

Faszination 3D-Druck, Teil 9

Foto: © M.Dörr & M.Frommherz - AdobeStockphoto

Der 3D-Druck hat Einzug in die Dentallabore gehalten. Auf unserer Reise durch diese faszinierende Technologie geht es diesmal um die Validierung.

Der 3D-Druck hat sich in den letzten Jahren immer weiter zur Additiven Fertigung, auch bekannt als Additive Manufacturing (AM), weiterentwickelt. Es geht also längst nicht mehr nur um die Fertigung von Modellen oder „Prototypen“, sondern es werden Teile für lasttragende, technische, medizinische und industrielle Anwendungen gefertigt. War die Technologie in der Anfangszeit auf Grund der Komplexität und Kosten des benötigten Equipments nur für industrielle Anwender zugänglich, sind 3D-Drucker inzwischen auch für Privatanwender erschwinglich. Inzwischen gibt es viele Verfahren, die den Aufbau dreidimensionaler Objekte erlauben. Alle haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Gemein ist ihnen, dass in der Regel Material Schicht für Schicht aufgetragen wird und so dreidimensionale Werkstücke entstehen. Dieser schicht-



Autoren

Dr. Jens Träger

jtraeger@mtcompanies.com

www.dmg-digital.com


B.Sc.

Kai Billerbeck

kbillerbeck@mtcompanies.com

www.dmg-digital.com

weise Aufbau erfolgt computergesteuert aus flüssigen oder festen Werkstoffen und auf Basis von digital vorliegenden Daten der gewünschten Objektgeometrie (vgl. CAD/CAM). Durch physikalische oder chemische Härtungs- bzw. Schmelzprozesse erfolgt eine selektive Verfestigung in Schichten und die Verbindung zu einem dreidimensionalen Objekt. Typische Werkstoffe für das 3D-Drucken sind Kunststoffe und -harze, Metalle sowie Keramiken. Obwohl es sich beim 3D-Druck um formgebende Verfahren handelt, sind keine speziellen Werkzeuge erforderlich, die in direktem Kontakt das Werkstück bearbeiten oder dessen jeweilige Geometrie (als Negativ) wiedergeben, wie es zum Beispiel bei Gussformen der Fall ist [IPH]. Dies macht die Additive Fertigung so attraktiv, wenn Unikate, also Einzelstücke, benötigt werden, wie es in der Dental- und Medizintechnik, aber auch bei Schmuck oder in der Kleinserienfertigung oder Einzelfertigung von Teilen der Fall ist. Im Gegensatz zu allen Fertigungsverfahren, die eine subtraktive Bearbeitung der Werkstücke erfordern (Trennen, Fräsen usw.) erhöht sich beim Additive Manufacturing die Wirtschaftlichkeit mit steigender Komplexität der Bauteilgeometrie und sinkender benötigter Stückzahl.

Additive Fertigung im Dentalbereich

Aus den allgemeinen Überlegungen zum Additive Manufacturing wird ersichtlich, dass dieses Verfahren grundsätzlich für dentale Anwendungen sehr gut geeignet sind, da hier – wie sonst in kaum einem anderen Bereich – individuelle Werkstücke mit einer hohen Formkomplexität als Einzelanfertigung benö-

tigt werden. Somit ist es nicht verwunderlich, dass der 3D-Druck sich auch bei dentalen Anwendern immer größerer Beliebtheit erfreut. Die Herstellung dentaler Medizinprodukte durch Additive Manufacturing stellt jedoch auch erhöhte Anforderungen an die Bauteile und an die Validität des Workflows. Für 3D-Druck-Enthusiasten der sogenannten Maker-Szene, also Privatpersonen, die als kreative Tüftler im besten Sinne bezeichnet werden können und die gemeinsam Problemlösungen entwickeln und eigene Do-it-Yourself-Projekte verwirklichen, sind in der Regel derart enge und genaue Vorgaben wie bei Medizinprodukten nicht relevant. Dies trifft auch auf Bereiche wie den Prototypen- und Modellbau zu.

