

CAD/CAM, 3D-Druck – und was kommt als nächstes?

Ein Beitrag von ZT Josef Schweiger, M.Sc., Prof. Dr. Daniel Edelhoff und Priv.-Doz. Dr. Dr. Oliver Schubert, M.Sc.

Status quo der Digitalisierung in Praxis und Labor

Seit mehr als 25 Jahren werden analoge Behandlungs- und Verfahrenskonzepte durch digitale Technologien substituiert. Die Gründe dafür sind vielfältig. Im Wesentlichen stehen aber sechs Gründe im Vordergrund, die darüber entscheiden, ob die Behandlung oder die Herstellung des Produktes mittels digitaler Technologien ausgeführt wird:

1. Das Produkt oder die Behandlung ist durch den Einsatz digitaler Technologien bei gleicher Qualität kostengünstiger.
2. Das Produkt oder die Behandlung ist durch den Einsatz digitaler Technologien bei gleichem Preis qualitativ besser.
3. Es bieten sich für den Patienten Vorteile, wenn Behandlungsschritte mithilfe digitaler Technologien ausgeführt werden.
4. Es bieten sich für den Anwender Vorteile, die Behandlung oder die Herstellung des Produktes digital auszuführen.

5. Die Ausführung der Behandlung oder die Herstellung des Produktes ist nur auf digitalem Weg möglich: Killerapplikation.
6. Es gibt niemanden mehr, der die analogen Techniken beherrscht.

Inzwischen werden immer mehr Anwendungen mithilfe digitaler Technologien ausgeführt. Dabei erstreckt sich das Portfolio digitaler Werkzeuge von der Datenerfassung über die Datenverarbeitung bis hin zur Datenausgabe mittels subtraktiver und additiver Verfahren. Es findet sich kaum noch eine Praxis oder ein Labor, in dem kein Scanner oder eine Fräsmaschine steht. Seit mehr als 25 Jahren werden analoge Fertigungsschritte zunehmend durch digitale Möglichkeiten ersetzt. Die Produktfertigung wird dominiert von den CAD/CAM-Technologien und seit einigen Jahren auch vom 3D-Druck.

Waren es am Anfang vorwiegend einzelne analoge Schritte, die durch Maschinen substituiert wurden, so sind es zunehmend komplette Workflows, die rein digital durchgeführt werden können. Allein die Komplexität des Produktes begrenzt

den Einsatz digitaler Technologien, so dass bei der Anfertigung teilweise immer noch analoge Teilschritte notwendig sind. So werden keramische Verblendungen nach wie vor hauptsächlich durch manuelles Schichten vom Zahntechniker erzeugt. Ebenso wird komplexe herausnehmbare Prothetik zwar teilweise mit digitalen Prozessen angefertigt, jedoch wird eine Vielzahl von Teilschritten immer noch analog ausgeführt. Die Gründe dafür liegen unter anderem auch darin, dass die analoge Fertigung dabei noch kostengünstiger oder aber, dass die Herstellung derzeit digital nicht möglich ist. Dies könnte sich allerdings in naher Zukunft komplett ändern. Das Zauberwort heißt „Multimaterialfertigung“. Was sehr einfach klingt, ist in Wirklichkeit durchaus komplex und erfordert technisch raffinierte Lösungsansätze.

Digitale Multimaterial- fertigung – Verfahren mit Zukunftspotenzial?

Die digitale Multimaterialfertigung hat sich in den letzten fünf Jahren entwickelt und gewinnt zunehmend an Bedeutung

