

CAD/CAM-Implantatabutments: Materialauswahl, Biege- und Bruchfestigkeit, klinische Bewährung

Aktuelle Literaturübersicht

PETER GEHRKE, CARSTEN FISCHER, OCTAVIO WEINHOLD, GÜNTER DHOM





Abb. 1a bis c Klinischer Fall mit interner Wurzelresorption von Zahn 11. Nach Extraktion und Implantation wurde ein präfabrizierter Titanaufbau verwendet, der zu einem Farbshift der perimplantären Mukosa und zu einem kompromitierten Gesamtergebnis der Ästhetik führte.

Zusammenfassung

Implantataufbauten sind mehr als ein bloßes Kopplungselement zwischen dem osseointegrierten Implantatkörper und der prothetischen Suprakonstruktion. Sie gelten heute als wichtiger Faktor für den implantologischen Langzeiterfolg. Daher werden Abutments aus vielen Perspektiven intensiv untersucht. Relevante Forschungsergebnisse aus Klinik und Labor umfassen z. B. das Abutmentmaterial, die Implantataufbauverbindung, den Design- und Herstellungsprozess und die Kompatibilität der verschiedenen Systeme. Diese Ergebnisse führen zu einer Fülle von Informationen über ästhetische, biologische und mechanische Eigenschaften. Der vorliegende Beitrag gibt eine aktuelle Übersicht zur wissenschaftlichen Datenlage von Implantatabutments, zu ihrer Biege- und Bruchfestigkeit sowie zu ihrer klinischen Langzeitbewährung.

Indizes

Implantatprothetik, Werkstoffe, Aufbauten, Abutments, Evidenz

Einleitung

Implantatgetragener Zahnersatz ist heute fester Bestandteil prothetischer Versorgungskonzepte zur Wiederherstellung von Kaufunktion und natürlicher Ästhetik. Die guten Langzeitergebnisse von festsitzenden und herausnehmbaren Suprakonstruktionen ermöglichen dem Behandler und dem Zahntechniker eine Vielzahl an Planungsmöglichkeiten. Eine Voraussetzung für den klinischen Erfolg sind biokompatible Materialien, die den chemischen und physikalischen Kräften der Mundhöhle dauerhaft widerstehen. Die in der Implantatprothetik eingesetzten Werkstoffe sollten den auftretenden Kaubelastungen, wechselnden Temperaturen und Säuregraden in der Mundhöhle standhalten. Dabei werden im Bereich der ersten Molaren die größten Kaukräfte gemessen. Die Lastmittelwerte liegen im Molarenbereich bei 216 bis 847 N, während im Frontzahnbereich Kräfte von 108 bis 299 N erreicht werden^{21,49}.

Präfabrizierte, einteilige Abutments

Bei der Wahl des Materials für Implantataufbauten hat sich Titan aufgrund sei-

ner hervorragenden Biege- und Bruchfestigkeit sowie der akzeptablen Biokompatibilität klinisch bewährt und gilt aufgrund der vorhandenen Langzeitdaten als „Goldstandard“^{24,29}. Neben rein funktionellen Erfolgskriterien haben im sichtbaren Frontzahn- und Prämolarenbereich ästhetische Aspekte einen entscheidenden Anteil an dem Erfolg oder Misserfolg einer Implantatversorgung. Die Verwendung von Titanabutments in ästhetisch anspruchsvollen Bereichen kann bei Patienten mit dünner Schleimhaut zu einem gräulichen Farbshift der Mukosa führen und somit die Ästhetik negativ beeinflussen (Abb. 1)²⁵. Dieser werkstoffbedingte Nachteil von Titanaufbauten führte zur Entwicklung und zum Einsatz von vollkeramischen, einteiligen Abutments aus Aluminiumoxidkeramik und Yttrium-stabilisierter Zirkonoxidkeramik.

Der Einsatz neuer keramischer Werkstoffe mit ihren Vorteilen bei der Umsetzung eines hochästhetischen Implantatkonzeptes darf die Langlebigkeit prothetischer Arbeiten jedoch nicht gefährden. Daher sollte die Gesamtstabilität des Abutments und der dazugehörigen Krone für die hohen Druck- und Scherbelastungen beim Kauen ausreichend sein. Ein Hauptunterschied der



Abb. 2 Beispiele für einteilige CAD/CAM-Abutments und Hybridabutments mit einer Titanklebebasis und CAD/CAM-generiertem Aufbau aus Zirkonoxid, Lithium(di)silikat oder Polyetheretherketon (PEEK).

Werkstoffeigenschaften von Titan, Zirkonoxid- und Aluminiumoxidkeramiken liegt in der Sprödigkeit der Keramiken. Auch wenn die Biegefestigkeit von Zirkonoxidkeramiken mit 800–1200 MPa (Aluminiumoxid 547 MPa) deutlich höher als bei Titan ist (ca. 400 MPa), so ist die Bruchzähigkeit von Zirkonoxid, also der Widerstand der Keramik gegen Rissfortschritt, mit 9 MPa/m² (Aluminiumoxid 3,55 MPa/m²) deutlich niedriger als bei Titan (40 bis 60 MPa/m²)³⁰. Während Metalle Spannungsspitzen durch plastische Verformung kompensieren können, bricht Zirkonoxid nahe seiner Elastizitätsgrenze und macht die Keramik empfindlich gegenüber Zugkräften. Studien zeigen, dass einteilige präfabrizierte Abutments aus Zirkonoxid im Vergleich zu Implantataufbauten aus Aluminiumoxid ein besseres Bruchlastverhalten aufweisen³².

