

Update digitale Fertigung 2020

Neue Entwicklungen in der additiven und subtraktiven Fertigung

Ein Beitrag von Josef Schweiger MSc und Prof. Dr. Jan-Frederik Güth

Die Entwicklungsgeschwindigkeit im Bereich der digitalen dentalen Fertigungstechnologien hat ein enormes Tempo angenommen. Während im Bereich der subtraktiven Verfahren bereits ein hohes Produktivitätsniveau mit optimalen Passungen erreicht ist, gewinnen additive Verfahren (3-D-Druck) zunehmend an Bedeutung. Aber auch Kombinationen aus verschiedenen Fertigungsverfahren zeigen enormes Potenzial, so beispielsweise die Verknüpfung des Lasersinterns mit der CNC-Bearbeitung oder aber auch die Kombination von digitaler Konstruktion mit dem analogen Fertigungsweg der Keramikpresstechnik.

Additive Fertigung

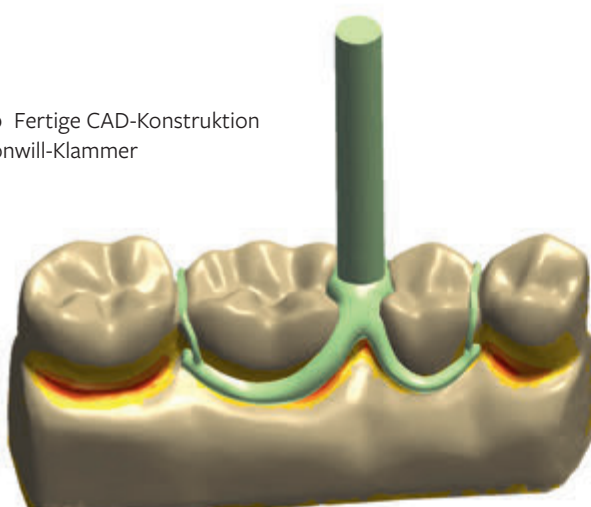
Digitaler Einstückguss/ Klammermodellguss

Die Befestigung von Zahnersatz mithilfe von Klammern ist eine der ältesten Formen von Verankerungselementen [1]. Klammerverankerte Prothesen, die auch als Einstückgussprothesen bezeichnet werden, sind eine sehr einfache Form des Zahnersatzes und zeigen eine große Variationsbreite, wodurch sie sehr universell einsetzbar sind [2]. Seit mehr als 100 Jahren sind klammerverankerte Prothesen eine probate Möglichkeit, um heraus-

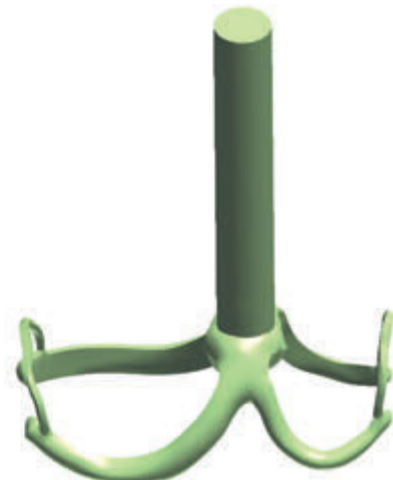
nehmbaren Zahnersatz gegen abziehende Kräfte, beispielsweise beim Sprechen oder Kauen, auf dem Kiefer in lagerichtiger Position zu halten und die Kaukräfte möglichst gleichmäßig auf Restzähne und Weichgewebe zu verteilen. Dr. F.E. Roach schrieb 1930 im Journal of the American Dental Association [3]: „The clasp is the oldest and still is and probably will continue to be, the most practical and popular means of anchoring partial dentures“. Die Einführung von digitalen Verfahren zur Herstellung von Zahnersatz, wie beispielsweise Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing (CAD/

CAM) und additive Fertigungstechniken, bieten die Möglichkeit, Einstückgussprothesen digital zu planen und anschließend subtraktiv mittels CNC-Fräsmaschinen oder additiv mittels 3-D-Drucker zu fertigen [4]. Dabei können indirekte und direkte Methoden differenziert werden. Beim indirekten Verfahren werden die Gerüste in Wachs oder Kunststoff gedruckt und anschließend in Lost-Wax-Technik mittels Gusstechnik hergestellt. Beim direkten Verfahren wird der CAD-Datensatz der Konstruktion mittels Lasersinter-Verfahren unmittelbar in die Co-Cr-Legierung umgesetzt [5,6,7].

