

Abb. 8.40 Elektronenmikroskopische Aufnahme, auf der die zähigkeitssteigernden Mechanismen in polykristallinen Keramiken zu erkennen sind. In (a) breitet sich der Riss sowohl durch die Körner (intragranulare Fraktur) als auch an den Rändern der Körner (intergranulare Fraktur) aus. In (b) ist die „Rissüberbrückung“ zu sehen, in der ein Riss vorübergehend gestoppt wird und sich an anderer Stelle weiter ausbreitet.

Aluminiumoxidpulver trockengepresst. Nach der Vorsinterung wurde dieses Aluminiumoxidgerüst bis zur gewünschten Dicke maschinell bearbeitet, bevor das endgültige Sintern stattfand.

Zu dem Zeitpunkt, als dicht gesintertes Aluminiumoxid für den Einsatz in der Zahnmedizin eingeführt wurde, übertrafen seine mechanischen Eigenschaften die jedes anderen Keramikmaterials auf dem Markt, einschließlich In-Ceram Alumina (► Tab. 8.3), wodurch die Anfertigung von Brücken mit mehr als einem Brückenglied erstmals möglich wurde. Mit polykristallinem Aluminiumoxid konnten dünnere Infrastrukturen hergestellt werden, insbesondere Ränder, die mit glasinfiltierten Aluminiumoxidmaterialien nur schwer zu realisieren waren. Die Korngröße bei polykristallinem, glasfreiem Aluminiumoxid variiert zwischen 3 und 10 µm.

Nach der Einführung von Zirkonoxid in der Zahnmedizin in den frühen 2000er-Jahren gab es einen signifikanten Einbruch für Aluminiumoxid, da beide Materialien hinsichtlich der klinischen Indikation konkurrierten, Zirkonoxid jedoch deutlich bessere mechanische Eigenschaften aufweist und durch seine größere Transparenz ein höheres ästhetisches Potenzial besitzt.

Polykristallines Zirkonoxid

Die wichtigste Oxidkeramik in der Zahnmedizin ist derzeit das polykristalline Zirkonoxid, das seit seiner Markteinführung im Jahr 2001 eine regelrechte Revolution in der Zahntechnik ausgelöst hat. Polykristallines Zirkonoxid ist nicht nur bioinert, sondern steif genug, um als Gerüstmaterial mit bis zu 0,3–0,4 mm Dicke spröde Verblendkeramiken zu unterstützen, aber auch so stabil und robust, dass es für Implantate und weitspannige prothetische Rekonstruktionen genutzt werden kann, für die bis dahin nur Metalllegierungen infrage kamen.

Die meisten Zirkondioxidmaterialien für die Anwendung im Dentalbereich werden heute als vorgesinterte Blöcke oder Rohlinge geliefert, die sich maschinell einfach bearbeiten lassen, was aber einen zweiten Sinterschritt erforderlich macht. Einige Unternehmen bieten außerdem vollständig gesinterte Materialien an, die bearbeitet werden können und mithilfe eines heißisostatischen Nachdichtungsverfahrens (HIP) hergestellt werden, bei dem ein Pulver in Form gepresst und bis zur geschlossenen Porosität gesintert wird, um anschließend mit hohem Gasdruck und hoher Temperatur zu nahezu 100% der theoretischen Dichte verdichtet zu werden. Da diese Materialien extrem schwierig zu bearbeiten sind, werden HIP-Verfahren hauptsächlich verwendet, um Werkstücke herzustellen, die nicht weiterverarbeitet werden müssen, z. B. Zahnimplantate.

Die überlegenen mechanischen Eigenschaften von teilstabilisiertem, polykristallinem Zirkonoxid beruhen auf seiner einzigartigen Kristallstruktur, die Veränderungen in der Kristallstruktur erfährt, um die Bruchfestigkeit und -zähigkeit zu erhöhen. Reines Zirkonoxid kann 3 kristallografische Modifikationen annehmen (siehe ► Abb. 8.5):

- monoklin (m)
- tetragonal (t)
- kubisch (k)

Dies entspricht der Symmetrie der Atome innerhalb eines Kristallgitters, die hinsichtlich ihrer Gitterkonstanten variieren. Die monokline Form ist die thermodynamisch stabile Modifikation bei Raumtemperatur, die bei Temperaturen oberhalb von 1170 °C in die tetragonale und oberhalb von 2370 °C in die kubische Form übergeht. Von besonderer Bedeutung ist die Volumenzunahme (3–4,5%) beim Übergang von der tetragonalen in die monokline Phase (t → m), die gezielt zur Zähigkeitssteigerung ausgenutzt wird. Da das übliche Sinterintervall für Zirkonoxidkeramiken zwischen 1300 °C und 1600 °C liegt, kann

Tab. 8.3 Zusammenfassung ausgewählter Literatur zu Kristallitanteil, elastischen und mechanischen Eigenschaften verschiedener Arten von Oxidkeramiken und Verbundkeramiken verschiedener Hersteller.

Material	Hersteller	Klasse	Kristallitanteil	Elastizitätsmodul	Querkontraktionszahl	Biegefestigkeit	Bruchzähigkeit
IPS e.max ZirCAD	Ivoclar-Vivadent	polykristallines Zirkonoxid	ZrO ₂ : ≈ 99 Vol.-%	204 GPa [13]	0,244 [13]	1250 MPa (B3B) [159]	4,5 MPa√m [14]
YZ Cubes	VITA Zahnfabrik	polykristallines Zirkonoxid	ZrO ₂ : ≈ 99 Vol.-%	≈ 200 GPa	–	911 (3-PB) [19]	4,5 MPa√m [15]
Procera Alumina	Nobel Biocare	polykristallines Aluminiumoxid (trockengepresst)	Al ₂ O ₃ : ≈ 99 Vol.-%	≈ 300 GPa	–	610 MPa (3-PB) [167]	–
In-Ceram AL	VITA Zahnfabrik	polykristallines Aluminiumoxid (CAD/CAM-Verfahren)	Al ₂ O ₃ : ≈ 99 Vol.-%	≈ 300 GPa	–	488 MPa (3-PB) [19]	3,6 MPa√m [19]
In-Ceram Alumina (Schlicker-technik)	VITA Zahnfabrik	glasinfiltrierte Oxidkeramik (Schlicker-technik)	Al ₂ O ₃ : 68 Vol.-% Lanthanglas: 27 Vol.-% Porosität: 85 Vol.-%	265 GPa [58]	–	594 MPa (3-PB) [58] 530 (3-PB) [3]	4,4 MPa√m [58]
In-Ceram Alumina (CAD/CAM)	VITA Zahnfabrik	glasinfiltrierte Oxidkeramik (CAD/CAM + Infiltration)	Al ₂ O ₃ : 67 Vol.-% Lanthanglas: 29 Vol.-% Porosität: 4 Vol.-%	265 GPa [58]	–	440 MPa (3-PB) [58] 511 (3-PB) [3]	3,6 MPa√m [58]
In-Ceram Zirconia (Schlicker-technik)	VITA Zahnfabrik	glasinfiltrierte Oxidkeramik (Schlicker-technik)	Al ₂ O ₃ : 33,8 Vol.-% ZrO ₂ : 34 Vol.-% Lanthanglas: 23 Vol.-% Porosität: 8 Vol.-%	240 GPa [58]	–	630 MPa (3-PB) [58]	4,8 MPa√m [58]
In-Ceram Zirconia (CAD/CAM)	VITA Zahnfabrik	glasinfiltrierte Oxidkeramik (CAD/CAM + Infiltration)	Al ₂ O ₃ : 35,5 Vol.-% ZrO ₂ : 32,2 Vol.-% Lanthanglas: 21,5 Vol.-% Porosität: 11 Vol.-%	240 GPa [58]	–	423 MPa (3-PB) [19] 476 (3-PB) [58] 624 (3-PB) [3]	3,6 MPa√m [19] 4,9 MPa√m [58]
In-Ceram Spinell	VITA Zahnfabrik	glasinfiltrierte Oxidkeramik	MgAl ₂ O ₄ : ≈ 33 Vol.-% ZrO ₂ : ≈ 33 Vol.-% Lanthanglas: ≈ 24 Vol.-% Porosität: ≈ 10 Vol.-%	–	–	283 MPa (3-PB) [91]	–
NanoZr	Panasonic Co. Ltd.	polykristallines Aluminiumoxid-Zirkonoxid	Al ₂ O ₃ : 30 Vol.-% ZrO ₂ : 70 Vol.-%	–	–	950 MPa (3-PB)	9,8 MPa√m [102]

3-PB: 3-Punkt-Biegung; B3B Biaxiale Festigkeit mit dem Ball-on-three-balls-Test.

