

Zirkonium-Implantataufbauten

Der Einfluss zyklischer Belastungen auf die Lockerung von Halteschrauben

Die Haltbarkeit der Restauration und die farbliche Übereinstimmung von natürlichen und ersetzten Zähnen sowie die „Grundarchitektur“ des Lächelns sind Voraussetzungen für eine ästhetisch hochwertige Implantatversorgung. Obwohl Implantataufbauten aus Metall aus ästhetischer Sicht materialbedingte Nachteile haben, werden sie allgemein als Standardoption für die Versorgung von implantatgetragenen Restaurationen angesehen.

PETER GEHRKE^{1*}, GÜNTER DHOM^{1*}/LUDWIGSHAFEN,
JOCHEN BRUNNER^{2*}, DIETRICH WOLFF^{2*}/MANNHEIM, MARCO DEGIDI^{3*},
ADRIANO PIATTELLI^{4*}/CHIETI-PESCARA, ITALIEN

Verbesserte Materialeigenschaften, die den gestiegenen Ansprüchen von Zahnärzten und Patienten an hochwertige ästhetische Resultate gerecht werden, haben entscheidend zur Entwicklung einer neuen Generation von Keramikaufbauten beigetragen. Yttrium-stabilisierte Zirkoniumdioxid-Aufbauten (Y-TZP) zeichnen sich durch ihre zahnähnliche Farbe, hohe Belastungsfestigkeit, Gewebeerträglichkeit und intra-sukuläre Formverbesserung aus.¹⁻⁵ Das Phänomen der Umwandlungsverstärkung von Zirkoniumoxid führt zu extrem hoher Festigkeit der Komponenten, außergewöhnlicher Biege- und Zugfestigkeit, Frakturwiderstand und chemischer Beständigkeit.^{6,7} Um als echte Alternative berücksichtigt zu werden, müssen die mechanischen und biologischen Eigenschaften von Keramikaufbauten denen von Titanaufbauten gleichen oder besser sein. Diese Anforderungen können nur von hochleistungsfähigen und biokompatiblen Oxidkeramiken erfüllt werden.⁸⁻¹⁰

Oxidkeramiken sind aus mechanischer Sicht Metallen gleichzusetzen, biologisch allerdings überlegen.¹¹⁻¹⁴ Eine Ausnahme ist die hohe Sprödigkeit von Keramik und die Gefahr von Sprüngen. Bisher war die Verwendung von Implantataufbauten aus Vollkeramik für Implantatrestaurationen durch diese Eigenschaft limitiert. Die Vermeidung der Aufbautenlockerung und ihrer Implantat-Suprakonstruktionen, gleich welchen Materials, ist von besonderem Interesse. Die Aufbau-Halteschraube, bei der die Biegung durch hohe Belastungen beginnt, wird als das schwächste Verbindungsglied bei vollkeramischen Einzelzahn-Implantatrestaurationen angesehen.¹⁵ Ziel dieser Studie war die Bestimmung der Bruchfestigkeit von Zirkonium-Implantataufbauten und des erforderlichen Drehmoments zum Lösen der Halteschraube vor und nach Applikation zyklischer Belastun-

gen auf die Implantataufbau-Einheit. Außerdem wurde das dynamische Verhalten und Lastverteilungsmuster von Zirkoniumaufbauten anhand der transienten dynamischen Analyse durch Finite Element Studien (FEM) untersucht.

Material und Methoden

Es wurde eine Laborstudie entsprechend den internationalen Standards (DIN ISO/WD 14801 Rev [F], International Organization for Standardization) durchgeführt, die die funktionelle Belastung eines enossalen Implantatkörpers und seiner Aufbaukomponenten unter Annahme des ungünstigsten Falls simulierte. Gerade CERCON® Zirkonium-Implantataufbauten wurden mit sieben XiVE® Implantaten mit einem Durchmesser von 4,5 mm und einer Länge von 18 mm verbunden (DENTSPLY Friadent, Mannheim, Deutschland). Alle Implantate wurden in ein elastisches Material (EpoFix, Stuers, Ballerup, Dänemark) eingebettet, welches einem knochenähnlichen Young's-Modul von 4.100 MPa entsprach. Die Implantatschulter ragte dabei drei Millimeter über das