1a & b Fertige CAD-Konstruktion der Bonwill-Klammer



1a



1b



02



3a



3b



04



05



06



07

2 3-D-gedruckte Klammern aus rückstandslos verbrennbarem Kunststoff für die Lost-wax-Technik | **3a & b, 4** Einbetten und Gießen der 3-D-gedruckten Klammern | **5** Generierung der Stützstrukturen für die additive Fertigung mittels Direct Metal Laser Sintering (DMLS) | **6** Bauplattform nach dem additiven Bauprozess der Klammern | **7** Abzugsmodelle mit 16 lasergesinteren Klammern

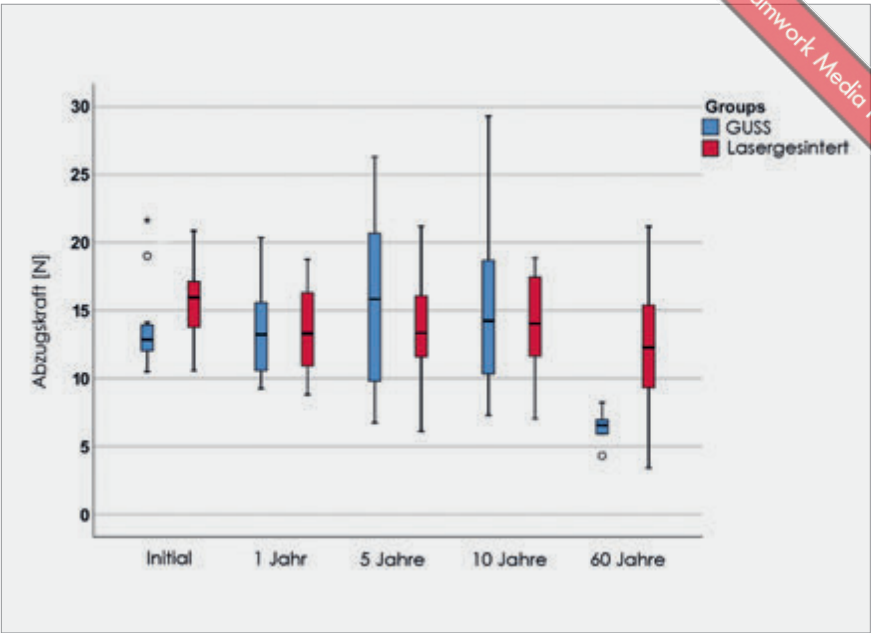
Das letztgenannte Verfahren ist derzeit noch im Prototypen-Stadium. Aktuelle Publikationen sehen in der digitalen Fertigung mittels Lasersinterverfahren Vorteile in der Standardisierung, der verringerten Produktionszeit und dem einfachen Transfer von digitalen Daten. Derzeit wird die Wirtschaftlichkeit

allerdings noch kritisch beurteilt [5,8]. Um eine endgültige Empfehlung dieser Fertigungsweise auszusprechen, sind verschiedene wissenschaftliche Studien notwendig. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf die Verankerungselemente (Klammern) gelegt, da diese aufgrund ihrer Halte- und Stützfunktion hohen me-

chanischen Belastungen ausgesetzt sind. In einer In-vitro-Untersuchung wurde an der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der LMU München die „mechanische Qualität gegossener versus lasergesinterter Klammern für Modellgussprothesen“ untersucht (Abb. 1 bis 7). Die Ergebnisse der Studie sind sehr vielversprechend

und zeigen das hohe mechanische Potenzial von lasergesinterten Klammern. Folgende Kernaussagen können auf der Basis der Studie getroffen werden [9]:

- 1. Die notwendigen initialen Klammerabzugswerte konnten sowohl von den gegossenen als auch von den lasergesinterten Klammern erreicht werden. Nach künstlicher Alterung zeigte sich bei den lasergesinterten Klammern keine Abnahme der Retentionskraft (Abb. 8).
- 2. Die Fehlstellen waren bei den lasergesinterten Klammern insgesamt kleiner und homogener verteilt als bei den gegossenen Klammern (Abb. 9).
- 3. Im Langzeitverhalten zeigten lasergesinterte Klammern deutliche Vorteile gegenüber den gegossenen Klammern und somit eine mehr als doppelt so hohe Überlebenswahrscheinlichkeit. Ein Grund dafür könnte in der besseren Gefügequalität der lasergesinterten Klammern liegen (Abb. 10).