Da die Festigkeit von dem beanspruchten Volumen/der beanspruchten Oberfläche abhängt, ergeben biaxiale Festigkeitsprüfungen höhere Ergebnisse als 3-PB-Tests, die wiederum höhere Resultate ergeben als 4-PB-Tests. Die Festigkeitswerte der verschiedenen Prüfmethode können nicht direkt miteinander verglichen werden.

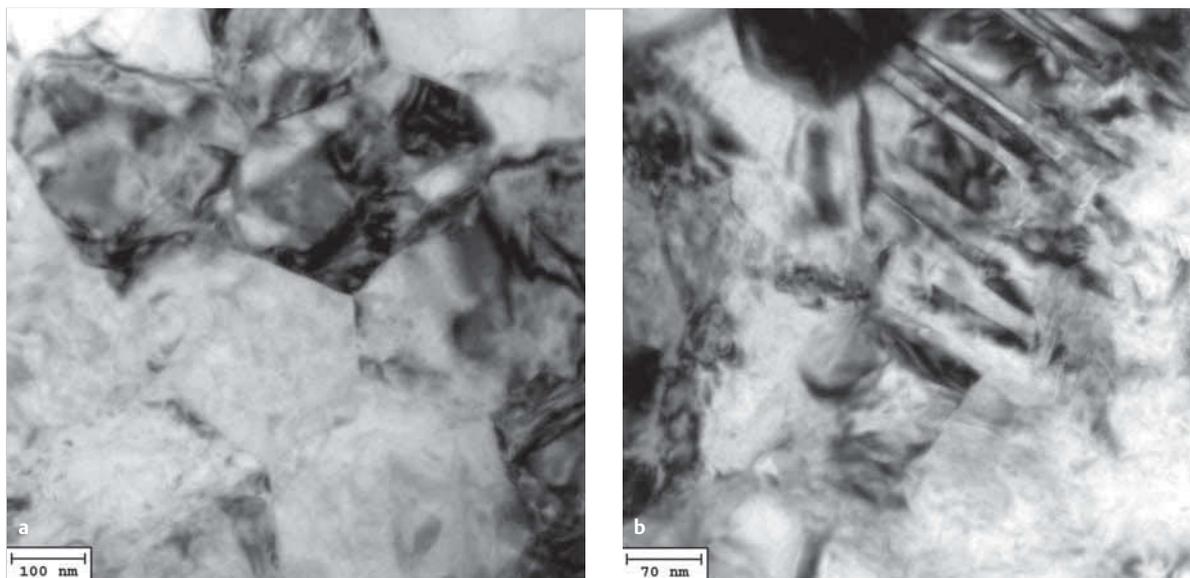


Abb. 8.41 Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahmen. 3Y-TZP-Körner, die Körner in stabilisiert-tetragonaler Form enthalten (links), und Körner, die Regionen aufweisen, die teilweise zur monoklinen Phase umgewandelt wurden (rechts).

mittels stabilisierender Oxide wie MgO, CaO, CeO₂ oder Y₂O₃ die tetragonale Phase im Zirkonoxid auch bei Raumtemperatur stabilisiert werden. Diese Materialien bezeichnet man als Tetragonal Zirconia Polycrystal (TZP). Die tetragonale stabilisierte Phase wird dennoch als „metastabil“ bezeichnet, da unter bestimmten Bedingungen (Zugspannung) – unabhängig von der Temperatur – immer noch die Umwandlung $t \rightarrow m$ auftreten kann. Die Metastabilität der tetragonalen Phase bei TZP kann Vor- und Nachteile haben. Auf der einen Seite kann die Umwandlung $t \rightarrow m$ zum Vorteil der mechanischen Eigenschaften des Materials ausgenutzt werden, da äußere Belastungen an der Spitze eines sich ausbreitenden Risses im Material zur spontanen, martensitischen Umwandlung $t \rightarrow m$ führen kann. Die beschriebene Volumenzunahme in den Körnern führt zu einer Kompression des sich ausbreitenden Risses und damit zu einer Erhöhung des Widerstands (Energie) gegenüber einer Fraktur. Dieser Mechanismus, den wir als „Umwandlungsverstärkung“ bezeichnen, ist für die hohe Bruchzähigkeit von TZP verantwortlich [52].

Auf der anderen Seite kann die Umwandlung $t \rightarrow m$ durch einen chemischen Prozess ausgelöst werden, bei dem Wassermoleküle die tetragonale Phase destabilisieren, indem sie die vakante Sauerstoffstelle innerhalb des Gitters besetzen. Auf diese Weise unterbrechen sie die elektrische Neutralität und bewirken eine Veränderung der Atomanordnung [131]. Dieser Vorgang wird als „Niedertemperaturdegradation“ (Low Temperature Degradation, LTD) bezeichnet. Die Transformation beginnt an der Oberfläche und löst durch einen Diffusionsmechanismus die Transformation von Körnern in tieferen Schichten aus [28]. In makroskopischer Hinsicht erhöht der LTD-Prozess

die Rauheit des Oberflächenmaterials, da die Körner angehoben werden. Unter der Oberfläche entwickeln sich Mikrorisse zwischen den Körnern, durch die Wasser ins Innere gelangt. Es wurde bisher angenommen, dass diese Vorgänge das Material schwächen und unter klinischen Bedingungen die Lebensdauer begrenzen, obwohl klinische Studien bislang keine systematischen Nachweise für eine solche Wirkung gezeigt haben [29]. LTD dürfte bei prothetischen Konstrukten nicht übermäßig relevant sein, könnte aber für Zirkonoxidimplantate von Bedeutung sein. ► Abb. 8.41 zeigt im Transmissionselektronenmikroskop, wie normale (stabilisierte tetragonale) und teilweise umgewandelte (monokline) Körner aussehen.

Die Art der tetragonalen Stabilisierung und die Korngröße (durch Sinterparameter wie Zeit und Temperatur gesteuert) sind die wichtigsten Faktoren, von denen der Stabilitätsgrad der tetragonalen Phase abhängt [65], [150]. Yttriumoxid beispielsweise hat eine stärker stabilisierende Wirkung als Ceroxid, und kleinere Körner werden besser stabilisiert als größere, da die Dotieradditive dazu neigen, sich an den Korngrenzen einzulagern. Eine vollständige Stabilisierung der tetragonalen Phase ist nicht erwünscht, da dies den Mechanismus der Umwandlungsverstärkung behindern würde und eine niedrige Konzentration der Stabilisierungsoxide (und sehr große Korngrößen) die LTD-Anfälligkeit des Materials erhöhen würde. Die meisten dentalen Zirkondioxide enthalten eine Konzentration von 3 Mol.-% Yttriumoxid, als 3Y-TZP bezeichnet, und weisen Korngrößen von unter 0,5 µm nach dem Sintern bei ~ 1530 °C auf. Geringe Mengen von Al₂O₃ (< 0,25 Gew.-%) werden verwendet, um die Sinter Temperatur zu steuern und die Auslaugung der Dotieradditive zu verhindern.

Oberflächenbehandlungen wie z.B. Schleifen und Sandstrahlen haben ebenfalls einen Einfluss auf die Kornstruktur dentaler Zirkondioxide [56]. Solche Behandlungen, die wiederum als Vorbereitung für die konventionelle und adhäsive Befestigung dienen, führen zudem zu einer Umwandlung von Zirkondioxidkörnern an der Oberfläche, aber auch zum Entstehen von Oberflächendefekten, die die mechanischen Eigenschaften beeinträchtigen können [56], [22]. Falls Sandstrahlen notwendig wird, beispielsweise zur Schaffung von Mikroretentionsflächen, werden kleine Partikelgrößen (30–50 µm) und reduzierte Strahldrücke (ca. 1 bar) empfohlen [22].