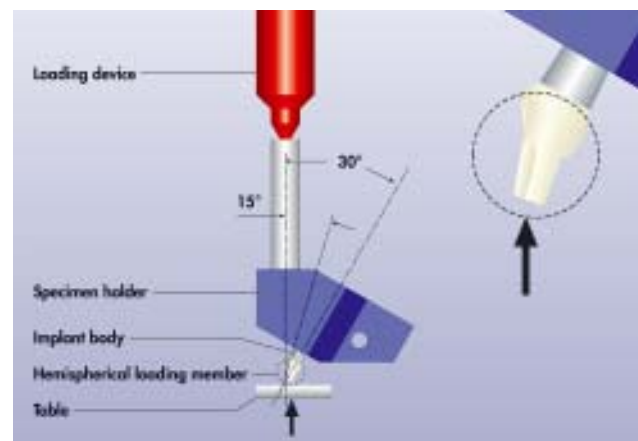


Abb. 1: Testanordnung für zyklische Belastung mittels servohydraulischer, dynamischer Testung. Kompressionsbelastung mit 30° Abweichung von der Implantatachse.

^{1*} Dr. med. dent., Ludwigshafen, Deutschland

^{2*} DENTSPLY Friadent, Mannheim, Deutschland

^{3*} Dr. med., Dr. med. dent., Privatpraxis, Bologna, Italien, Gastprofessor Universität Chieti-Pescara, Italien

^{4*} Dr. med., Dr. med. dent., Professor für Oralpathologie und Medizin, Zahnklinik, Universität Chieti-Pescara, Italien

umgebende Material hinaus, um den ungünstigsten Fall einer krestalen Knochenresorption zu simulieren. Um definierte Hebelkräfte zu simulieren, wurden kugelförmige Kappen angefertigt, auf alle Zirkoniumaufbauten zementiert (TempBond®, Kerr, Kalifornien, USA) und auf die gleiche Länge von 8 mm angepasst. Während des Tests ruhte die kugelförmige Kappe auf einer ebenen Platte. Die Belastung wurde über einen Edelstahlstab appliziert (mit einem Stift über einen kleinen Bohrpunkt in der Mitte), um externen Kräften zu widerstehen und eine zu starke laterale Auslenkung des Stabs und der daran befestigten Halterung zu vermeiden. Zyklische Belastungstests (Cyclic loading tests, CLT) wurden mittels einer servohydraulischen, dynamischen Testmaschine (Instron 8872, Instron, Canton, MA, USA), bei Belastungen zwischen 100 und 450 Newton für bis zu fünf Millionen Belastungszyklen bei 15 Hz durchgeführt. Dabei wurde eine Kompressionsbelastung mit 30° Abweichung von der Implantatachse appliziert. Dies führte zu einer Kombination von Kompressions-, Biege- und Scherbelastungen des Testkörpers. Die Tests wurden sowohl statisch unter Einzelbelastungsbedingungen als auch mit zyklischen Belastungen durchgeführt, um Ermüdungskurven mit denen für einen Bruch erforderlichen Zyklen zu vergleichen. Dabei wurde der gleiche Implantattyp (XiVE®) sowohl für die statischen Belastungstests (1,27 mm/Minute Kreuzkopfgeschwindigkeit) als auch für die zyklischen Ermüdungstests (15 Hz) verwendet. Die zum Lösen der Halteschrauben erforderlichen Drehmomentwerte wurden mit einer Tohnichi Drehmomentlehre (Tohnichi America Corporation, Northbrook, IL, USA) ermittelt.

Zusätzlich wurde das dynamische Verhalten der Zirkoniumdioxid-Aufbauten anhand einer transienten dynamischen Analyse durch Finite Element Studien (FEM) untersucht. Dabei handelt es sich um ein Software-Optimierungsverfahren, das auf einer CAD-Zeichnung (Computer Aided Design,) der Implantataufbau-Einheit basiert. Ein mathematisches Gitternetz wurde mit den Zeichnungen der Implantataufbau-Einheit überlagert. Anschließend wurde eine virtuelle Belastung gewählt, die den klinischen Bedingungen in der Mundhöhle entspricht. Eine identische Anordnung wurde für die Computeranalyse mit geraden Aufbauten gewählt. Externe Belastungen von 100 und 250 Newton wurden mit einer Neigung von 30° zur Implantatachse auf die Versuchseinheit appliziert. Die FEM-Studien wurden mit der Pro/MECHANICA Software (Parametric Technology Corporation, Needham, MA, USA) durch Vergleich von Vander-Mises- und maximalen Belastungswerten, die sich aus der Berechnung ergaben, durchgeführt.

Ergebnisse

Die in der vorliegenden Studie untersuchten CERCON® Zirkonium-Keramikaufbauten zeigten eine maximale Frakturfestigkeit von 672 N während statischer Belastung und von 269 N während zyklischer Belastung bei einem Auslaufpunkt von 800.000 bis 5.000.000 Zyklen bzw.