8 Werte der Retentionskräfte der gegossenen und lasergesinterten Klammern initial und im Zeitverlauf

Digitale Presstechnologie

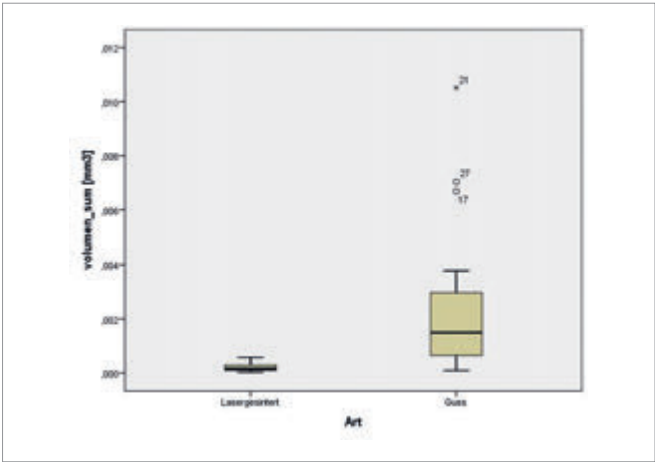
Einen neuen Ansatz im Bereich der Presskeramik bietet die Firma Dekema mit dem innovativen trix-System. Dabei werden die Vorteile der digitalen Konstruktion mit der unschlagbaren Effizienz der bewährten Presskeramik-Technologie kombiniert. Das System bildet den kompletten Pressworkflow digital ab, vom Aufwachsen bis zum Pressen. Am Beispiel einer Patientenarbeit werden die Arbeitsschritte nachfolgend erklärt.

Einscannen und CAD-Konstruktion

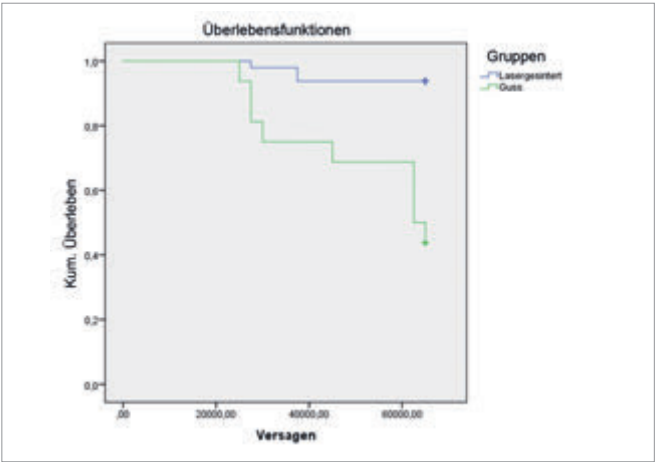
Die digitale Erfassung der Mundsituation kann entweder direkt mittels Intraoralscanner oder indirekt über das Einscannen eines Meistermodells nach analoger Abformung erfolgen (Abb. 11). Die digitale Presstechnologie ist für beide Erfassungsmethoden geeignet. Die digitale Konstruktion der Teilkronen erfolgt effizient mit den üblichen CAD-Software-Tools (Abb. 12 und 13).

Automatisches Erstellen der Presskanäle und der Platzhalter für bis zu drei Pressstempel

Nach Auswahl der Objekte aus dem jeweiligen CAD-System konstruiert trix CAD automatisch das komplette Wax-up inklusive der Platzhalter für bis zu drei Stempel, um bis zu drei, auch verschiedenfarbige, Presspellets in einem Vorgang zu verpressen (Abb. 14 bis 16). Trix CAM berechnet das Schichtmuster und schickt es an den Dekema trix print 3-D-Drucker.



9 Vergleich des gesamten Lunkervolumens/Klammer von lasergesinterten Klammern und Gussklammern

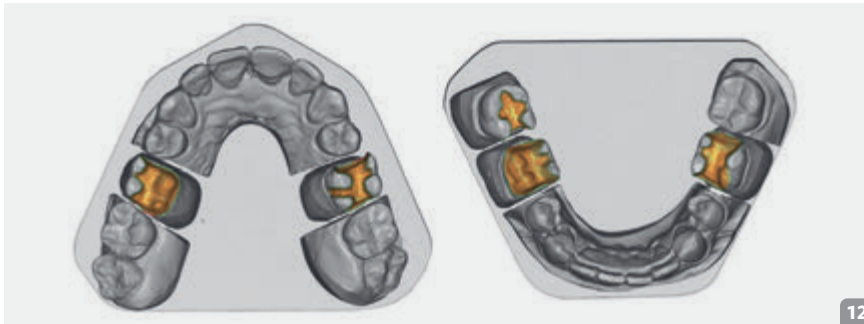


10 Überlebenszeitanalyse mittels Kaplan-Meier-Kurve über einen Zeitraum von 60 Jahren



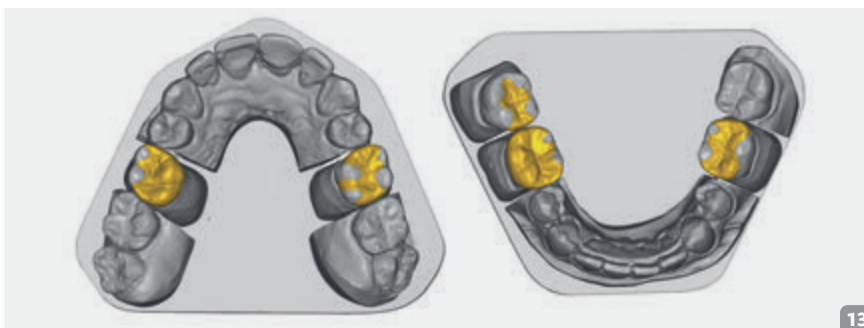
11

11 Bei der digitalen Presstechnologie kann die Abformung der Kiefer sowohl digital als auch analog durch Einscannen der Meistermodelle erfolgen.

