

Zusammenfassung

Zirkoniumdioxid findet als hochfestes vollkeramisches Gerüstmaterial zunehmend Verbreitung im zahntechnischen Alltag. Vollkeramik wird u. a. wegen seiner ästhetischen Vorzüge gegenüber Metallkeramik besonders angepriesen. Erste Erfahrungen zeigten jedoch, dass gerade bei Zirkonkronen die optischen Eigenschaften der Keramik gegenüber dem natürlichen Vorbild und anderen Dentalkeramiken noch deutliche Unterschiede aufwiesen. Aus diesem Grund wurden verschiedene Verblendkeramiken verglichen und der derzeitige Stand der Möglichkeiten in diesem Artikel dargestellt. Daneben werden Grundzüge des Lichtverhaltens in natürlicher Zahnschmelze und der Einfluss des Gerüsts erörtert.

Indizes

Vollkeramik, Ästhetik, optische Eigenschaften, Lichtbrechung, Lichtstreuung

Optische Eigenschaften von Verblendkeramiken auf Kronengerüsten aus Zirkoniumdioxid

Jan Hajt6, Hubert Schenk

Mit Zirkoniumdioxid steht uns heute ein zuverlässiger vollkeramischer Gerüstwerkstoff für die Kronen- und Brückenprothetik zur Verfügung. Bei gleicher Haltbarkeit und Präzision wird von den Patienten vollkeramischer Zahnersatz intuitiv einer metallgestützten Versorgung vorgezogen. Vollkeramik impliziert auch für den Laien Reinheit, biologische Verträglichkeit, Ästhetik und Werthaltigkeit. Unter den heutigen Rahmenbedingungen einer niedergelassenen zahnärztlichen Tätigkeit gewinnt dieser Faktor des persönlichen Wertes zunehmend an Bedeutung, da er beim Patienten eine erhöhte Bereitschaft zu finanziellen Aufwendungen für zahnmedizinische und zahntechnische Leistungen erweckt.

Der Aspekt der Ästhetik wird in der Werbung für vollkeramische Systeme und bei den entsprechenden Fertigungsverfahren meist in besonderem Maße hervorgehoben. In der Realität bestehen insbesondere bei den Keramikmassen, die für Zirkoniumdioxid angeboten werden, heute durchweg noch deutliche ästhetische Defizite. Dies sind allerdings Defizite, die meist nur dem Fachmann bewusst werden. Zirkonoxidkronen stellen aus ästhetischer Sicht aber einen Rückschritt z. B. gegenüber Presskeramikronen dar.

Zirkoniumdioxid in der Praxis



Abb. 1 Vollkeramikkrone auf Zirkoniumdioxidgerüst im Durchlicht.

Dennoch wurde in der Praxis der Autoren bewusst die Entscheidung getroffen, im Falle von Vollkronen ausnahmslos und auch in ästhetisch anspruchsvollen Fällen mit Zirkoniumdioxid zu arbeiten (Abb. 1). Der Hauptgrund ist die klare Priorität der Patienten auf Langlebigkeit und Haltbarkeit der teuer erstandenen neuen Zähne. Der Stellenwert einer perfekten Ästhetik wird von Zahnärzten und Zahntechnikern in der Regel überbewertet und als wichtiger angesehen, als es dem Patienten tatsächlich ist. Eine Verblend- oder Gerüstfraktur stellt für unsere Patienten nicht nur oftmals eine mittlere Katastrophe dar, sondern ist das beste Mittel, den Praxisruf nachhaltig zu beschädigen. In der Praxis der Autoren werden daher seit zwei Jahren ausschließlich Kronen, Brücken und Implantat-abutments aus Zirkoniumdioxid eingesetzt. Die Gerüstkomponenten werden dabei mit dem ZirkonZahn-System (ZirkonZahn GmbH, Bruneck, Italien) hergestellt. Dieses ermöglicht eine hinreichende Passgenauigkeit, um auch sehr hohen Qualitätsansprüchen gerecht zu werden. Daneben bietet das System gegenüber CAD/CAM-Systemen eine größtmögliche Gestaltungsfreiheit, was insbesondere bei Brückengerüsten von großer Bedeutung ist. Im Frontzahnbereich werden die Kronen immer mit partiellen oder zirkulären Schultern versehen, im Seitenzahnbereich dagegen wird angestrebt, den Abschlussrand mit dem stabilen Gerüst zu erzielen, um versehentliche Scherfrakturen dünn auslaufender Ränder beim Zementieren zu verhindern.

Es hat sich in dieser Zeit erwiesen, dass mit Zirkonoxid bisher bei gleicher Behandlungsmethodik keinerlei Nachteile gegenüber der bewährten metallkeramischen Technik aufgetreten sind. Weder konnten eine erhöhte Anzahl von Abplatzungen der Verblendung noch jegliche andere Probleme, die im Zusammenhang mit dem Material stehen könnten, beobachtet werden. Vielmehr werden mit der Zeit vermehrt Vorteile ersichtlich. So ist es z. B. möglich, bei Implantatkronen auf Zirkonoxidabutments die Ränder hygiene-freundlich isogingival zu legen, da selbst bei späteren Rezessionen keine Metallpfosten zum Vorschein kommen. Auch bedingen Verblendfrakturen auf Metallgerüsten häufig eine Neuanfertigung oder Neuverblendung, wenn dunkles Metall sichtbar wird, wohingegen sichtbare Zirkongerüste höchstwahrscheinlich eher toleriert werden. Bisher wurde allerdings im eigenen Patientengut bei ca. 250 eingegliederten Einheiten eine einzige Verblendscherfraktur an einem nicht unterstützten Höcker eines oberen zweiten Molaren beobachtet. Die fehlende Unterstützung durch das Gerüst bei CAD/CAM gefertigten Gerüsten aufgrund der Unzulänglichkeiten der meisten Modellierssoftwares scheint der wahrscheinlichste Grund für die vereinzelt berichteten erhöhte Verblendfrakturraten auf Zirkongerüsten zu sein.

Die tägliche Praxis bietet selten den Regelfall, sondern fast immer nur Sonderfälle. Zu diesen zählen z. B. ungünstige Hebelverhältnisse, spitze Pfeiler mit ungünstigem Spannungseintrag auf das Gerüst, palatinal stark eingeschränkte Platzverhältnisse, osseointegrierte nicht resiliente Implantatpfeiler oder auch erhöhte Belastungsverhältnisse bei Parafunktionen. Hinzu kommt die Problematik der allgemeinen Materialeigenschaften von Keramik. Diese sind u. a. die geringe Festigkeit gegen Zugspannung, breite Streuung (Weibullverteilung) der Festigkeitswerte, Materialermüdung durch subkritisches Risswachstum, Abnahme der Festigkeit im Laufe der Zeit auf ca. 30 bis 50% des Ausgangswertes oder auch die Abhängigkeit der individuellen Festigkeit von Volumen, Form und Oberflächengüte. All dies kommt bei einer vorwiegend manuellen Herstellungsweise sehr stark zum Tragen. Aus diesem Grund kann aus eigener Sicht die Dauerbelastbarkeit eines

VERBLENDMASSEN

Gerüstmaterials nicht hoch genug sein. Auf eine Stabilisierung eines schwachen Gerüsts mittels Dentinadhäsion kann kein Verlass sein, da deren im Einzelfall ungewisse Dauerhaftigkeit nicht das Erfolgskriterium für eine teure und aufwändige Arbeit sein darf. Nicht zuletzt ist die konventionelle Zementierung gegenüber der adhäsiven Befestigung gerade bei Kronen mit normalerweise intrasulkären Rändern deutlich praktikabler, einfacher, sicherer und sauberer. Keine andere Vollkeramik bietet die langfristige Sicherheit wie Zirkonoxid und im professionellen Alltag gilt zuvorderst: „Safety first“.

In der Überzeugung, mit Zirkonoxid ein langfristig stabiles vollkeramisches Gerüstmaterial für ein breites Indikationsspektrum zur Verfügung zu haben, erwies sich die hochwertige Ästhetik als das vorrangigste Problem. Es zeigte sich sehr bald, dass die Endergebnisse meist nicht die Hoffnungen erfüllten, die aufgrund der angenommenen allgemeinen ästhetischen Vorteile von Vollkeramik bestanden. Die Kronen erschienen in der Regel optisch sehr dicht, ohne Tiefenwirkung (Abb. 2). Dies war unabhängig von der Art des Gerüstmaterials (HIP oder gesintert) und vom Hersteller des Gerüst- oder Verblendmaterials. Im Nachfolgenden wird dargelegt, welche Gründe hierfür aus Anwendersicht möglicherweise in Frage kommen könnten. Hierzu muss zunächst betrachtet werden, wie die Vorlage beschaffen ist, deren Nachahmung so perfekt erzielt werden soll.