Aus klinischer Sicht zeigen Implantataufbauten aus Zirkonoxid in einer retrospektiven Metaanalyse vergleichbare Überlebensraten wie aus Titan, jedoch bessere Ergebnisse als bei Aufbauten aus Aluminiumoxidkeramik²³. Gehrke et al. untersuchten in einer Laborstudie die Inzidenz von Schraubenlockerungen bei präfabrizierten, vollkeramischen Aufbauten aus Zirkonoxid. Dabei zeigten sich nur geringe Verluste der Anzugskraft der Halteschrauben, eine Lockerung wurde nicht festgestellt. Die gemessene Bruchkraft der Abutments bei statischer Belastung lag bei durchschnittlich 672 N¹⁴. Eine prospektive klinische Langzeitstudie von Zembic et al. bestätigt, dass die in vitro demonstrierten guten mechanischen Eigenschaften auch für den klinischen Einsatz gelten⁵². Die nachverfolgten Zirkonabutments dieser Untersuchung wurden bei 27 Patienten im Frontzahn-, Eckzahn- und Prämolarenbereich zum Ersatz von Einzelzähnen verwendet. 54 Zirkonoxidabutments wurden 11,3 (± 0,9) Jahre nach-

untersucht. Die Abutments wiesen nach diesem Beobachtungszeitraum eine Erfolgsrate von 96,3 % auf und zeigten damit eine exzellente Überlebensrate. Die klinischen Fünf-Jahres Ergebnisse einer Studie von Nothdurft demonstrieren jedoch, dass einteilige präfabrizierte Zirkonabutments für den Molarenbereich ungeeignet sind, da es aufgrund der hohen Kaubelastungen zu einer erhöhten Inzidenz von technischen Komplikationen und zum Bruch der Abutments kommen kann³⁵.

Neben den ästhetisch positiven Eigenschaften hat sich Zirkonoxid als biokompatibel und inert erwiesen⁹. Der klinische Erfolg von Abutments aus Zirkonoxid führte zu einer immer größer werdenden Vielzahl von Anbietern vollkeramischer Aufbauten. Die Aufbauten unterscheiden sich dabei hinsichtlich ihrer Form, Herstellungsweise und Art der Implantat-Aufbauverbindung. Eine Laborstudie von Aramouni et al. belegt Unterschiede des Bruchlastverhaltens vollkeramischer Abutments, die oberhalb der physiologisch auftretenden Kräfte des Frontzahnbereichs lagen¹.

Eine weitere Laborstudie untersuchte die Breite des Mikrospalts zwischen Implantat und Aufbau bei vier unterschiedlichen vollkeramischen Implantat-Abut-

mentsystemen⁴. Der gemessene Mikrospalts bei den getesteten Systemen mit interner Implantat-Abutmentverbindung und konischem Interface zeigte kleinere Messwerte als Systeme mit Flach-zu-Flach-Verbindungen (But-Joint). Die Autoren vermuten, dass sich die präzise Passung in diesem Bereich positiv auf den biomechanischen und biologischen Erfolg dieser Systeme auswirkt. Das Bruchlastverhalten von Zirkonoxid-aufbauten steht auch in Abhängigkeit zum Durchmesser des Abutments, wobei es zu einer signifikanten Steigerung der Bruchkräfte bei zunehmendem Durchmesser der Aufbauten kommt³⁶.

Individuelle CAD/CAM-Abutments: einteilig vs. zweiteilig

Neben präfabrizierten Standardaufbauten ermöglicht die computergestützte Konstruktion und Fertigung (Computer-Aided-Design/Computer-Aided-Manufacturing: CAD/CAM) die Herstellung von individuellen einteiligen Abutments aus Titan und Zirkonoxid sowie zweiteiligen Hybridabutments mit einer Titanklebebasis und CAD/CAM-generiertem Aufbau aus Zirkonoxid, Lithium(di)silikat oder Polyetheretherketon (PEEK) (Abb. 2).

Individuelle CAD/CAM-Abutments erlauben den Ausgleich von Achsendivergenzen zwischen Implantat und korrespondierender Krone. Der Verlauf des Kronenrandes kann dem Weichgewebsverlauf angepasst werden und Forderungen nach einem anatomischen Emergenzprofil sowie der Kontrollierbarkeit des Zementspaltes bei implantatgetragenen Einzelzahnersatz können individuell gelöst werden (Abb. 3 und 4). Beim Vergleich des Bruchlastverhalten von präfabrizierten, einteiligen Zirkonabutments mit im CAD/CAM-Verfahren hergestellten einteiligen Aufbauten gleichen Materials konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, obwohl die Passgenauigkeit der präfabrizierten Abutments den manuell hergestellten Abutments überlegen war (Abb. 5 bis 7)²².

Mit der Einführung von Titan-Nitridbeschichteten (TiN) CAD/CAM-Aufbauten ist eine zusätzliche Materialklasse verfügbar, die eine Ästhetikoptimierung in Kombination mit guter Abutmentstabilität ermöglicht (Abb. 5). Aufgrund der gold- oder rosafarbenen TiN-Beschichtung können auch bei dünnen Schleimhautverhältnissen ein negativer Farbshift

der periimplantären Mukosa verhindert und ein gutes ästhetisches Gesamtergebnis realisiert werden^{12,19}. Im Vergleich zu klassischen Titanoberflächen zeigt TiN eine signifikante Reduktion von Plaque und bakterieller Besiedlung, das macht es aus biologischer Sicht zu einem interessanten Material für Implantataufbau-

ten^{20,40}. Die Integrität der TiN-Abutmentoberfläche muss jedoch bei allen Laborschritten sorgsam beachtet werden¹⁸.

