerkstoff Zirkonoxid  $\sigma_0 = 1143$  MPa,  $m = 18$ ,  $n = 35$ ,  $B = 22 \cdot 10^4$  MPa<sup>2</sup>s, für die Verblendkeramik  $\sigma_0 = 69$  MPa,  $m = 12$ ,  $n = 21$  und  $B = 72$  MPa<sup>2</sup>s [14]. Die Versagenswahrscheinlichkeiten wurden für Belastungen von 60–600 N und Belastungsdauern von  $10^3$  s,  $10^4$  s,  $10^5$  s, einem Jahr und 10 Jahren ermittelt.

## Ergebnisse

Die Ergebnisse der Finite-Elemente-Analyse bei unterschiedlichen Geometrien und Belastungsfällen zeigten qualitativ ähnliche Spannungsverteilungen. Hohe Zugspannungen konzentrierten sich dabei stets in den basalen Bereichen beider Verbinder, wobei jeweils höhere Spannungen am dünneren mesialen Verbinder auftraten. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Spannungsverteilungen für den Lastfall 2, der von den untersuchten Szenarien zu den höchsten auftretenden Zugspannungen führte (*worst case* Szenario).

Die im Fall der betrachteten drei Lastfälle sowie Geometrien auftretenden maximalen Zugspannungen sind in Abbildung 5 zusammengefasst. Die Verläufe zeigen eine deutliche Abhängigkeit der maximal auftretenden Zugspannungen sowohl von der Geometrie der Restauration als auch vom Belastungsszenario. Besonders auffällig sind die gegenläufigen Trends des Verlaufes der ersten Hauptnormalspannung im Gerüst und in der Verblendung. Während diese im Gerüst mit dessen zunehmender Größe steigt, sinken gleichzeitig die in der Verblendung auftretenden maxima-



**Abbildung 4** Erste Hauptnormalspannung (MPa) im Gerüstwerkstoff (links) und in der Verblendkeramik (rechts) für den Lastfall 2 bei von oben nach unten abnehmender Gerüstgröße.

**Figure 4** First principal stress (MPa) in the framework material (left) and in the veneering material (right) for the loading case No. 2, and decreasing framework size from top to bottom.

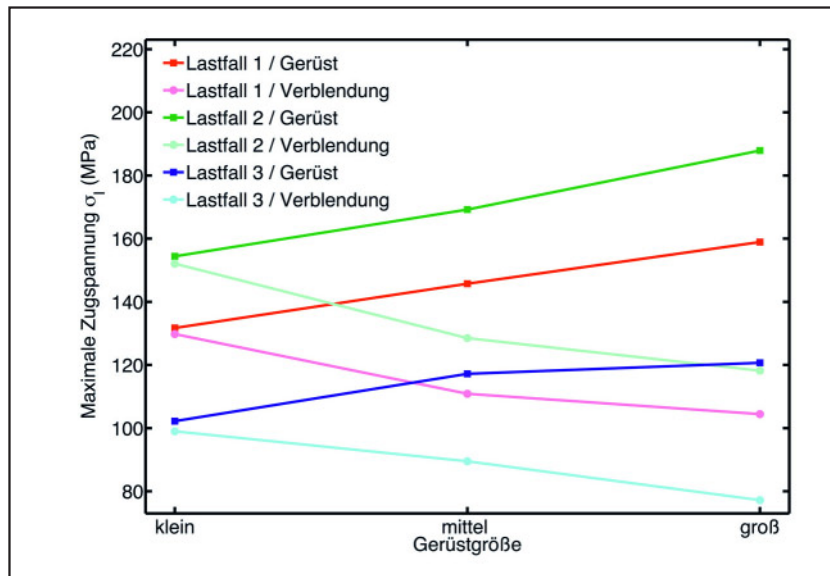
len Zugspannungen. Weiterhin ist ein signifikanter Einfluss der Belastungssituation auf die resultierenden Spannungsverteilungen zu verzeichnen. Unter allen untersuchten Okklusionsbedingungen traten die höchsten Zugspannungen im Lastfall 2 auf, während Lastfall 3 zu den niedrigsten Zugspannungen führte.