DLP-Technologie in der dentalen additiven Fertigung

Für die Herstellung dentaler Druckobjekte mittels Additive Manufacturing kommt bei professionellen Anwendern heutzutage das DLP-Verfahren zum Einsatz. Wenngleich ein vollumfänglicher Überblick über alle existierenden Verfahren den Umfang dieses Beitrags sprengen würde, sollen doch die Kernfeatures und -vorteile der DLP-Technologie (Digital Light Processing) zusammengefasst werden, um die technologischen Gründe für diese Entwicklung zu zeigen.

In den 3D-Druckern werden lichterhärtende Harzformulierungen verarbeitet. Lichthärtende Materialien sind Zahnarzt und Zahntechniker seit Jahrzehnten bekannt und werden in der täglichen Routine oft und mit sehr gutem Erfolg eingesetzt. Diese lichthärtenden Materialien werden, insbesondere wenn sie intraoral eingesetzt werden, wie etwa

Füllungskomposite, mit blauem Licht von etwa 450 nm Wellenlänge ausgehärtet. Die DLP 3D-Drucker DMG 3Demax und DMG 3Delite arbeiten mit UV-Licht von 385 nm und auf Grund der geringeren Wellenlänge präzise. Die Verwendung von UV-Licht im 3D-Druck ist gefahrlos möglich, da Anwender und Patient nicht mit dieser Strahlung in Kontakt kommen. Die Belichtung und Aushärtung der 3D-Druck-Formulierungen im Drucker erfolgt in Schichten, die bis in den Bereich von einigen zehn Mikrometern dünn sein können. Jede dieser Schichten, aus denen das Objekt gebaut wird, ist in der Ebene ein hochaufgelöstes Bild mit einer Auflösung, die einem Full-HD Projektor entspricht. Da diese Belichtung auf einer viel kleineren Fläche erfolgt als etwa bei der Projektion von Bildern oder Filmen, ist die Größe eines Pixels, das heißt, die Auflösung, bei 68 µm und darunter. Es können also auch hier hohe Genauigkeiten erreicht werden. Durch die schichtweise Aushärtung mit Licht erhält man vor allem auch völlig dichte Objekte ohne Hohlräume oder Porositäten, was sie für eine intraorale Anwendung prädestiniert.

Druckgenauigkeit und Validierung

In diesem Beitrag stellen wir den validierten DMG DentaMile Workflow vor, mit dem Ergebnisse erzielt werden, welche hinsichtlich Biokompatibilität, Stabilität und Präzision die hohen Anforderungen der Zahntechniker und Zahnärzte erfüllen. Der DentaMile validated Workflow wurde bei DMG nach strengen Kriterien erarbeitet und wird in unserem Applikationszentrum überprüft, so dass immer die höchste Qualität erreicht wird. Hierbei ist wichtig zu betonen, dass das Augen-

merk auf dem gesamten Workflow liegt. Jede Komponente des gesamten Workflows hat Einfluss auf das Endergebnis. Der Grundstein für Richtigkeit und Präzision wird zwar im 3D-Drucker gelegt, jedoch haben auch die Reinigung des Grünteils und besonders auch die Nachbelichtung Einfluss auf das Endergebnis. Unter dem Grünteil versteht man im 3D-Druck Prozess das Druckobjekt, das im 3D-Drucker entsteht und diesem nach Abschluss des Baujobs entnommen wird. Das Grünteil ist noch nicht vollständig ausgehärtet und hat noch nicht die endgültigen Materialeigenschaften. Es wird mittels UV-Licht zu Ende gehärtet, nachdem es von anhaftenden Harzresten gereinigt wurde.