Die für die Autoren wichtigen Kriterien der optischen Erscheinung von Zähnen können trotz der inzwischen allgemein verfügbaren Farbmessgeräte auch heute noch schwer gemessen und in Werten ausgedrückt werden, da Zähne Gebilde aus optisch höchst unterschiedlichen und in sich wiederum teils regelmäßigen teils aber auch ungleichmäßig aufgebauten Strukturen darstellen. Dies hat eine äußerst komplexe Interaktion mit Licht zur Folge. Hinzu kommt, dass sich die Zahngewebe unterschiedlicher Personen oder Altersstufen in hohem Maße voneinander unterscheiden. Durch sorgfältige klinische Beobachtung sind viele optische Charakteristika von Zähnen erkannt worden, deren genaue Ursachen wissenschaftlich jedoch teilweise bisher nicht untersucht oder gar geklärt sind. So kommt es, dass viele den Praktiker interessierende Fragen noch offen sind. Die Untersuchung und mathematische Berechnung des genauen Verhaltens von Lichtstrahlen in den Zahngeweben ist zwar Gegenstand von wissenschaftlichen Forschungen zum Zwecke der Laserzahnheilkunde, doch die Ergebnisse zeigen eher, wie schwierig und komplex die Beschreibung der optischen Vorgänge ist. Licht verhält sich beim Auftreffen und Durchdringen von Zahnschubstanz auf sämtliche Arten, in denen Licht mit Materie interagieren kann (Abb. 3 und 4). Auf einige Punkte soll hier eingegangen werden. Wesentlich ausführlicher wird dies in dem Buch „Inspiration – Natürliche schöne Frontzähne“¹ dargestellt.



Abb. 2 Typisches Erscheinungsbild von Vollkeramikronen auf Zirkonoxidgerüsten (Zähne 14, 15). Die Kronen erscheinen optisch sehr dicht und ohne Tiefe. Selbst mit Metallkeramik lassen sich im Einzelfall bessere Ergebnisse erzielen. Das Gerüst kann demnach nicht alleine ausschlaggebend sein.

Optische Eigenschaften von Zähnen



Abb. 3 Ein extrahierter oberer mittlerer Schneidezahn im Durchlicht. Links: vollständig. Mitte: labiale Schmelzschicht entfernt. Rechts: kronenpräparation.



Abb. 4 Natürliche Zähne 11, 21. Der Zahn 21 ist mit weißem Cerec Scan Spray hinterlegt. Er wirkt nicht nur inzisal, sondern auch zervikal heller und mehr orange. Durch das weiße Puder wird alles Licht, das den Zahn durchdringt, wieder zurückgeworfen und gestreut. Infolge der Opaleszenz des Zahnes kommt es auch zu einer Farbtonverschiebung, da langwelliges (orange wahrgenommenes) Licht stärker hindurchgelassen und demnach bei weißem Hintergrund auch wieder vermehrt zurückgestreut wird als langwelliges.



Abb. 5a und 5b Extrahierter Zahn 21 im Auflicht (oben) und im Durchlicht (unten). Links jeweils intakt, rechts der Dentinkern. Sowohl Schmelz als auch Dentin sind transluzent.

Transluzenz der Zahngewebe

Alle im Mund sichtbaren Gewebe sind ebenso wie unsere Haut transluzent. Pulpa, Dentin und Schmelz sind in unterschiedlichem Maße lichtdurchlässig (Abb. 5a und 5b). Transluzenz und Transparenz sind nicht zu verwechseln. Transparenz bezeichnet Bilddurchlässigkeit, während Transluzenz Lichtdurchlässigkeit bedeutet. Transparenz ist der Extremwert der Transluzenz mit einem ungeminderten Lichtdurchfluss.

Bei der Betrachtung der Transluzenz von Zähnen ist neben der quantitativen Betrachtung vor allem die Frage interessant, auf welche Art und Weise das hindurchdringende Licht verändert wird (Abb. 6a und 6b). Grundsätzlich sind die optischen Vorgänge innerhalb der Zahnschicht komplex und vielgestaltig. Lichtwellen werden im Zahn auf verschiedene physikalische Arten beeinflusst. Am und im Zahn wird Licht vor allem gebrochen, gestreut (dabei verschiedene Arten von Streuung: diffus, vorwärts, rückwärts, mehrfach, wellenlängenabhängig), polarisiert, doppelt gebrochen, geleitet, gebeugt, absorbiert, reemittiert (Fluoreszenz). Diese Vorgänge verändern sich in unterschiedlichem Maße, je nach Beleuchtungsart und Intensität, Feuchtigkeit, Oberflächenbeschaffenheit oder Mikrostruktur der Zähne, um nur einige Faktoren zu nennen (Abb. 7).

Die generelle Transluzenz der Zähne ist deshalb von so besonderer Bedeutung, da das, was uns im Allgemeinen als „Zahnfarbe“ erscheint, im Wesentlichen auf der Summe aller oben erwähnten optischen Phänomene beruht. Zahnfarbe wird durch eine Volumen-

VERBLENDMASSEN



Abb. 6a und 6b Schmelzkappe eines extrahierten Zahnes 11 im Auflicht (links) und im Durchlicht (rechts). Der Zahnschmelz schimmert im Auflicht blass bläulich, im Durchlicht dagegen deutlich gelb-orange. Der Grund liegt in der unterschiedlich starken Streuung der sichtbaren Wellenlängen des Lichtes. Kurze Wellenlängen (Blau) werden stärker gestreut, lange (Gelb, Rot) werden ungestreut hindurchgelassen. Zahnschmelz ist ein wellenlängenabhängiger Filter. Dies ist der so genannte Opal-Effekt oder die Opaleszenz. Der Dentikern wurde herausgeschliffen und die Innenfläche mit Bond beschichtet, um eine glatte Oberfläche ohne Schleifspuren zu erhalten. Der ca. 0,5 mm breite, quer-verlaufende transparentere Streifen, ca. 1,5 mm unterhalb der Inzisalkante, entspricht einer Ansammlung des Bonds in der sehr dünn ausgeschliffenen Inzisalkante und stellt ein Artefakt dar.



Abb. 7 Schmelzkappe eines extrahierten Zahnes 11 in ausgetrocknetem und in wassergesättigtem Zustand. Der trockene Schmelz rechts ist opaker, heller und achromatischer, da Licht aller Wellenlängen stärker zurückgeworfen werden. Der hydrierte Schmelz links lässt langwelliges Licht hindurch und ist infolgedessen transparenter, gelblicher und dunkler.

reflexion erzeugt. Das bedeutet, auftreffendes Licht wird nach seinem Eindringen in den Zahn innerhalb des Zahnkörpers teilweise wieder zurückgeworfen oder zum Teil hindurchgelassen. Ein Aspekt dieser Lichtdynamik wurde in Abbildung 4 veranschaulicht. Es ist in Anbetracht dieser Lebendigkeit beeindruckend, wie naturnah mit heutigen Methoden Zahnersatz hergestellt werden kann. Die Reproduktion der korrekten Transluzenzgrade und Lichtwirkung natürlicher Zähne ist eines der wichtigsten Kriterien zur Erzielung einer naturgetreuen Restauration. Diese Parameter lassen sich heute noch am zuverlässigsten und genauesten visuell direkt am Patienten erfassen.

Dentin ist im Allgemeinen die am wenigsten transluzente Substanz der Zahnkrone. Alle Aussagen zu optischen Eigenschaften von Zahnschmelz können nur unter der Einschränkung gelten, dass sehr große individuelle Schwankungen vorkommen. Dentin und Schmelz verschiedener Personen, Zähne oder auch Lokalisationen innerhalb eines Zahnes können in Größenordnungen voneinander hinsichtlich Transparenz, Streuverhalten oder Absorption abweichen.

