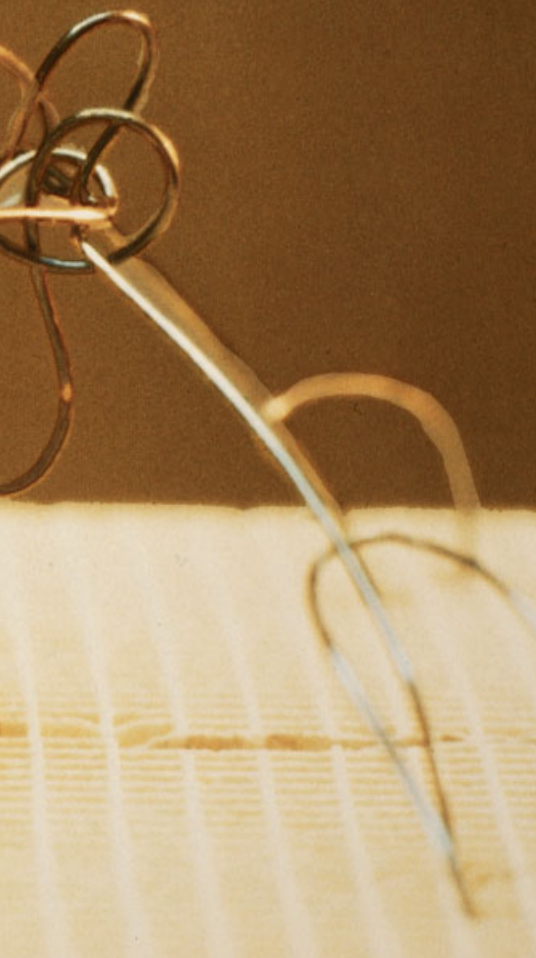


Eine Krone? Eine Prüfkrone!
Sie ist von Thermoelementen umgeben,
die den Temperaturverlauf messen.
Die Messelemente für die Verblendung
stützen sich auf einen Drahtkäfig.

Jährlich wird in Deutschland für über hundert Millionen Euro metallkeramischer Zahnersatz hergestellt. Für diese Schädigungen können Wärmespannungen verantwortlich sein. Bei der Entwicklung von modernem Zahnersatz hilft die Grundlagenforschung

m Dienste der Krone



Bereits seit etwa 35 Jahren wird metallkeramischer Zahnersatz (Kronen, Brücken, Prothesen) routinemäßig in der zahnärztlichen Prothetik eingesetzt. Dennoch kommen – insbesondere, wenn Zahntechniker zu einer neuen Legierung und/oder Keramik greifen – immer wieder Schädigungen wie Risse oder Abplatzungen in der Keramik oder Abscherungen der Verblendung vom Metallgerüst vor. Diese können entweder schon während der Fertigung des Ersatzes im Labor, später beim Einsetzen in den Mund des Patienten oder nach kurzer Tragezeit eintreten. Da allein in der Bundesrepublik jährlich metallkeramischer Zahnersatz im Umfang von mehreren hundert Millionen Euro hergestellt wird, ist es von volkswirtschaftlichem Nutzen, die Entstehung und die Verteilung der Wärmespannungen, die für diese Schädigungen verantwortlich sind, zu untersuchen.

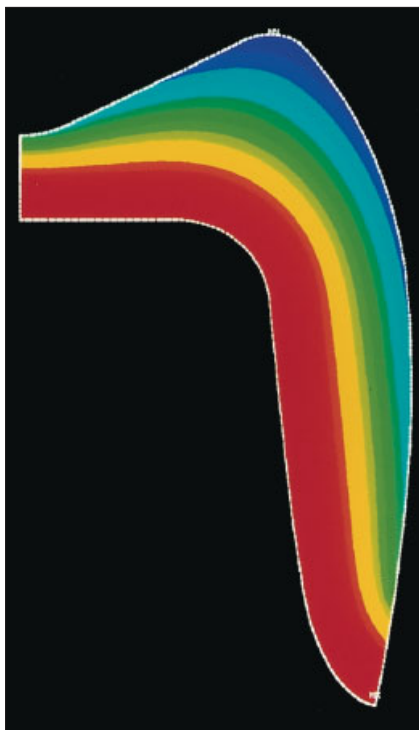
Metallkeramischer Zahnersatz besteht aus einem Legierungsgerüst, welches durch Aufbrennen (Aufsintern) von Keramik („Porzellan“) zahnähnlich verblendet wird. Er vereint somit die hohe Steifigkeit der Legierung mit den vorteilhaften Eigenschaften von Keramik: exzellente Gewebeverträglichkeit (Biokompatibilität), unübertroffene Ästhetik über viele Jahre hinaus und ausgezeichnete Abriebsfestig-

