

DENTAL DIGITAL



2

Eine Publikation von:

dental
class
labor



Der Multimaterial-3D-Druck in der dentalen Anwendung



ZT Josef Schweiger
Leiter des zahntechnischen
Labors der Ludwig-Maximilian
Universität München
Josef.Schweiger@
med.uni-muenchen.de



Annett Kieschnick
Freie Fachjournalistin, Berlin
ak@annettkieschnick.de



PD Dr. Jan-Frederik Güth
Leitender Oberarzt Poliklinik
für Zahnärztliche Prothetik
Ludwig-Maximilian
Universität München

Die Herstellung von Bauteilen, die aus verschiedenen Materialien bestehen, ist in der Regel aufwendig und daher kostenintensiv. Oftmals werden hierbei nach wie vor analoge Technologien und manuelle Arbeitsschritte eingesetzt. Der Multimaterial-3D-Druck (3D-MMP) bietet hier erstmals die Chance, solche Bauteile in einfacher und schneller Weise auf rein digitalem Wege herzustellen. Das Ergebnis sind erstaunliche Produkte, die schon bei der ersten Betrachtung das zukünftige Potenzial dieser Technologie erahnen lassen. Der Multimaterial-3D-Druck revolutioniert die additive Fertigung.

DERZEIT ERLEBT der sogenannte 3D-Druck einen enormen Zuspruch. Tatsächlich ist die Technologie nichts Neues. Schon in den 1980er Jahren kamen erste industrielle Maschinen für die additive Fertigung auf den Markt. Als **Pioniere des 3D-Druckes** sind hier Charles Hull (Gründer von 3D-Systems), S. Scott Crump (Gründer von Stratasys) und Hans J. Langer sowie Hans Steinbichler (beide Gründer von EOS) zu nennen¹. Zum damaligen Zeitpunkt wurden die Druckmaschinen hauptsächlich für das Herstellen von Prototypen eingesetzt (Rapid Prototyping). In den Folgejahren entwickelte sich die Technik schnell. Die Drucker wurden kleiner und günstiger. Die Einsatzgebiete veränderten sich. Die zu druckenden Materialien erweiterten sich auf Kunststoff, Metall, Keramik und sogar menschliches Gewebe. Die Rapid Prototyping Verfahren können unter anderem nach der Art der verwendeten Materialien unterschieden werden (zum Beispiel Kunststoffe, Metalle oder Pulverbett)².

Rapid Prototyping = Oberbegriff für Verfahren zur schnellen und einfachen digitalgestützten Umsetzung von CAD-konstruierten Mustern

Einteilung der 3D-Druckverfahren nach DIN^{3,4}

Eine eindeutige Klassifizierung lässt sich nach der VDI Richtlinie 3404 bzw. der ISO/DIS 17296 vornehmen. Danach lassen sich die additiven Verfahren in zwei Gruppen unterteilen:

Binderverfahren

Bei den Binderverfahren wird zunächst eine komplette Schicht eines Materials (flüssig, pulvrig, fest) ausgelegt und entsprechend den Konturen des Objektes in geeigneter Weise verfestigt. Zu diesen Verfahren zählen beispielsweise:

- ▶ Stereolithographie (SLA)
- Hierzu zählt auch das Maskenbelichtungsverfahren (= Direct Light Processing = DLP)
- ▶ Selektives Lasersintern (SLM, DMLS)
- ▶ Indirekter 3D-Druck (Pulverbettendrucker)
- ▶ LOM-Verfahren (Laminated Object Manufacturing)

Abscheidungsverfahren

Bei den Abscheidungsprozessen wird über eine Düse oder einen Druckkopf Material kontinuierlich oder tropfenförmig abgegeben und als Punkt- oder Linienmuster Schicht für Schicht abgelegt. Zu diesen Prozessen gehören beispielsweise:

- ▶ Extrusionsverfahren (FDM-Verfahren [Fused Deposition Modeling] oder FFF-Verfahren [Fused Filament Fabrication])
- ▶ Direkter 3D-Druck (3DP)
- ▶ 3D-Extrusion von Pasten
- ▶ Polyjet-Verfahren, bei dem Fotopolymere tropfenförmig über einen Druckkopf abgesetzt werden.