Streuung Die Art und Weise, wie Lichtstrahlen in den Zahnschmelz gestreut werden, ist die Grundlage der optischen Erscheinung von Zähnen. Prinzipiell gilt: Je mehr Licht aller Wellenlängen innerhalb des Zahnes zurückgestreut wird, desto opaker und heller erscheinen der Zahnschmelz sowie der gesamte Zahn. Die Schmelzprismen an sich sind nahezu transparent. Dass der Zahnschmelz nicht vollständig transparent aussieht, ist die Folge von Streuungsphänomenen. Im Gegensatz zu lichtundurchlässigen Materialien ist die Absorption und Streuung in einem nicht homogenen trüben Material komplexerer Natur (Abb. 8 und 9).

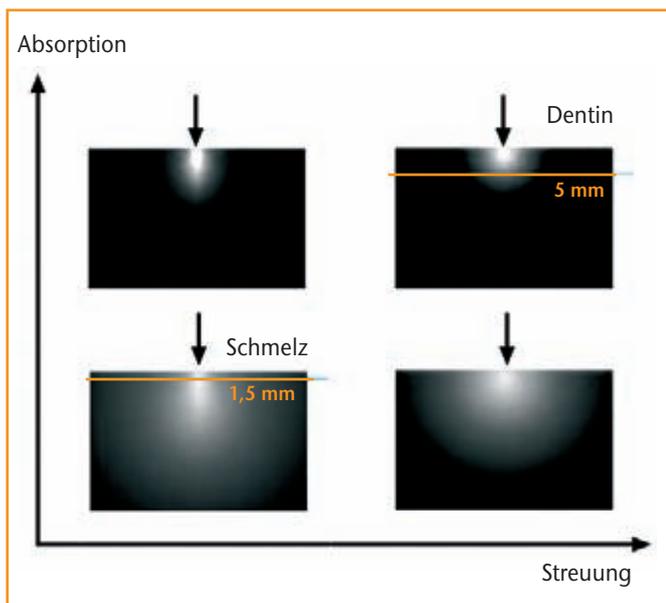


Abb. 8 Die generelle Lichtausbreitung in einem Gewebe erfolgt in Abhängigkeit vom Maß der Absorption und der Streuung. Sowohl im Zahnschmelz als auch im gesunden unverfärbten Dentin überwiegt die Streuung gegenüber der Absorption. Zahnschmelz absorbiert nur zu einem sehr geringen Anteil, streut aber im Verhältnis dazu sehr stark. Beim Dentin beträgt sowohl die Absorption als auch die Streuung ein Vielfaches gegenüber dem Schmelz. Die Schnitte entsprechen in etwa dem Erscheinungsbild in Abbildung 9 unten.

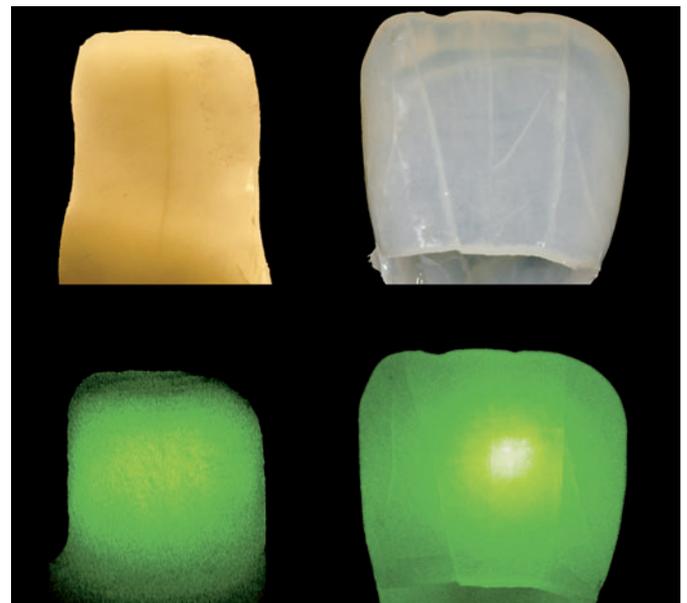


Abb. 9 Links Dentinkern. Dieser wurde orovestibulär auf ca. 3 mm Dicke zugeschliffen. An dünnen Bereichen (inzisal) wird auch Dentin relativ transluzent. Oben im Durchlicht. Unten mit einem grünen Laserstrahl von hinten beleuchtet. Die starke Streuung im Dentin wird sichtbar. Das Licht wird eher diffus gestreut, es ist kein heller Fleck in der Mitte zu sehen. Aber auch eine deutliche Absorption ist vorhanden, die Streuung ist etwas begrenzt, da das Licht sich z. B. nicht bis in die Inzisalkante ausbreitet. Rechts Schmelzkappe. Oben im Auflicht. Unten von oral mit einem grünen Laserstrahl beleuchtet. Durch die starke diffuse Mehrfachstreuung breitet sich Licht in der gesamten Kappe aus. Infolge der starken Vorwärtsstreuung dringt jedoch auch ein Großteil des Lichtes auf der Strahlungsachse hindurch (heller Punkt in der Mitte).

VERBLENDMASSEN

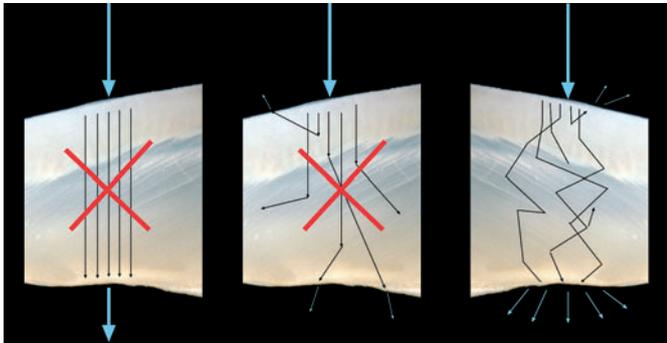


Abb. 10 Stark vereinfachtes Modell des Ausbreitung von Licht in der Zahnschmelz. Das Licht dringt nicht auf gerader Strecke hindurch (links). Lichtstrahlen werden auch nicht nur einmal gestreut (Mitte). Vielmehr wird jeder Lichtstrahl mehrfach gestreut und verändert seine Richtung häufig, bevor er irgendwo wieder austritt oder absorbiert wird. Querschnitt einer Palatinalfläche Oberkiefer 1er, obere hellere Zone Zahnschmelz, darunter Dentin (dieses Modell berücksichtigt nicht die wellenlängenabhängigen Unterschiede und unterschiedlichen Brechungsindizes).

Zur theoretischen Beschreibung der diffusen Reflexion und der Lichtausbreitung in einem inhomogenen Material existieren nur Näherungen (Abb. 10). Das am weitesten verbreitete mathematische Modell zur Berechnung für streuende und absorbierende färbende Schichten ist die Formel nach Kubelka-Munk. Jede eingefärbte Fläche reflektiert das eingestrahlte Licht, wobei die Fläche bestimmte Wellenlängenbereiche definiert absorbiert. Eingestrahktes Weiß kommt nach Abzug der spezifischen Absorption farbig zurück. Aber aus verschiedenen Schichttiefen kommt materialabhängig auch Streulicht zurück.

Keramische Massen und Kompositmaterialien, die zum Ersatz und der Nachahmung natürlicher Zähne verwendet werden, wirken umso weniger naturähnlich, je weniger sie den Streueigenschaften der Zahngewebe entsprechen. Dies ist insbesondere bei ausgeprägter Absorption der Fall. Absorption ist bei der Einfärbung mittels Pigmenten gegeben. Hohes Chroma wird bei Kunststoffen und Keramiken immer durch die Beigabe von Pigmenten (z. B. Metalloxide) erzeugt. Es ist bekannt, dass insbesondere Malfarben eine deutliche Metamerie bewirken.

Es ist auch sehr schwierig, das exakte Streuverhalten des Zahnschmelzes mathematisch zu berechnen oder experimentell zu bestimmen, da Lichtstrahlen innerhalb des Zahnes mehrfach gestreut werden. Das Licht, welches wir bei der Betrachtung eines Zahnes beobachten, hat einen langen Weg innerhalb des Zahnes zurückgelegt. Ein Großteil des Lichtes durchdringt das Dentin und es findet auch ein seitlicher Versatz statt. Bei Durchleuchtung eines Zahnes kann der Austrittspunkt eines Lichtstrahles einige Millimeter vom Eintrittspunkt versetzt liegen.