Zweiteilige Hybridabutments bestehen aus einer Titanklebebasis und einem CAD/CAM-generierten Keramikaufbau, die miteinander extraoral verklebt werden. Für die Gesamtstabilität eines

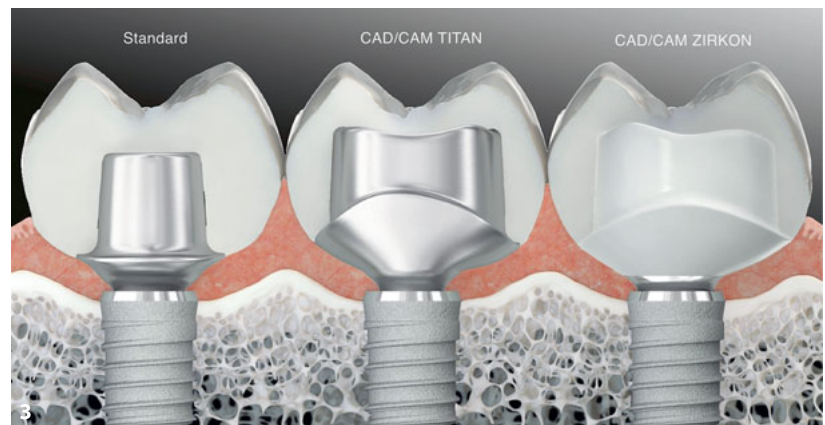


Abb. 3 Vergleich von präfabriziertem Standardaufbau aus Titan und CAD/CAM-generierten, individuellen Molaren-Abutments. **Abb. 4** Veränderung der Geometrie eines CAD/CAM-Abutments in Abhängigkeit von der in der Konstruktionssoftware gewählten Schulterhöhe bzw. Position des Kronenrandes (0, 1, 2, oder 3 mm unterhalb des Mukosarandes). **Abb. 5** Einteiliges, individuelles CAD/CAM-Abutment aus zentraler Herstellung in identischer Geometrie, jedoch in unterschiedlichen Materialvarianten: **a** Titan, **b** Titan-Nitrid und **c** Zirkonoxid.



Abb. 6a und b Titanabutments führen bei dünner periimplantärer Mukosa zum Farbshift der umgebenden Weichgewebe. In Kombination mit einer hochtransluzenten Kronenkeramik (Lithiumdisilikat) führen sie ebenfalls zu starken Farbveränderungen der prothetischen Versorgung. **Abb. 7a und b** Einteilige bzw. zweiteilige Hybridabutments können neben ihrer guten Biokompatibilität zu ästhetischen und funktionellen Gesamtergebnissen führen.

Hybridabutments spielen nicht nur die Werkstoffeigenschaften selbst, sondern vor allem der dauerhaft stabile adhäsive Verbund eine entscheidende Rolle. Bei zweiteiligen Abutments sollen die optimalen mechanischen Materialeigenschaften des Titaninserts durch extraorale Verklebung mit den guten ästhetischen und mechanischen Eigenschaften der CAD/CAM-generierten Keramikhülse kombiniert werden. Um eine präzise Implantat-Aufbau-Verbindung zu garantieren, wird die Schnittstelle zum Implantat (Anschlussgeometrie) konfektioniert hergestellt. Hybridabutments aus Zirkonoxid und Titanklebebasis besitzen eine

höhere Bruchlast als einteilige Zirkonoxidabutments, da die Titanklebebasis die Stabilität von Zirkonoxidabutments erhöhen^{45,51}. Daneben weisen zweiteilige Abutments hohe Biegemomente (Ncm) auf, die ebenfalls die Biegemomente für einteilige Zirkonoxidabutments überschreiten, jedoch geringer als für einteilige Titanabutments sind⁴⁷.

Hybridabutments mit Titanklebebasis haben sich dennoch ähnlich stabil wie einteilige Titanabutments erwiesen⁷. Dies wird daran verdeutlicht, dass für zweiteilige Abutments mit Titanklebebasis im Vergleich zu einteiligen Titanabutments sogar eine höhere Bruchlast gemessen

werden konnte, wobei es bei Ersteren zu einer Deformation der Implantatschulter kam⁴⁶. Des Weiteren kommt es erst unter hoher Krafteinwirkung, die die normalen Kaukräfte übertrifft, zum Versagen der Hybridabutments oder der Implantate¹⁰. Zweiteilige Abutments mit Titanklebebasis besitzen demnach gute mechanische Eigenschaften und können hohe Kräfte aufnehmen (Abb. 8 a bis c und Abb. 9).

Durch das Verkleben mit der Titanbasis kann auf eine Friktion der Zirkonoxidhülse und somit auch auf mögliche Zugspannungen verzichtet werden. Zirkonoxid ist anfälliger gegenüber Zugspannungen als Metall beziehungsweise



Legierungen, aufgrund der spröden Materialeigenschaften, wohingegen Titan hohe Druckspannungen aufnehmen kann⁴². Die Zugspannungen können eine Phasenumwandlung von der tetragonalen in die monokline Kristallphase, also eine Änderung des ZrO_2 -Keramikgefüges hervorrufen, die mit einer Volumenzunahme einhergeht. Infolgedessen können Mikrorisse im Keramikgefüge entstehen, die letztendlich zu einem Bruch des Zirkonoxidaufbaus und zu einem Versagen der gesamten implantatprothetischen Versorgung führen können. Neben der Geometrie der Verankerung und der Festigkeit der Elemente ist die Gesamtstabilität von Hybridabutments von der adhäsiven Verklebung der beiden Komponenten abhängig (Abb. 10). Im Fokus steht die Vorbehandlung der beiden Materialien (Titan/Keramik), um einen zuverlässigen Klebeverbund zu erzielen (Abb. 11)⁵⁴.

Es gibt einige Studien, die sich mit der Verklebung von Zirkonoxid befassen^{26,48}. Zirkonoxid unterscheidet sich von Glaskeramik und glasinfiltrierter Keramik, da es nicht mit 5 %iger-Flusssäure angeätzt werden kann⁴². Daher sollte Zirkonoxid zur adäquaten Vorbehandlung an der Klebefläche mit Aluminiumoxidpartikeln (Al_2O_3) korundgestrahlt wer-



Abb. 8a bis c Klinischer Fall mit Implantatpfiler-Vermehrung nach Entfernung der insuffizienten VMK-Brücke im III. Quadranten und prothetischer Versorgung mit vollkeramischen Einzelkronen auf Hybridabutments. **Abb. 9** Ein Beispiel für eine noch nicht verklebte Molar-Hybridkrone (links) und ein zweiteiliges Hybridabutment mit CAD/CAM-generierter Zirkonoxidhülle (rechts). **Abb. 10** Vergleichende Darstellung einer präfabrizierten Titanbasis (geringe Unterstützungs- und Klebeflächen) und eines CAD/CAM-Abutments als individuelle Basis für die Verklebung einer monolithischen Zirkonoxidkrone.