01 Valplast 3D-Drucker (Arfona)

Nicht jedes dieser Verfahren ist für eine dentale Anwendung geeignet. Bevorzugt werden derzeit die Stereolithographie (SLA), das Maskenbelichtungsverfahren (DLP), das Polyjet-Verfahren sowie die Lasersinter-Technologie (SLS, SLM et cetera) eingesetzt.

Multimaterial-3D-Druck (3D-MMP)

Die Technologie des Multimaterial-3D-Druckes ist relativ neu. Hierbei werden unterschiedliche Materialien vereint und über das additive Vorgehen entsprechende Bauteile hergestellt. Bislang galt als großer Vorteil des 3D-Drucks, dass basierend auf einer CAD-Konstruktion jedwede Form im additiven Verfahren hergestellt werden kann. Nun lässt sich zusätzlich eine weitere Grenze überwinden, denn mit dem Multimaterial-3D-Druck können auch alle denkbaren Farben in einem breiten Farbspektrum (360.000 verschiedene Farbtöne) detailgetreu nachgebildet werden. Dies kann zukünftig im Dentalbereich eine enorme Bereicherung darstellen, denn die mannigfaltigen lichteoptischen Eigenschaften natürlicher Zähne können exakt reproduziert werden. Grundsätzlich sind verschiedene Fertigungsverfahren dafür geeignet. Sowohl im Bereich der Binderverfahren als auch im Bereich der Abscheidungsverfahren gibt es Hersteller, welche die Technologie mittlerweile als Serienprodukt anbieten.

Multimaterial-3D-Druck (zum Beispiel Stratasys): In einem Druckvorgang kann eine breite Palette verschiedener Materialien – von steif bis flexibel, von transparent bis undurchsichtig – mit einem Farbspektrum aus 360.000 verschiedenen Tönen vereint werden.

Partielle Prothesen

So hat beispielsweise der Dentalhersteller Valplast (Valplast International Corp., Westbury, NY, deutscher Vertrieb Johannes Weithas GmbH & Co. KG) in Zusammenarbeit mit dem 3D-Drucker Startup Arfona (Brooklyn, NY) einen



02 Eine 3D-gedruckte Valplast-Prothese mit Valplast-Filament (Druckermaterial)



03 Gedruckte Valplast-Prothese im Frontzahnbereich (Patientenarbeit, Universität Köln, Dr. Roggendorf, 2016)

(Bildquellen 1 bis 3: J. Weithas GmbH & Co. KG)

FFF-Drucker (Fused Filament Fabrication, Schmelzschicht-Verfahren) vorgestellt, mit dem partielle Prothesen aus biokompatiblen, thermoplastischem Nylon im Multimaterial-3D-Druck gebaut werden (01). Somit können erstmals Teilprothesen mit Klammern volldigital hergestellt werden. Anders als im DLP-Druckverfahren wird der Kunststoff nicht mittels Lichtpolymerisation ausgehärtet, sondern das thermoplastische Material durch Aufschmelzen in Form bzw. Schichten gebracht (02). Da keine Polymerisation – wie beim DLP-Verfahren – stattfindet, werden auch keine potenziell allergieauslösenden Restmonomere oder Photoinitiatoren freigesetzt.

Der FFF-Drucker kann dank seiner beiden Druckköpfe zwei unterschiedliche Materialien gleichzeitig verarbeiten, zum Beispiel das Prothesenmaterial Valplast (Polyamid/Nylon) zusammen mit einem speziellen Support-Material. Beide Druckköpfe sind für flexible Materialien optimiert worden, so dass sich neben Valplast auch andere, teils flexible thermoplastische Materialien (zum Beispiel PMMA, POM, PLA, PETG) drucken lassen. Denkbar wäre somit auch ein gleichzeitiger Druck der Prothesenbasis mit Zähnen aus PMMA. Auf Grund seiner identischen Verarbeitung ist Valplast 3D als Klasse 2a Medizinprodukt für den dauerhaften Einsatz zugelassen und kann auf umfassende klinische Studien zurückgreifen. Erste Patientenarbeiten mit dem Valplast 3D-Druck wurden im Jahr 2016 an der Universität Köln gefertigt (03). An der Universität Dresden läuft eine materialkundliche Untersuchung des gedruckten Valplast-Materials. Aufgrund der geringeren Auflösung eignet sich das FFF-Druckverfahren zur Zeit nur für bestimmte zahntechnische Arbeiten wie Prothesenbasen, Funktionslöffel und Kontrollmodelle.