Wenn wie bei Schmelz und Dentin die Streuung in einem Medium größer ist als die Absorption, dann resultiert daraus ein diffuser Lichttransport innerhalb des Materials. Diese Lichtdiffusion findet auch über die Kontaktpunkte von einem Zahn zum anderen statt.

Licht breitet sich in unterschiedlichen Medien jeweils verschieden schnell aus. Je langsamer sich das Licht ausbreitet, als umso optisch dichter wird ein Material bezeichnet. Trifft Licht auf eine ebene Grenzfläche zwischen zwei lichtdurchlässigen Materialien mit unterschiedlicher optischer Dichte, dann werden die Lichtstrahlen an der Grenzfläche in ihrer Richtung verändert. Das Licht wird gebrochen. Die Stärke der Richtungsänderung ist umso größer, je größer der Unterschied zwischen den Brechungsindizes der Materialien ist. Der Brechungsindex (Refraktionsindex) bezeichnet das Verhältnis der Ausbreitungs-

Refraktion – Totalreflexion
– Lichtleiteneffekte

geschwindigkeit des Lichts in einem Medium zu der in Luft. Der Index für Luft oder Vakuum beträgt 1, und je langsamer sich das Licht in anderen Medien ausbreitet, umso größer ist der Index. Bei einem Index von 2 beträgt die Geschwindigkeit die Hälfte. Für uns sind folgende Brechungsindizes interessant:

- Luft $n = 1$
- Wasser $n = 1,33$
- Glas $n = 1,5$
- Dentin $n = 1,45$
- Schmelz $n = 1,62$

Die Schmelzkappe des Zahnes besitzt mit 1,62 einen höheren Brechungsindex als Glas und ist dabei sehr transluzent. Ebenso wie eine Glaskugel oder Linse bedeutet dies bei den konvex gekrümmten Oberflächen der Zähne, dass ein Vergrößerungsglaseffekt eintritt (Abb. 11).

Abb. 11 Gerenderte Darstellung von 3D-Scans einer natürlichen Zahnkrone mit Dentinkern. Obere Reihe: Zahnschmelz halbtransparent und mit einem Refraktionsindex von 1 berechnet (physikalisch nicht realistisch). Man erkennt die eigentliche Ausdehnung des Dentinkerns. Untere Reihe: Zahnschmelz mit einem Refraktionsindex von 1,62 berechnet. Der Dentinkern wird wie durch eine Linse vergrößert. Dies kommt der Realität näher. Dieses Modell ist stark vereinfacht und alle übrigen optischen Eigenschaften des Zahnes sind vernachlässigt.



Wenn ein Lichtstrahl von einem optisch dichteren Medium heraus auf die Grenzfläche zu einem optisch dünneren (kleiner Brechungsindex n) Medium trifft, dann wird er unterhalb eines kritischen Winkels θ_c (Grenzwinkel der Totalreflexion), bei dem der gebrochene Strahl parallel zur Grenzfläche verläuft, wieder zurückreflektiert. Es erfolgt Totalreflexion (Abb. 12 und 13). Bei Lichtleitfasern kann das Licht auf diese Weise die Faser nur am Ende wieder verlassen. Eine gebogene Glasfaser mit hohem Brechungsindex leitet das Licht durch wiederholte Totalreflexion fast ohne Intensitätsverlust über weite Strecken. Lichtleiteffekte werden sowohl am Zahnschmelz als auch am Dentin beobachtet (Abb. 14). Im Dentin werden für die Dentintubuli lichtleitende Eigenschaften angenommen.

Schmelz ist mit $n = 1,62$ optisch dichter (jedoch lichtdurchlässiger) als Dentin ($n = 1,45$). Totalreflexionen sind demnach an der Dentin-Schmelz-Grenze und auch an der

VERBLENDMASSEN

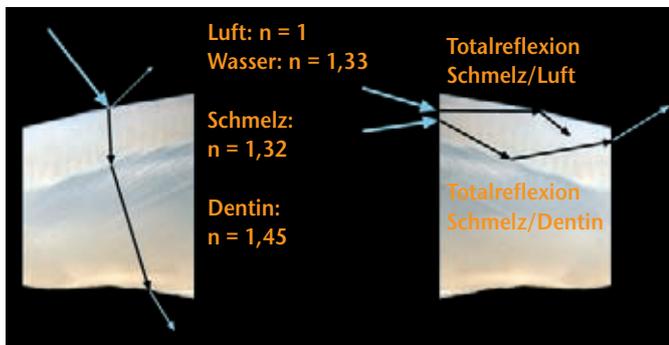


Abb. 12 Die Schmelzkappe ist mit $n = 1,62$ die optisch dichteste Zone im Zahn. Dentin ist zwar opaker jedoch optisch dünner ($n = 1,45$). Totalreflexion erfolgt bei Lichtstrahlen, die unterhalb des kritischen Winkels zur Schmelzoberfläche (kritischer Winkel = ca. 38°) oder der Schmelz-Dentin-Grenze (kritischer Winkel = ca. 63°) verlaufen. Dieses stark vereinfachte Modell berücksichtigt keine Streuungen, wellenlängenabhängigen Unterschiede und andere in der Realität vorhandenen Effekte.

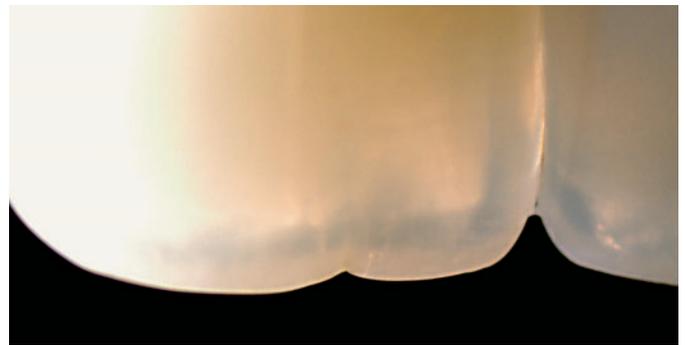


Abb. 13 Von außen deutlich erkennbare Totalreflexionen am Dentinkern und an der Schmelzinnenfläche (mesial-approximal) bei seitlicher Beleuchtung eines natürlichen Zahnes 11. Da die Schmelz- und Dentinmassen aller Dentalkeramiken und Komposite identische oder sehr nahe beieinander liegende Brechungsindizes um 1,5 besitzen, sind solche Effekte damit nicht nachzuahmen. Lediglich synthetisches Fluorapatit besitzt einen höheren Brechungsindex mit 1,63.

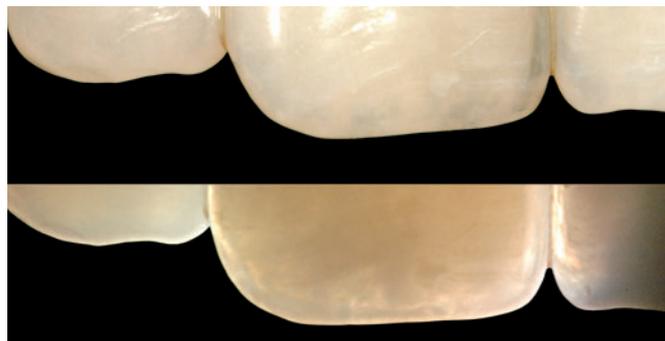


Abb. 14 Natürliche Inzisalkanten im Auflicht (oben) und im Durchlicht (unten). Die im Durchlicht besonders hell strahlenden Bereiche sind sehr wahrscheinlich auf Lichtleitereffekte zurückzuführen. Korrespondierend wird an diesen Stellen bei Beleuchtung von vorne besonders viel Licht verschluckt (dunkle Zonen).

Schmelzoberfläche (Luft: $n = 1$; Wasser $n = 1,33$) bei von innen kommenden Lichtstrahlen möglich. Der relativ hohe Brechungsindex von Zahnschmelz kommt klinisch visuell auch insofern zum Tragen, da ein befeuchteter Zahnschmelz aufgrund des höheren Index von Speichel gegenüber Luft transluzenter erscheint.