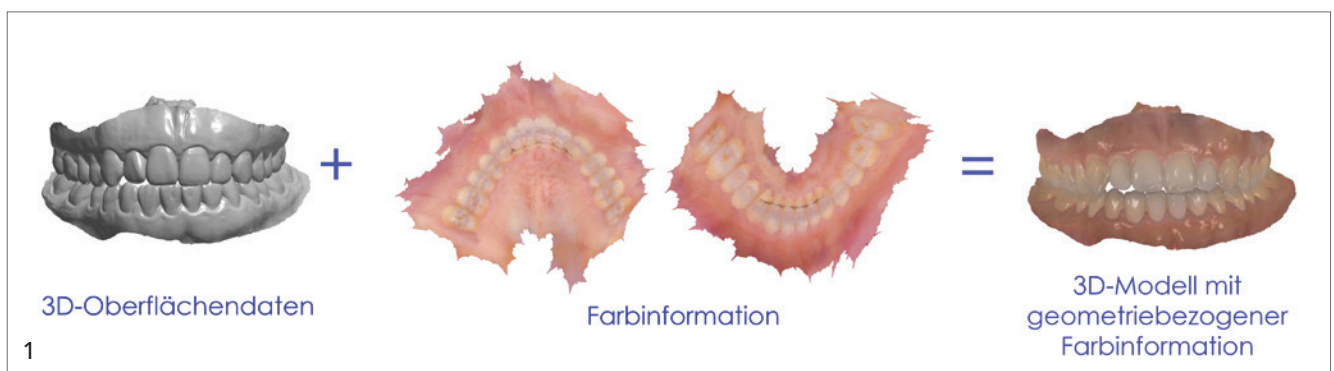


Abb. 1: Intraorale 3D-Farbscans werden aus Oberflächendaten und Farbinformationen zusammengesetzt. Die Dateiformate sind so gestaltet, dass die Farbinformation geometriebezogen dargestellt wird. Dazu sind spezielle Formate wie beispielsweise das DCM-Format, das PLY-Format, das OBJ-Format oder das 3MF-Format geeignet.

im Rahmen der dentalen Fertigungstechnologien. Der initiale Auslöser dieses innovativen Produktionsansatzes war im Bereich des festsitzenden Zahnersatzes die Verwendung von Mehrgenerationen-Zirkonoxid (Gradiententechnologie). Aber auch beim herausnehmbaren Zahnersatz gibt es höchst innovative Möglichkeiten, prothetische Versorgungen mittels Multimaterialfertigung herzustellen.

Das Prinzip der digitalen Multimaterialfertigung

Die digitale dentale Multimaterialfertigung beruht auf dem Prinzip, dass einem Bauteil, z. B. ein Meistermodell oder Zahnersatz, verschiedene räumlich definierte Eigenschaften zugeordnet werden. Diese können beispielsweise Farbinformationen oder materialspezifische Charakterisierungen sein. Diese Eigenschaften werden dann beim Fertigungsprozess mit einer geeigneten Verfahrenstechnologie in die Realität umgesetzt.

Die Grundlage für die Multimaterial-Fertigung kann bereits im Mund mit der digitalen Erfassung durch einen 3D-Intraoralscanner gelegt werden. Dabei werden seit einigen Jahren zusätzlich zu den dreidimensionalen Oberflächendaten auch die geometriebezogenen Farbinformationen aufgezeichnet. Spezielle Dateiformate wie beispielsweise das DCM-Format, das PLY-Format, das OBJ-Format oder das 3MF-Format ermöglichen die Speicherung von Farbinformation in Relation zu den Oberflächendaten. Das heißt, jedem Oberflächenpunkt wird eine spezifische Farbe zugeordnet (Abb. 1). Und diesen Mehrwert an Information kann man bei der Herstellung von Meistermodellen und Zahnersatz nutzen. Die digitale dentale Multimaterialfertigung ist sowohl mittels abtragender Verfahren (= subtraktive Verfahren = CNC-Fräsen) als auch additiver Verfahren (= 3D-Druck) umsetzbar.

Aktuelle Beispiele für die digitale dentale Multimaterialfertigung

Derzeit gibt es in allen Materialbereichen Ansätze, welche das Prinzip der digitalen Multimaterialfertigung im Dentalbereich



nutzen bzw. verwenden. Nachfolgend werden diese in ihren Grundprinzipien für die Bereiche Kunststoff, Keramik und Metall dargestellt.