Valplast = Prothesenmaterial aus biokompatiblen, thermoplastischem Nylon

Histoanatomischer 3D-Druck von Zähnen

Den interessantesten Ansatz zeigt derzeit die Firma Stratasys (Eden Prairie, MN) mit der patentierten Polyjet-Technologie. Bei diesem Vorgehen werden die verschiedenen Materialien direkt über einen Druckkopf auf das Baufeld aufgetragen. Seit dem Jahr 2014 bietet Stratasys für die Polyjet-Technologie die Möglichkeit des Multimaterial-3D-Drucks an. Mit der Stratasys Objet 260 Dental Selection (04) und der Objet500 Dental Selection werden Geräte angeboten, die speziell auf die Anforderungen von Dental-laboren zugeschnitten sind (05 und 06). Neueste Geräteentwicklungen, wie beispielsweise der Stratasys J750, bieten die Option, sechs verschiedene Materialien mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften und bis zu 360.000 Farbmischungen in einem Bauprozess simultan im Multimaterial-3D-Druck anzuwenden⁵. Die Resultate sind erstaunlich (07 und 08).

Eine Anwendungsmöglichkeit des 3D-MMP im Dentalbereich könnte zukünftig der Bau von mehrschichtigem Zahnersatz aus verschiedenen Materialien sein. Im Bereich der identischen Reproduktion von natürlichen Zähnen über einen Kronen- und Brückenzahnersatz befindet sich derzeit in der Prototypen-Phase. Die Basis der Technologie bildet die sogenannte Zahnstrukturdatenbank nach Schweiger^{6,7,8}. Mit dieser ist es möglich, den mehrschichtigen Aufbau natürlicher Zähne zu kopieren und die generierten Daten für den additiven Herstellungsprozess zu nutzen (09 bis 011). Ziel ist es, biomimetischen Zahnersatz herzustellen. Dies bedeutet, dass dieser sowohl die mehrschichtige Dreidimensionalität als auch die mechanischen Eigenschaften natürlicher Zähne widerspiegelt. Unter Berücksichtigung der lichteoptischen Eigenschaften der verschiedenen Zahnschichten (Pulpa, Dentin, Schmelz) wird eine identi-