Abb. 11 Set-up für die extra-orale Verklebung von Hybridabutments und Abutmentkronen.

den, mit ≤ 50 mm bei 0,5 bis 1 bar⁶. Als problematische Oberflächenbehandlung wird zu aggressives Abstrahlen (110 bis 250 mm bei 2 bis 4 bar) betrachtet, da Mikrorisse auf der Oberfläche und eine Phasenumwandlung entstehen können, was schlechtere Materialeigenschaften hervorrufen beziehungsweise das Zirkonoxid beschädigen kann⁸. Für Zirkonoxid sollte ein Primer oder Befestigungskomposit mit einem Phosphatmonomer (MDP = 10-Methacryloyloxydecyldihydrogenphosphat) verwendet werden, da dies einen guten, dauerhaften Verbund herstellt⁵⁰.

Die Klebefläche der Titanklebebasis sollte mit 50 bis 110 mm großen Alumi-

niumpoxidpartikeln (Al_2O_3) mit geringem Druck bei 1 bis 1,5 bar korundgestrahlt und silanisiert beziehungsweise silikatisiert werden¹³. Die Anschlussgeometrie darf dabei jedoch nicht abgestrahlt werden. Das Silikatisieren stellt ein tribochemisches Verfahren dar (z. B. Rocatec, CoJet). Bei dem Prozess werden siliziumbeschichtete Aluminiumoxidpartikel mit Druckluft auf die Oberfläche aufgebracht, die Oberfläche wird aktiviert und eine bessere Benetzbarkeit erzeugt. Der adhäsive Verbund zwischen Klebebasis und Zirkonoxidabutment hat sich mithilfe von Korundstrahlen als Vorbehandlung als sehr zuverlässig und stabil erwiesen, da die Verbindung zur Klebe-

basis unter Belastung intakt bleibt⁴⁴. Jedoch können andere Versagensarten auftreten, wie Schraubenlockerung, Schraubendeformation, Schraubenbruch oder Bruch des Keramikaufbaus um die Titanklebebasis¹⁵.

Eine Titanklebebasis kann mit unterschiedlichen keramischen Materialien adhäsiv verklebt werden (Tab. 1). Aktuelle Studien zeigen, dass weder die Klebefuge noch das Abutmentmaterial einen negativen Einfluss auf das zervikale Knochenniveau oder das Weichgewebe haben³¹. Der Klebspalt sollte bei Hybridabutments jedoch möglichst klein gehalten werden. Ideal wäre eine maximale Spaltbreite von 20 bis 30 μm ¹⁸ (Abb. 12).

Da Zirkonoxid im Vergleich zu Glaskeramiken eine schlechte Transluzenz aufweist, weiß und opak ist, werden im ästhetischen Frontzahnbereich häufig Hybridabutments mit CAD/CAM-generierten Lithiumdisilikat-Hülsen (LaT) verwendet⁵⁴. Lithiumdisilikat ist die stärkste und zähste der verfügbaren Glaskeramiken. Es hat eine mäßige Biegefestigkeit (360 bis 500 MPa) und Bruchzähigkeit (2,5 bis 3 MPa, 0,5 m), jedoch ausgezeichnete Transluzenz und Farbanpassung. Eine aktuelle In-vitro-Untersuchung zeigt, dass LaT- und ZrO_2 -Hybridabutments mit Metallbasen den im Frontzahnbereich auftretenden physiologischen Okklusionskräften standhalten und daher als ästhetische Alternative zur Versorgung einzelner Implantate im anterioren Bereich empfohlen werden können¹⁰. Die Studienergebnisse deuten darauf hin, dass die Bruchfestigkeit von LaT-Abutments offensichtlich nicht negativ beeinflusst wird, wenn sie als Hybridabutments verwendet werden.

Zu berücksichtigen sind dabei die Ergebnisse einer aktuellen In-vitro-Studie zur Haftzugfestigkeit zwischen der Titanklebebasis und dem keramischen Bauteil von Hybridabutments. Die Untersuchung

Tab. 1 Einteilung der verschiedenen Materialien für Implantataufbauten.

einteilig	zweiteilig auf Titanklebebasis
Titan	Zirkonoxid
Titan-Nitrid (TiN)	
Aluminiumoxid	Lithiumdisilikat-Hybridabutmentkrone
Zirkonoxid	Lithiumdisilikat
Polyetheretherketon (PEEK) (Provisorium)	zirkonoxidverstärktes Lithiumdisilikat
	Polyetheretherketon (PEEK)