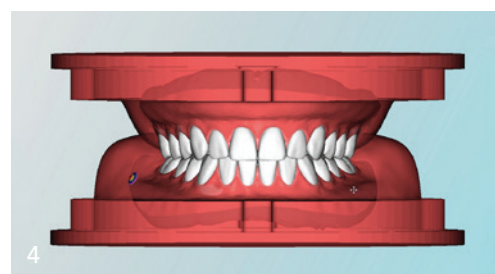
Multimaterialfertigung im Kunststoffbereich

1. Multimaterial-3D-Druck von grafischen 3D-Modellen (= Vollfarben-3D-Modelle)

Auf der Basis von intraoralen 3D-Farbscans können mithilfe des Multimaterial-3D-Druckes farbige Meistermodelle hergestellt werden, welche die Mundsituation in realistischen Farben wiedergeben (Abb. 2 und 3). Aktuell gibt es drei verschiedene 3D-Drucktechnologien, die die Herstellung von grafischen 3D-Modellen ermöglichen. Die erste dazu geeignete Technik war das sogenannte Pulverbett-Druckverfahren (Binder-Jetting), bei dem unterschiedlich eingefärbte Binderflüssigkeiten in ein Pulverbett gespritzt werden und so einerseits das Bauteil verfestigt und andererseits die Farbe des gedruckten Objektes definiert wird. Diese Technologie findet im Dentalbereich keine Anwendung. Mit der Einführung des Multimaterial-3D-Druckes im Material-Jetting-Verfahren ergaben sich ganz neue Möglichkeiten bei der Anfertigung von dentalen Bauteilen. Verschiedene Hersteller bieten dieses Verfahren inzwischen an, wie beispielsweise Stratasys (Eden Prairie, MN), Mimaki (Nagano, JP), Hewlett Packard (Palo Alto, CA, USA) und 3D-Systems (Rock Hill, SC, USA). Auch mittels Materialextusion (FDM, FFF) und Schicht-Laminat-Verfahren von Papier ist die Herstellung von Vollfarben-3D-Modellen möglich. Im Dentalbereich findet derzeit jedoch vor allem das Material-Jetting-Verfahren bei der Herstellung von grafischen 3D-Modellen Anwendung.

Abb. 2: Mittels Multimaterial-3D-Druck (Stratasys, Eden Prairie, MN; 3D medical print KG, Lenzing, A) hergestellte Vollfarben-3D-Modelle. –

Abb. 3: Vier Seitenzahnkronen Regio 34 bis 37 aus Lithiumdisilikat auf einem Vollfarben-3D-Modell. – **Abb. 4:** CAD-Konstruktion von Ober- und Unterkiefer-Totalprothesen im Baltic-Denture-Workflow (Merz Dental, Lütjenburg, D). – **Abb. 5:** Bei den Baltic-Denture-Rohlingen (BD-Load) sind die aufgestellten Konfektionszähne bereits kraftschlüssig mit den Prothesenbasen-Rohlingen verbunden. – **Abb. 6:** Fertige Baltic-Denture-Totalprothesen. Der Ausarbeitungsvorgang beschränkt sich auf die Oberflächengestaltung der Prothesenbasen und die anschließende Politur von Prothesenkörper und Zähnen.



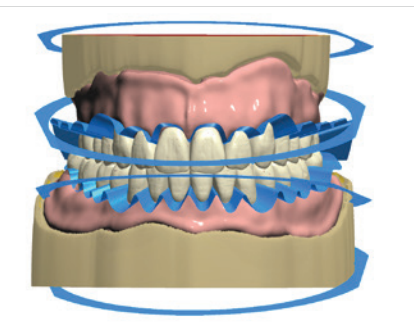
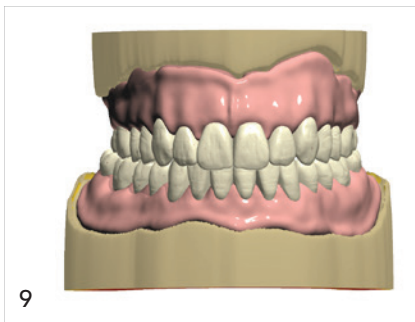


Abb. 7 und 8: Virtuelles Set-up für Ober- und Unterkiefertotalprothesen unter Zuhilfenahme eines 3D-Gesichtsscans und des digitalen Artikulators. – **Abb. 9:** CAD-Konstruktion einer Ivoclar Ivotion Prothese (Ivoclar, Schaan, FL). – **Abb. 10:** Ivotion-Prothesen direkt nach dem CNC-Fräsvorgang. – **Abb. 11:** Ivoclar Ivotion Totalprothesen-Rohling mit sogenannter „Shell-Geometrie“ (= innen liegende Grenzschicht zwischen rosafarbenem Prothesenbasisanteil und zahnfarbenem Prothesenzahnbereich). © Ivoclar – **Abb. 12:** Das Ausarbeiten der Ivotion-Totalprothesen beschränkt sich auf das Separieren der Prothesenzähne, die Gestaltung der Oberflächentextur der Prothesenzähne und des Prothesenkörpers sowie die finale Politur.