403 N bei einem Auslaufpunkt von 10.000 Zyklen. Das durchschnittliche Drehmoment, das zum Lösen der Aufbau-Halteschrauben nach dem (initialen) Anziehen erforderlich war, betrug $21 \text{ Ncm} \pm 1$ bzw. $20 \text{ Ncm} \pm 1$ (Messgenauigkeit $\pm 2 \text{ mm}$) nach Belastung mit bis zu fünf Millionen Zyklen. Die Drehmomentwerte nahmen minimal ab, führten jedoch zu keiner Schraubenlockerung. Die FEM-Analyse zeigte ein Muster von niedrigen, gut verteilten Belastungen entlang der gesamten Implantataufbau-Einheit bei einer externen Belastung von 100 N. Höhere Belastungsspitzen von bis zu 800 MPa wurden am zervikalen Anteil des Zirkoniumaufbaues und am apikalen Drittel seiner Halteschraube bei einer externen Belastung von 250 N nachgewiesen.

Diskussion

Die Verwendung von Zirkoniumdioxid als Material für Implantataufbauten wurde wegen seiner, im Vergleich zu Aluminiumoxid und anderen Dentalkeramiken, hohen Bruchfestigkeit eingeführt.¹⁶⁻¹⁸ Bislang sind nur wenige Daten über die Erfolgsrate und die durchschnittliche Lebensdauer von Zirkonium-Implantatversorgungen verfügbar.^{4,5,19} Bei der Untersuchung der Bruchfestigkeit von Zirkoniumaufbauten und der Auswirkung zyklischer Belastungen auf eine Schraubenlockerung, müssen maximale Kaukräfte berücksichtigt werden. Zahlreiche Untersuchungen haben sich ausführlich mit den beim Kauvorgang auftretenden Kaukräften beschäftigt.²¹⁻²⁴ Abgesehen von individuellen anatomischen und physiologischen Charakteristika wurde gezeigt, dass die maximalen Kaukräfte je nach Region der Mundhöhle variieren. Während die größten Kaukräfte im Bereich der ersten Molaren gefunden wurden, tragen die Schneidezähne nur etwa ein Drittel bis ein Viertel der Kräfte der posterioren Region. Es konnten Durchschnittswerte aufgezeigt werden, die von 180 bis 847 N für die maximale Kaukraft variierten, wogegen von kleineren Werten im Bereich von 94 bis 250 N für die Schneidezahnregion berichtet wurde.²¹⁻²⁴ Nach intensiven Untersuchungen forderten KÖRBER und LUDWIG²⁵, dass festsitzender Zahnersatz im Seitenzahnbereich stabil genug sein sollte, um eine mittlere Belastung von 500 N auszuhalten. Es erscheint sinnvoll, einen ähnlichen zulässigen Mindestwert für posteriore Implantataufbauten und ihre Suprakonstruktionen zu erwarten. Außerdem sollte ein zyklisches Ermüdungsmuster und eine in der Mundhöhle verursachte Belastung durch Korrosionsermüdung berücksichtigt werden.² Im wässrigen Mundmilieu wurden materialbedingte Unzulänglichkeiten von Keramiken dafür verantwortlich gemacht, die Bildung von Sprüngen zu induzieren, die auf eine kritische Größe anwachsen können. Ein Bruch resultiert letztendlich aus einem finalen Belastungszyklus, der die mechanische Belastbarkeit der Keramik überschreitet. Als grundsätzliche Regel gilt, dass die Belastbarkeitsgrenze für zyklische Ermüdung, der man Dentalkeramik aussetzen kann, etwa 50 % der maximalen Bruchfestigkeit beträgt.²⁶ Folglich muss, eine initiale Bruchfestigkeit innerhalb eines Sicherheitsbe-