keit. Aus Kostengründen werden in neuerer Zeit neben hochgoldhaltigen auch goldreduzierte, Palladium-Basis- und Nichtedelmetall-Legierungen eingesetzt. Bei deutlich höherer Steifigkeit bieten insbesondere die CoCr-Legierungen ein mit den klassischen Legierungen vergleichbar gutes Korrosionsverhalten im Mundmilieu.

Bei der Fertigung von metallkeramischem Zahnersatz, auch Restauration genannt, wird gemäß den vom Zahnarzt gelieferten Abdrücken ein Legierungsgerüst gegossen und anschließend mit Keramik beschichtet. Als Mischung von Pulver und Liquid besitzt sie zunächst eine pastenartige Konsistenz. Das Objekt wird auf einen so genannten Brenngutträger montiert und in einem Brennofen auf hohe Temperaturen aufgeheizt. Je nach Keramik beträgt die Brenntemperatur zwischen 850 und 980 Grad Celsius. Anschließend kühlt die Restauration nach einem vorgegebenen zeitlichen Verlauf zunächst im Brennofen, später außerhalb an der Luft auf Raumtemperatur ab. Da die Keramik während des Sinterns schrumpft, sind in der Regel vier Brennvorgänge vonnöten.

Bei der Glastemperatur, die meistens im Intervall von 550 bis 600 Grad Celsius liegt, geht die Keramik vom plastisch-zähflüssigen in den elastisch-spröden Zustand 23

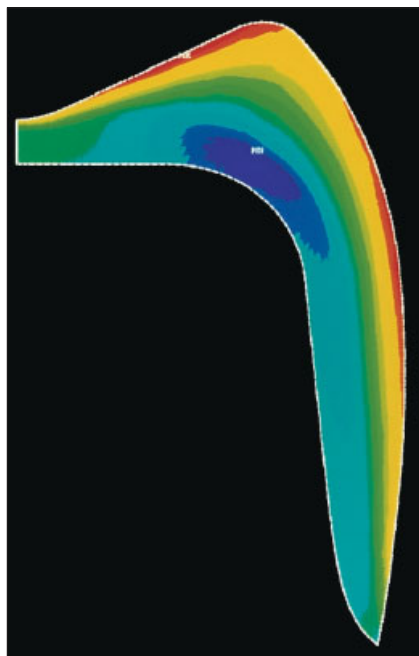
über. Oberhalb der Glastemperatur folgt die Keramik spannungsfrei der eigenen Schrumpfung und der des Gerüsts durch „Nachfließen“. Unterhalb der Glastemperatur hingegen bauen sich Wärmespannungen im Verbundsystem auf, weil sich das Wärmeausdehnungsverhalten der nun „harten“ Keramik von demjenigen der Legierung unterscheidet. Verblendung und Gerüst würden bei freier Verformung geometrisch nicht mehr zusammen passen, sind jedoch an der Materialtrennfläche miteinander verbunden. Dabei entstehen Zwängungen. Bei „thermisch inkompatiblen“ Materialkombinationen kann es dann wegen kritischer Wärmespannungen schon während der Fertigung oder später durch zu-



sätzliche Lastspannungen beim Einzementieren oder beim Kauen zu Schädigungen kommen.