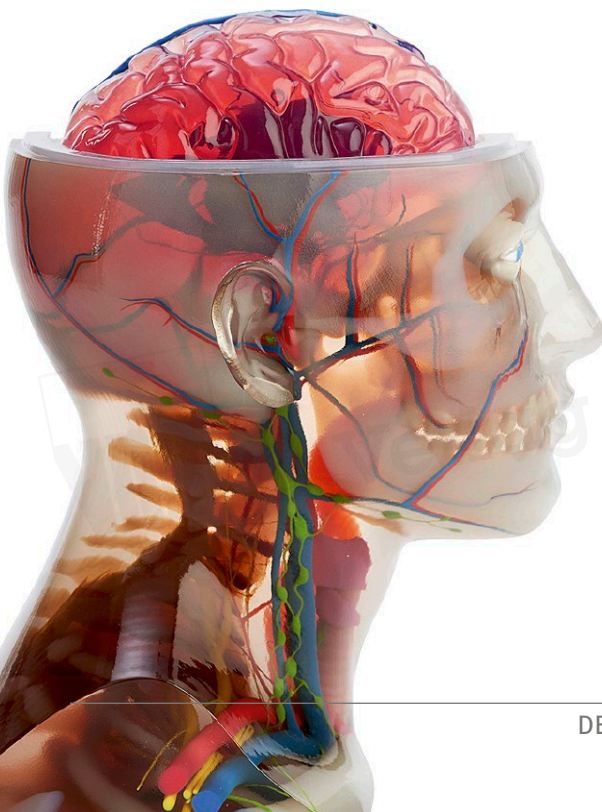


04 Stratasys bietet mit der *Objet260 Dental Selection* und der *Objet500 Dental Selection* zwei **Multimaterial-3D-Drucker** an, die auf die Anforderungen des **Dentalbereiches zugeschnitten sind**

(Bildquellen: Stratasys, Eden Prairie, MN)

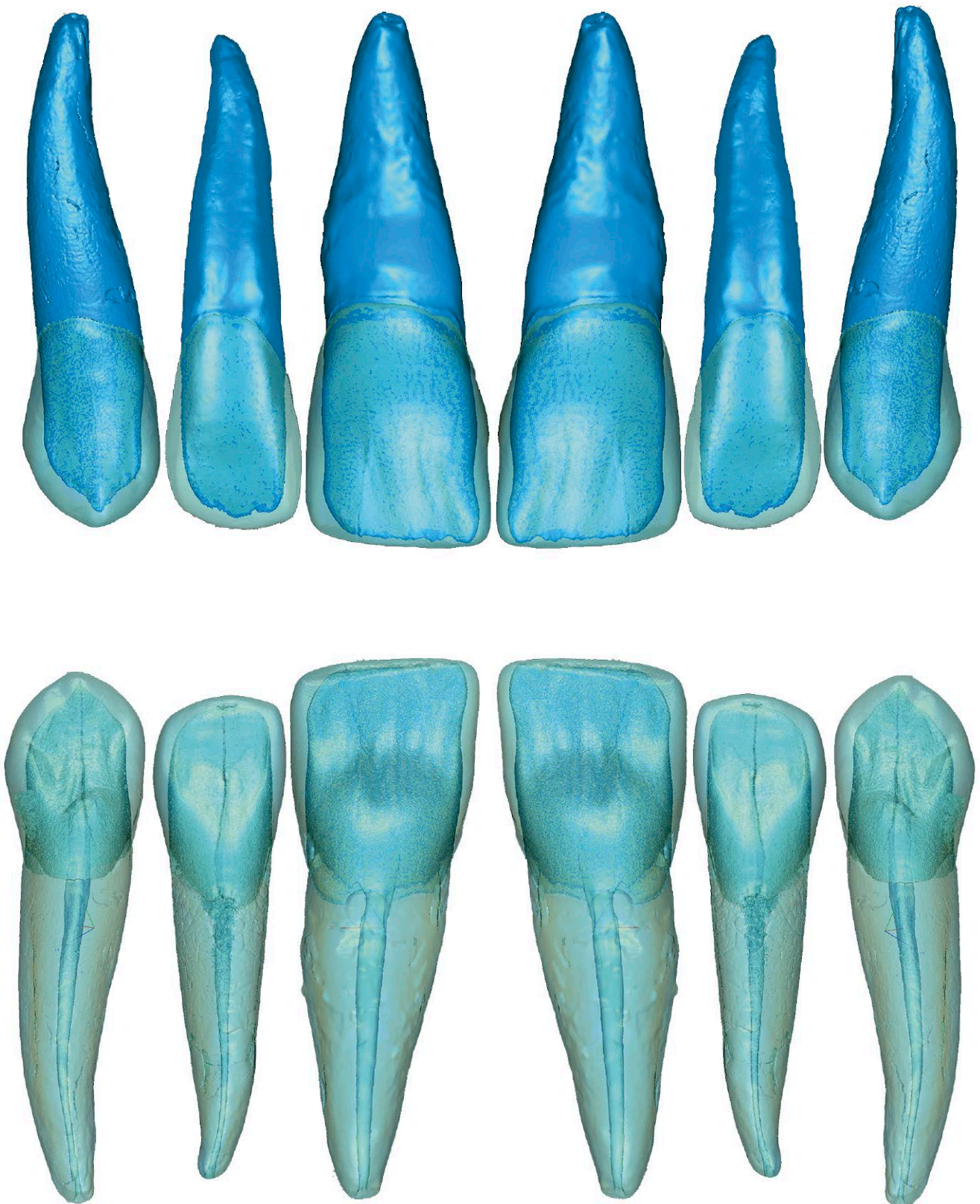
05 und **06** **Anschauungsmodelle und Implantat-Modelle mit Gingivamaske** können in einem **Bauprozess aus verschiedenen Materialien hergestellt werden**