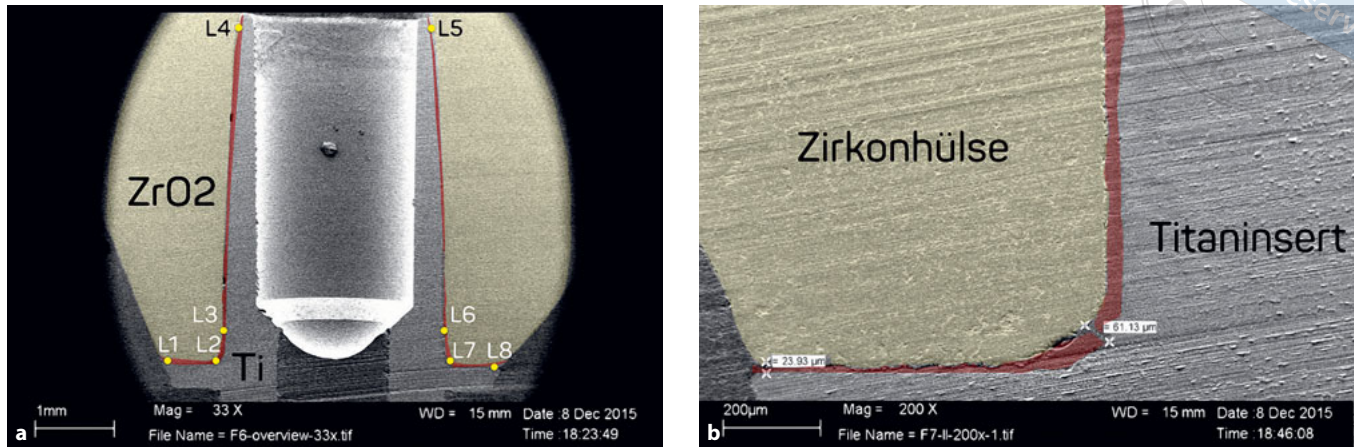


Abb. 12a und b Rasterelektronische Aufnahmen (REM) zur Bestimmung des externen Klebspaltes bei Zirkonoxid-Hybridabutments¹⁸.

demonstrierte bessere Klebekraft-Werte für CAD/CAM-gefrästes Lithiumdisilikat (CAD/CAM LaT) im Vergleich zu gepresstem Lithiumdisilikat (Press LaT) oder CAD/CAM-gefrästem Zirkonoxid (CAD/CAM ZrO₂)⁵³. Präfabrizierte Titanbasen sollten unter keinen Umständen im Bereich der Retentionsflächen durch den Zahntechniker bearbeitet werden. Die Ergebnisse einer weiteren In-vitro-Studie zeigen, dass implantatgetragene monolithische Zirkonoxidkronen auf Zirkon-Hybridabutments eine signifikant höhere Bruchfestigkeit aufweisen als monolithische Kronen aus Lithiumdisilikat auf demselben Aufbau typ¹¹. Trotz zahlreicher vielversprechender Laborstudien und initialer klinischer Ergebnisse² sind Langzeituntersuchungen zu Hybridabutments und den möglichen restaurativen Materialkombinationen überfällig.

Um systemabhängige Einflüsse näher zu identifizieren, untersuchten Sailer et al. den Einfluss, den die Implantat-Abutmentverbindung unterschiedlicher präfabrizierter vollkeramischer Abutments auf das Bruchlastverhalten ausübt. Dabei wurden einteilige und zweiteilige Zirkonaufbauten untersucht. Die Arbeitsgruppe konnte signifikante Unterschiede

zwischen den einzelnen Gruppen aufzeigen. Die höchsten Biegemomente wurden bei zweiteiligen Zirkonabutments mit interner Titanverbindung erreicht³⁸. Eine Laborstudie von Truninger et al. bestätigte die höheren Biegebruchmomente für zweiteilige Hybridabutments mit metallischem Insert und einer Innenverbindung, im Vergleich zu Werten von einteiligen Systemen und zweiteiligen Systemen mit Außenverbindung⁴⁷. Abutmentfrakturen waren der Hauptgrund für das Versagen der Prüfkörper. Interne Implantat-Aufbauverbindungen waren weniger anfällig für Brüche und Lockerungen der Halteschraube und scheinen Systemen mit externen Verbindungen hinsichtlich der Langzeitstabilität des Implantat-Abutmentkomplexes überlegen zu sein^{27,39,43}. Der derzeitige Wissensstand über vollkeramische Implantataufbauten aus Zirkon scheint Forderungen nach umfangreichen vergleichenden Studien in diesem Bereich zu rechtfertigen.

Leutert et al. untersuchten in einer Laborstudie die unterschiedlichen Biegemomente und Frakturbilder von individuellen Aufbauten mit unterschiedlichen einteiligen internen Implantat-Abutmentverbindungen²⁸. Es konnten

signifikante Unterschiede der Bruchfestigkeit sowie im Verlauf der Frakturmuster bei den unterschiedlichen internen Verbindungstypen konstatiert werden. Abutments, bei denen der Aufbau nicht auf den Außenkanten des Implantates auflag (Platform Switching), erreichten signifikant höhere Bruchwerte als Aufbauten, bei denen ein keramischer Anteil des Abutments der Implantatschulter aufsaß. Frakturen verliefen bei den Aufbauten mit Verbindungsart des Platform Switchings in erster Linie unterhalb der Implantatschulter, während die Frakturen der Abutments ohne Platform Switching auf Höhe der Implantatschulter verliefen. Diese Studie verdeutlicht den Einfluss, den das Design des Abutments und die Art des Verbindungstyps auf die Stabilität des Implantat-Abutmentkomplexes ausübt.

Die klinische Situation bei Zahnverlust im Oberkieferfrontzahnbereich fordert häufig die Verwendung abgewinkelter Aufbauten. Nothdurft et al. testeten in einer Laborstudie den Einfluss künstlicher Alterung auf die Bruchstabilität gerader und angulierter präfabrizierter Zirkonabutments³⁴. Die Testgruppen mit abgewinkelten Abutments hielten dabei



höheren Kräften stand als jene mit geraden Abutments. Die thermozyklische Belastung führte bei keiner der Testgruppen zu einer signifikanten Herabsetzung der Bruchstabilität. Die Bruchkräfte aller getesteten Gruppen waren höher als die zu erwartenden Kaukräfte im Frontzahnbereich.

In einer weiteren Laborstudie von Nothduft et al. wurden die Bruchlasten von angulierten im Vergleich zu nicht angulierten keramischen Aufbauten bei dreiteiligen hybridgetragenen Brücken getestet, bei denen jeweils ein Zahnanalogon mit einem vollkeramischen Aufbau kombiniert wurde³³. Es wurde dabei signifikant höhere Bruchlasten der Brückenkonstruktionen mit angulierten Abutments festgestellt.