Die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeiten erfolgte für unterschiedliche maximale Kaukräfte von 60 bis 600 N in Schritten von 60 N. Die Versagenswahrscheinlichkeiten bei Belastungen von mehr als 180 N lagen bereits für Belastungszeiten von einem Tag bei über 90 %, daher wurden ausschließlich Belastungen von 60 N, 120 N und 180 N ausgewertet. Die durchgeführten Berechnungen entsprechen dabei einer konstant anhaltenden Belastung, die so in der Realität nicht vorkommt und entsprechen daher einer sehr konservativen Auslegung der Situation im Patientenumd. Die Versagenswahrscheinlichkeiten der Verblendkeramik waren durchgängig deutlich höher als die des Gerüstmaterials, weshalb erstere für die Beurteilung der Gesamtkonstruktion herangezogen wurde, während der Ge-

rüstwerkstoff vernachlässigt werden konnte. Abbildung 6 zeigt den ermittelten Verlauf der Versagenswahrscheinlichkeit für den Belastungsfall 2 in Abhängigkeit von verschiedenen Gerüstgrößen und reflektiert so den Einfluss der Gerüstgeometrie auf die Versagenswahrscheinlichkeit der Restaurationen.

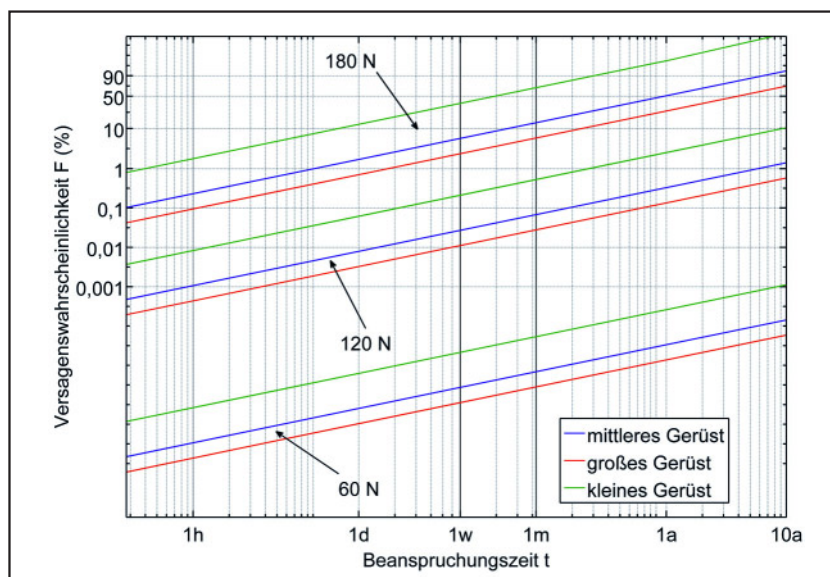
Die Versagenswahrscheinlichkeiten steigen mit der aufgetragenen Last und mit fallender Gerüstgröße. Während für die kleinste aufgetragene Last von 60 N die Versagenswahrscheinlichkeiten für alle betrachteten Zeiten unter 0,001 % liegt, ändert sich das bereits bei einer Kraft von 120 N. Hier gibt es im Fall des kleinsten Gerüsts bereits nach einem Jahr eine Versagenswahrscheinlichkeit von mehr als 1 %. Bei weiterer Erhöhung der angenommenen Kaukraft auf 180 N sind bereits nach einem Jahr signifikante Versagenswahrscheinlichkeiten für alle Gerüstgrößen feststellbar.

Der zweite untersuchte Parameter war die angenommene Lastverteilung auf der Okklusionsfläche. Die in Abbildung 7 dargestellten Verläufe zeigen einen deutlichen Einfluss der Krafteinleitung auf die Lebensdauer der Versorgungen, wobei das größte Gerüst zu Grunde gelegt wur-



**Abbildung 5** Maximal auftretende Zugspannung im Gerüstwerkstoff und in der Verblendkeramik für die drei betrachteten Lastfälle.

**Figure 5** Maximum occurring tensile stress in framework and veneering material for the three examined loading cases.



**Abbildung 6** Einfluss der Gerüstgeometrie auf die Versagenswahrscheinlichkeit der Verblendkeramik, exemplarisch dargestellt für Belastungsfall 2.