(Bildquellen: Stratasys, Eden Prairie, MN)

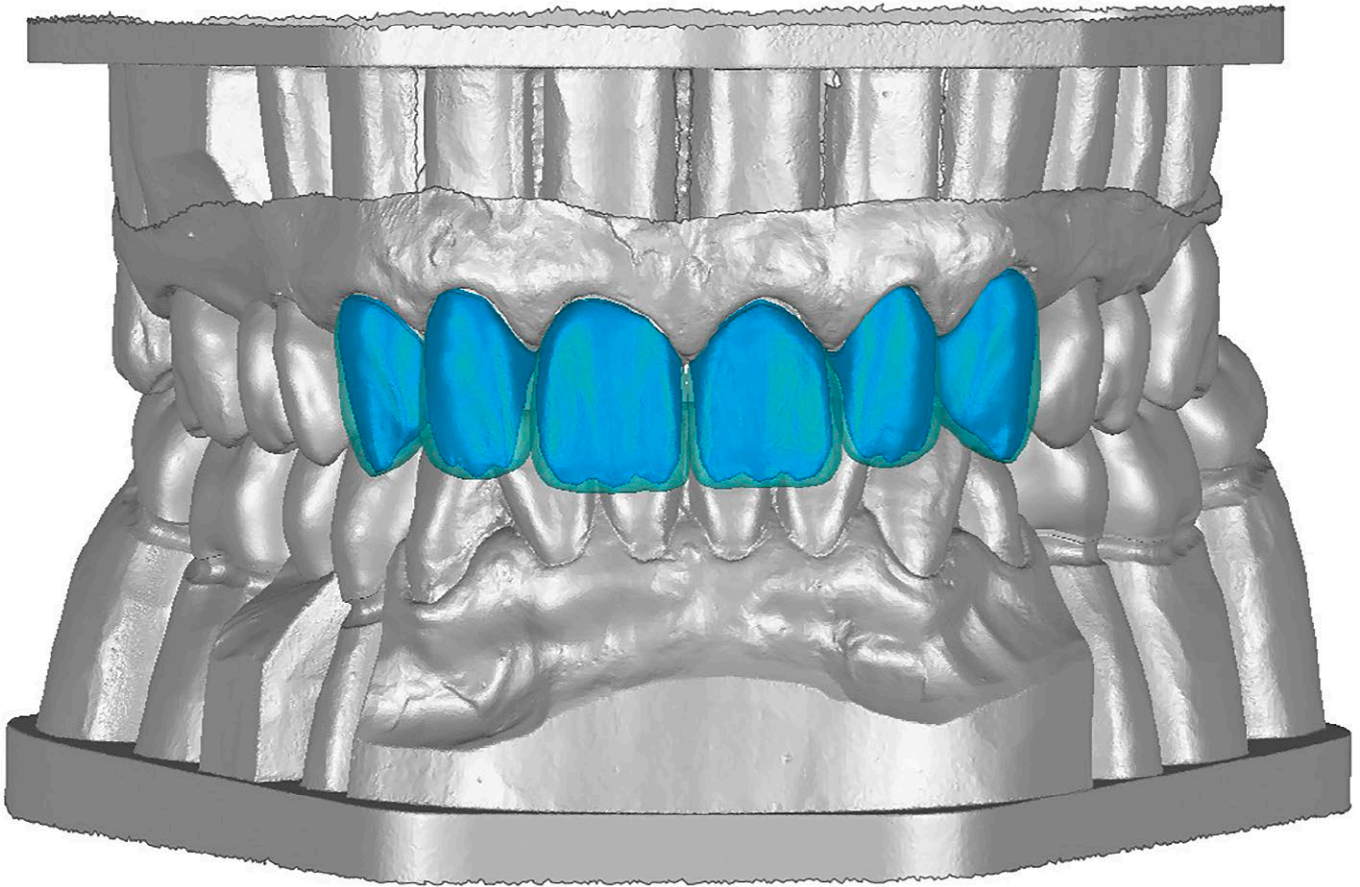


07 und **08** Der **Multimaterial-3D-Druck** mit dem *Stratasys J750* ermöglicht **erstaunliche Lösungen**. In der **CAD-Software** können **bis zu 360.000 Farben** zugeordnet und **realistische Prototypen-Modelle** **additiv gefertigt** werden. (links: Der **menschliche Schädel** mit **realistisch dargestellten internen Strukturen** kann zum **Beispiel als Lehr- und Unterrichtsmaterial** dienen; rechts: **Prototyp eines Turnschuhs**, mit dem zum **Beispiel** **schlüssige Verbraucherstudien** vorgenommen werden können.)

(Bildquellen: Stratasys, Eden Prairie, MN)



09 und 10 Die Basis des Multimaterial-3D-Druckes von Zähnen bildet die Zahnstrukturdatenbank nach Schweiger, welche die verschiedenen Schichten von Zähnen, wie beispielsweise die äußere Schmelzoberfläche (OES), die Dentin-Schmelz-Grenze (DEJ) und die Pulpa, abbildet



►11 CAD-Konstruktion von sechs Frontzahnkronen mithilfe der Zahnstrukturdatenbank

sche ästhetische Reproduktion von natürlichen Zähnen⁹ erreicht (►12 und ►13).

Histoanatomisch: Histologie ist die Wissenschaft von Geweben, und Anatomie beschreibt die Lehre vom Aufbau des Körpers. Als „histoanatomisch“ kann die Symbiose von Gestalt (Morphologie) und Aufbau biologischer Gewebe bezeichnet werden.