Transluzente Zirkonoxide

Obwohl dentale Zirkonoxide einen gewissen Grad an Transluzenz aufweisen, führen dicke Zirkonoxidkappen oder die Herstellung monolithischer Zirkondioxidrestaurationen aufgrund der erhöhten Opazität in der Regel zu unzureichenden ästhetischen Ergebnissen. Dies hat dazu geführt, transluzente Zirkonoxide zu entwickeln, die in erster Linie für monolithische Anwendungen infrage kommen. Die höhere Transluzenz von 3Y-TZP-Materialien kann durch verschiedene Strategien erreicht werden: Eine Verringerung der Korngröße durch Zirkonoxidnanopulver, eine Verringerung der Porosität oder eine Verringerung des Aluminiumoxidgehalts im Pulver. Einige experimentelle Nano-3Y-TZP-Materialien besitzen eine optische Lichtdurchlässigkeit von mehr als 65 % (bei 0,4–0,5 mm Dicke) [166], [83]. Die Herstellungsschritte von Nanokeramiken stellen jedoch eine Herausforderung dar. Die meisten transluzenten dentalen Zirkonoxide weisen Korngrößen von > 0,2 µm und eine verringerte Menge an Al₂O₃ auf. Mit der Abnahme der Korngröße wird eine höhere Stabilität der tetragonalen Phase erwartet, wodurch das LTD-Risiko gesenkt wird. Eine weitere Möglichkeit die Transluzenz von Zirkonoxid zu steigern, ist die Beimischung kubischen Zirkonoxids. Aufgrund seiner optischen Isotropie werden Lichtstreuungseffekte minimiert.

8.8.5 Verbundkeramiken

Hybridkeramiken finden in der Zahnheilkunde vor allem als Gerüstmaterial Anwendung. Zunächst wurden dafür poröse Gerüste aus Oxidkeramik mit Glas infiltriert, in letzter Zeit wurde teilweise gesintertes, poröses Glas mit Polymer infiltriert. Mithilfe der ersten Strategie sollte ein festes Material als Rahmen für Verblendkeramiken geschaffen werden, wogegen bei der letzteren durch die Verringerung des Elastizitätsmoduls der Silikatkeramik ein verschleißfreundliches Material mit guten Dämpfungseigenschaften entstand. Die endgültigen mechanischen Eigenschaften werden hauptsächlich durch das Volumenverhältnis zwischen den Phasen und die Qualität ihrer verbundenen Grenzflächen bestimmt.

Glasinfiltrierte Oxidkeramik

In dieser Gruppe wird im Wesentlichen das In-Ceram-Verfahren beschrieben. Ein poröses Gerüst aus einer Oxidkeramik (In-Ceram Alumina, In-Ceram Spinell oder In-Ceram Zirconia) wird mit einem hoch lanthanhaltigen Glas infiltriert. Während des Sinterprozesses bei hohen Temperaturen schmilzt das Glas bis zur notwendigen Viskosität, sodass es in der Lage ist, durch Kapillarwirkung die darunterliegende poröse Struktur zu infiltrieren. Die finale Struktur ist ein „Verbundwerkstoff“ aus ca. 68 Vol.-% Aluminiumoxid, 27 Vol.-% Glas und geringer Restporosität (≈ 5 Vol.-%). In den 1990er-Jahren setzte sich die CAD/CAM-Technik durch und das In-Ceram-System wurde um CAD/CAM-bearbeitbare Blöcke erweitert. Obwohl es fast 30 Vol.-% Glas enthielt, war In-Ceram Alumina relativ opak. Ein transluzenteres Material auf Basis von MgAl₂O₄-Partikeln, nämlich In-Ceram Spinell, wurde auf die gleiche Art und Weise hergestellt und war dank der höheren Transluzenz für den Frontzahnbereich besser indiziert.

Eine Variation des glasinfiltrierten Aluminiumoxidmaterials stellt In-Ceram Zirconia dar. Hier wurde eine Mischung von gleichen Teilen an 12 Mol.-% CeO₂-stabilisiertem TZP und Aluminiumoxidpartikeln für die poröse Struktur verwendet. Mithilfe der oben beschriebenen Umwandlungsverstärkung, die der Zirkondioxidphase zugeschrieben wird, konnte eine leichte Verbesserung der mechanischen Eigenschaften erreicht werden, doch die Glasphase war bei allen In-Ceram-Materialien weiterhin das schwächste Glied der Kette. In-Ceram-Materialien wurden seit über 25 Jahren erfolgreich dazu verwendet, Gerüste von Einzelkronen und Brücken zu fertigen. Im Hinblick auf die große Beliebtheit von polykristallinem Zirkonoxid mit seinen hervorragenden mechanischen Eigenschaften und seiner flexiblen Anwendung hat der Hersteller den Vertrieb von glasinfiltrierten Oxidkeramiken jedoch Ende 2015 eingestellt.

Polymerinfiltriertes Keramiknetzwerk

Polymerinfiltrierte Keramiknetzwerke, gegenwärtig als Enamic (Fa. Vita Zahnfabrik) auf dem Markt, basieren auf den Herstellungsprinzipien der In-Ceram-Familie. Zunächst werden gemahlene Feldspatpartikel und das Pulver des Precursor-Glases, das sich aus der Vitablocs-Produktfamilie ableitet, mit einem Bindemittel vermischt und uniaxial gepresst, sodass ein Block entsteht. Der Sinterprozess wird in einer Phase unterbrochen, in der die Glaspartikel beginnen miteinander zu verschmelzen. Nach dem Abkühlen entspricht die Keramikphase einer einzigen verbundenen Struktur, die 75 Vol.-% des Materials ausmacht. Die Porosität ist unregelmäßig geformt und kontinuierlich und macht ca. 25 % des Volumens aus. Bevor das Keramikgerüst mit Polymer infiltriert wird, wird es gründlich silanisiert, um die Haftung zwischen Polymer und Glas zu verstärken. Eine niedrigviskose Mischung aus Urethan-Dimethylmethacrylat (UDMA) und Triethylen-Glykol-Dimetha-

crylat (TEGDMA) – typische Monomere zur Herstellung von Kompositen – werden unter Vakuum zur Infiltration in die Porositäten appliziert und unter hohem Druck und hoher Temperatur polymerisiert. Das Ergebnis ist ein Hybrid zwischen Keramik und Polymer mit verbundenen, interpenetrierenden Phasen. Der Elastizitätsmodul ist dabei nur halb so groß wie bei herkömmlicher Feldspatkeramik und mehr als doppelt so groß wie das eines typischen plastischen Komposits [147], [33]. Die Biegefestigkeit übersteigt die der Feldspatkeramik, jedoch fällt die Bruchzähigkeit geringer aus, wahrscheinlich aufgrund der geringeren Menge an kristalliner Phase (siehe den Vergleich zu Vitablocs Mark II in ► Tab. 8.2). Dennoch scheint diese Materialklasse für klinische Indikationen wie Inlays, Onlays und Einzelkronen mit indirekten Kompositen und mit Silikatkeramiken mit geringem kristallinem Anteil konkurrieren zu können. Die Hersteller haben ihre Indikation inzwischen auf Einzelkronen über Implantaten ausgeweitet, da die durch die Polymerphase ermöglichte Dämpfung einen Mangel an parodontaler Flexibilität ausgleichen soll [126]. Die Mikrostruktur des Materials Enamic ist in ► Abb. 8.39g gezeigt. Durch Ätzen mit Flusssäure wird die keramische Phase gelöst und eine Oberfläche geschaffen, die sich zum adhäsiven Befestigen eignet.

Aluminiumoxidverstärktes Zirkonoxid (ATZ)

Aluminiumoxidverstärkte Zirkonoxidkeramiken (Alumina toughened zirconia, ATZ) sind aus der Nachfrage nach zirkonoxidbasierten Materialien mit sehr guten mechanischen Eigenschaften bei geringerer Anfälligkeit gegenüber LTD entstanden. Diese Verbundwerkstoffe enthalten 20–30 Gew.-% Aluminiumoxidteilchen, eingebettet in eine polykristalline, 10–12% Ce-stabilisierte, tetragonale Zirkonoxidmatrix (Ce-TZP). Obwohl diese eine geringere Festigkeit als 3Y-TZP aufweisen, zeigen sie dank der Stabilisierung mit Ceroxid (CeO_2) eine hohe Bruchzähigkeit und eine erhöhte Beständigkeit gegenüber zyklischer Ermüdung [42], [16]. Aufgrund der höheren Menge an Aluminiumoxid als zweite Phase wird eine hohe Beständigkeit gegenüber LTD erzielt [72], weshalb diese Materialien sich ideal für die Herstellung von Zahnimplantaten eignen. Einige dieser Produkte werden bereits als Fräsrohlinge vermarktet, z. B. das Material NanoZr.