Beurteilung

Aktuell gibt es noch kein marktreifes Kalibrierungsverfahren, welches eine Übertragung der tatsächlichen Farbe der Mundsituation auf die farbliche Darstellung der Vollfarben-3D-Modelle ermöglicht. Zukünftig wird dies möglich sein, sodass hier dann ein tatsächlicher Mehrwert für den Zahntechniker bei der Herstellung von ästhetischem Zahnersatz resultiert.

2. Digitale Multimaterialfertigung von Totalprothesen

Die digitale Multimaterialfertigung von Totalprothesen ist sowohl mittels CNC-Frästechnik als auch 3D-Druck möglich. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades bei der Herstellung und des geringen Anteiles manueller Arbeitsschritte ergeben sich durch diesen Ansatz erhebliche wirtschaftliche Vorteile. Zusätzlich zeigen industriell hergestellte Fräsrohlinge für die Multimaterialfertigung sehr gute mechanische Materialeigenschaften bei hervorragender Biokompatibilität, wie beispielsweise einen extrem geringen Restmonomergehalt.

Subtraktive Multimaterial-Fertigung von Totalprothesen mittels CNC-Frästechnik

Bereits seit 2015 gibt es die Möglichkeit, Prothesen zusammen mit den Zähnen subtraktiv in einem einzigen Fräsvorgang zu fertigen. Merz Dental (Lütjenburg, D) zeigte als weltweit erster Hersteller die Möglichkeit, mit dem „Baltic Denture System“ in einem vollständig digitalen Herstellungsprozess Totalprothesen zu realisieren (Abb. 4–6). Dies wird durch einen Fräsrohling ermöglicht, bei dem die aufgestellten Konfektionszähne bereits kraftschlüssig mit dem Prothesenrohling verbunden sind. Somit müssen diese nicht mehr manuell in die Basis eingeklebt werden.

Seit 2020 bietet Ivoclar (Schaan, FL) den sogenannten „Ivotion-Rohling“ an, der den Gingivabereich und den Anteil für den Zahnbereich in einer zweischichtigen Ronde integriert. Die Grenzschicht zwischen den beiden Bereichen ist als „Shell-Geometrie“ gestaltet, welche den Gingivaverlauf entlang der Zähne imitiert und so eine natürliche Gestaltung der Totalprothese ermöglicht (Abb. 7–12).

Multimaterial-3D-Druck von Totalprothesen

Aktuell wurde auf der IDS 2023 die additiv gefertigte Totalprothese „TrueDent“ (Stratasys, Eden Prairie, MN; Abb. 13–15) vorgestellt, bei der die Prothesenbasis und die Prothesenzähne in einem einzigen Druckvorgang hergestellt werden. Das Produkt ist in den USA bereits zugelassen und wird dort von verschiedenen Laboren bereits angeboten.

Beurteilung

Die subtraktive Multimaterialfertigung von Totalprothesen zeichnet sich aufgrund von industriell vorgefertigten Rohlingen durch sehr gute mechanische Eigenschaften und einen geringen Restmonomergehalt aus. Die Polierbarkeit der Prothesen ist exzellent. Als Nachteil ist beim Baltic-Denture-System zu nennen, dass es keine patientenspezifische Anpassungsmöglichkeit der Zahnaufstellung gibt. Beim Ivotion-System ist eine individuelle Aufstellung der Zähne möglich, sodass hier wie beim analogen Aufstellen vorgegangen werden kann. Eine Einschränkung ist jedoch durch die „Shell-Geometrie“ gegeben, die den Bereich der dreidimensionalen Zahnposition in einem gewissen Rahmen begrenzt. Aktuell ist der zahnfarbene Rohlingsanteil monochrom. Ein farblich geschichteter Aufbau wäre ein zusätzlicher Mehrwert für diese Technologie.