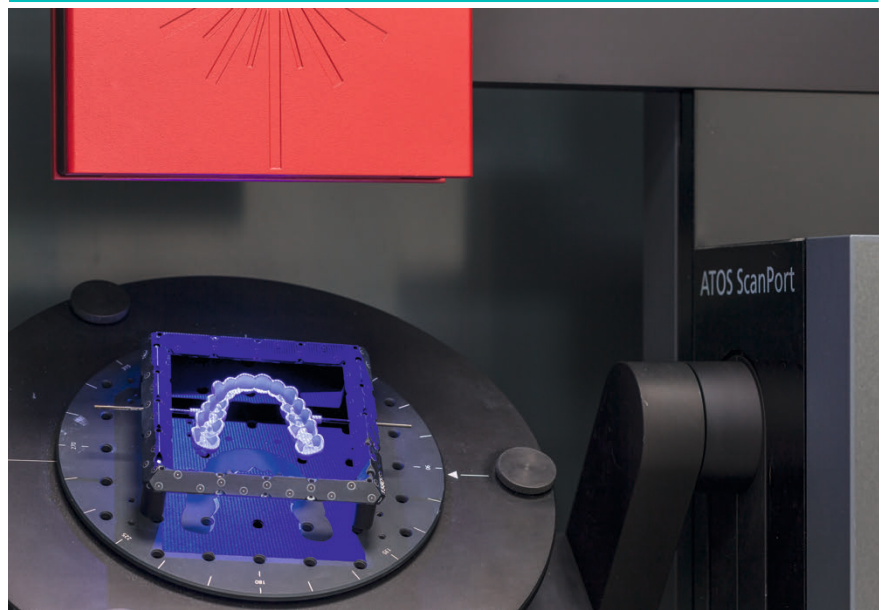
Nicht zuletzt kann der Herstellungsprozess des Druckobjekts nicht losgelöst vom Design der Objekte betrachtet werden. Dem Design kommt daher ebenfalls eine entscheidende Rolle in Bezug auf das Endergebnis zu. Daher ist es wichtig, alle Schritte des Workflows zu betrachten und so aufeinander abzustimmen, dass das optimale Endergebnis erreicht wird.

Für die Genauigkeit wird häufig zunächst die Angabe der XY-Auflösung herangezogen. Im DLP-Verfahren entspricht diese XY-Auflösung der projizierten Pixelgröße. So ergibt sich beispielsweise bei einer projizierten Pixelgröße von 68 µm eine Genauigkeit des Geräts in Bezug auf die Auflösung von ± 34 µm. Die Auflösung bzw. die Größe eines Pixels sind jedoch für die Beurteilung der Genauigkeit eines Druckteils per se nicht ausreichend. Es gibt viele weitere Einflussfaktoren auf die Genauigkeit, darunter – um nur einige zu nennen – die richtige Kalibration der Drucker sowie Nachbearbeitungseinheiten, die Reinigung der

Bauteile nach dem Druck und der Schrumpfung des Harzes bei der Polymerisation. Gerade da ein großer Anteil des Schrumpfes bei der Nachhärtung und nicht im Drucker selbst von statten geht, ist es unter anderem so wichtig, den gesamten Prozess im Blick zu behalten und die Beurteilung der Genauigkeit nur durch Messungen am finalen Bauteil vorzunehmen. Letztlich ist es nur diese Genauigkeit, die für den Anwender ausschlaggebend ist.

Die Genauigkeit der Erfassung der Objekte muss um mindestens eine Größenordnung genauer sein, als die klinische Akzeptanzgrenze um eine verlässliche, auf Daten gestützte Beurteilung des Prozesses durchführen zu können. Die Genauigkeit üblicher dentaler Desktop- und Handscanner ist dafür oft nicht ausreichend. Daher werden die erforderlichen 3D-Koordinatenmessungen im Digitalen Applikationszentrum der DMG Digital Enterprises SE mit einem Industriescanner durchgeführt, der eine Antastabweichung von etwa 3 µm aufweist (Abb. 1).