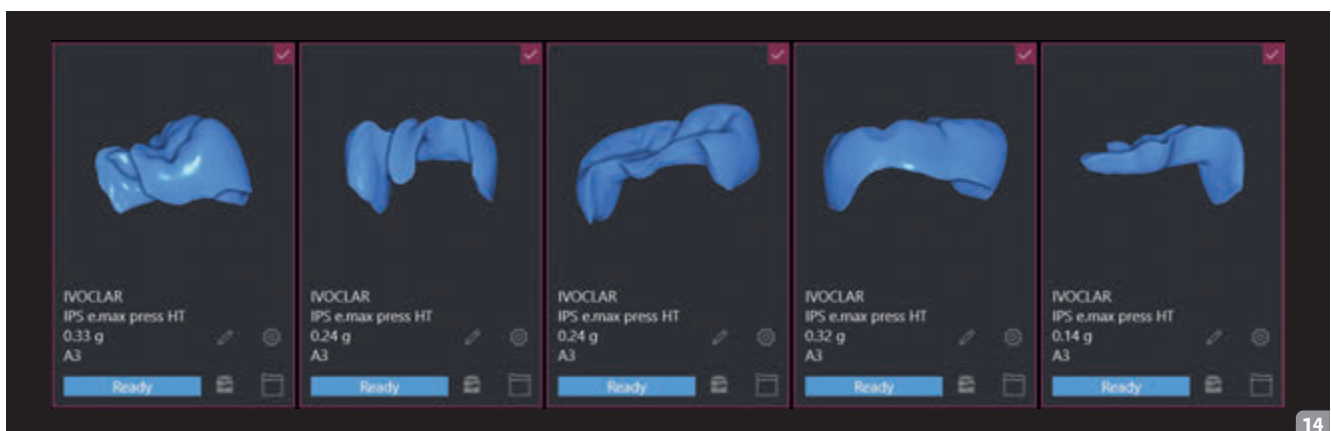


12

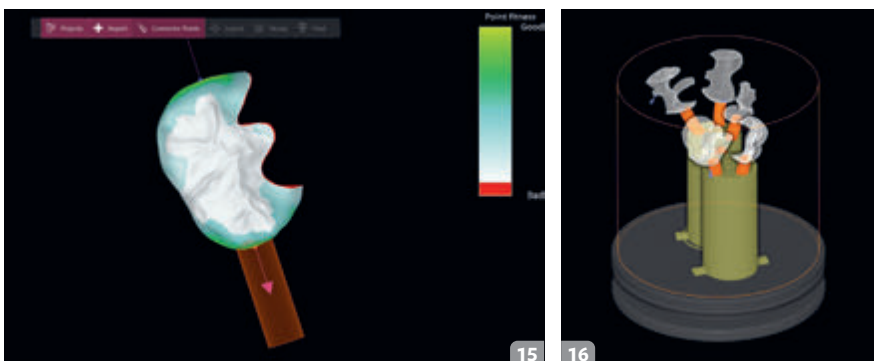
12 & 13 Die digitale Konstruktion der Teilkronen erfolgt hocheffizient mit den üblichen CAD-Software-Tools.



13



14



15

16

14 – 16 Nach Auswahl der zu pressenden Objekte konstruiert trix CAD automatisch das komplette Wax-up inklusive der Platzhalter für bis zu drei Stempel.



17



18



19



20



21

17 & 18 3-D-Druck der Teilkronen mit dem Dekema trix print 3-D-Drucker

19 & 20 Nach dem 3-D-Druckprozess erfolgt das Reinigen und Härten der Bauteile sowie das Einbetten in der trixpress-Muffel.

21 Gegenüberstellung der 3-D-gedruckten und der gepressten Teilkronen

3-D-Druck mit dem Dekema trix print 3-D-Drucker

Die geslicten Schichtdaten werden auf die Grundplatte des trixpress-Muffelsystems gedruckt. Das zugehörige, druckbare Burn-out-Material trix Cast kommt ebenfalls aus dem Hause Dekema (Abb. 17 bis 18).