Der gute klinische Erfolg für abgewinkelte Titanabutments konnte bereits in mehreren Studien belegt werden^{5,41}. Gehrke et al. untersuchten das Bruchverhalten abgewinkelter individuell gefertigter Abutments aus Zirkonoxid¹⁶. Die Studienergebnisse zeigen, dass einteilige CAD/CAM-gefertigte, angulierte Zirkonoxidbauten hinsichtlich ihres Bruchlastverhaltens präfabrizierten, angulierten Aufbauten ebenbürtig sind (Abb. 13). Individuelle zweiteilige Hybridbauten erreichten innerhalb des gewählten Studiendesigns jedoch höhere Bruchlasten als einteilige Aufbauten. Die Verwendung eines zweiteiligen Systems mit Innenverbindung scheint hinsichtlich der besseren Langzeitprognose anderen Systemen überlegen und sollte deshalb in Bereichen mit höheren Kaukraftbelastungen präferiert werden.

Als relativ neuartiges Material wird auch Polyetheretherketon (PEEK) für die Herstellung von Hybridabutments eingesetzt. PEEK ist ein polyzyklisches, aromatisches, thermoplastisches Polymer, das teilkristallin und in linearer Struktur vorliegt. Es ist ein leichtes Material

mit einer geringen Dichte (1,32 g/cm³). PEEK hat gute mechanische Eigenschaften, ist hydrolysebeständig und weist eine gute Biokompatibilität auf³⁷. Die charakteristischste Eigenschaft von PEEK-Aufbauten ist ihr niedriger Elastizitätsmodul. PEEK-Hybridabutments

können durch Press- und Fräsmethoden innerhalb von CAD/CAM-Technologien hergestellt werden und sind dabei entweder direkt mit der Titanbasis verbunden (gepresstes PEEK) oder werden extraoral mit der Titanbasis verklebt (gefrästes PEEK) (Abb. 14). Im



Abb. 13 15°-angulierte Zirkonabutments (von links nach rechts): unpräpariertes, präfabriziertes, einteiliges Zirkonoxidabutment, CAD/CAM-generiertes einteiliges Zirkonoxidabutment und zweiteiliges Hybridabutment mit CAD/CAM-generierter Keramikhülse. **Abb. 14** PEEK-Aufbauten mit Anschlussgeometrie, gepresst vs. CAD/CAM-gefräste PEEK-Hülsen, verklebt auf Titan-Basis.

Rahmen einer aktuellen Studie wurden für keramisch verstärkte PEEK-Abutments auf Titanbasen vielversprechende Bruchfestigkeiten gefunden³. Die mit monolithischen Lithiumdisilikatkronen restaurierten Polymer-Abutments zeigten ähnliche Bruchfestigkeiten ($623,9 \pm 97,4$ N) wie die getesteten Zirkonabutments ($602,93 \pm 121,03$ N). Damit hätten PEEK-Abutments das klinische Potenzial, den maximalen anterioren Okklusionskräften standzuhalten. Bevor PEEK-Abutments jedoch als funktionelle und ästhetische Alternative für Einzelimplantatversorgungen im Frontzahnbereich empfohlen werden können, sind weitere In-vitro- und klinische Studien erforderlich.

Schlussfolgerung

Obwohl Titan als Abutmentmaterial noch immer als klinischer Standard für präfabrizierte und CAD/CAM-generierte Aufbauten gilt, stehen heute aus funktioneller und ästhetischer Sicht verlässliche Alternativmaterialien zur Verfügung. Hybridabutments aus Zirkonoxid oder Lithium(di)silikat auf Titanklebebasen sind, im Rahmen ihrer Indikation, eine sichere und stabile Option für ästhetisch anspruchsvolle Implantatversorgungen. Mit der Einführung von Titan-Nitrid-beschichteten (TiN) CAD/CAM-Aufbauten ist eine zusätzliche Materialklasse verfügbar, die eine Ästhetikoptimierung in Kombination mit guter Abutmentstabilität ermöglicht. Ob auch Hybridabutments aus Polyetheretherketon (PEEK) für die klinischen Einsatz empfohlen werden können, muss in Zukunft durch Langzeitstudien überprüft werden.

Danksagung

Wir bedanken uns bei Dr. Rafaela Jenatschke, Frankfurt, für die klinische Zusammenarbeit und die Unterstützung unserer Projekte.