8.9 Verblendete Restaurationen

Metallkeramikrestaurationen wurden bereits ab dem 19. Jahrhundert in der Zahnmedizin eingesetzt. Sie griffen traditionelle Keramikglasur- und Emailiertechniken auf, die seit der Antike verwendet wurden, um die chemischen und ästhetischen Eigenschaften von metallischen Bauteilen zu verbessern [47]. Die Zugabe von Leuzit

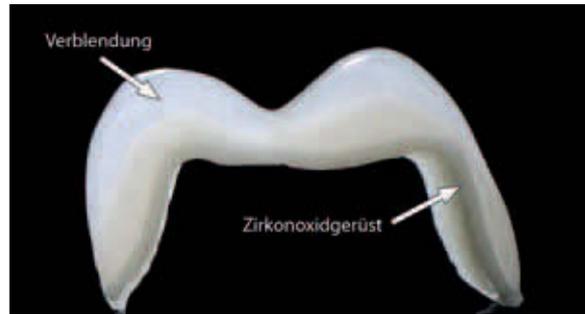


Abb. 8.42 Verblendete Vollkeramikrestaurationen. Sie kombinieren die mechanischen Vorteile eines stabilen, rigiden Gerüsts mit den ästhetischen Eigenschaften transluzenter zahnfarbener Verblendkeramiken.

oder Feldspat bei der Herstellung von Porzellan in den 1950er-Jahren und die daraus resultierende Verbesserung der thermischen Eigenschaften und Verarbeitungstechniken führte dazu, dass es als Verblendmaterial für komplexere Gerüste wie Kronen und Brücken Verwendung fand (► Abb. 8.42) [79]. Dank ihres langfristigen Erfolgs und ihrer hohen klinischen Überlebensraten (► Tab. 8.4) sind sie zum Goldstandard für Restaurationen im Seitenzahnbereich geworden (► Abb. 8.43).

Der Einsatz von Glas- und polykristallinen Keramiken als Gerüstmaterialien für die festsitzende Kronen- und Brückenprothetik hat in den letzten Jahrzehnten enorm zugenommen, und ihr Indikationsspektrum ist vom Front- auf den Seitenzahnbereich erweitert worden. Im Frontzahnbereich sind die am häufigsten verwendeten Materialien silikatische Keramiken (z. B. leuzitverstärkt) und Glaskeramiken auf der Basis von Lithium(di)silikaten. Sie weisen eine höhere Transluzenz und bessere ästhetische Eigenschaften auf als polykristalline Keramiken, die deutlich weniger transluzent erscheinen. Mit der Einführung von aluminiumoxidbasierten Systemen (glasinfiltriert, Spinell etc.) in den 1990er-Jahren wurde die Indikation von verblendeten, vollkeramischen Restaurationen auf den Seitenzahnbereich erweitert. Den höheren mechanischen Eigenschaften von aluminiumoxidbasiertem, festsitzendem Zahnersatz standen jedoch höhere klinische Ausfallraten im Vergleich zur Metallkeramik gegenüber (► Tab. 8.4), was ihren Erfolg und ihre weitere Indikation für ausgedehntere Versorgungen einschränkte. Dies wurde schließlich durch die Einführung von Zirkonoxid überwunden, das seither zum standardmäßigen keramischen Gerüstmaterial im Seitenzahnbereich avancierte (► Abb. 8.44).

Tab. 8.4 Die Überlebensraten von verblendetem, mehrgliedrigem Zahnersatz mit verschiedenen Gerüstmaterialien.

Studie	Zeitraum (Jahre)	Anzahl festsitzender Restaurationen	Gerüstmaterial	Überlebensrate	Ausfallraten (Ursache)	
					Gerüstfrakturen	Verblendfrakturen
Walton 2002 [156]	10–15	515	Metall	89%	n. b.	n. b.
De Backer et al. 2008 [36]	15–20	236	Metall	70,8%	11,1%	n. b.
Olsson et al. 2003 [105]	10	42	glasinfiltriertes Aluminiumoxid	82,9%	12%	n. b.
Eschbach et al. 2009 [43]	5	65	glasinfiltriertes Aluminiumoxid (zirkonoxidverstärkt)	96,8%	1,6%	6,3%
Solá-Ruiz et al. 2013 [139]	10	21	Lithiumdisilikat	71,4%	23,8%	4,7%
Rinke et al. 2013 [124]	7	99	Zirkonoxid	83,4%	6,25%	28%
Sorrentino et al. 2012 [142]	5	48	Zirkonoxid	100%	0%	6,25%

Nur kurzspannige Brücken (meist dreigliedrig) wurden berücksichtigt.
n. b. = nicht beschrieben

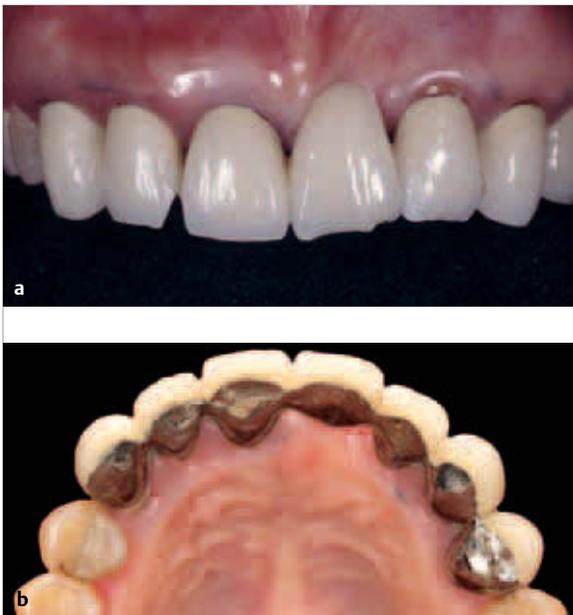


Abb. 8.43 Metallkeramik. Die hohe Festigkeit eines Metallgerüsts bietet eine ideale Unterstützung für die Verblendkeramik (a, b). Der große ästhetische Nachteil dieser Kombination liegt im dunklen, opaken Gerüstmaterial (b), wodurch es in Regionen mit minimaler Verblendungsdicke (z. B. Zervikalränder) zu grauen Schattierungen kommt (a). (Mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. D. Edelhoff)



Abb. 8.44 Zirkonoxidgetragene Vollkeramik. Selbst Alveolar-knochendefekte können durch gingivafarbene Keramik verborgen werden. (Mit freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. D. Edelhoff & ZTM P. Biekert)

- a** Die höhere Bruchfestigkeit von Zirkonoxid hat die Ausweitung der klinischen Indikation für dauerhaften, festsitzenden Zahnersatz auf vielgliedrige, belastete Brückenrestauration ermöglicht.
- b** Die CAD/CAM-Bearbeitung von Zirkonoxidstrukturen ist inzwischen günstiger und schneller geworden als diejenige von Aluminiumoxid, was ihren größeren Marktanteil erklärt. Eine kombinierte Verblendung ermöglicht den Einsatz weiß-opaker Zirkonoxidgerüste sogar im Frontzahnbereich.

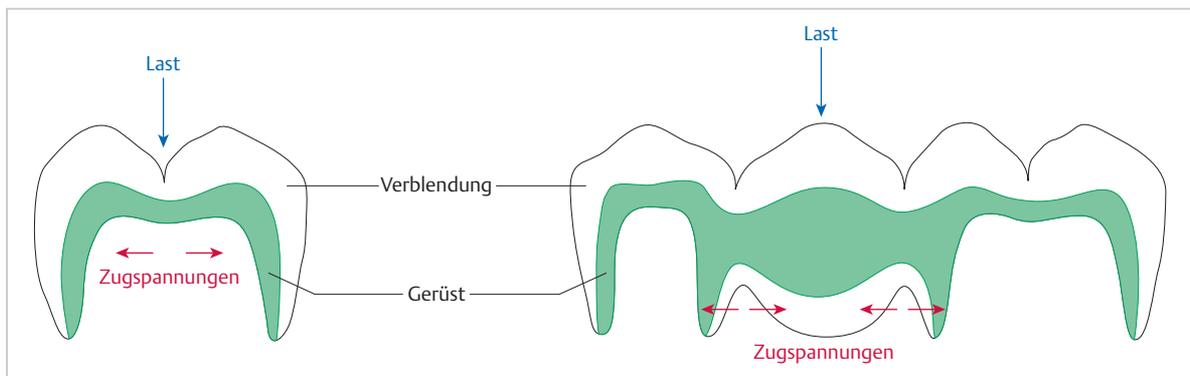


Abb. 8.45 Belastungskonfiguration von Mehrschichtverbunden. Bei Kronen führt eine okklusale Belastung zu Zugspannungen an der Innenseite des Gerüsts. Daher verbessert die Verwendung starker und bruchzäher Gerüste die Widerstandsfähigkeit des Gesamtsystems. Es wurde beispielsweise eine erhöhte Frakturrate bei Restaurationen auf Aluminiumoxidbasis (Bruchzähigkeit von etwa $3 \text{ MPam}^{1/2}$ [117]) im Vergleich zu zirkonoxidverblendeten Systemen beobachtet (Bruchzähigkeit von etwa $4,5 \text{ MPam}^{1/2}$ [153]). Mehrgliedrige Restaurationen werden hauptsächlich an den basalen Konnektorflächen unter Zugspannung gesetzt. Diese Verbinder besitzen generell einen größeren Querschnitt und sind nur dünn verblendet. Aufgrund der hohen Belastungen beginnt hier eine Fraktur, die sich über den kompletten Querschnitt ausbreitet.