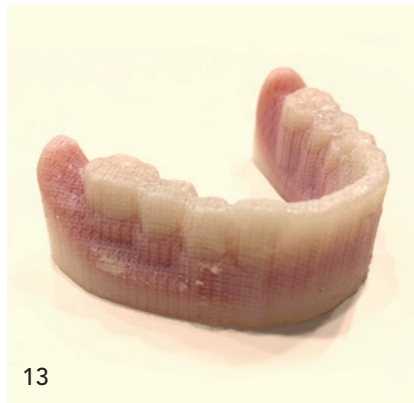


Abb. 13: TrueDent-Prothese (Stratasys, Eden Prairie, MN) mit wasserlöslicher Supportstruktur. – **Abb. 14 und 15:** Fertig ausgearbeitete und polierte TrueDent Prothese. Die Zähne und die Prothesenbasis werden gleichzeitig in einem Druckvorgang gefertigt.



Die additive Multimaterialfertigung von Totalprothesen zeichnet sich durch das sehr effiziente Verfahren der Stratasys PolyJet-Technologie aus und ermöglicht so eine kostengünstige Anfertigung des Zahnersatzes. Die Individualität der Prothesengestaltung ist sowohl im Hinblick auf die Zahnaufstellung, die Schichtung der Zähne als auch die farbliche Gestaltung als sehr gut zu sehen.

Aktuell gibt es noch keine klinischen Daten zu den TrueDent-Prothesen.

Multimaterialfertigung im Keramikbereich

1. Digitale Multimaterialfertigung von mehrschichtigen Vollkeramikrestaurationen aus Zirkoniumdioxid (Zirkonia)

Restaurationen aus Zirkoniumdioxid haben sich in den letzten 20 Jahren zu einer etablierten Versorgungsform im Kronen- und Brückenbereich entwickelt. In zunehmendem Maße werden aus Zirkonoxid vollanatomische monolithische Restaurationen hergestellt. Dies ist durch die Entwicklung transluzenter Zirkonoxide möglich geworden. Allerdings weisen transluzente Zirkoniumdioxide geringere mechanische Festigkeiten als die klassischen Varianten auf.

Seit einigen Jahren bietet hier die Multimaterialfertigung eine Lösung dieses Problems – die sogenannte Gradiententechnologie (GT) mit Mehrgenerationen-Rohlingen (Abb. 16). Damit ist es möglich, eine hohe Festigkeit bei gleichzeitig optimaler Transluzenz zu erreichen (Abb. 17). Die Gradiententechnologie beruht auf der zweidimensionalen Schichtung des Fräsrohlings aus verschiedenen Zirkonia-Generationen. Der basale Anteil des Rohlings ist aus hochfestem Zirkoniumdioxid aufgebaut (3Y-TZP oder 4Y-TZP), während der okklusale Bereich aus hoch transluzentem Zirkonia (5Y-CZP oder 6Y-CZP) besteht.