Literatur

1. Aramouni P, Zebouni E, Tashkandi E, Dib S, Salameh Z, Almas K. Fracture resistance and failure location of zirconium and metallic implant abutments. *J Contemp Dent Pract* 2008;9:41–48.
2. Asgeirsson AG, Sailer, Gamper F, Jung RE, Hämmerle CHF, Thoma DS. Veneered zirconia abutments cemented on non-original titanium bases: 1-year results of a prospective case series. *Clin Oral Implants Res* 2019;30:735–744.
3. Atsü SS, Aksan ME, Bulut AC. Fracture resistance of titanium, zirconia, and ceramic-reinforced polyetheretherketone implant abutments supporting CAD/CAM monolithic lithium disilicate ceramic crowns after aging. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2019;34:622–630.
4. Baixe S, Fauxpoint G, Arntz Y, Etienne O. Microgap between zirconia abutments and titanium implants. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2010;25:455–460.
5. Balshi TJ, Ekfeldt A, Stenberg T, Vrielinck L. Three-year evaluation of Bränemark implants connected to angulated abutments. *Int J Oral Maxillofac Implants* 1997;12:52–58.
6. Blatz MB, Chiche G, Holst S, Sadan A. Influence of surface treatment and simulated aging on bond strengths of luting agents to zirconia. *Quintessence Int* 2007;38:745–753.
7. Butz F, Heydecke G, Okutan M, Strub JR. Survival rate, fracture strength and failure mode of ceramic implant abutments after chewing simulation. *J Oral Rehab* 2005;32:838–843.
8. Chintapalli RK, Marro FG, Jimenez-Pique E, Anglada M. Phase transformation and subsurface damage in 3Y-TZP after sandblasting. *Dent Mater* 2013;29:566–572.
9. Degidi M, Artese L, Scarano A, Perrotti V, Gehrke P, Piattelli A. Inflammatory infiltrate, microvessel density, nitric oxide synthase expression, vascular endothelial growth factor expression, and proliferative activity in peri-implant soft tissues around titanium and zirconium oxide healing caps. *J Periodontol* 2006;77:73–80.
10. Elsayed A, Wille S, Al-Akhali M, Kern M. Comparison of fracture strength and failure mode of different ceramic implant abutments. *J Prosthet Dent* 2017;117:499–506.
11. Elshiyab SH, Nawafleh N, Öchsner A, George R. Fracture resistance of implant-supported monolithic crowns cemented to zirconia hybrid-abutments: zirconia-based crowns vs. lithium disilicate crowns. *J Adv Prosthodont* 2018;10:65–72.
12. Ferrari M, Carrabba M, Vichi A, Goracci C, Cagidiaco MC. Influence of abutment color and mucosal thickness on soft tissue color. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2017;32:393–399.
13. Fischer C, Gehrke P. Taktische Einheit: CAD/CAM-Hybridabutments. *Quintessenz Zahntech* 2017;43:1526–1542.
14. Gehrke P, Dhom G, Brunner J, Wolf D, Degidi M, Piattelli A. Zirconium implant abutments: fracture strength and influence of cyclic loading on retaining-screw loosening. *Quintessence Int* 2006;37:19–26.
15. Gehrke P, Alius J, Fischer C, Erdelt KJ, Beuer F. Retentive strength of two-piece CAD/CAM zirconia implant abutments. *Clin Implant Dent Relat Res* 2014;16:920–925.
16. Gehrke P, Johansson D, Fischer C, Stawarczyk B, Beuer F. In vitro fatigue and fracture resistance of one- and two-piece CAD/CAM zirconia implant abutments. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2015;30:546–554.
17. Gehrke P, Spanos E, Fischer C, Storck H, Tebbel F, Duddeck D. Influence of scaling procedures on the integrity of titanium nitride coated CAD/CAM abutments. *J Adv Prosthodont* 2018;10:197–204.
18. Gehrke P, Sing T, Fischer C, Spintzyk S, Geis-Gerstorfer J. Marginal and internal adaptation of hybrid abutment assemblies after central and local manufacturing, respectively. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2018;33:808–814.
19. Gil MS, Ishikawa-Nagai S, Elani HW, Da Silva JD, Kim DM, Tarnow D, Schulze-Späte U, Cleber S, Bittner N. Comparison of the color appearance of peri-implant soft tissue with natural gingiva using anodized pink-neck implants and pink abutments: a prospective clinical Trial. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2019;34:752–758.
20. Grössner-Schreiber B, Griepentrog M, Hausteiner I, Müller WD, Lange KP, Briedigkeit H, Göbel UB. Plaque formation on surface modified dental implants. *Clin Oral Impl Res* 2001;12:543–551.