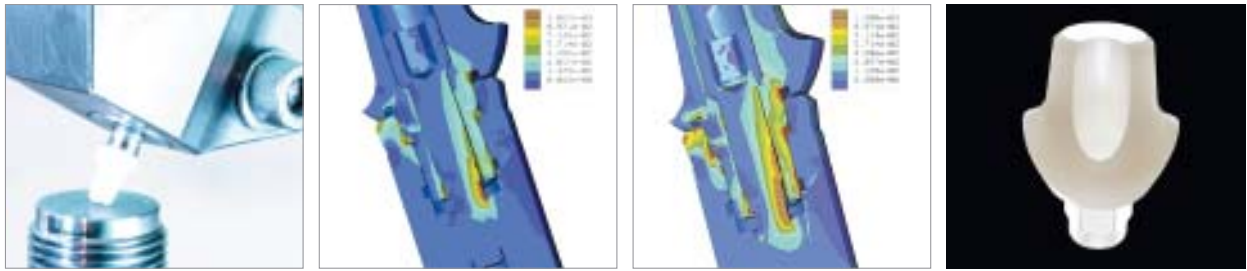


Abb. 2: Nahaufnahme der dynamischen Festigkeitstestung der Implantat-Zirkoniumaufbau-Einheit. – Abb. 3: FEM der Implantat-Zirkoniumaufbau-Einheit bei einer externen Belastung von 100 N. – Abb. 4: FEM der Implantat-Zirkoniumaufbau-Einheit bei einer externen Belastung von 250 N. – Abb. 5: FRIADENT® CERCON® Aufbau mit Sechskant-Verbindung.



Abb. 6: Situation nach Implantatinserterion ohne Lappenbildung. Vormontiertes XIVE® TempBase Abutment wird als temporärer Aufbau verwendet. – Abb. 7: Nichtfunktionell belastetes Kunststoffprovisorium unmittelbar nach Implantatinserterion. – Abb. 8: Postoperative Frontalansicht nach vier Monaten mit CERCON® Aufbau in situ.

reichs von 300 N für die Frontzahnregion und 1.000 N für die posteriore Region im Ober- und Unterkiefer gefordert werden, um eine günstige klinische Prognose für Zirkonium-Implantataufbauten und ihre vollkeramischen Restaurationen zu gewährleisten. Weitere In-vitro- und In-vivo-Studien sind nötig, um zu bestätigen, dass diese Forderung auf klinische Situationen übertragen werden kann.

Die in der vorliegenden Studie untersuchten Zirkonium-Implantataufbauten zeigten eine maximale Frakturfestigkeit von 672 N während statischer Belastung und von 269 N bzw. 403 N während zyklischer Belastung. An diesem Punkt wurde die Belastung abgebrochen, um die Drehmomentwerte der Halteschrauben messen zu können. Die vorliegenden Resultate liefern den Nachweis, dass CERCON® Aufbauten in der Frontzahnregion des Ober- und Unterkiefers sicher verwendet werden können, wogegen im Molarenbereich zu Vorsicht geraten

werden muss. Diese Ergebnisse entsprechen den Herstellerempfehlungen, die Aufbauten nur im anterioren Bereich des Ober- und Unterkiefers zu verwenden. Zyklische Belastungen simulieren die unter klinischen Bedingungen auftretenden Kaukräfte am besten. Vorsicht ist jedoch bei der Extrapolierung von Labordaten auf klinische Situationen geboten, da viele In-vivo-Variablen von einer kontrollierten Laborstudie nicht erfasst werden können. Es wird vermutet, dass das Phänomen der Umwandlungsverstärkung zur hohen Bruchfestigkeit von Zirkoniumdioxid beiträgt und die „selbst-reparierenden“ Eigenschaften des Zirkoniums eine weitere Ausbreitung von Sprüngen verhindern kann.^{6,7} Dieses Phänomen der Ausbreitungsverminderung von Mikrorissen durch hohe Materialspannung wird als Umwandlungsverstärkung bezeichnet. Neue Zirkoniumoxid-Keramiken wurden für unterschiedliche Anwendungen entwickelt. Die bedeutendste zahnärztliche Anwendung ist

Probe	CERCON® Abutment	max. Kraft (N)	Frakturzyklus (n)	Entfernungsdrehmoment (Ncm) Halteschraube	
	Statische Belastung (N)			initial	nach
1	40 %	268,8	811.930	23	21
2	40 %	268,8	818.023	20	18
3	40 %	268,8	905.645	21	20
4	40 %	268,8	5.000.000	20	19
5	60 %	403,2	10.000	21	19
6	60 %	403,2	10.000	20	20
7	60 %	403,2	10.000	20	20

Ermüdungstestung von Zirkoniumaufbauten: Erforderliches Ausdrehmoment der Aufbau-Halteschraube vor (initial) und nach zyklischer Belastung.



Abb. 9: Postoperative Frontalansicht beim Eingliedern der vollkeramischen Krone. – Abb. 10: Ansicht der Vollkeramikrestauration in situ mit Polymerisationslicht (palatinal). Beachte identische Transparenz von Keramikrestauration und angrenzender Bezaehlung. – Abb. 11: Postoperative Röntgenaufnahme mit endgültiger Versorgung.

die polykristalline Stabilisierung von Zirkoniumdioxid mit Yttriumoxid (Y-TZP).²⁷ Verglichen mit anderen stabilisierenden Oxiden ist dies die feinkörnigste, am dichtesten gesinterte und mechanisch hochwertigste Struktur.