Biomimetik (auch Bionik): Biomimetik beschreibt das Nachahmen biologischer Stoffe aus der Natur. In der Zahnmedizin bedeutet dies beispielsweise die Imitation der mechanischen Eigenschaften und der lichteoptischen dreidimensionalen Struktur eines natürlich gesunden Zahnes.

Zahnstrukturdatenbank nach Schweiger: Intelligente Datenbank zur CAD/CAM-gestützten Fertigung von Zahnersatz. Zusätzlich zu einem Vorschlag zur Zahnaußengeometrie wird von der Software die interne Zahnstruktur (Dentinkern) abgebildet. Die Form des Dentinkerns steht hier als ausschlaggebendes Kriterium für einen naturidentischen Zahnersatz.

Ästhetisches Try-In

Die aktuellen Forschungen an der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der LMU München nutzen für die Umsetzung des Konzeptes die Daten aus der Zahnstrukturdatenbank und das Polyjet-Verfahren der Firma Stratasys. Der derzeitige Entwicklungsstand ermöglicht die Anfertigung von sogenannten „Ästhetik-Try-In“-Kronen/Brücken aus lichthärtenden Kunststoffmaterialien. Die hierfür verwendeten Werkstoffe sind für die Anwendung im Mund bis zu 24 Stunden zugelassen. Somit ist eine Evaluierung sowohl der funktionellen als auch insbesondere der ästhetischen Kriterien möglich. Die 3D-Schichtung der Restaurationen ist aufgrund des digitalen Konstruktionsprozesses reproduzierbar, sodass nach der Einprobe die geschichteten Restaurationen beispielsweise mittels subtraktiver Fertigung 11 in die definitive Versorgung aus Keramik überführt werden können (►14).