Wie alle gewachsenen biologischen Gewebe mit einer aus einzelnen Zylindern aufgebauten Struktur, wie z. B. Muskeln, Haut oder Knochen weisen die Zahnhartgewebe, bestehend aus Dentintubuli und Schmelzprismen, eine ausgeprägte Anisotropie der Lichtausbreitung auf. Anisotropie bedeutet, dass das Licht in einer bevorzugten Richtung stärker hindurchgelassen wird, sich das Licht im Medium also nicht gleichförmig in alle Richtungen ausbreitet. Die Richtungsabhängigkeit des Lichtdurchlasses im Schmelz lässt sich auch im Mund immer wieder beobachten (Abb. 15a und 15b). Natürliche Zähne können aus verschiedenen Blickwinkeln unterschiedlich wirken. Zahnschmelz funktioniert wie ein Richtungsfilter (Abb. 16 und 17). Es ist nicht möglich, dies mit künstlichen isotropen Materialien nachzustellen.

Anisotropie

VERBLENDMASSEN

Abb. 15a und 15b Je nach Betrachtungswinkel erscheinen unterschiedliche Zonen im Bereich der Inzisalkante und der Leisten bläulich bzw. transluzent schimmernd. Natürlicher Zahn 21.

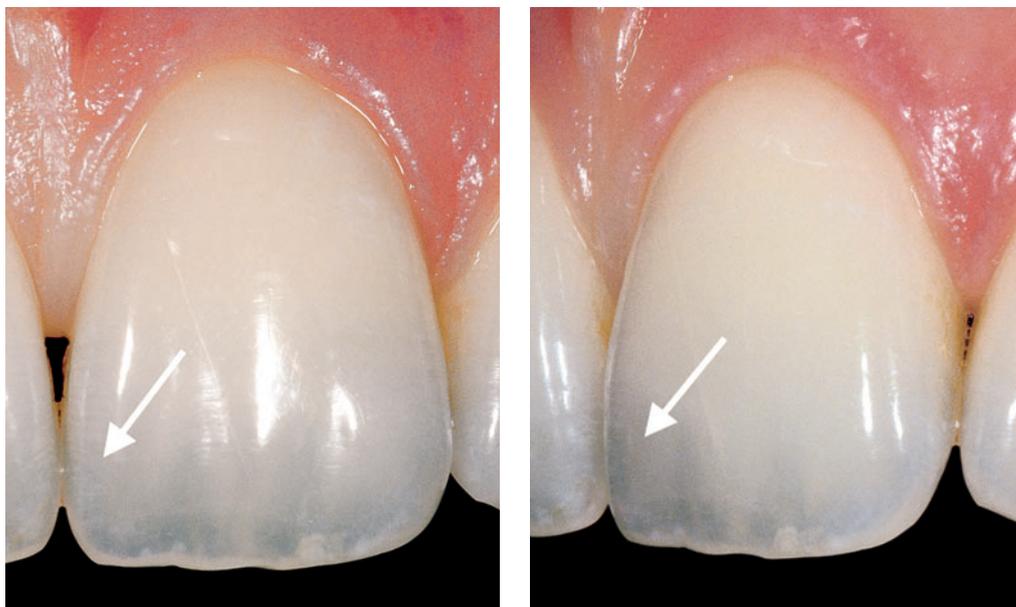


Abb. 16 Dentinscherbe eines extrahierten Zahnes aus zwei leicht unterschiedlichen Ansichten. Das Dentin erscheint an verschiedenen Stellen und auch je nach Betrachtungsrichtung unterschiedlich transluzent. Sehr deutlich ist das am rechten Rand der Scherbe zu erkennen. Je nach Einfallrichtung des Lichtes wird es unterschiedlich gestreut. Der Grund für diese ausgeprägte Anisotropie liegt in der Anordnung der Dentintubuli.



Abb. 17 Schmelzkappe eines natürlichen Zahnes 11 (das Dentin des extrahierten Zahnes wurde herausgeschliffen) aus verschiedenen labialen Ansichten mesial (links) bis distal (rechts). Die Schmelzkappe ist von hinten mit weißem Licht beleuchtet. Je nach Betrachtungsrichtung schwankt die Lichtdurchlässigkeit. Im Randleistenbereich mit starker Krümmung genügen bereits kleine Winkelveränderungen, um die Transluzenz zu verändern. Interessanterweise ist der Zahnschmelz von approximal weniger durchlässig als von orovestibulär. Es ist zu berücksichtigen, dass hauptsächlich langwelliges Licht durchgelassen wird (die Schmelzkappe erscheint orange). Kurzwellige Strahlung (Blau) wird in Richtung der Lichtquelle reflektiert. Es handelt sich um eine vollständige Kappe mit palatinalen Schmelzanteil.

Fluoreszenz ist ein Mitleuchten. Sie endet im Gegensatz zur Phosphoreszenz (Nachleuchten) mit dem Erlöschen der anregenden Strahlung. Angeregt wird die natürliche Fluoreszenz der Zähne von UV-Strahlung. Die Fluoreszenz beruht in erster Linie auf den organischen Bestandteilen der Zahnschmelz. Aus diesen besteht Schmelz zu ca. 4% und Dentin zu ca. 30%. Die genaue Biochemie der organischen Substanzen in Dentin und Schmelz, die für die Emissionen im sichtbaren Spektrum verantwortlich sind - und ob nicht doch auch die anorganische Matrix eine gewisse Rolle spielt - sind heute noch nicht genau bekannt.

Fluoreszenz

Es ist wenig bekannt, dass die Dentinfluoreszenz mit dem Alter zunimmt oder zumindest nicht abnimmt (Abb. 18a bis 18d). Auch extrahierte Zähne und Zähne von Verstorbenen weisen eine höhere Fluoreszenz auf, als vitale Zähne. Bekanntermaßen nimmt mit fortschreitendem Alter gleichzeitig auch das Chroma zu. Demnach verhält es sich nicht so, dass bei Zähnen ein erhöhter Anteil an blauweißem Licht die Farbintensität allgemein

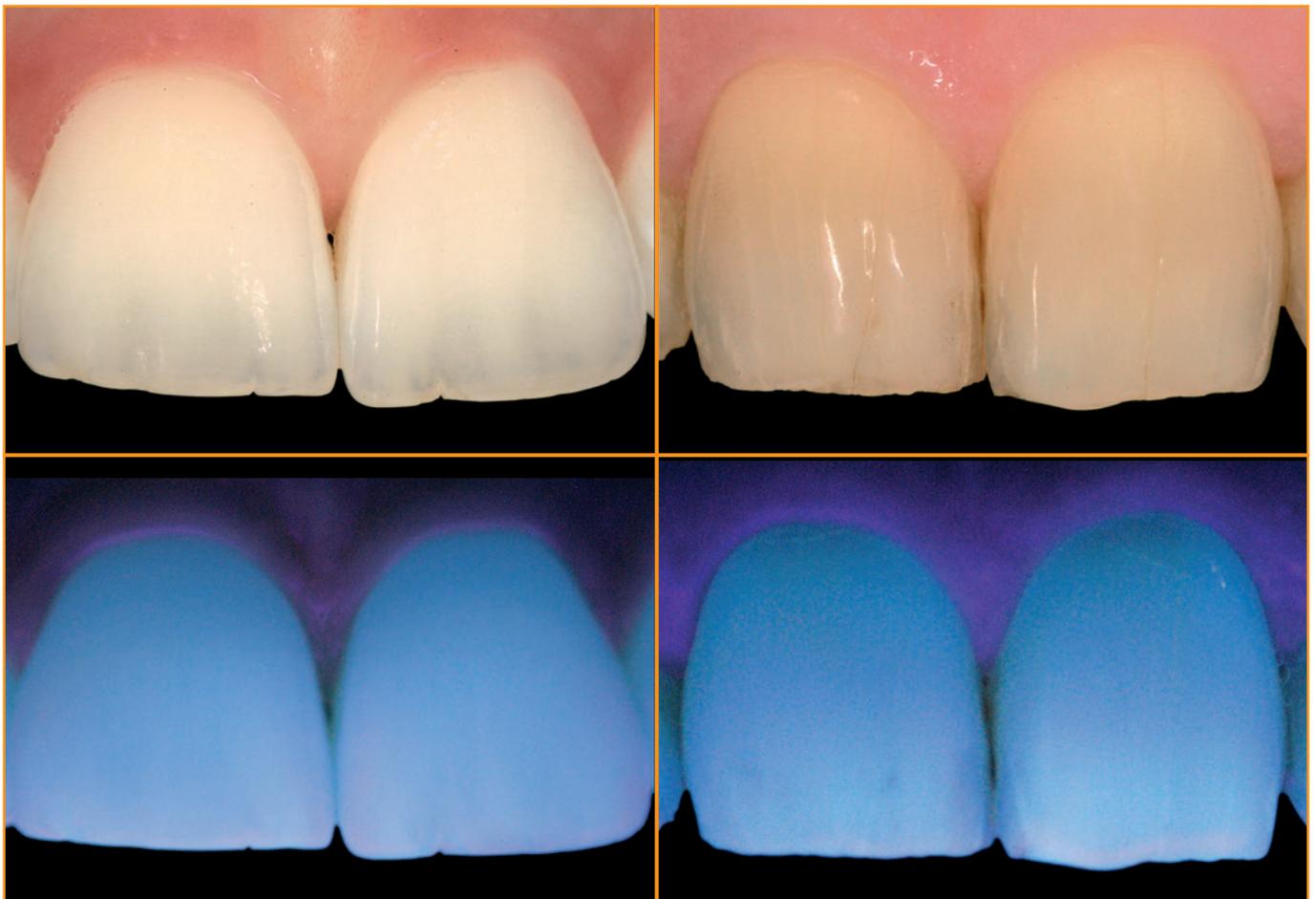
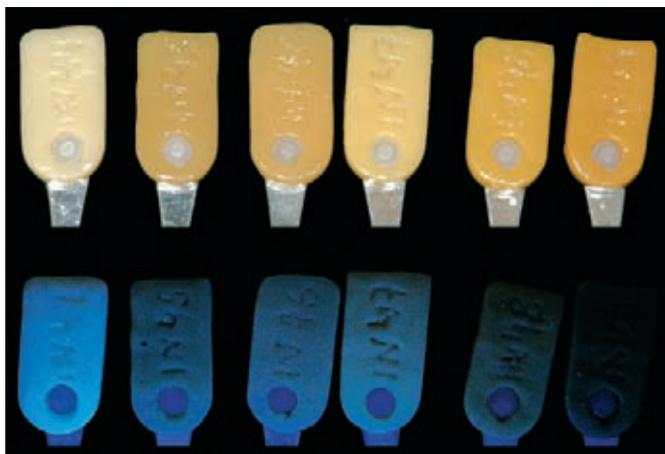