**Figure 6** Influence of the framework geometry on the failure probability of the veneer, exemplarily shown for the loading case No. 2.

de. Hier ergibt sich für den Lastfall 2 bereits nach einem Monat eine Versagenswahrscheinlichkeit von 0,1 %, die nach einem Jahr auf 1 % ansteigt. Dieser Lastfall führt in allen durchgeführten Untersuchungen zur höchsten Beanspruchung der Werkstoffe und somit auch zur höchsten Versagenswahrscheinlichkeit. Die beiden weiteren Lastfälle 1 und 3 liefern

ähnliche Verläufe der Versagenswahrscheinlichkeit, die jedoch beide deutlich unter denen des Lastfalls 2 liegen.

## Diskussion

Durch den wachsenden Einsatz der CAD/CAM-Technologie im Bereich der

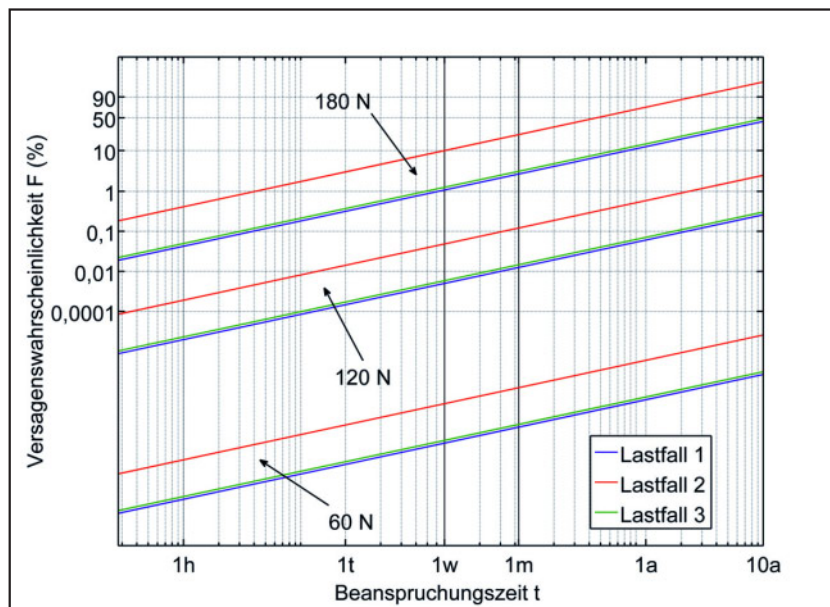
Fertigung von dentalen Restaurationen können Simulationstechniken, die im ingenieurwissenschaftlichen Bereich seit vielen Jahren als Standardtools verwendet werden, auch zur Auslegung zahnärztlicher Versorgung eingesetzt werden. Die Ergebnisse von Simulationsstudien können dabei als Basis für die CAD-Entwicklung prothetischer Versorgung dienen und Zahnärzte sowie Zahntechniker bei der virtuellen Planung einer Restauration unterstützen. Die hier vorgestellten Simulationen entsprechen einer Fallstudie, in der das Gerüstdesign und die Okklusionssituation im Patientenmund variiert wurden.

Die in den Simulationen ermittelten Spannungsverteilungen zeigen hohe Zugspannungskonzentrationen auf der basalen Seite der beiden Verbinder. Dieses Ergebnis ist konsistent mit bereits bekannten numerischen und experimentellen Untersuchungen [6, 7, 11, 13, 18, 19, 25]. Diese zeigen, dass bei einer auf dem Brückenzwischenglied konzentrierten Belastung bevorzugt ein Versagen der Restaurationen im Verbinder auftritt. Der beobachtete Unterschied zwischen der Höhe der auftretenden Zugspannungen auf der mesialen und distalen Seite resultiert hauptsächlich aus der unterschiedlichen Dicke beider Verbinder und der sich daraus ergebenden unterschiedlichen Nachgiebigkeiten. Ein interessanter zu beobachtender Effekt ist der gegenläufige Trend der maximal auftretenden Zugspannungen in beiden betrachteten Werkstoffen abhängig von der Gerüstgeometrie. Bei geringerem Verbinderquerschnitt sinken die maximalen Zugspannungen im Gerüst, welche dann im Verblendmaterial aufgenommen werden müssen. Die Folge ist, dass neben der Geometrie auch die Werkstoffauswahl für die Verblendkeramik eine erhebliche Rolle spielt. Dies zeigt auch, dass *In-Vitro*-Versuche an unverblendeten Gerüsten keinerlei Aussage über die Stabilität von verblendeten Brückenkonstruktionen zulassen. Diese Erkenntnis wird auch durch weitere Studien gestützt [15].