Restaurationen in der ästhetisch anspruchsvollen Frontzahnregion stellen sowohl in der chirurgischen als auch in der prothetischen Phase der Implantologie eine beträchtliche Herausforderung dar. Titan hat sich als das Material der Wahl für enossale Implantate etabliert und führte zu einem hohen Maß an Vorhersagbarkeit. Zirkoniumdioxid-Keramik ist ein geeigneter Werkstoff zur Herstellung von Implantataufbauten mit geringem bakteriellen Besiedelungspotenzial.^{13,29,30} Ihre Haltbarkeit und Farbübereinstimmung sind Grundvoraussetzungen für ästhetisch hochwertige Implantatrestaurationen.^{4,5,31–33}

Schlussfolgerung

Innerhalb der Grenzen dieser Studie übertraf die Frakturresistenz der untersuchten Zirkoniumdioxid-Implantataufbauten die in der Literatur dokumentierten Werte von bis zu 300 N für die maximalen Kaukräfte in der Frontzahnregion. Die Aufbauten zeigten auch nach bis zu fünf Millionen Belastungszyklen noch eine exakte Passung im Titanimplantat. Die hohe Bruchfestigkeit, die für Keramikaufbauten aus Yttrium-stabilisiertem Zirkoniumdioxid festgestellt wurde, unterstreicht die guten mechanischen Eigenschaften unter hohen Belastungsbedingungen.

Zusammenfassung

Ziel: Zweck dieser Studie war die Bestimmung der Bruchfestigkeit von Zirkonium-Implantataufbauten und des erforderlichen Drehmoments zum Lösen der Halteschraube vor und nach Applikation zyklischer Belastungen auf die Implantataufbau-Einheit. Außerdem wurde das dynamische Verhalten und Lastverteilungsmuster von Zirkoniumaufbauten anhand einer transienten dynamischen Analyse durch Finite Element Studien (FEM)

untersucht. Methode und Materialien: Statische und zyklische Belastungen von sieben XiVE® Implantaten mit geraden CERCON® Zirkoniumaufbauten wurden unter Annahme des schlechtesten Falls nach internationalen Standards simuliert. Zyklische Belastungstests (Cyclic Loading Tests, CLT) wurden mittels einer servohydraulischen, dynamischen Testmaschine bei Belastungen zwischen 100 und 450 N mit bis zu fünf Millionen Belastungszyklen bei 15 Hz durchgeführt. Das dynamische Verhalten der Aufbauten wurde mit FEM und der Pro/MECHANICA Software durch Vergleich der Van-der-Mises- und maximalen Belastungswerte analysiert. Ergebnisse: CERCON® Aufbauten zeigten eine maximale Frakturfestigkeit von 672 N während statischer Belastung und von 269 N während zyklischer Belastung bei einem Auslaufpunkt von 800.000 bis 5.000.000 Zyklen bzw. 403 N bei einem Auslaufpunkt von 10.000 Zyklen. Das durchschnittliche Drehmoment, das zum Lösen der Aufbau-Halteschrauben nach dem (initialen) Anziehen erforderlich war, betrug $21 \text{ Ncm} \pm 1$ bzw. $20 \text{ Ncm} \pm 1$ (Messgenauigkeit $\pm 2 \text{ mm}$) nach Belastung mit bis zu fünf Millionen Zyklen. Die Drehmomentwerte nahmen minimal ab, führten jedoch zu keiner Schraubenlockerung. Die FEM-Analyse zeigte Belastungsspitzen von bis zu 800 MPa am zervikalen Anteil des Zirkoniumaufbaus und am apikalen Drittel seiner Halteschraube bei einer externen Belastung von 250 N. Schlussfolgerung: Innerhalb der Grenzen dieser Studie übertrafen Zirkonium-Implantataufbauten die in der Literatur etablierten Werte für die maximalen inzisalen Kaukräfte, und waren auch nach einigen Millionen Belastungszyklen noch passgenau mit dem Titanimplantat verbunden.

Die Literaturliste kann in der Redaktion angefordert werden.

Korrespondenzadresse:
Dr. med. dent. Peter Gehrke
Bismarckstr. 27
67059 Ludwigshafen
Fax: 06 21/68 12 44 68
E-Mail: dr-gehrke@dr-dhom.de