8.9.1 Mechanische Eigenschaften von Verblendsystemen

Als Hauptargumente für die aufwendige Fertigung von verblendeten Restaurationen werden die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften des Systems und das Erzielen eines maximal ästhetischen Ergebnisses genannt. Ein besonders starkes, rigides Gerüst muss eine stabile mechanische Unterstützung für die vergleichsweise schwache und spröde Verblendung bereitstellen und nicht nur deren Fraktur, sondern auch eine Delamination des Gerüsts unter Belastung verhindern. Dennoch wird die Frakturanfälligkeit von Mehrschichtsystemen nicht nur durch die Stabilität des Gerüstmaterials beeinflusst, sondern auch durch eine mangelhafte Abstimmung der Eigenschaften beider Schichten. Ein Schwachpunkt dieser Systeme befindet sich an der Grenzfläche zwischen Verblendung und Gerüst. Die Bruchzähigkeit der Grenzfläche steuert die mechanische Leistungsfähigkeit des gesamten Systems. Mit anderen Worten: Falls die Belastung bei einer Fraktur die Integrität der Grenzfläche übersteigt, breitet sich ein Riss entlang der Grenzfläche aus und es kommt zur Delamination [151]. Falls jedoch die Verbundfestigkeit der Grenzfläche stärker ausgeprägt ist, wird ein Riss bevorzugt innerhalb einer Schicht (meist innerhalb der Verblendschicht) verlaufen.

Es existieren unterschiedliche Ansätze mechanische Eigenschaften verblendeter Vollkeramiksysteme zu charakterisieren, doch sind die wissenschaftlichen Ergebnisse der meisten dieser Arbeiten noch nicht konsistent. Einer der Hauptaspekte ist die Belastungskonfiguration von Mehrschichtverbunden. Das unter Zugspannung befindliche Material definiert die Stabilität des Systems, da eine Fraktur von dieser Oberfläche aus eingeleitet wird (► Abb. 8.45). Steht in einem Experiment das Gerüstmate-

rial unter Zugspannung, zeigen sich keine Unterschiede zu monolithischen Prüfkörpern. Steht dagegen die schwache Verblendschicht unter Zugspannung, beobachtet man deutlich reduzierte Biegefestigkeiten des Verbundsystems [18].

Abplatzungen (sogenannte „Chippings“) werden als eine der häufigsten Komplikationen verblendeter Vollkeramikrestaurationen benannt. In vielen Fällen wird die Funktion der Restauration nicht beeinträchtigt und kann mithilfe intraoral adhäsiver Verfahren repariert werden. Doch berücksichtigt man den hohen Anspruch an vollkeramische Restaurationen, stellen Chippings eine nicht akzeptable Erscheinung dar, die ihren Ruf als zuverlässige Alternative zur Metallkeramik schädigt. Unzureichende mechanische Eigenschaften von Verblendkeramiken begünstigen die Bildung und Ausbreitung solcher Chippings innerhalb der Verblendung. Man hat jedoch beobachtet, dass Frakturmuster variieren, je nachdem, auf welchem Gerüstmaterial die Verblendmaterialien verarbeitet sind [86], wie in ► Abb. 8.46 zu sehen ist. Die Ausbildung von Eigenspannungen sowie geometrische Effekte einer individuellen Restauration oder eine unterschiedliche Dicke der Verblendschicht beeinflussen die Entwicklung von Rissen und damit die Anfälligkeit gegenüber einer Chipping-Fraktur (s. ► Abb. 8.49).

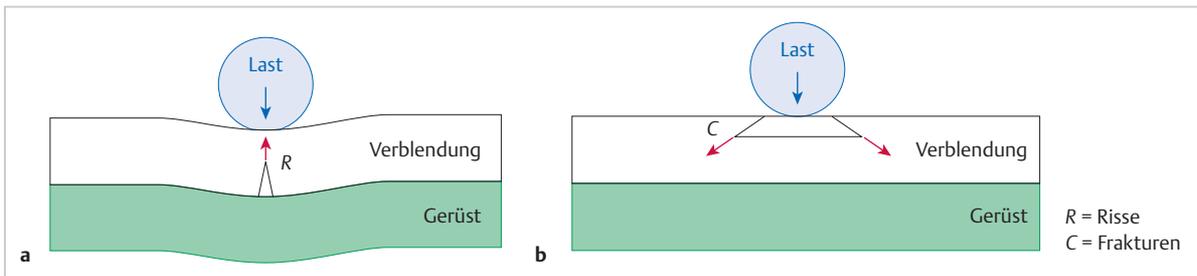


Abb. 8.46 Frakturmuster.

- a** Radiale Risse (R) tauchen in der Grenzfläche als Folge einer starken Deformation des Gerüstmaterials auf.
b Gerüstmaterialien mit hohem Elastizitätsmodul (rigide Gerüste wie Zirkonoxid) führen eher zu konisch verlaufenden Frakturen (C) innerhalb der Verblendung. Diese Risse breiten sich in typischen Winkeln zur Grenzfläche aus [5].

8.9.2 Haftung zwischen Gerüst und Verblendung

Die Verblendkeramik wird während des Sintervorgangs mit dem Gerüstmaterial verbunden. Ein dauerhafter Verbund wird dabei über 2 Mechanismen erzeugt: eine chemische Wechselwirkung zwischen den Schichten und eine mikromechanische Verankerung. Bei Metallkeramikrestauration erfolgt die chemische Bindung zusätzlich über oxidische Atombindungen. Dazu werden aufbrennfähigen Legierungen sogenannte Haftoxide beigemischt, die sich dann mit den silikatischen Oxiden der Verblendkeramik verbinden (Kap. 9) [5]. Die chemische Wechselwirkung im Bereich der zirkonoxidverblendeten Materialien ist leider noch immer nicht vollständig geklärt, auch wenn Nachweise einer Interdiffusionszone [41] und vollständigen Benetzung durch die Verblendkeramik [56] geführt wurden. Die von der Metallkeramik herrührende Anwendung einer Opakerschicht scheint die Bindung an Zirkonoxid nicht signifikant zu verbessern [48]. Dennoch wird von Herstellerseite die Anwendung eines niedrigviskosen Opakers (dünne keramische Haft- und Abdeckschicht für Metallgerüste) empfohlen, um eine gleichmäßige Abdeckung und Verbund zu gewährleisten.

Die mikromechanische Verankerung wird in der Regel durch Sandstrahlen erreicht. Der Aufprall eines harten Strahlpulvers (Al_2O_3) auf die Oberfläche eines Gerüsts erhöht dessen Rauheit und damit die für die adhäsive Verbindung zur Verfügung stehende Kontaktfläche. Im Gegensatz zu ihrem erfolgreichen Einsatz bei Metallkeramikrestaurationen wird diese Technik bei Vollkeramikgerüsten nur bedingt empfohlen, hauptsächlich wegen der hohen Empfindlichkeit keramischer Materialien gegenüber Oberflächenschädigungen (siehe Kap. 8.6). Dementsprechend empfehlen einige Hersteller lediglich eine angemessene Säuberung des Gerüsts vor dem Verblenden. Zirkonoxid ist aufgrund seiner höheren Bruchzähigkeit fälschlicherweise als unempfindlicher gegenüber Sandstrahlen einzuschätzen.