Die Berücksichtigung der charakteristischen Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe erfolgte mittels des Einsatzes der Simulationssoftware CARES/Life, die basierend auf den Finite-Elemente-Simulationen die Versagenswahrscheinlichkeit der Versorgung ermitteln kann. Dabei zeigte die Untersuchung des Ge-

rüsten bei einer maximal aufgetragenen Belastung von 600 N auch nach einer Beanspruchungszeit von 10 Jahren keine nennenswerten Versagenswahrscheinlichkeiten. Dies stimmt mit klinischen Studien überein, in denen ein Versagen des Gerüsts bei verblendeten Zirkonoxidbrücken nach mehreren Jahren als seltene Komplikation beschrieben wurde [23]. Mit einer charakteristischen Festigkeit von 1143 MPa von Zirkonoxid gegenüber der Verblendkeramik mit 65 MPa ist die Hochleistungs-Oxidkeramik in der Lage, deutlich höhere Spannungen ohne Bruch zu überstehen. Wie die Spannungsverteilungen der Finite-Elemente-Analyse zeigen, liegen die auftretenden maximalen Zugspannungen bei knapp über 10 % der charakteristischen Festigkeit von Zirkonoxid. Im Fall der Verblendkeramik erreichen die auftretenden Zugspannungen bei einer Belastung von 600 N bereits das Doppelte der charakteristischen Festigkeit. Dies äußert sich auch in den berechneten Versagenswahrscheinlichkeiten. Belastungen von über 180 N führen bereits nach relativ kurzer Zeit zu relevanten Versagenswahrscheinlichkeiten der Verblendkeramik. Erst bei Belastungen unterhalb von 120 N ergaben sich klinisch akzeptable Versagenswahrscheinlichkeiten. Diese Tendenz deckt sich ebenfalls mit klinischen Beobachtungen, bei denen Brüche der Verblendungen von Zirkonoxidbrücken von 1,98 % bis 12,2 % pro Jahr berichtet wurden [23]. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass neben den geometrischen Parametern wie der Dicke der Verbinder auch Okklusionsbedingungen einen großen Einfluss auf die auftretenden Zugspannungen haben. Die betrachteten Lastfälle 1 bis 3, die eben solche unterschiedlichen Okklusions-situationen repräsentieren, zeigen diesen Einfluss deutlich. Die Okklusionsbedingungen können durch die vom Zahn-techniker vorgegebene Form der Restauration oder auch durch Einschleifen vom behandelnden Zahnarzt eingestellt werden.

Die Ergebnisse der Simulationen können dabei hilfreiche Informationen über günstige oder ungünstige Okklusionsbedingungen liefern. So stellt eine Okklusion, bei der die Kontaktpunkte lediglich auf den palatinalen Höckern eingestellt sind, den ungünstigsten Fall dar. Bei der Konstruktion der Brücken-zwischenglieder sollte demnach auf eine



**Abbildung 7** Einfluss der Belastungssituation für das große Gerüst auf den zeitlichen Verlauf der Versagenswahrscheinlichkeit der Verblendkeramik.

**Figure 7** Influence of the loading situation on the time dependent failure probability of the veneering material for the largest framework.

(Abb. 1–7: Zahnärztliche Werkstoffkunde und Biomaterialforschung, Universitätsklinikum RWTH Aachen)

ausgeglichene Okklusion Wert gelegt werden (siehe Lastfall 1). Durch die Verlagerung der Last hin zu den Randleisten des Brücken-zwischengliedes wurde in diesem Fall die mechanische Zuverlässigkeit der Gesamtrestauration erhöht.