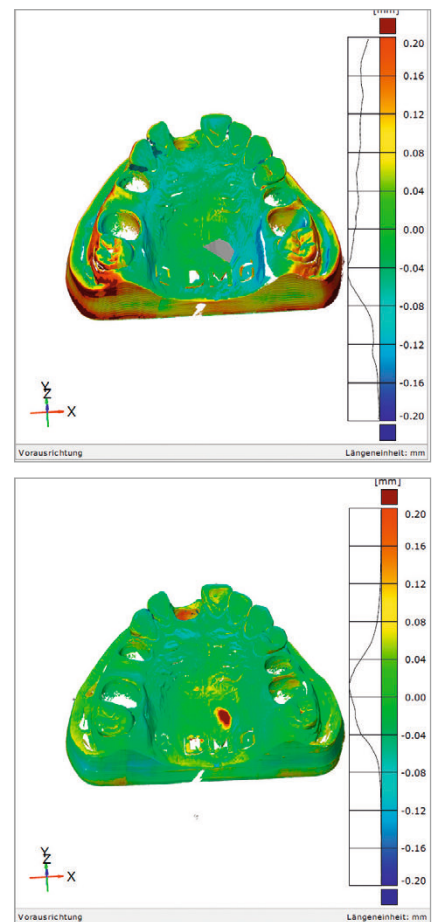
Mit solch präzisen Messverfahren können die Bauteile in ihrer gesamten dreidimensionalen Form beurteilt werden. Damit wird eine deutlich praxisnähere Einschätzung möglich als dies etwa durch eine rein eindimensionale Vermessung von Prüfquadranten möglich wäre. Abbildung 2 zeigt die Wichtigkeit dieser Prüfung für den praktischen Anwender. Gegenübergestellt sind ein Modell mit fehlerhafter und ein Modell mit optimaler Parameteranpassung. Bei dem nicht-optimierten Modell links sind deutlich irreguläre Verzüge zu erkennen. Es gibt Bereiche, die ins Positive abweichen (rot) und solche, die ins Negative abweichen (blau-violett). Eine derartige



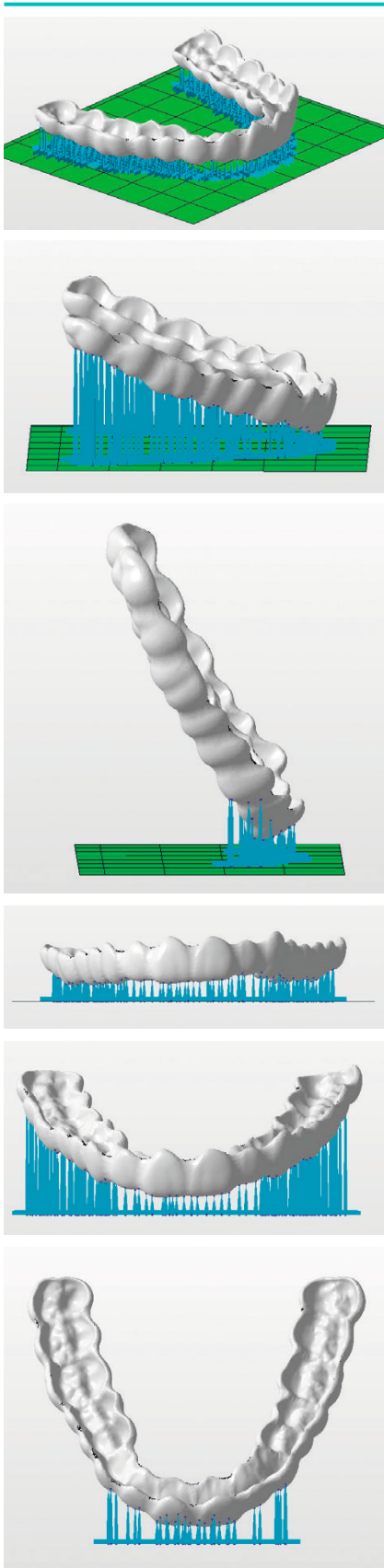
1 Objekt wird gescannt

Situation ist durch den Anwender, etwa durch Skalierung seiner digitalen Eingangsdaten, nicht korrigierbar und muss daher vermieden werden.