Abb. 18a bis 18d Obere 1er einer 19jährigen Patientin und eines 70jährigen Patienten im Vergleich. Oben: Polarisationsaufnahme; unten: Fluoreszenzaufnahme. Eine exakte Vergleichbarkeit der Fluoreszenzaufnahmen ist nicht gegeben, da eine vollständige Standardisierung unter Praxisbedingungen bei dieser eigenen Untersuchung nicht gewährleistet war. Kleine Veränderungen des Abstandes oder Winkels der UV-Röhre bewirken deutliche Unterschiede in der Helligkeit. Ob in diesem Fall die gealterten Zähne wie beschrieben stärker fluoreszieren als die jugendlichen kann nicht ausgesagt werden, dennoch ist zu erkennen, dass der deutliche Helligkeitsunterschied der Zähne sich in der Fluoreszenz nicht wiederfindet.

Abb. 19 Fluoreszenz unterschiedlich dunkler und eingefärbter Verblendmassen eines handelsüblichen Keramiksystems. Da Keramikmassen und Komposite durch Pigmente eingefärbt werden, bewirkt deren zunehmende Absorption bei stärkerer Einfärbung eine geringere Fluoreszenz. Bei natürlichen Zähnen verhält es sich genau umgekehrt.



reduziert, bzw. dass bei einer Zunahme absorbierender Pigmente die Lumineszenz „verschluckt“ wird.

Genau umgekehrt wie bei Zähnen verhält es sich allerdings bei Keramik- oder Kunststoff-Restaurationsmaterialien, welche ihre Färbung durch absorbierende Pigmente erhalten. Bei diesen ist infolge der stärkeren Einfärbung bei chromatischen oder dunklen Massen eine geringere Fluoreszenz vorhanden (Abb. 19). Dies erklärt, weshalb farbintensive aber anscheinend leuchtende Zähne älterer Patienten oft kaum korrekt nachgebildet werden können.

Auch wenn hier nicht auf die weiteren optischen Phänomene, wie z. B. Beugung, Polarisation oder Doppelbrechung eingegangen werden kann, wird deutlich, dass natürliche Zähne lichtdynamisch äußerst komplexe Objekte darstellen.

Um diese möglichst naturgetreu nachzubilden zu können, sind wir auf Restaurationmaterialien angewiesen, die der Zahnschubstanz physikalisch möglichst genau entsprechen. Bestimmte Erscheinungen sind aus strukturellen Gründen nicht nachzubilden, sondern nur durch Effekte nachzuahmen. Hierzu gehören z. B. intensivblaue Bereiche oder der inzisale Halo, für die spezielle Massen existieren, die jedoch im Zahn allein durch Streuphänomene entstehen. Im Nachfolgenden wird dargestellt, zu welchem Grade es uns mit heutigen handelsüblichen Materialien möglich ist, auf Zirkonoxidgerüsten die Erscheinung der Zähne nachzubilden und welche Mängel noch bestehen.

Optische Eigenschaften von Zirkongerüsten

Aus den vorangegangenen Ausführungen folgt nahe liegend, dass aus ästhetischer Sicht das beste Gerüst kein Gerüst ist. Dies bestätigt auch die klinische Erfahrung, die zeigt, dass die ästhetisch perfektesten keramischen Versorgung mit Laminare Veneers zu erzielen sind. Auf vitalen unverfärbten Kronenstümpfen folgen Presskeramikteilkronen oder Kronen als nächstbeste Alternative. Vollkeramikronen und Metallkeramikronen haben je nach Situation ihre spezifischen optischen Wirkungen, wobei Vollkeramik in der Regel als vorteilhafter angesehen wird. Es muss hervorgehoben werden, dass die Frage der Ästhetik nicht allein auf das Material reduziert werden darf. Das Endergebnis hängt von einer ganzen Reihe von Faktoren ab. Hierzu zählen neben dem Gerüst und dem Verblendmaterial der Stumpf, die Platzverhältnisse, die Nachbarzähne, die umgebenden Weichgewe-

VERBLENDMASSEN



Abb. 20 Zwei Kronenkäppchen aus Zirkoniumdioxid. Links 0,3 mm Wandstärke, rechts 0,7 mm.



Abb. 21 Die beiden Kappen aus Abbildung 20 im Durchlicht: Mitte: 0,7 mm. Rechts 0,3 mm. Ganz links im Vergleich dazu eine 0,7 mm starke Presskeramikkappe. Die Lichtdurchlässigkeit der labialen Wand der Presskeramikkappe und der dünnen Zirkonkappe sind ähnlich. Auffällig ist die mangelhafte diffuse Lichtausbreitung innerhalb aller Kappen, sodass die Vorderfläche sehr dunkel erscheint.

be, die Umstände der Farbnahme bzw. Farbkommunikation und natürlich die Fähigkeiten des Zahntechnikers.

Zirkonoxid ist heute leider noch nicht in der Transluzenz erhältlich, wie es aus Anwendersicht wünschenswert wäre. Aus diesem Grund werden z. B. von 3M Espe, Seefeld, Kappen für Frontzahneinzelkronen auch in einer reduzierten Schichtdicke von 0,3 mm angeboten. Dies macht im Hinblick auf die mehr als ausreichende Festigkeit durchaus Sinn. Die Transluzenz der Kappe liegt so in etwa im Bereich einer 0,7 mm starken Presskeramikkappe (Abb. 20 bis 22).

In den Abbildungen 23 bis 26 ist dargestellt, wie diese drei verschiedenen Kappen (Presskeramik 0,7 mm, Zirkon 0,7 mm und Zirkon 0,3 mm) im Durchlicht gegenüber den präparierten Stümpfen und den intakten Nachbarzähnen erscheinen. Wie auf Abbildung 26 zu erkennen ist, ist die Gesamtdurchlässigkeit selbst der dünnen Zirkonkappe nicht so hoch, wie die der dicken Presskeramikkappe (Abb. 27). Daher besteht aus unserer Sicht der dringende Bedarf nach Zirkonoxidmaterialien mit höherer Transluzenz. Deren auf jeden Fall geringere Festigkeit dürften bei Einzelkronen kein Problem darstellen.

Auch wenn mit Zirkonoxidkappen noch nicht die Transluzenz zu erreichen ist wie mit Presskeramik, so besteht dennoch ein deutlicher Vorteil gegenüber metallischen Gerüsten (Abb. 28 bis 30b).