8.9.3 Eigenspannungen

Die unterschiedlichen thermischen Eigenschaften von Materialien in Mehrschichtverbunden führen dazu, dass sich beim Sintern der Verblendung Eigenspannungen ausbilden können. Traditionell hat man die Erzeugung von Oberflächendruckspannungen in der Verblendung als Verstärkungsmechanismus genutzt, da hierbei eine erhöhte Widerstandskraft der Verblendkeramik gegenüber der Rissausbreitung unterstellt wurde. Bei individuellen Geometrien mit äußerst stark konvex oder konkav gekrümmten Oberflächenbereichen können bewusst eingebrachte Eigenspannungen zwar zu einer Verstärkung beitragen, diese müssen aber auch an anderer Stelle wieder kompensiert werden. Die Entstehung ausgleichender Zugeigenspannungen innerhalb der Verblendung stellt ein potenzielles Risiko für Chippings dar, und es wurde in der Literatur bereits darauf hingewiesen, dass diese Zugspannungen für die Anhäufung von Chippings auf verblendeten Zirkonoxidgerüsten verantwortlich gemacht werden können (► Tab. 8.4, [8]).

Die Entwicklung von Eigenspannungen wird durch zahlreiche Bedingungen beeinflusst. Die wichtigste Rolle hierbei spielt der Unterschied der Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) zwischen Gerüst und Verblendung (► Abb. 8.47).

Praxistipp

Ein ideales WAK-Verhältnis ist immer noch Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen, grundsätzlich ist jedoch Folgendes zu beachten [37]:

- Der WAK der Verblendung muss an das Gerüst angepasst sein (z. B. WAK Gerüst minus WAK Verblendung ≈ 0), um hohe Eigenspannungen zu vermeiden.
- Stark positive (> 1 ppm/K) oder negative ($< -0,6$ ppm/K) Differenzen können zum spontanen Versagen der Verblendung führen.

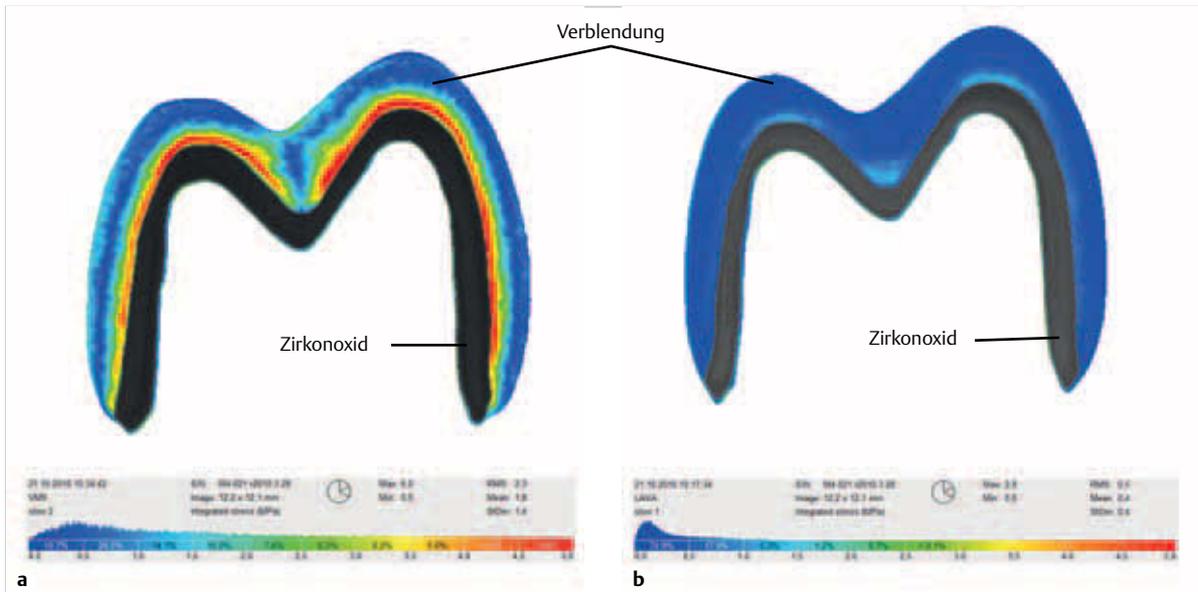


Abb. 8.47 Eigenspannungen aufgrund nicht angepasster WAKs, gemessen im Lichtdoppelbrechungsverfahren. In **a** wurden 2 Materialien mit unterschiedlichen WAKs verwendet ($\Delta WAK = +1,5$ ppm/K). Aufgrund des höheren WAKs des Zirkonoxidgerüsts kontrahiert es während des Abkühlens stärker als das Verblendmaterial und erzeugt so Druckspannungen in der Verblendung (hier rote Bereiche, nahe der Grenzfläche). In **b** wurde eine Kombination mit geringem WAK-Unterschied verwendet ($\Delta WAK = +0,6$ ppm/K). Es sind nahezu keine Eigenspannungen messbar (blaue Farbe in der gesamten Verblendungsschicht), da beide Materialien während des Abkühlens ähnlich stark kontrahieren.

Eigenspannungen können auch als Folge einer inhomogenen Abkühlung der Restaurationen beim finalen Sinterbrand im Ofen entstehen. Metallkeramikrestaurationen werden unmittelbar nach dem Sintervorgang aus dem Ofen genommen, da Metalle eine hohe Temperaturleitfähigkeit besitzen und die gesamte Restauration schnell abkühlen kann. Zirkonoxid hingegen erzeugt aufgrund seiner geringeren Temperaturleitfähigkeit höhere Temperaturgradienten im Inneren der Verblendung, was zu höheren Eigenspannungen führt (► Abb. 8.48).

Die bereits erwähnten Ursachen von Eigenspannungen werden zusätzlich durch die Geometrie der Restauration und das Dickenverhältnis der Schichten unterstützt. Bereiche starker Krümmung oder unterschiedlicher Dicken (z. B. im Höckerbereich) neigen dazu, höhere Eigenspannungsgradienten zu erzeugen (► Abb. 8.49; siehe Kap. 8.13).

8.9.4 Verblendverfahren

Beim Verblenden werden verschiedene Verfahren angewendet (► Abb. 8.50).

Traditionelle Schichtung im Schlickerverfahren

Das Hauptargument für das Schlickerverfahren ist die Möglichkeit, eine Restauration individuell und hochästhetisch zu gestalten: Anatomie, Farbe und Textur lassen sich modellieren und vom Zahntechniker auf den Patienten passend abstimmen (► Abb. 8.51). Die Schlickertechnik setzt jedoch ein hohes Maß an Können und Erfahrung vom Zahntechniker voraus. Variablen wie Homogenität und Viskosität der Schlicker, Luftporenschlüsse während des Aufbringens der einzelnen Schichten, Dauer und Anzahl der Brennzyklen usw. beeinflussen allesamt die letztendlichen Eigenschaften einer Restauration. Ein gehäuftes Auftreten von Poren kann die Restauration deutlich schwächen – ein Nachteil, der durch industriell gefertigte CAD/CAM-Materialien vermieden wird.

Zusätzlich werden Zirkonoxidgerüste heute zunehmend auch mit Kompositen verblendet (siehe Kap. 7).