Einbetten und Pressen

Anschließend an den 3-D-Druckprozess erfolgt das Reinigen und Härten der Bauteile sowie das Einbetten in der trixpress-Muffel (Abb. 19 und 20). Nach dem Aufheizen im Vorwarmofen und dem rückstandsfreien Ausbrennen wird die

Presskeramik in die Muffel eingesetzt und üblicherweise mit den trixpress-Stempeln verpresst (Abb. 21). Das projektspezifische Pressprogramm wurde dafür bereits vom trix CAM zum Austromat 654i gestreamt. Alternativ können die Daten auch per USB-Stick übertragen werden.

Ausarbeiten und Glasieren

Nach dem Pressvorgang werden die Teilkronen mit den bekannten Schritten finalisiert. Es gibt hierbei keinerlei Unterschied zu den Verfahrensschritten des analogen Workflows. Wird im komplett digitalen Workflow gearbeitet, so ist es

empfehlenswert, die Scandaten der Kiefer mittels eines 3-D-gedruckten Modells abzubilden, sodass man damit sowohl die Passung als auch die approximale und okklusale Kontaktsituation überprüfen kann. Mittels Malfarben- und Glasurmassebrand wird die Herstellung der Teilkronen abgeschlossen (Abb. 22 und 23).

Grafische 3-D-Modelle (3D medical print)

Eine Reihe von intraoralen 3-D-Scannern bietet mittlerweile die Möglichkeit, neben den Oberflächendaten auch die Farbinformationen digital zu erfassen. Dateifor-

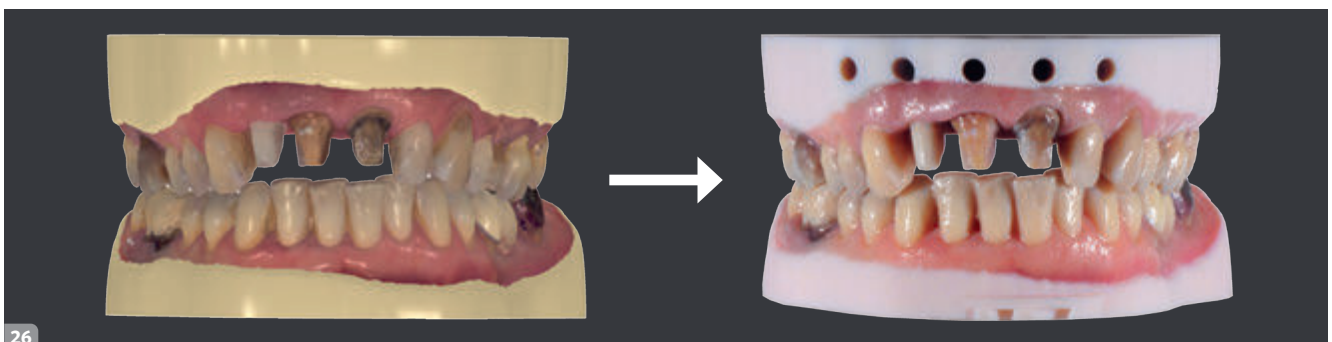


22 & 23 Fertige Teilkronen nach dem Malfarben- und Glasurmassebrand

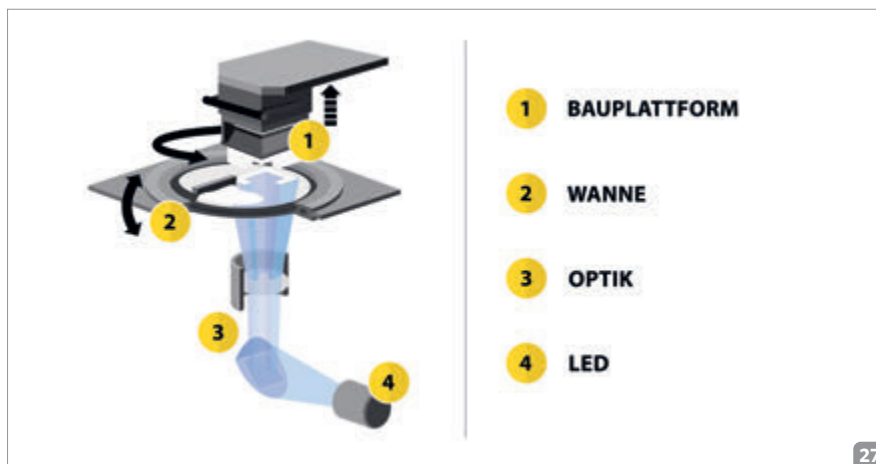
mate sind beispielsweise PLY-, OBJ- oder VRML-Dateien. Mittels Polyjet-Technologie ist es möglich, diese Daten in physische Modelle umzusetzen. Die Farbinformation ist dabei geometriebezogen, das heißt, die zweidimensionale Farbinformation ist der 3-D-Oberfläche eindeutig zugeordnet ist (Abb. 24 und 25). Mittels