Die absoluten Werte der Simulationen müssen natürlich immer kritisch betrachtet werden, da die durchgeführten Finite-Elemente-Untersuchungen der hier verwendeten dreigliedrigen Seitenzahnbrücke Annahmen beinhalten, die real auftretende anatomische Gegebenheiten nicht hinreichend berücksichtigen. Sowohl die Zahnbeweglichkeit als auch die Nachgiebigkeit des Alveolarknochens wurde bei der Berechnung der auftretenden Spannungen vernachlässigt. Es ist bekannt, dass diese Vereinfachungen zu einer Unterschätzung der auftretenden Spannungen und damit auch der Versagenswahrscheinlichkeiten führen können [22]. Trotz der getroffenen Annahmen erlaubt die Finite-Elemente-Analyse eine gute Abschätzung der auftretenden Spannungsverteilungen in Abhängigkeit von Einflussgrößen wie der Geometrie oder den Okklusionsbedingungen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Betrachtung der Belastungsdauer, die zur Simulation der Versagenswahrscheinlich-

keiten verwendet worden ist. Diese entspricht einer statischen Dauerbelastung, die in dieser Form in der Realität nicht auftritt. Die in den Simulationen angenommenen Zeitskalen von Dauerbelastungen bis zu 10 Jahren sind nicht unmittelbar auf die Situation im Patientenumfeld übertragbar. Da eine Beaufschlagung solcher Lasten im Kauvorgang lediglich kurzzeitig auftritt, sind die absoluten Zeiträume natürlich deutlich zu verlängern. Eine genauere Abschätzung kann hier auch die Berücksichtigung einer dynamischen Belastung liefern. In der Literatur wird bei *In-Vitro*-Untersuchungen zahnärztlicher Versorgungen bei zyklischer Belastungen von Kaufrequenzen von 1,6 Hz ausgegangen [22]. Obwohl die Implementierung einer solchen dynamischen Belastung zu einer Verbesserung der quantitativen Abschätzung führen würde, liefern die dargestellten Ergebnisse bereits grundlegende qualitativ korrekte Informationen, die eine numerische Auslegung zahnärztlicher Versorgungen unterstützen können.

## Danksagung

Die geometrischen Daten der untersuchten Brücke wurden freundlicher-

weise von der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der LMU München zur Verfügung gestellt. Diese Studie wurde in Teilen durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert (FKZ: 13N9658). 

**Interessenkonflikt:** Der Autor/ die Autoren erklären, dass kein Interessenkonflikt im Sinne der Richtlinien des International Committee of Medical Journal Editors besteht.

#### Korrespondenzadresse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Fischer  
Zahnärztliche Werkstoffkunde und  
Biomaterialforschung  
Universitätsklinikum RWTH Aachen  
Pauwelsstraße 30, 52074 Aachen  
E-Mail: hfischer@ukaachen.de