Ästhetik-Try-In: Einprobe eines Zahnersatz-Prototypen, bei dem zusätzlich zur Funktion (okklusale Gegebenheiten, Phonetik) und zur Zahnform auch die Zahnfarbe bewertet werden kann



12 und 13 Die Anwendung von Zahnstrukturdaten ermöglicht die identische Kopie der natürlichen lichteoptischen Eigenschaften von natürlichen Zähnen

Diskussion

Mithilfe der Kombination von Zahnstrukturdatenbank und Polyjet-Technologie ist es erstmals möglich, geschichtete Try-In-Kronen/Brücken herzustellen. Da die Fertigung der Schichtung keine analogen Schritte aufweist, wird das Ergebnis nicht von manuellen Faktoren beim Schichten beeinflusst. Einzig und allein die Komposition der Druckwerkstoffe in Kombination mit dem dreidimensionalen schichtweisen Aufbau des Zahnersatzes beeinflusst das mechanische und ästhetische Ergebnis. Durch Verändern der Zusammensetzung beim Multimaterial-3D-Druck-Prozess können zukünftig die lichteoptischen Eigenschaften sehr präzise eingestellt werden. So werden bereits bei In-vitro-Untersuchungen verschiedene Mischungen für den Schmelzmasseanteil getestet, um möglichst nahe an die Lichttransmission von natürlichem Zahnschmelz heranzukommen (15). Ebenso können die Dentine durch Mischungen im RGB-Farbraum eingestellt werden.

RGB-Farbraum: International anerkanntes Farbmodell, bei dem das Nachbilden einer Farbwahrnehmung durch das additive Mischen dreier Grundfarben (Primärfarben rot, grün, blau) erfolgt

Ausblick

Die Umsetzung der bisherigen Erkenntnisse aus den Zahnstrukturdatenbanken für den Multimaterial-3D-Druck von definitivem Zahnersatz stellt eine große Herausforderung dar. Weder die Druck-Technologien noch die dazugehörigen Materialien erscheinen derzeit dafür geeignet zu sein. Eine intensive Forschung in beiden Bereichen, am besten parallel, sollte es jedoch langfristig möglich machen, Tech-

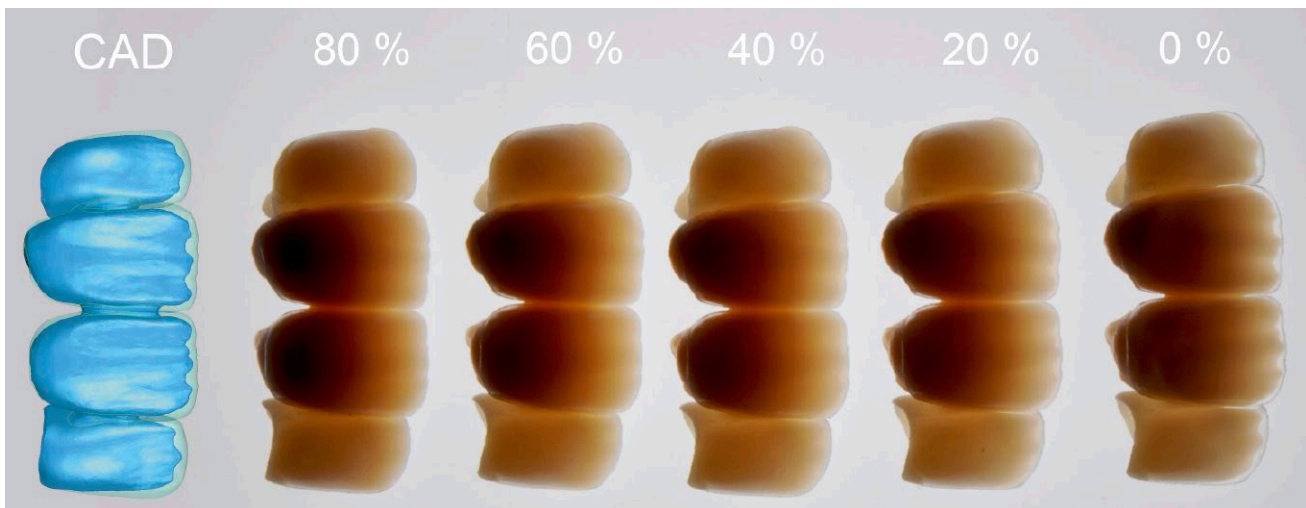
nologien zu entwickeln, welche die Herstellung von geschichtetem definitivem Zahnersatz, beispielsweise aus Keramik, mittels 3D-Druck erlauben. □