Modelbuilder Software wird ein virtuelles Farbmodell generiert, das anschließend mittels Multimaterial-3-D-Druck (Polyjet-Technologie, Stratasys) in ein physisches Farbmodell umgesetzt wird (Abb. 26). Da die Übertragung von Farbinformationen mittels analoger Abformung nicht möglich ist, bilden grafische 3-D-Modelle eine

wirkliche „Killerapplikation“. Die Datengenerierung und Herstellung der Modelle ist nur im digitalen Workflow möglich. Es werden hier zukünftig neue Möglichkeiten entstehen, die insbesondere bei der Herstellung von hochästhetischem Zahnersatz enorme Verbesserungen und Erleichterungen bringen können.



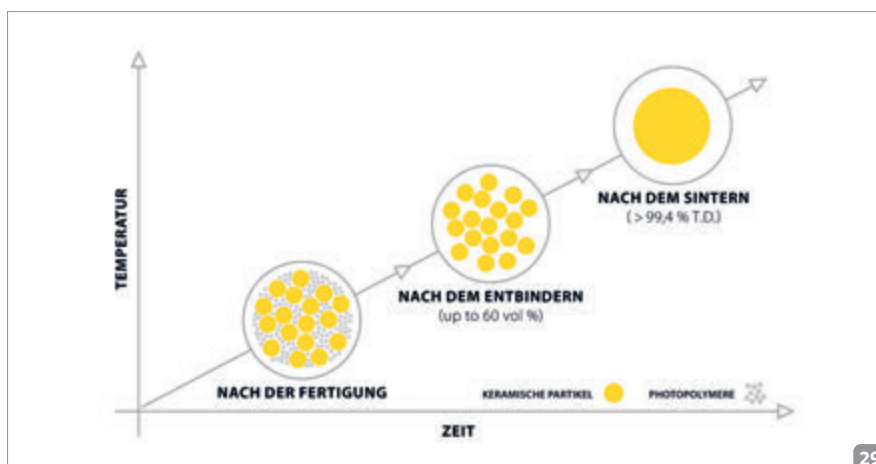
24 & 25 Mittels 3-D-Intraoralscanner ist es möglich, neben der Oberflächengeometrie auch die geometriebezogene Farbinformation zu erfassen ...
26 ... und diese mittels Modelbuilder-Software und Multimaterial-3-D-Druck in ein physisches Modell umzusetzen (3D medical Print).



27



28



29

27 Die Lithography-based-Ceramic Manufacturing (LCM)-Technologie von Lithoz basiert auf dem Prinzip der sogenannten Maskenbelichtung (DLP-Verfahren).

28 Für dentale Anwendungen hat Lithoz den CeraFab 7500 Dental 3-D-Drucker entwickelt.

29 Das Dichtsintern erfolgt in zwei Schritten – nämlich dem Entbinderungsprozess bei 1000 °C und dem anschließenden Dichtsintern bei 1600 °C.

3-D-Druck von Zirkonoxid (Lithoz)

Beispiel: 3-D-gedruckte Seitenzahnkrone

Anhand einer Unterkiefermolarenkrone soll der aktuelle Stand der Technik im dentalen 3-D-Druck von Zirkonoxid dargestellt werden. Nach der Digitalisierung der Kiefer und der anschließenden CAD-Konstruktion erfolgt die Fertigung der vollanatomischen Krone mittels Lithography-based-Ceramic Manufacturing (LCM)-Technologie von Lithoz. Das LCM-Verfahren basiert auf dem Maskenbelichtungsverfahren (= Digital Light Processing (DLP)) (Abb. 27). Dabei wird ein photosensitiver Keramikschlicker selektiv ausgehärtet, wobei ein besonders hoher Füllgrad und eine hohe Packungsdichte der Keramikpartikel im Grünling erreicht werden. Dies ist notwendig, um fehlerfreie und dichte Keramikbauteile herstellen zu können. Das Polymernetzwerk dient als Binder zwischen den Keramikpartikeln. Für dentale Anwendungen hat Lithoz den CeraFab 7500 Dental

3-D-Drucker (Abb. 28) entwickelt. Für die Herstellung der vollanatomischen Seitenzahnkrone wurde das Zirkonoxid LithaCon 3Y 230 (3 mol% yttria-stabilized zirconia, 3Y-TZP) als Rohmaterial verwendet. Der Druckvorgang dauerte für 20 Kronen circa sieben Stunden; daraus resultiert eine Druckzeit von 21 Minuten pro Krone.