## Literatur

- Augereau D, Pierrisnard L, Barquins M: Relevance of the finite element method to optimize fixed partial denture design. Part I. Influence of the size of the connector on the magnitude of strain. *Clin Oral Investig* 2, 36–39 (1998)
- BW Morris: Failure analysis of ceramic components. Lockheed Martin Corporation, Schenectady, NY 12301 (US), 2000
- Conrad HJ, Seong WJ, Pesun IJ: Current ceramic materials and systems with clinical recommendations: A systematic review. *J Prosthodont* 98, 389–404 (2007)
- Dittmer MP, Kohorst P, Borchers L, Schweska-Polly R, Stiesch M: Stress analysis of an all-ceramic FDP loaded according to different occlusal concepts. *J Oral Rehabil* 38, 278–285 (2011)
- Dittmer MP, Kohorst P, Borchers L, Stiesch-Schol M: Finite element analysis of a four-unit all-ceramic fixed partial denture. *Acta Biomater* 5, 1349–1355 (2009)
- Dittmer M, Kohorst P, Borchers L, Stiesch M: Finite-Elemente-Analyse zur Ermittlung der Spannungsverteilung in Vollkeramikbrücken. *Dtsch Zahnärztl Z* 92–99 (2010)
- Fischer H, Weber M, Marx R: Lifetime prediction of all-ceramic bridges by computational methods. *J Dent Res* 82, 238–242 (2003)
- Gonzaga CC, Cesar PF, Miranda WG Jr, Yoshimura HN: Slow crack growth and reliability of dental ceramics. *Dental Materials* 27, 394–406 (2011)
- Guazza M, Proos K, Quach L, Swain M: Strength, reliability and mode of fracture of bilayered porcelain/zirconia (Y-TZP) dental ceramics. *Biomaterials* 25, 5045–5052 (2004)
- Hübsch PF, Middleton J, Rees JS, Jacobsen PH: An adaptive finite-element approach for the analysis of dental restorations. *J Biomed Eng* 15, 401–408 (1993)
- Kelly JR, Tesk JA, Sorensen JA: Failure of all-ceramic fixed partial dentures in vitro and in vivo: Analysis and modeling. *J Dent Res* 74, 1253–1258 (1995)
- Lund E: Shape optimization using Weibull statistics of brittle failure. *Struct Multidisc Optim* 15, 208–214 (1998)
- Magne P, Perakis N, Belser UC, Krejci I: Stress distribution of inlay-anchored adhesive fixed partial dentures: a finite element analysis of the influence of restorative materials and abutment preparation design. *J Prosthodont* 87, 516–527 (2002)
- Marx R, Weber M: Vollkeramische Kronen- und Brückenmaterialien – Eigenschaften und Anforderungen. Aachen: Universitätsklinikum der RWTH Aachen, Klinik für Zahnärztliche Prothetik, 2000
- Möllers K, Pätzold W, Parkot D et al.: Influence of connector design and material composition and veneering on the stress distribution of all-ceramic fixed dental prostheses: A finite element study. *Dental Materials* 27, e171–e175 (2011)
- Munz D: Ceramics: mechanical properties, failure behaviour, materials selection. Springer, Berlin 1999
- Nemeth NN, Manderscheid JM, Gyekenyesi JP: Design of ceramic components with the NASA/CARES computer program. NASA Lewis Research Center, 1990
- Oh W, Götzen N, Anusavice KJ: Influence of connector design on fracture probability of ceramic fixed-partial dentures. *J Dent Res* 81, 623–627 (2002)
- Oh WS, Saglik B: Provisional prosthetic management of mobile teeth in conjunction with a removable partial denture using orthodontic wire. *J Prosthodont* 18, 638–640 (2009)
- Onodera K, Sato T, Nomoto S, Miho O, Yotsuya M: Effect of connector design on fracture resistance of zirconia all-ceramic fixed partial dentures. *Bull Tokyo Dent Coll* 52, 61–67 (2011)
- Rafferty BT, Janal MN, Zavanelli RA et al.: Design features of a three-dimensional molar crown and related maximum principal stress. A finite element model study. *Dental Materials* 26, 156–163 (2010)
- Rosentritt M, Behr M, Gebhard R, Hande G: Influence of stress simulation parameters on the fracture strength of all-ceramic fixed-partial dentures. *Dental Materials* 22, 176–182 (2006)
- Sailer I, Pjetursson BE, Zwahlen M, Hammerle CHF: A systematic review of the survival and complication rates of all-ceramic and metal-ceramic reconstructions after an observation period of at least 3 years. Part II: fixed dental prostheses. *Clinical Oral Implants Research* 18, 86–96 (2007)
- Schneemann P, Borchers L, Stiesch-Schol M: Belastbarkeit 4-gliedriger Seitenzahnbrücken aus Vollkeramik. *ZWR* 114, 28–36 (2005)
- Sundh A, Molin M, Sjogren G: Fracture resistance of yttrium oxide partially-stabilized zirconia all-ceramic bridges after veneering and mechanical fatigue testing. *Dental Materials* 21, 476–482 (2005)
- Tsumita M, Kokubo Y, Vult von Steyern P, Fukushima S: Effect of framework shape on the fracture strength of implant-supported all-ceramic fixed partial dentures in the molar region. *J Prosthodont* 17, 274–285 (2008)
- Weibull W: A statistical distribution function of wide applicability. *J Appl Mech* 18, 293–305 (1951)