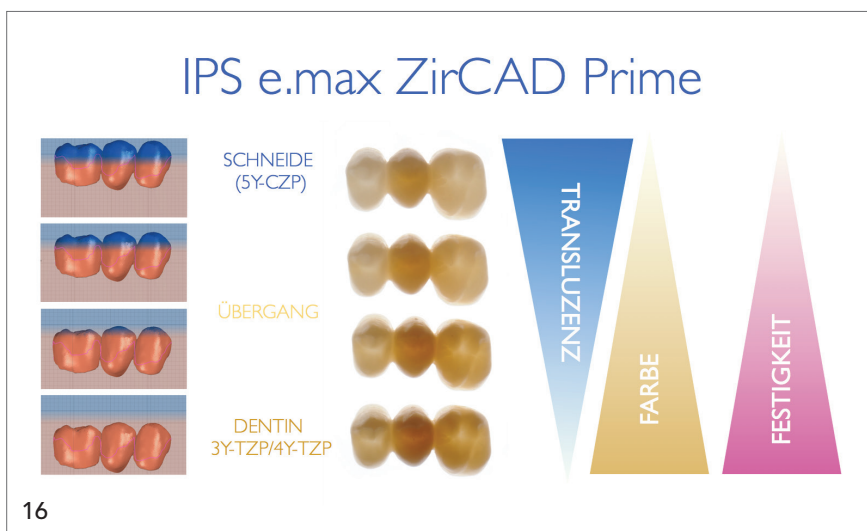


Abb. 16: IPS e.max ZirCAD Prime als Beispiel für ein Zirkonoxid der Gradienten-Technologie (Mehrgenerationen-Technologie). Der IPS e.max ZirCAD Prime-Rohling weist eine zweidimensionale Schichtung aus unterschiedlichen Zirkonoxid-Generationen auf.

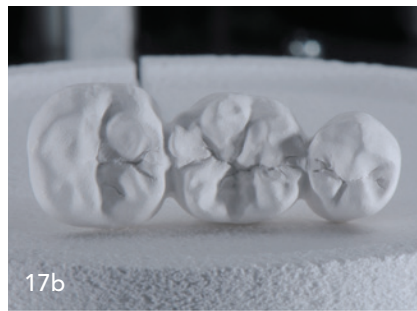


Abb. 17a–d: Workflow zur Herstellung einer dreigliedrigen Unterkieferseitenzahnbrücke aus IPS e.max ZirCAD Prime.

Beispiele für Zirkoniumdioxid in Gradiententechnologie:

- IPS e.max ZirCAD MT Multi (4Y-TZP und 5Y-CZP; Ivoclar)
- IPS e.max ZirCAD Prime (3Y-TZP und 5Y-CZP; Ivoclar)
- IPS e.max ZirCAD Prime Esthetic (4Y-TZP und 5Y-CZP; Ivoclar)
- Katana YML (3Y-TZP und 5Y-CZP; Noritake Kuraray)
- Prettau 3 (3Y-TZP und 5Y-CZP; Zirkonzahn)
- priti multidisc ZrO₂ Multi Translucent (3Y-TZP und 5Y-CZP; Pridentia)
- GQ Quattro Disc Space (3Y-TZP und 5Y-CZP; Gold Quadrat)

- Nacera Pearl Natural (3Y-TZP und 6Y-CZP; Dental Direkt)
- Perfit ZR TS-ML (4Y-TZP und 5Y-CZP; Vatech MCIS)

Beurteilung

Mehrschichtige Vollkeramikrestaurationen aus Zirkoniumdioxid zeichnen sich durch eine hohe Effizienz bei der Herstellung, eine hervorragende Biokompatibilität und eine sehr gute Ästhetik aus. Gerade die neuen Möglichkeiten von Mikrolayering und Cutback, bei denen eine Reduzierung der anatomischen Form im Schmelzbereich erfolgt, die dann durch individuelle Gestaltung mit pastösen Schneidmassen

im Sinne eines Glanzbrandes ergänzt werden, liefern im Frontzahnbereich überzeugende ästhetische Ergebnisse.

2. Multimaterial-3D-Druck von mehrschichtigen Vollkeramikrestaurationen

Zukünftig wird man in der Lage sein, mehrschichtige Vollkeramikronen (beispielsweise aus Lithiumdisilikat) additiv in einer natürlichen 3D-Schichtung herzustellen. Der 3D-Drucker-Hersteller Lithoz (Wien, A) hat in einer ersten Machbarkeitsstudie gezeigt, dass es mit der patentierten LCM-Technologie (LCM = Lithography-based Ceramic Manufacturing) möglich ist, Zähne aus Lithiumdisilikat in einer natürlichen Dentin-Schneide-Schichtung zu drucken (Abb. 18–20).

Die ersten Ergebnisse sind beeindruckend und lassen auf das disruptive Potenzial dieser Technologie schließen.