Heutige Zirkonoxidkappen besitzen zwar nicht die Transluzenz, Streuung und Fluoreszenz (Abb. 31) wie natürliches Dentin, doch selbst auf Metallgerüsten war es zuletzt möglich, in bestimmten Fällen und bei ausreichendem Platzangebot mit geeigneten Verblendmassen und entsprechender Schichttechnik sehr genaue Nachahmungen zu realisieren. Daher erscheint uns das Gerüstmaterial nicht der entscheidende Faktor für die tendenziell optisch dichte Erscheinung solcher Kronen zu sein.

VERBLENDMASSEN



Abb. 22 Klinische Situation zweier zu Kronen beschliffener oberer 1er. Frontale Beleuchtung.



Abb. 23 Dieselbe Situation im diffusen weißen Durchlicht. Sehr bemerkenswert ist die Tatsache, dass die unbeschliffenen seitlichen Schneidezähne heller erscheinen als die Präparationen! Dies deutet darauf hin, dass im hochgradig transluzenten Zahnschmelz ein diffuser Lichttransport um den Dentinkern herum stattfindet.

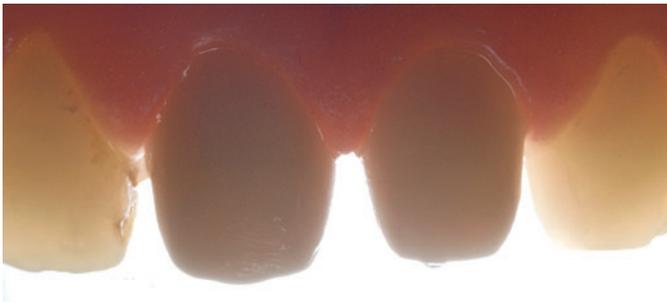


Abb. 24 Zirkonoxidkappe 0,7 mm auf 11 und 0,3 mm auf 21. Es ist bei beiden Kappen ein deutlicher Verlust des hindurchgelassenen Lichtes zu beobachten.



Abb. 25 Zirkonoxidkappe 0,3 mm auf 21 im Vergleich zum Stumpf 11.



Abb. 26 Zirkonoxidkappe 0,3 mm auf 21 im Vergleich zum Stumpf 11. Die Gesamtlichtdurchlässigkeit der Presskeramikplatte ist höher als die der Zirkonkappe. Dies liegt wahrscheinlich am erhöhten Lichttransport innerhalb der dickeren und transluzenteren Kappe.



Abb. 27 Zirkonoxidkappe 0,3 mm auf 21 im Vergleich zum Stumpf 11 im Auflicht. Bei der Presskeramikplatte sind die Platzverhältnisse für eine anspruchsvolle Verblendung bereits sehr limitiert, wenn berücksichtigt wird, dass die Gesamtkronenstärke in der Regel zwischen 1,0 und 1,3 mm beträgt. Nur selten ist es möglich, 1,5 mm oder mehr Platz zu schaffen.

VERBLENDMASSEN



Abb. 28 Metallkeramikkrone 11 und Zirkonkrone 21.



Abb. 29 Metallkeramikkrone 11 und Zirkonkrone 21 im Durchlicht. Beim Vergleich mit Abbildung 26 wird deutlich, dass die Verblendmasse die Funktion hat, einen Lichttransport um das Gerüst bzw. um den Stumpf herum zu bewerkstelligen. Dies geschieht umso besser, je größer die Verblendstärke ist. Zervikal ist die Zirkonkrone entsprechend dunkel.



Abb. 30a und 30b Presskeramikkronen 12, 11, 22 und Zirkonkrone 21 im Auflicht und im Durchlicht. Die Krone beim 21 musste bei diesem Fall wegen einer Totalfraktur der ursprünglichen Presskeramikkrone bei palatinal limitierten Platzverhältnissen neu angefertigt werden. Es ist gut zu erkennen, dass Presskeramikkronen von allen Kronenarten dem natürlichen Erscheinungsbild im Durchlicht am nächsten kommen.

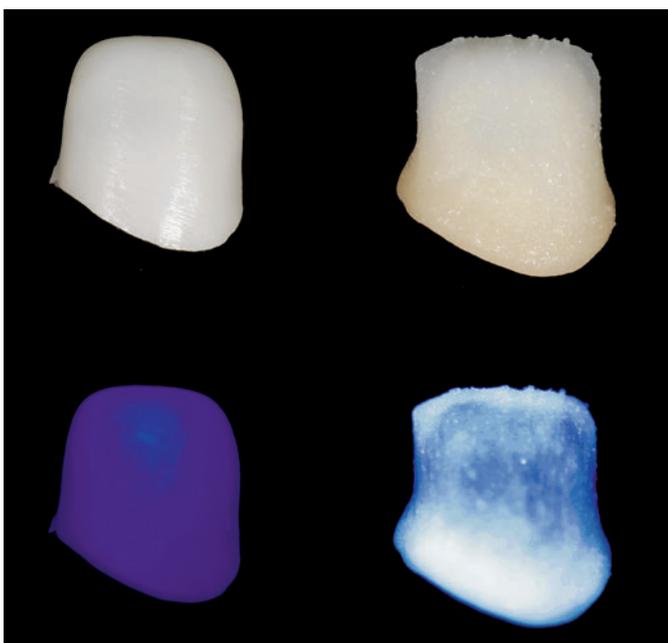


Abb. 31 Kronenkappe aus Zirkonoxid, oben unter normaler Beleuchtung, unten unter UV-Licht. Links jeweils die unbehandelte Kappe, rechts mit Liner und Schultermasse versehen. Da die Zirkonkappe nicht fluoresziert, muss die notwendige Fluoreszenz mittels Liner und Schultermasse erreicht werden.



Abb. 32 und 33 Endergebnis der beiden Zirkonkronen 11 und 21 (derselbe Fall wie in Abbildungen 20 bis 29). Eine bessere Anpassung ist den Autoren mit den bisherigen Verblendmaterialien nicht möglich.

Optische Eigenschaften von Zirkonverblend- materialien

Die beschriebene opake Charakteristik von Zirkonkronen scheint im Wesentlichen durch eine mangelnde Streuung und diffusen Lichtfluss in den Dentinmassen verursacht zu sein. Die Kronen wirken optisch „dicht“ (Abb. 32 und 33). Diese hohe „Dichte“ lässt sich auch erkennen, wenn ein Keramikplättchen aus diesem Material zerbrochen wird. Die Bruchfläche ist speckig und glatt. Auch bei der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung der Oberflächen von Zirkonverblendmassen und Metallkeramikmassen sind deutliche Unterschiede zu erkennen (Abb. 34 bis 36). Die Zirkonmassen wirken homogener. Aussagekräftigere Untersuchungen der kristallinen Struktur standen den Autoren nicht zur Verfügung und die Hersteller halten sich in dieser Frage naturgemäß sehr bedeckt. Dennoch deckt sich das makroskopische Bild mit dem mikroskopischen.

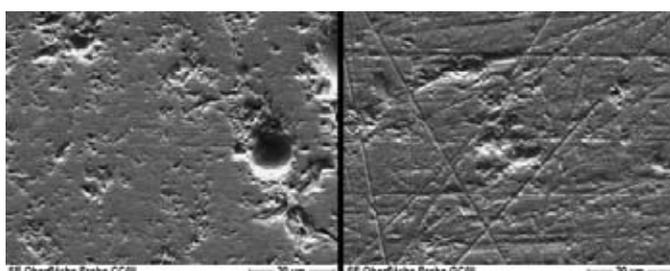


Abb. 34a und 34b Polierte Oberflächen von Metallkeramikverblendmaterial (links) und Zirkonverblendkeramik (rechts). Maßstabsmarke 30 µm. Es handelt sich jeweils um Dentinmasse.