Nach dem additiven Fertigungsverfahren liegen die Kronen als „Grünling“ vor. Dieser enthält das organische Bindermaterial und muss daher im nächsten Schritt „entbindert“ werden (Abb. 29). Dieser Prozess erfolgt bei 1000 °C über einen Zeitraum von mehreren Stunden. Dabei entsteht der sogenannte „Weißling“, der keinen Binder mehr enthält und bereits Sinterbrücken ausgebildet hat, sodass das Bauteil nicht mehr zerfallen kann (Abb. 30). Im Weißlingszustand erfolgt dann die individuelle Einfärbung durch Färbelösungen, wobei drei Varianten möglich sind:

- Tauchen der Krone in der Färbelösung
- Individuelles Einmalen der Krone mittels Pinsel und Färbelösung
- Kombination aus Tauchen und Einmalen (Abb. 31)

Im Verlauf der Entwicklung hat sich die dritte Variante als ideal erwiesen. Dabei erfolgt die Grundcolorierung durch Tauchen, die individuelle Adaption erfolgt anschließend nach dem Tauchprozess durch verschiedene intensive Färbelösungen, insbesondere im Kronenrandbereich und im Inzisal-/Kauflächenbereich. Nach dem Einfärben ist es wichtig, dass die Kronen vor dem finalen Sinterprozess getrocknet werden. Dies erfolgt idealerweise unter einer Infrarotlampe. Der Sinterprozess erfolgte bei 1600 °C. Aufheizrate betrug 8 °C/min, bei einer Haltezeit auf Endtemperatur von zwei Stunden. Die Abkühlrate betrug 8 °C/min bis auf 500 °C. Anschließend Abkühlen auf Raumtemperatur. Zum Finalisieren



30 Vollanatomische Seitenzahnkronen aus Zirkonoxid nach dem additiven Bauprozess in der „Grünlings“-Phase (organischer Binder ist noch enthalten) | 31 Individuelle Einfärbung der Krone in der „Weißlings“-Phase | 32 Grünling – Weißling – dichtgesintert – Malfarben-/ Glasurmassebrand (von links nach rechts) | 33 Exakte Wiedergabe der Kauflächen mit scharfer und natürlicher Darstellung der Fissuren

der Kronenrestaurationen wird jeweils ein Malfarben- und ein Glasurmassebrand durchgeführt. Dieser erfolgt bei einer Temperatur von 770 °C. Im dargestellten Fall wurden dafür die IPS e.max Ceram-Malfarben verwendet (Abb. 32). Zur additiven Fertigung der Krone mittels Lithoz LCM-Verfahren wurde ein 3Y-TZP Material (3 mol% Y_2O_3) verwendet. Dieses klassische Zirkonoxid ist normalerweise zur Herstellung von Kronen- und Brückengerüsten vorgesehen, die manuell mit einer keramischen Verblendung aus Silikatkeramik beschichtet werden. Die Transluzenz dieser Gerüst-Zirkonoxide ist daher niedrig. Trotzdem kann mit dem LCM-Verfahren auch bei vollanatomischen Kronen eine ansprechende Ästhetik erzielt werden. Die sehr gute Wiedergabe der scharfkantigen Kronenränder sowie die exakte Wiedergabe der Kauflächen mit scharfer und natürlicher Darstellung der Fissuren fielen besonders ins Auge. Da bei der subtraktiven Bear-

beitung immer eine Kronenrandverstärkung notwendig ist und aufgrund des endlichen Durchmessers der Fräser die Kauflächenfissuren immer gerundet dargestellt werden, erweist sich die additive Fertigung hier als vorteilhaft (Abb. 33).

Hybridfertigung (Datron – Concept Laser – Follow-Me)

Als Hybridfertigung bezeichnet man in der digitalen Dentaltechnologie die Kombination von additiven und subtraktiven Fertigungsschritten. Das Ziel ist dabei, die hohe Effizienz der additiven Fertigung mit der Präzision der CNC-Frästechnik zu vereinen. Die mittels Hybridverfahren hergestellten Produkte zeigen eine verbesserte Oberflächenstruktur, eine höhere Passgenauigkeit bei gleichzeitig reduzierten Kosten (Abb. 34). Die Datron AG arbeitet seit mehr als acht Jahren an der Umsetzung dentaler Fertigungsprozesse mittels Hybridtechnologie. Eine da-

für gebildete Kooperation zwischen der Datron AG, der Concept Laser und der Follow-Me! Technology Group verfolgt das Ziel, durch eine intelligente Vernetzung den Hybrid-Workflow mit Standardmaschinen abbilden zu können.