Im gezeigten Fall ist der irreguläre Verzug durch die Nachbelichtung verursacht worden. Dies unterstreicht, dass die Betrachtung des gesamten Workflows von größter Wichtigkeit ist. Durch eine reine Betrachtung des Grünteils wäre der Effekt nicht erkennbar. Wichtig ist daher, dass alle Schritte des Fertigungsprozesses betrachtet werden und das Material und die Steuerungsparameter der verwendeten Geräte aufeinander abgestimmt sind. Nur durch die sorgfältig durchgeführten und mit objektiven Messdaten untermauerte Durchführung der Druckparameterentwicklung zusammen mit den entsprechenden Handlungsempfehlungen wird ein in sich schlüssiger Workflow erreicht, der dem Anwender mit hoher Reproduzierbarkeit genaue und sichere Objekte liefert.



2a und 2b Modell mit unterschiedlichen Parametern im Vergleich

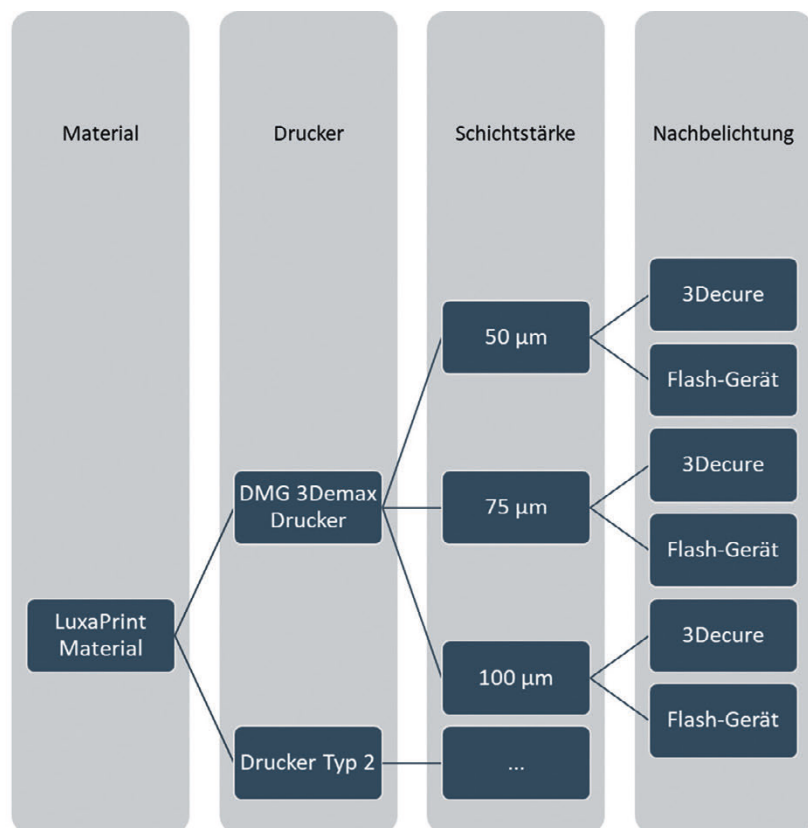


3a bis 3f Ausrichtung der Schienen in Netfabb inklusive Stützstrukturen

So erfolgt auch, wie in **Abbildung 3** für das Beispiel einer Aufbisschiene gezeigt, die Prüfung verschiedener Anordnungen der Objekte im Bau- raum, da auch dadurch ein Einfluss auf die Dimensionen gegeben sein kann.

Die mechanischen Grundeigenschaften des Bauteils sind ebenfalls ein Pro- dukt der korrekten Reinigung und vor allem Nachhärtung. Das direkt aus dem Drucker erhaltene Grünenteil weist in der Regel noch nicht die ge- wünschten Grundeigenschaften zum Beispiel in Bezug auf Härte, Elastizität oder mechanischer Festigkeit auf. Bisher wurden die Aspekte darge- stellt, die für dimensionsgetreue Her- stellung mechanisch belastbarer Ob- jekte ausschlaggebend sind. Im Falle der Herstellung von Medizinproduk- ten mit Additive Manufacturing ist auch die Biokompatibilität des ferti-