21. Helkimo E, Carlsson GE, Helkimo M. Bite forces used during chewing of food. *J Dent Res* 1959;29:133–136.
22. Hjerppe J, Lassila LV, Rakkolainen T, Narhi T, Vallittu PK. Load-bearing capacity of custom-made versus prefabricated commercially available zirconia abutments. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2011;26:132–138.
23. Hu M, Chen J, Pei X, Han J, Wang J. Network meta-analysis of survival rate and complications in implant-supported single crowns with different abutment materials. *J Dent* 2019. doi: 10.1016/j.jdent.2019.04.007.
24. Jung RE, Zembic A, Pjetursson BE, Zwahlen M, Thoma DS. Systematic review of the survival rate and the incidence of biological, technical, and aesthetic complications of single crowns on implants reported in longitudinal studies with a mean follow-up of 5 years. *Clin Oral Impl Res* 2012;23:2–21.
25. Jung RE, Holderregger C, Sailer I, Khraisat A, Suter A, Hämmerle CH. The effect of all-ceramic and porcelain-fused-to-metal restorations on marginal peri-implant soft tissue color: a randomized controlled clinical trial. *Int J Periodontics Restorative Dent* 2008;28:357–365.
26. Kern M, Wegner SM. Bonding to zirconia ceramic: adhesion methods and their durability. *Dent Mater* 1998;14:64–71.
27. Khraisat A, Stegaroiu R, Nomura S, Miyakawa O. Fatigue resistance of two implant/abutment joint designs. *J Prosthet Dent* 2002;88:604–610.
28. Leutert CR, Stawarczyk B, Truninger TC, Hämmerle CH, Sailer I. Bending moments and types of failure of zirconia and titanium abutments with internal implant-abutment connections: a laboratory study. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2012;27:505–512.
29. Linkevicius T, Vaitelis J. The effect of zirconia or titanium as abutment material on soft peri-implant tissues: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Impl Res* 2015;26:139–147.
30. Luethy H, Filser F, Loeffel O, Schumacher M, Gaukler LJ, Hämmerle CH. Strength and reliability of four-unit all ceramic posterior bridges. *Dent Mater* 2005;21:930–937.
31. Mehl C, Gassling V, Schultz-Langerhans S, Acil Y, Bahr T, Wiltfang J, Kern M. Influence of four different abutment materials and the adhesive joint of two-piece abutments on cervical implant bone and soft tissue. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2016;31:1264–1272.
32. Nakamura K, Kanno T, Milleding P, Ortengren U. Zirconia as a dental implant abutment material: a systematic review. *Int J Prosthodont* 2010;23:299–309.
33. Nothdurft FP, Doppler KE, Erdelt KJ, Knauber AW, Pospiech PR. Influence of artificial aging on the load-bearing capability of straight or angulated zirconia abutments in implant/tooth-supported fixed partial dentures. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2010;25:991–998.
34. Nothdurft FP, Doppler KE, Erdelt KJ, Knauber AW, Pospiech PR. Fracture behavior of straight or angulated zirconia implant abutments supporting anterior single crowns. *Clin Oral Investig* 2011;15:157–163.
35. Nothdurft FP. All-ceramic zirconium dioxide implant abutments for single-tooth replacement in the posterior region: a 5-year outcome report. *Int J Prosthodont* 2019 M;32:177–181.
36. Nguyen HQ, Tan KB, Nicholls JI. Load fatigue performance of implant-ceramic abutment combinations. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2009;24:636–646.
37. Ramenzoni LL, Attin T, Schmidlin PR. In vitro effect of modified polyetheretherketone (PEEK) implant abutments on human gingival epithelial keratinocytes migration and proliferation. *Materials (Basel)* 2019;12.
38. Sailer I, Philipp A, Zembic A, Pjetursson BE, Hämmerle CH, Zwahlen M. A systematic review of the performance of ceramic and metal implant abutments supporting fixed implant reconstructions. *Clin Oral Implants Res* 2009;20 Suppl 4:4–31.
39. Sailer I, Sailer T, Stawarczyk B, Jung RE, Hämmerle CH. In vitro study of the influence of the type of connection on the fracture load of zirconia abutments with internal and external implant-abutment connections. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2009;24:850–858.
40. Scarano A, Piatelli M, Vrespa G, Caputi S, Piatelli A. Bacterial adhesion on titanium nitride-coated and uncoated implants: an in vivo human study. *J Oral Implantol* 2003;29:80–85.
41. Sethi A, Kaus T, Sochor P. The use of angulated abutments in implant dentistry: five-year clinical results of an ongoing prospective study. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2000;15:801–810.
42. Stawarczyk B, Keul C, Eichberger M, Figge D, Edelhoff D, Lümkeemann N. Werkstoffkunde-Update: Zirkonoxid und seine Generationen von verblendet bis monolithisch. *Quintessenz Zahntechnik* 2016;42:740–765.
43. Steinebrunner L, Wolfart S, Ludwig K, Kern M. Implant-abutment interface design affects fatigue and fracture strength of implants. *Clin Oral Implants Res* 2008;19:1276–1284.
44. Stimmelmayr M, Edelhoff D, Güth J-F, Erdelt K, Happe A, Beuer F. Wear at the titanium–titanium and the titanium-zirconia implant-abutment interface: a comparative in vitro study. *Dent Mater* 2012;28:1215–1220.
45. Stimmelmayr M, Sagerer S, Erdelt K, Beuer F. In vitro fatigue and fracture strength testing of one-piece zirconia implant abutments and zirconia implant abutments connected to titanium cores. *Int J Oral Maxillofac Implants* 2013;28:488–493.
46. Stimmelmayr M, Heiss P, Erdelt K, Schweiger J, Beuer F. Fracture resistance of different implant abutments supporting all-ceramic single crowns after aging. *Int J Comput Dent* 2017;20:53–64.
47. Truninger TC, Stawarczyk B, Leutert CR, Sailer TR, Hämmerle CH, Sailer I. Bending moments of zirconia and titanium abutments with internal and external implant-abutment connections after aging and chewing simulation. *Clin Oral Implants Res* 2012;23:12–18.
48. Zanakakis E-GC, Tzoutzas IG, Koidis PT. Is there a potential for durable adhesion to zirconia restorations? A systematic review. *J Prosthet Dent* 2016;115:9–19.
49. Waltimo A, Könönen M. A novel bite force recorder and maximal isometric bite force values for healthy young adults. *Scand J Dent Res* 1993;101:171–175.
50. Wolfart M, Lehmann F, Wolfart S, Kern M. Durability of the resin bond strength to zirconia ceramic after using different surface conditioning methods. *Dent Mater* 2007;23:45–50.
51. Yilmaz B, Salaita LG, Seidt JD, McGlumphy EA, Clelland NL. Load to failure of different zirconia abutments for an internal hexagon implant. *J Prosthet Dent* 2015;114:373–377.
52. Zembic A, Philipp AO, Hämmerle CH, Wohlwend A, Sailer I. Eleven-year follow-up of a prospective study of zirconia implant abutments supporting single all-ceramic crowns in anterior and premolar regions. *Clin Implant Dent Relat Res* 2015;17 Suppl 2:417–426.
53. Zirak M, Vojdani M, Khaledi AAR, Farzin M. Tensile bond strength of three custom-made tooth-colored implant superstructures to titanium inserts. *J Dent (Shiraz)* 2019;20:131–136.
54. Zöllner C, Stawarczyk B, Fischer C, Gehrke P, Liebermann A. Zirkonoxidabutment auf Titanklebebasis – eine aktuelle Literaturübersicht. *ZWR* 2018;127:346–355.



Summary

Implant abutments are more than a mere coupling element between the osseointegrated implant body and the prosthetic superstructure. Today they are regarded as an important factor for long-term success in implantology. Therefore, abutments are intensively investigated from many perspectives. Relevant research results from clinics and laboratories include, for example, the abutment material, the implant abutment connection, the design and manufacturing process and the compatibility of the various systems. These results lead to a wealth of information on esthetic, biological and mechanical properties. This article provides an up-to-date overview of the scientific data available on implant abutments, their flexural and fracture strength, and their long-term clinical reliability.



Dr. Peter Gehrke

Zahnarztpraxis für Oralchirurgie und Implantologie
 Bismarckstrasse 27
 67059 Ludwigshafen
 E-mail: dr-gehrke@prof-dhom.de
 und
 Department of Postgraduate Education
 Master of Oral Implantology, Oral and Dental
 Medicine
 Johann Wolfgang Goethe Universität
 60596 Frankfurt am Main
 E-Mail: gehrke@med.uni-frankfurt.de

ZT Carsten Fischer

Sirius Ceramics
 Lyoner Straße 44–48
 60528 Frankfurt am Main

Dr. Octavio Weinhold, M. Sc., M. Sc.

Zahnarztpraxis für Oralchirurgie und Implantologie
 Bismarckstrasse 27
 67059 Ludwigshafen

Prof. Dr. Günter Dhom

(Adresse wie Dr. Octavio Weinhold)