In einem von der DFG geförderten Forschungsvorhaben wurde untersucht, wie sich Wärmespannungen in metallkeramischen Kronen entwickeln. Neben dem unterschiedlichen Wärmeausdehnungsverhalten der beiden Werkstoffe spielt dabei die zeitlich und lokal unterschiedliche Abkühlung eine

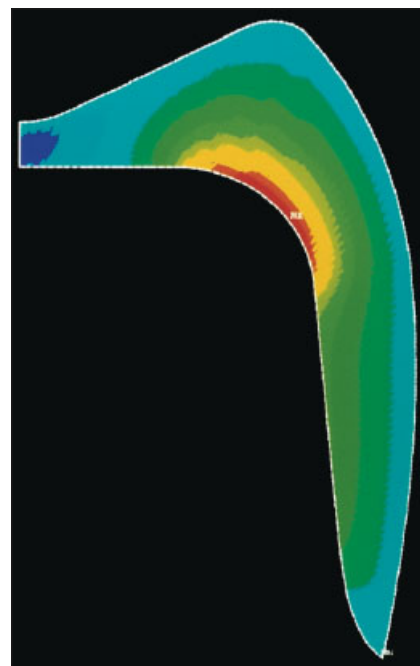
Kronengeometrie ist die analytische und numerische Ermittlung der Wärmeabfuhr in die Umgebung derzeit noch nicht möglich. Daher maßen die Wissenschaftler in einer Reihe von Punkten die Oberflächentemperatur während des Abkühlens experimentell mit Hilfe von Thermoelementen. Bei zusätzlich vorgegebener Anfangstemperaturverteilung in der Gesamtkrone lassen sich auf diese



Während der Abkühlung ist eine Prüfkrone hohen Belastungen ausgesetzt. 26 Sekunden nach Ofenöffnung sind die Temperaturgradienten (links) und damit auch die vorübergehend auftretenden Wärmespannungen am größten. Sie konzentrieren sich an der Oberfläche der Verblendung (Mitte), in der auf Raumtemperatur abgekühlten Krone hingegen im Übergang von den Kauflächen zum Wandbereich (rechts).

Weise nämlich sowohl die Temperatur- als auch die Wärmespannungsverteilung im Innern der Krone eindeutig berechnen.

Aus den in den einzelnen Oberflächenpunkten gemessenen Temperatur-Zeit-Verläufen wurde ein stetiger Temperaturverlauf entlang der Kronenoberfläche interpoliert. Dieser diente als Input für ein so genanntes Finite-Element-(FE-)Modell, um die Spannungsverteilung im Innern der Krone sowohl im



zeitlichen als auch im räumlichen Verlauf zu berechnen. Dabei wurde sowohl für die Legierung als auch für die Keramik ein linear-thermoelastisches Materialverhalten vorausgesetzt.

In einer ersten Simulation vollzog man eine Langzeitabkühlung im Ofen nach. Der Deckel des Brennofens wurde bei einer homogenen Kronentemperatur von 600 Grad Celsius und damit knapp oberhalb der Glastemperatur der Keramik (581,7 Grad Celsius) geöffnet und die Krone dem Ofen entnommen. Sofort bauen sich erhebliche Temperaturgradienten, das sind Temperaturgefälle, in der Krone auf: Die höchsten Temperaturen werden durchweg im Gerüst, die niedrigsten an der Verblendungs Oberfläche gemessen. Dies hängt damit zusammen, dass die Keramik Wärme frei in die Umgebung abstrahlen kann, während sich die Partien des Gerüsts gegenseitig anstrahlen. Zudem gibt die Verblendungs Oberfläche durch Konvektion mehr Wärme an die vorbeistreichende Luft ab als das einen Hohlraum bildende Gerüstinnere.

Ungefähr eine halbe Minute nach Beginn der Abkühlphase tritt der höchste Temperaturunterschied zwischen Gerüst und Keramikoberfläche auf. Er kann mehr als

120 Grad Celsius betragen. Auch die Wärmezugspannung ist zu diesem Zeitpunkt am höchsten. Zugspannungen sind für ein sprödes Material wie Keramik schädlich. Im kritischen Fall führen sie zu Rissen oder Abplatzungen. Demgegenüber steht das Innere der Verblendung unter Druck oder höchstens mäßigem Zug. Mit fortschreitender Abkühlung kommt es in der Krone zu einem Temperaturausgleich. Dann nehmen die Temperaturgradienten wieder ab, und die maximalen Zugspannungen wandern von der Keramikoberfläche in die Verbundfläche zur Legierung. Als residuell bezeichnet man den in der Krone nach der Fertigung „eingefrorenen“ Eigenspannungszustand.