gen Druckobjekts ein entscheidender Faktor. Hier sind neben der Medical Device Regulation (MDR), der Euro- päischen Verordnung für Medizin- produkte, diverse weltweit harmoni- sierte ISO-Normen zu beachten. Die dort beschriebenen Tests werden durchgeführt, um ein sicheres Pro- dukt zur Verwendung am bzw. im Patienten zu erhalten. Würde hier vom Anwender etwa von der geprüf- ten Nachbehandlung der gedruckten Objekte abgewichen, wäre eine Bio- kompatibilität nicht mehr sicherge- stellt bzw. müsste separat geprüft werden. Auch dies unterstreicht die Wichtigkeit, die vorgegebenen Work- flows einzuhalten. Alle zuvor beschriebenen Prüfungen müssen separat für jede gewünschte Kombination aus Prozessparametern und -geräten vorgenommen werden. Ausgehend von einem zu validieren-



4 Schematische Darstellung des Parameterentwicklungsbaums

den Material ist jeder 3D-Drucker, für den ein valider Prozess bereitgestellt werden soll, separat zu betrachten. Ebenso sind die verschiedenen Schichtstärken, aus denen der Druck aufgebaut wird, zu beachten. Dies gilt auch für jedes Reinigungsverfahren, also zum Beispiel, ob dies manuell, im Ultraschallbad oder in einem Reinigungsgerät passiert und mit welchem Medium. Wie vorher schon beschrieben, kommt auch der Nachbelichtung eine entscheidende Bedeutung zu, daher ist auch jedes Nachbelichtungsgerät separat zu validieren. Einfache Nachbelichtungsgeräte haben als Vorgabe lediglich die Dauer der Nachbelichtung, während bei fortgeschrittenen Geräten wie der DMG 3Decure Belichtungsdauern und -intensitäten für verschiedenen Wellenlängen sowie Temperatur und das Evakuieren des Belichtungsraums gesteuert werden können.

Dadurch ergibt sich in der Regel eine große Zahl an Kombinationen, die alle mit entsprechenden Aufwänden geprüft werden müssen. Abbildung 4 fasst dies in einer Baumdarstellung zusammen und gibt einen visuellen Eindruck der Komplexität.

Zusammenfassung

Es wurden allgemeine Überlegungen zum dentalen 3D-Druck angestellt und dargelegt, warum die DLP-Technologie hier besonders geeignet ist. An einem Beispiel aus der Praxis wurde gezeigt, wie wichtig die Abstimmung und Validierung der Prozessparameter und die genaue Vermessung der erhaltenen Bauteile ist, um präzise Ergebnisse zu erhalten. Ein weiterer Kernpunkt ist die Sicherstellung der Biokompatibilität. Nur wenn alle relevanten Aspekte richtig zusammengeführt werden, wird ein validierter Workflow erhalten. ■

Literaturverzeichnis

[IPH] Additive bzw. generative Fertigung: Grundlagen und Potenziale; <https://www.iph-hannover.de/de/dienstleistungen/fertigungsverfahren/additive-fertigung/>; Abgerufen am 17.11.2020.

[WES] Wesemann, C.; Spies, B. C.; Schaefer, D.; Adali, U.; Beuer, F.; Pieralli, S. J.; Mech. Behav. Biomed. Mater. 2021, 114, 104179.

Über die Autoren

Dr. Jens Träger schloss sein Chemiestudium mit der Promotion im Bereich der biophysikalischen Chemie 2009 ab. Seit über zehn Jahren ist er in der DMG Firmengruppe beschäftigt. Er hat über fünf Jahre Erfahrung im dentalen 3D-Druck. Seit Ende 2019 leitet er das Digitale Anwendungszentrum (DAC) bei der DMG Digital Enterprises SE. Sein Interesse gilt dem vollständigen 3D-Druck Workflow.

Kai Billerbeck ist Bachelor of Science im Fach Chemie und seit über fünf Jahren im Bereich Forschung und Entwicklung der DMG Firmengruppe. Im Digitalen Anwendungszentrum (DAC) ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter schwerpunktmäßig mit der Prozessforschung und -weiterentwicklung im 3D-Druck-Workflow sowie mit der Erstellung von Application Notes betraut.