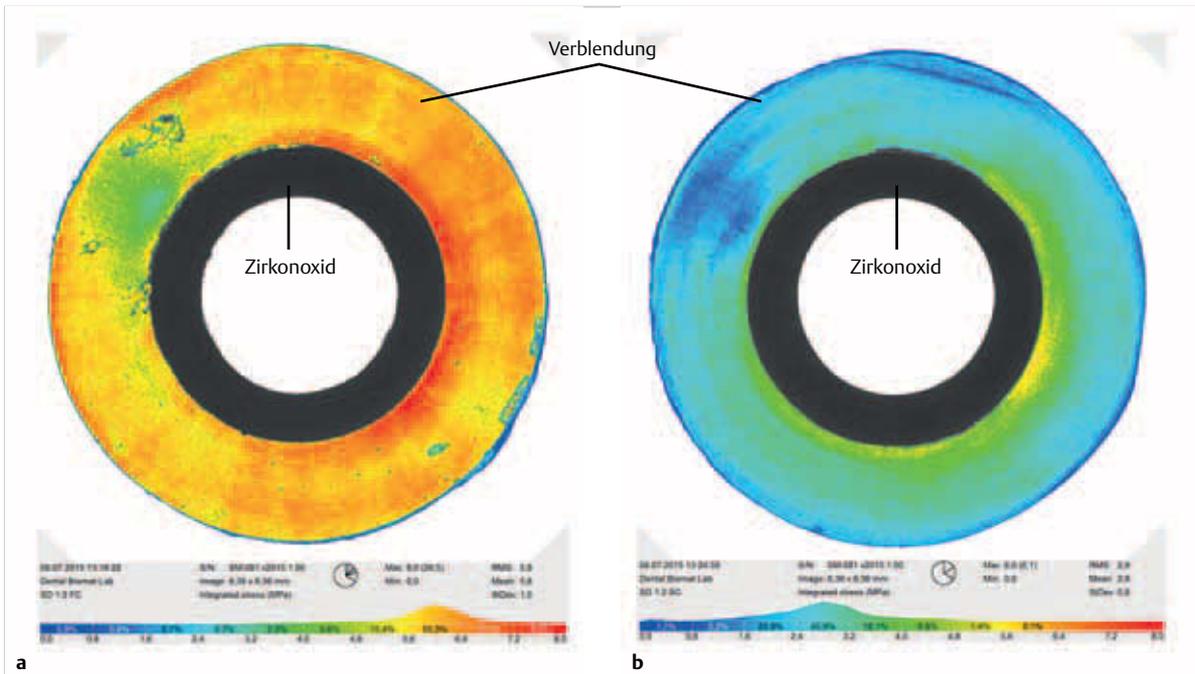


Abb. 8.48 Abkühlgeschwindigkeit. Unterschiedliche Eigenspannungen aufgrund unterschiedlicher Abkühlgeschwindigkeiten in experimentellen Restaurationengeometrien (Sagittalebene): In **a** kennzeichnet die rote Farbe die höhere Eigenspannung infolge einer Entnahme der Restauration aus dem Ofen bei 940 °C. Die Restauration in **b** wurde so lange im Ofen belassen, bis eine unkritische Temperatur von 300 °C erreicht war, was sich auf die Entwicklung von Eigenspannungen positiv auswirkte. Diese langsame Abkühlung wird mittlerweile auch von Herstellerseite empfohlen. (Abbildungen übernommen von Wendler et al. 2016 [160]. Mit freundlicher Genehmigung von M. Wendler et al.; R. Belli et al.; U. Lohbauer et al.)

8

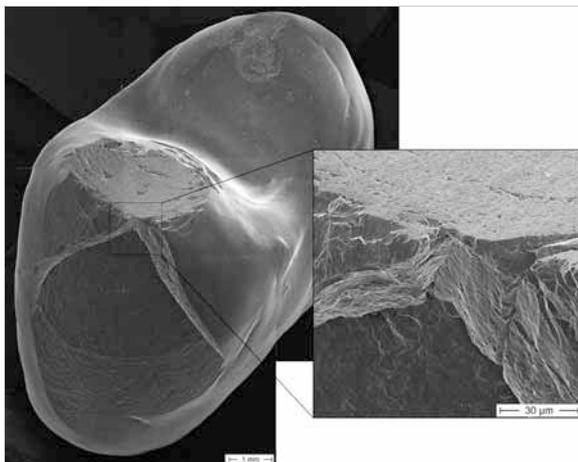


Abb. 8.49 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Verblendfraktur (Chipping). Das Rissystem ist unterhalb des Kontaktbereichs des bukkalen Höckers entstanden und hat sich innerhalb der Verblendschicht ausgebreitet. Die Krümmung des Höckers und die vorhandenen Zugeigenspannungen im Inneren der Verblendung haben den Riss abgelenkt. Schließlich ist das komplette Fragment abfrakturiert und hat auf dem Zirkonoxidgerüst nur eine dünne Verblendschicht hinterlassen. (Adaptiert von Belli et al. 2013 [11])

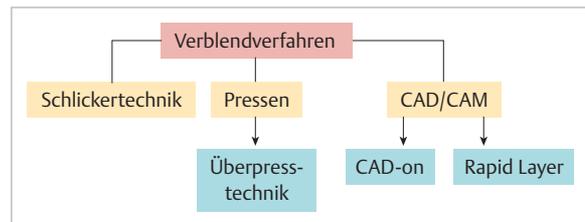


Abb. 8.50 Verblendverfahren je nach Fertigungssystem.

Überpressen mittels Heißpressverfahren

Die Anpassung von Heißpressverfahren zu Verblendungszwecken ist eine Reaktion auf die Notwendigkeit, die Qualität der Verblendschicht zu verbessern, und so Herstellungsfehler wie Poren und Defekte zu minimieren. Ähnlich wie bei herkömmlichen Metallguss- und Keramikpresstechniken wird von Hand auf dem Gerüstmaterial ein vollständiges anatomisches Wax-up der Verblendung erstellt. Alternativ kann das Wachs- oder Kunststoffmodell der Verblendung mittels CAD/CAM-Technologie gefräst werden. Dann werden die so hergestellten Wachs- oder Ausbrennpolymerformen auf das bereits gefertigte Gerüst adaptiert und in Muffeln aus feuerfestem Material eingebettet. Das Wachs (oder Polymer) wird

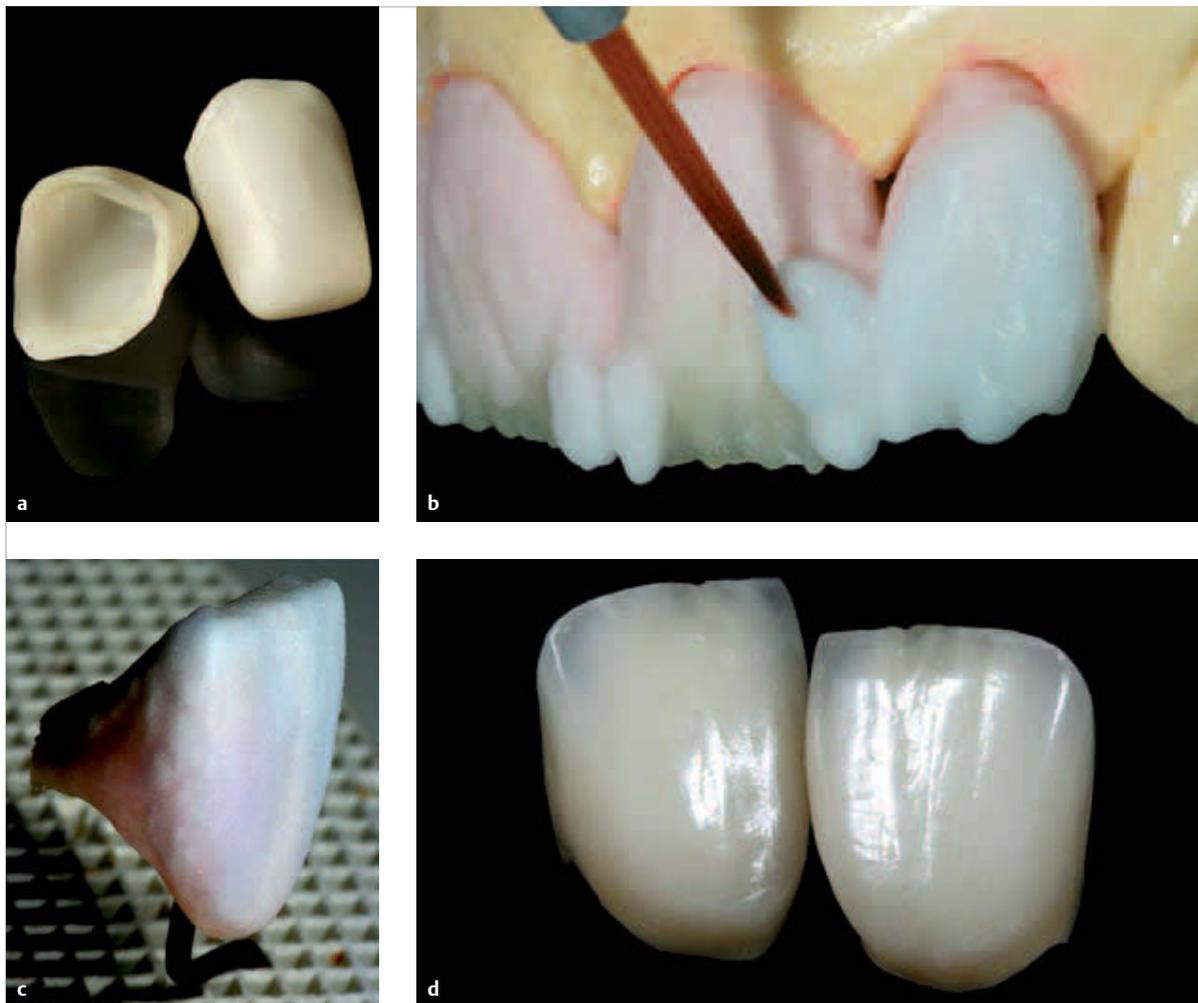


Abb. 8.51 Die Verblendung wird im Schlickerverfahren schichtweise modelliert. [7]. (Abbildungen adaptiert von Belli et al. 2009)