LITERATUR

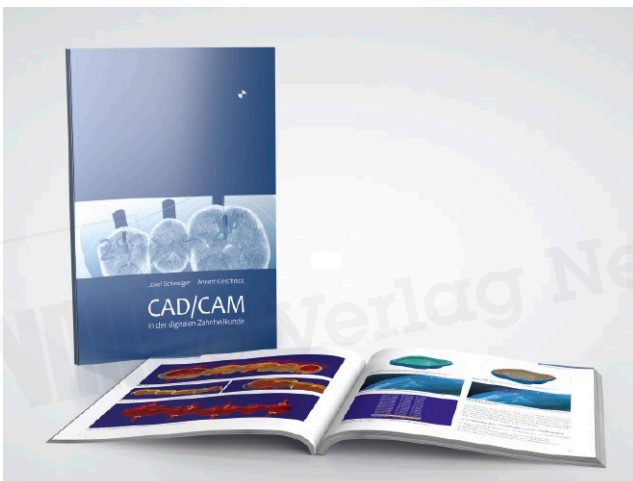
1. Schweiger J, Güth J-F, Trimpl J: 3D-Druck in aller Munde. Teamwork 2017 (2): 124-128
2. Schweiger J, Kieschnick A: CAD/CAM in der digitalen Zahnheilkunde. Teamwork Media 2017
3. Kollenberg W: Keramik und Multimaterial 3D-Druck. Keram. Z. 2014; 66(4): 233-236
4. Kieschnick A, Schweiger J, Edelhoff D, Güth J-F: Die additiven CAD/CAM-gestützten Fertigungstechnologien im zahntechnischen Labor. Verband Deutscher Zahntechniker Innungen VDZI Sachverständigenpapier Oktober 2016:1-16
5. www.stratasys.com
6. Schweiger J: Verfahren, Vorrichtung und Computerprogramm zur Herstellung eines Zahnersatzes. DE 10 2010 002 484 A1 (2010)
7. Schweiger J: Method, device and computer program for producing a dental prosthesis. EP 000002363094 A2 (2011)
8. Schweiger J: Method, device and computer program for producing a dental prosthesis. US 2011 0212419 B2
9. Schweiger J, Beuer F, Stimmelmayer M, Edelhoff D, Magne P, Güth J-F: Histo-anatomic 3D printing of dental structures. BrDentJ 2016; 221(9): 555-560
10. Schweiger J, Edelhoff D, Stimmelmayer M, Güth J-F, Beuer F: Automatisierte Fertigung von mehrschichtigem Frontzahnersatz mithilfe digitaler Dentinkerne. Quintessenz Zahntechnik 2014; 40 (10): 1248-1266
11. Schweiger J, Edelhoff D, Stimmelmayer M, Güth J-F, Beuer F: Automated Production of Multilayer Anterior Restorations with Digitally Produced Dentin Cores. Quintessence Dental Technician QDT 2015 (38): 207-220



▣14 Definitive Oberkiefer-Frontzahnkronen, hergestellt im rein digitalen Workflow: von der CAD-Konstruktion über die gedruckten Try-In-Kronen bis hin zu den digital geschichteten Keramikronen aus Lithiumdisilikat



▣15 In einem Pilotversuch wurden verschiedene Mischungsverhältnisse des Schmelzbereiches getestet. Dabei wurde dentinfarbiges Material mit transparentem Material gemischt. Die Prozentangabe bezieht sich dabei auf den Anteil des dentinfarbigen Materials im Schmelzbereich.



Im Fachbuch „CAD/CAM in der digitalen Zahnheilkunde“ (teamwork media Verlag) beschreiben die Autoren unter anderem die additiven Fertigungstechnologien ausführlich.