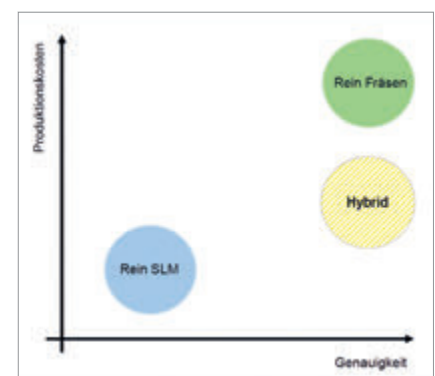


Abb.: Datron AG

34 Die Hybridfertigung ermöglicht eine hohe Präzision bei geringeren Produktionskosten.

Einen wesentlichen Bestandteil der Hybridfertigung bildet die Übergabe des Nullpunkts vom additiven Prozess an die CNC-Fräsmaschine. Hierzu werden beim Laserintern auf der Bauplattform drei Messpins mitgebaut, die in der Datron D5-Fräsmaschine mittels eines eigens für den Hybridfertigungsprozess entwickelten taktilen Infrarot-Messtaster (Abb. 35 und 36) detektiert werden, sodass in der Fräsmaschine exakt die Position der lasergesinterten Bauteile bestimmt werden kann. Die Korrekturwerte werden direkt in der Maschine verrechnet, sodass keine erneute CAM-Berechnung notwendig ist. Da die Bauteile zur Nachbearbeitung fest auf der Plattform bleiben (keine Aufnahme über Gitterstruktur), wird eine bestmögliche Positioniergenauigkeit mit größtmöglicher Präzision gewährleistet. Bei Implantat-Suprastrukturen erfolgt die Bearbeitung des Schraubensitzes von der Basalseite aus über den Schraubenkanal durch spezielle Formfräser. Die Herstellkosten können, je nach Produktionsmenge, zwischen 30 und 50 Prozent reduziert werden.

Ausblick

Additive Verfahren haben den wesentlichen Vorteil, dass die Eigenschaften der Bauteile während des Bauprozesses beeinflusst werden können. Dies betrifft sowohl die mechanischen als auch die ästhetischen Eigenschaften eines Bauteils. Bei subtraktiven Verfahren hingegen sind diese Charakteristika bereits mit der Herstellung des Fräsrohlings deter-

miniert. Dies erlaubt dem 3-D-Druck enorme Freiheiten schon beim Design-Prozess. Andererseits sind die Präzision und die Effizienz der subtraktiven Bearbeitung extrem hoch, sodass die Kombination aus beiden Fertigungstechniken äußerst sinnvoll erscheint. Dann gibt es die Bereiche, in denen die klassischen analogen Verfahren in ihrer Wirtschaftlichkeit unschlagbar sind, wie beispielsweise die Keramik-Press-Technologien. Auch hier ist die Verknüpfung mit digitalen Arbeitsschritten äußerst sinnvoll. Übertragen auf die additive Herstellung von keramischem Zahnersatz werden zukünftig völlig neue Ansätze zur naturidentischen Herstellung von Zahnersatz und Ersatzzähnen möglich sein. Eine

zukünftig möglich scheinende digitale Erfassung der dreidimensionalen Zahnschichtung mittels NIRI-Technologie könnte zusammen mit Zahnstrukturdatenbanken die Grundlage dieser Technik [10, 11, 12] bilden. Additive Technologien, wie das Lithoz LCM-Verfahren, sind die idealen Fertigungswege, um dieses Ziel zu erreichen. Gradiententechnologien können dabei individuell auf die Restaurationsgeometrien angepasst werden und bieten ungeahnte gestalterische Freiheiten im dreidimensionalen Raum, welche durch herkömmliche Technologien nicht möglich sind. ■

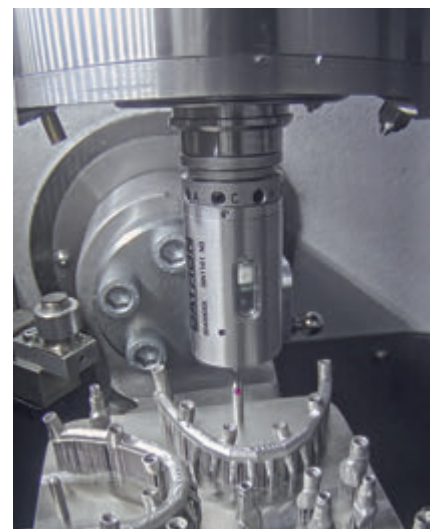


Literaturverzeichnis unter

www.teamwork-media.de/literatur



35 Speziell für die Hybridfertigung wurde von Datron ein taktiler Infrarot-Messtaster entwickelt.



36 Die Nullpunktübergabe erfolgt in der Fräsmaschine Datron D5 durch das taktile Vermessen der drei lasergesinterten Pins auf der Bauplattform.

Fotos Nr. 35 und 36: Datron AG

Die Autoren



Prof. Dr. Jan-Frederik Güth



Josef Schweiger MSc

Kontaktadresse

Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
Klinikum der Ludwig-Maximilians-Universität München
Goethestr. 70
80336 München
Josef.Schweiger@med.uni-muenchen.de