- a Zirkonoxidgerüste werden vor dem Sintern eingefärbt, um sie farblich an die Verblendkeramik anzupassen. Es wird zuerst ein Opaker aufgetragen, um den ästhetischen Einfluss des Gerüstmaterials zu minimieren.
- b Der Verblendschlicker wird durch Mischen des Keramikpulvers mit einer Modellierflüssigkeit hergestellt, die eine für die anatomische Modellierung der Verblendung ausreichende Konsistenz besitzt. Nach dem Aufbringen der Dentinmasse werden in verschiedenen Schattierungen schmelzähnliche Strukturen aufgebaut.
- c Nach dem Aufbringen jeder einzelnen Schicht erfolgt ein Brennzyklus unter Vakuum. Kontur und Okklusion der Restauration müssen während des Beschichtungsprozesses ständig im Artikulator überprüft werden, da durch die Sinterschwund Variationen in den Abmessungen der Verblendung auftreten können.
- d Sobald eine Restauration vollständig modelliert und gesintert ist, werden die Oberflächen mit Diamantfinierern und Silikonpolierern geschliffen und poliert. Ein abschließender Glasurbrand mittels transparentem oder gefärbtem Glas (sehr dünner Schlicker oder Spray) sorgt zusätzlich für eine glatte Oberfläche.

durch Erhitzen der Muffeln rückstandsfrei verbrannt und kann über die Angusskanäle entweichen. Nach dem Pressvorgang wird die Verblendung durch Abstrahlen mit Glasperlen bei niedrigem Druck (um Schäden am Material zu vermeiden) aus der Muffel frei gelegt. Die endgültige Politur wird mittels Diamant- und Silikonpolierwerkzeugen durchgeführt. Restaurierungen mit höheren ästhetischen Anforderungen können mithilfe der sogenannten „Cut-back-Technik“ individualisiert werden, bei der

ein Teil des gepressten Materials entfernt wird, um Platz für weitere Schichten zu schaffen.

Neben ihrer Einfachheit und methodischen Standardisierung weist diese Technik im Vergleich zur konventionellen Schichtung auch ein verbessertes Festigkeitsniveau und eine bessere Grenzflächenqualität auf [88]. Da das Pressen des Verblendmaterials unter Vakuum stattfindet, wird die Porenbildung deutlich reduziert und der Kontakt zwischen den Materialien verstärkt.

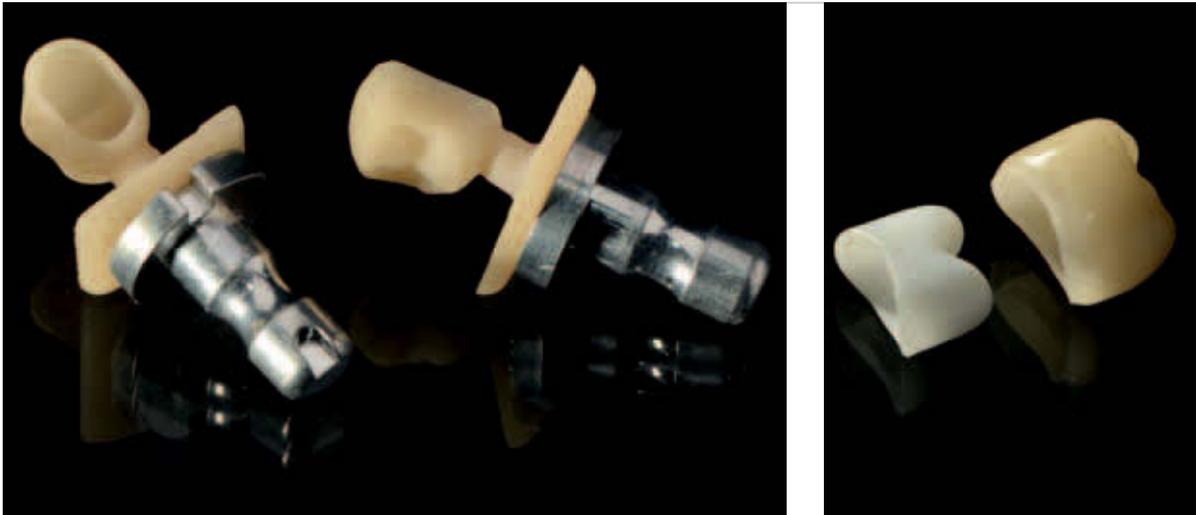


Abb. 8.52 CAD/CAM-gefertigte Verblendungen gewährleisten eine hohe Passgenauigkeit auf dem Gerüstmaterial. Eine gute stoffschlüssige Verbindung zwischen beiden Schichten wird entweder durch Aufschmelzen mittels Glaslot oder adhäsiver Befestigung erzeugt.

CAD/CAM-gefräste Verblendungen

Die wesentlichen Vorteile der CAD/CAM-Technik gegenüber der herkömmlichen Schichtung und der Überpress-technik sind:

- weniger Poren und Herstellungsfehler (Blöcke werden industriell gefertigt)
- bessere Kontrolle des Dickenverhältnisses von Gerüst und Verblendung (die Verblendung wird im CAD-Verfahren konstruiert)
- weniger bis keine Brennvorgänge erforderlich
- Reduzierung von Eigenspannungen an der Verbundgrenzfläche
- wirtschaftliches Verfahren

Die auf der Basis der digitalen Verblendung (erstmalig 2009: Digital Veneering System) beruhende CAD-on-Technik wurde 2010 von der Firma Ivoclar Vivadent eingeführt [17]. Zur Gestaltung der Verblendung muss auf einen ausreichend großen Fügspalt geachtet werden. Die Verbindung zwischen den Schichten wird durch ein Glaslot erzeugt, das einen an beide Materialien angepassten WAK und eine reduzierte Brenntemperatur im Vergleich zur Verblendkeramik besitzt. Um eine homogene Schmelzglasschicht zu gewährleisten, weist das Material ein thixotropes Verhalten auf und verflüssigt sich bei mechanischer Einwirkung (Vibration). Die Verbindung zwischen den Schichten wird durch einen weiteren Sinterbrand erzeugt. Obwohl der Name „CAD-on“ eine registrierte Handelsmarke ist, steht er in der Literatur bereits als Synonym für CAD/CAM-gefertigte und aufgesinterte Verblendungen.

Die alternative „Rapid-Layer“-Technik, die von der Firma VITA Zahnfabrik vermarktet wird, vereinfacht den

Verblendprozess noch weiter (► Abb. 8.52). Beide Schichten werden mit einem adhäsiven Befestigungskomposit miteinander verbunden, das dem traditionellen Befestigungsablauf für silikatische Keramiken entspricht: Säureätzung, Silanapplikation und adhäsive Befestigung. Um eine vollständige Polymerisation zu gewährleisten, werden dualhärtende Befestigungskomposite eingesetzt. Der Hauptvorteil dieses Klebverfahrens ist das gänzliche Vermeiden von thermischen Eigenspannungen, da kein Aufbrennen erforderlich ist. Dennoch muss sich das Verfahren den bekannten Schwierigkeiten im Hinblick auf eine dauerhafte adhäsive Befestigung gerade zum Zirkonoxidgerüst stellen.

Aufgrund der höheren Festigkeit und Zuverlässigkeit der CAD/CAM-gefertigten Verblendungen versprechen beide Techniken ein immenses Potenzial, sich als Standardverfahren für Verblendungen durchzusetzen. Trotzdem sind ausführliche klinische Studien notwendig, um die bisherigen positiven In-vitro-Daten zu stützen.

8.10 Degradationsprozesse

Mit dem Begriff „Degradation“ wird eine fortschreitende Verschlechterung der Materialeigenschaften beschrieben, die für gewöhnlich von externen Faktoren angetrieben wird und dazu führt, dass sich die Lebensdauer im Vergleich zur ursprünglichen Auslegung eines Materials verschlechtert. Die 3 wichtigsten Mechanismen zur Degradation der mechanischen Eigenschaften von Dentalkeramiken sind:

- Spannungsrisskorrosion durch Wasser
- Säurekorrosion
- mechanische Ermüdung