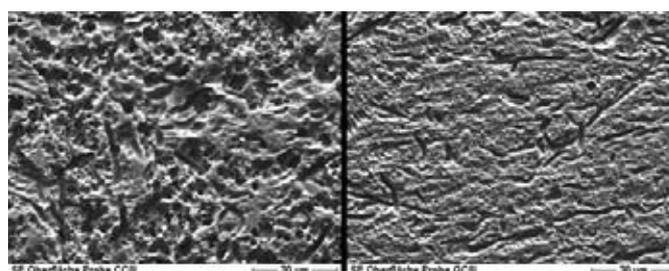
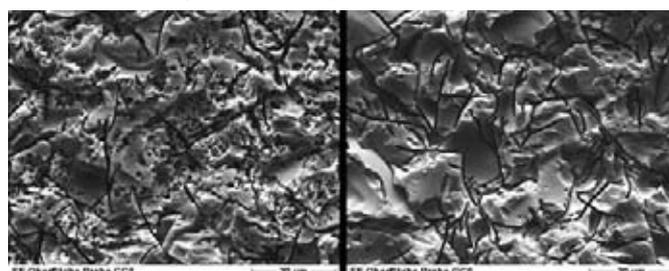


Abb. 35a und 35b Geätzte Oberflächen von Metallkeramikverblendmaterial (links) und Zirkonverblendkeramik (rechts). Maßstabsmarke 30 µm (Dentinmassen)

Abb. 36a und 36b Mit Aluminiumoxid (50 µm Körnung, 2,5 bar Druck) gestrahlte und geätzte Oberfläche von Metallkeramikverblendmaterial (links) und Zirkonverblendkeramik (rechts). Maßstabsmarke 30 µm. Bei allen Arten der Oberflächenbehandlung erscheint die Dentinmasse der Zirkonkeramik homogener und speckiger.



VERBLENDMASSEN

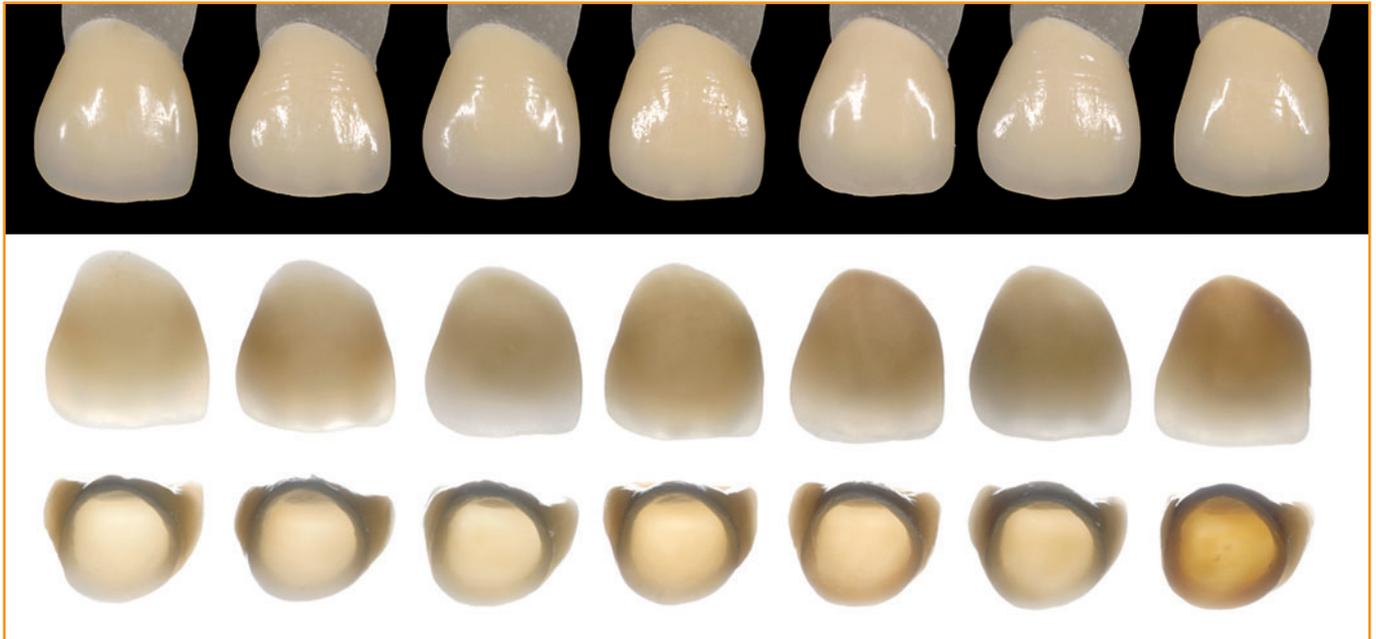


Abb. 37a bis 37c Sieben handelsübliche Verblendkeramiken für Zirkonoxidgerüste. Es wurden versucht, immer gleich zu schichten. Links: die Kronen mit besserer Lichtleitung; rechts: die etwas ungünstigeren Exemplare.

Hinsichtlich dieser Charakteristik unterscheiden sich auch die verschiedenen Produkte nicht besonders stark voneinander. Zum direkten Vergleich wurde von den Autoren eine Krone aus sieben verschiedenen Materialien und in soweit wie manuell möglich identischer Schichtung nach Herstellerangabe bestehend aus Liner, Dentinmasse und Schmelzmasse hergestellt. Diese Kronen sind in Abbildung 37a bis 37c im Auflicht und Durchlicht dargestellt. Dabei sind die vorteilhafteren Kronen links und die ungünstigeren rechts angeordnet. Das Hauptkriterium zur Beurteilung war die Fähigkeit des Materials, das Licht um die Kappe herum zu leiten.

Dieser Vergleich erhebt keinen Anspruch auf wissenschaftliche Genauigkeit oder abschließende Objektivität, sondern gibt den Eindruck der Autoren wieder. Deshalb wird nicht angegeben, um welchen Hersteller es sich im einzelnen handelt. Insgesamt wurden folgende Massen verwendet: ZI (Creation, Baar, Schweiz), Initial (GC, München), CZR (Noritake, Aichi, Japan), Hera Ceram (Heraeus Kulzer, Hanau), e.max (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein), Kiss (Degudent, Hanau) und Zirox (Wieland, Pforzheim). Aufschlussreich ist, dass nur sehr geringe Unterschiede zu erkennen sind.

Die Keramik ganz links unterscheidet sich insofern von den übrigen, da sie als einzige Fluorapatitkristalle enthält. Diese scheinen tatsächlich einen positiven Streueffekt und somit diffusen Lichttransport zu bewirken, da diese Krone am hellsten erscheint und die Kappe kaum zu erkennen ist. Da uns diese Keramik noch nicht lange genug zur Verfügung steht, kann noch nicht über eine ausreichende klinische Erfahrung berichtet werden. Das Material gibt jedoch Anlass zur Hoffnung, dass prinzipielle Verbesserungen möglich und auch weiterhin zu erwarten sind. In den Abbildung 38a und 38b ist dieses Material dem Material gegenübergestellt, mit dem von den Autoren bisher alle Arbeiten angefertigt wurden.



Abb. 38a und 38b Fluorapatitkristalle enthaltende Verblendkeramik für Zirkonoxid links und herkömmliche Zirkonkeramik rechts. Die linke Krone hat mehr Tiefe und wirkt nicht so opak. Dies ist mit dem Auge besser zu erkennen, als auf einer Fotografie dargestellt werden kann.



Abb. 39 Klinisches Abschlussbild einer gelungenen vollkeramischen Arbeit auf Zirkon. Kronen 11, 21.

Fazit Bei der kritischen Beurteilung von Zirkonarbeiten ist zu berücksichtigen, dass es sich um ein sehr neues Material handelt. Während in der Technik der Metallkeramik jahrzehntelange zahntechnische und materialtechnische Erfahrung aufeinander aufbauend weitergegeben werden konnte, stehen wir mit Zirkonoxid erst ganz am Anfang. Dass dennoch auch anspruchsvolle Fälle nicht unmöglich zu lösen sind, lässt uns berechtigte Hoffnungen in dieses Material setzen (Abb. 39). Es gehört zum Grundverständnis zahnärztlicher und zahntechnischer Tätigkeit, dass wir immer nur künstlichen Ersatz schaffen können und niemals die natürlichen Zähne vollständig neu erschaffen können. In diesem Bewusstsein sollte den Patienten auch bei vollkeramischen Arbeiten nie zu viel versprochen werden.

Weiterführende Literatur 1. Hajtó J. Inspiration – Natürlich schöne Frontzähne. Fuchstal: Teamwork Media, 2006.

Adresse der Verfasser Dr. Jan Hajtó, Spezialist für ästhetische Zahnmedizin, DGÄZ
Gemeinschaftspraxis Hajtó & Cacaci, Weistrasse 4, 80333 München
E-Mail: dr.jan.hajto@t-online.de

ZTM Hubert Schenk
Adresse?