Interessant – und bisher wohl unbekannt – ist aber, dass die vorübergehend auftretenden, so genannten transienten Wärmespannungen die nach vollständiger Abkühlung verbleibenden residuellen Spannungen deutlich überschreiten können. Dies kann schon im Abkühlungsprozess zu Rissen oder Abplatzungen führen.

Untersuchungen an geometrisch identischen, aber aus anderen Gerüstlegierungen gefertigten Modellkronen zeigten, dass die Wärmespannungen mit abnehmender Steifigkeit der Legierung kleiner werden. Für hochgoldhaltige Legierungen vermindern sich die Spannungswerte um rund 35 Prozent. Beim Einsatz von Nichtedelmetall-Legierungen muss deshalb besonders genau darauf geachtet werden, dass die

Ausdehnungseigenschaften der Keramik und des Gerüstmaterials nicht zu sehr voneinander abweichen. Eine Angleichung an die Legierung kann bei den meisten Keramiken durch einen Langzeit-Abkühlungsprozess erzielt werden.

Die residuellen Spannungen in der Verblendung sind allein durch das Ausdehnungsverhalten und die Steifigkeiten der beiden Materialpartner festgelegt. Die transienten Wärmespannungen hingegen las-



sen sich durch den Abkühlvorgang manipulieren: Wird beispielsweise der Brennofen erst bei einer Temperatur von 450 Grad Celsius – und somit unterhalb der Glasatemperatur der Keramik – geöffnet, so vermindern sich diese um rund ein Drittel. Im zahntechnischen Labor, wo eine zügige Produktion metallkeramischer Arbeiten gewährleistet sein muss, kann die Öffnungstemperatur des Brennofens wegen der entsprechend längeren Belegungszeit

jedoch nicht beliebig abgesenkt werden.

Es ist bekannt, dass die in der ausgekühlten Krone in der Verbundfläche vorliegenden maximalen Spannungen entschei-

dend vom lokalen Krümmungsradius abhängen. Der Zahntechniker ist deshalb gut beraten, die Gerüstoberfläche wohl zu runden. Auch der Zahnarzt kann durch eine entsprechende Präparation des zu rekonstruierenden Zahnes bereits wesentlich dazu beitragen.

Erstaunlicherweise zeigten die Experimente, dass die maximalen transienten Wärmespannungen auch maßgeblich vom Abstand der Krone über dem Brenngutträger abhängen.

Nach dem Brand sind in der Brücke feine Risse in der Verblendung entstanden. Für die Fertigung einer einwandfreien Prothese muss neben der „thermischen Kompatibilität“ der verwendeten Materialien, der Montage des Gerüsts auf dem Brenngutträger sowie dem Brenn- und Abkühlungsvorgang auch die Krümmung der Gerüstoberfläche berücksichtigt werden.

Bisher wurde der vereinfachte Fall simuliert, dass die Verblendung in einem Brennvorgang auf das Gerüst aufgesintert wird. Die Wissenschaftler der Universität Karlsruhe untersuchten in jüngster Zeit zusätzlich den realistischeren Prozess des Brennens in mehreren Schritten. So kann auch die Veränderung des Wärmeausdehnungskoeffizienten der Keramik mit der Zahl der Brände berücksichtigt werden. Letzten Endes sollen die Simulationen sowohl Zahntechnikern wie Zahnärzten Regeln für eine schadensfreie Fertigung metallkeramischer Restaurationen an die Hand geben.

*Dr. Jürgen Lenz
Dr.-Ing. Matthias Thies
Prof. Dr.-Ing. Karl Schweizerhof
Universität Karlsruhe (TH)*

Das Projekt wurde von der DFG im Normalverfahren gefördert.