Beurteilung

Der Multimaterial-3D-Druck von geschichteten Vollkeramikrestaurationen aus Lithiumdisilikat ermöglicht die exakte dreidimensionale Kopie natürlicher Zähne. Die digitale intraorale Erfassung der dreidimensionalen Zahnschichtung mittels NIRI-Technologie in Kombination mit Zahnstrukturdatenbanken könnte zukünftig die Datengrundlage für diese Technologie bilden. Da für mehrschichtig gedruckte Keramikrestaurationen keinerlei manuelle Schichtung erforderlich ist, sollte die Stabilität und Zuverlässigkeit derartiger Versorgungen wesentlich besser sein als bei den bisherigen analogen Schichttechniken.

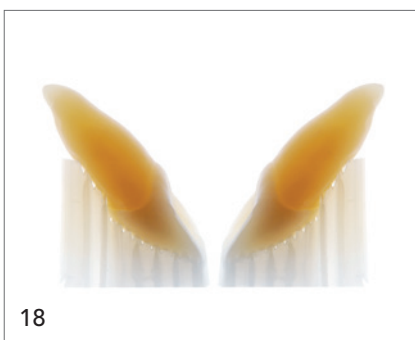


Abb. 18–20: Mittels Lithoz LCM-Verfahren (LCM = Lithography-based Ceramic Manufacturing) gefertigte, dreidimensional geschichtete Zähne aus Lithiumdisilikat.



Abb. 20 und 22: Demonstrator eines Metallgerüstes für eine Teleskopversorgung im Unterkiefer aus zwei verschiedenen Metallen (hochgoldhaltige Legierung, CoCrMo-Legierung), zusammen hergestellt in einem Bauprozess mittels Metall-Multimaterial-3D-Druck.

Multimaterialfertigung im Metallbereich

3. Multimaterial-3D-Druck von metallgestütztem Zahnersatz

Auch im Bereich der Metallfertigung gibt es Bestrebungen zur Herstellung von Bauteilen aus verschiedenen Metallen in einem einzigen Bauprozess. Als Vorreiter ist hier das Fraunhofer IGCV in Augsburg zu nennen, welches sich seit einigen Jahren mit dem Metall-Multimaterial-3D-Druck beschäftigt und aktuell erste Arbeitsansätze im Dentalbereich vorgestellt hat (Abb. 21 und 22).

Beurteilung

Der Multimaterial-3D-Druck mit verschiedenen Metallen in einem Bauprozess ermöglicht es, unterschiedliche Eigenschaften in einem Bauteil zu kombinieren und dabei das Bauteil in einem einzigen 3D-Druckvorgang herzustellen. So kann man beispielsweise die hohe Stabilität von CoCr-Gerüsten mit den hervorragenden Friktionseigenschaften von Gold in einer Multimaterial-Teleskoparbeit kombinieren. Da hierbei keine zusätzlichen Füge-schritte notwendig sind, ergibt sich daraus eine sehr kosteneffiziente Herstellungsvariante.

Fazit

Anhand der vorgestellten Beispiele zu den Möglichkeiten der digitalen Multimaterialfertigung in der zahnärztlichen Prothetik ist das hohe Potenzial dieser neuen technologischen Ansätze klar erkennbar. Da sowohl subtraktive als auch additive Verfahrenstechniken anwendbar sind, ergibt sich ein enormes Anwendungsspektrum für diese Technologien. Die bisherigen Erfahrungen mit den vorgestellten Anwendungen sind durchweg gut bis sehr gut. Es sollte dabei berücksichtigt werden, dass einige der vorgestellten Technologien bereits am Markt etabliert sind, während sich andere noch in der Entwicklungsphase befinden. Aus diesem Grund ist eine finale Beurteilung der letztgenannten Technologien in der jetzigen Phase verfrüht. Alle genannten Wege haben aber den wesentlichen Vorteil, dass die Arbeitsprozesse effizienter und damit kostengünstiger werden. Es stellt sich daher nicht die Frage, „ob“ sich diese Techniken durchsetzen, sondern „bis wann“ diese den Markt durchdringen.

ZT Josef Schweiger M.Sc.



Prof. Dr. Daniel Edelhoff



Priv.-Doz. Dr. Dr. Oliver Schubert



ZT JOSEF SCHWEIGER, M.SC.

Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
Klinikum der Universität München,
LMU München
Goethestraße 70
80336 München
Josef.Schweiger@med.uni-muenchen.de