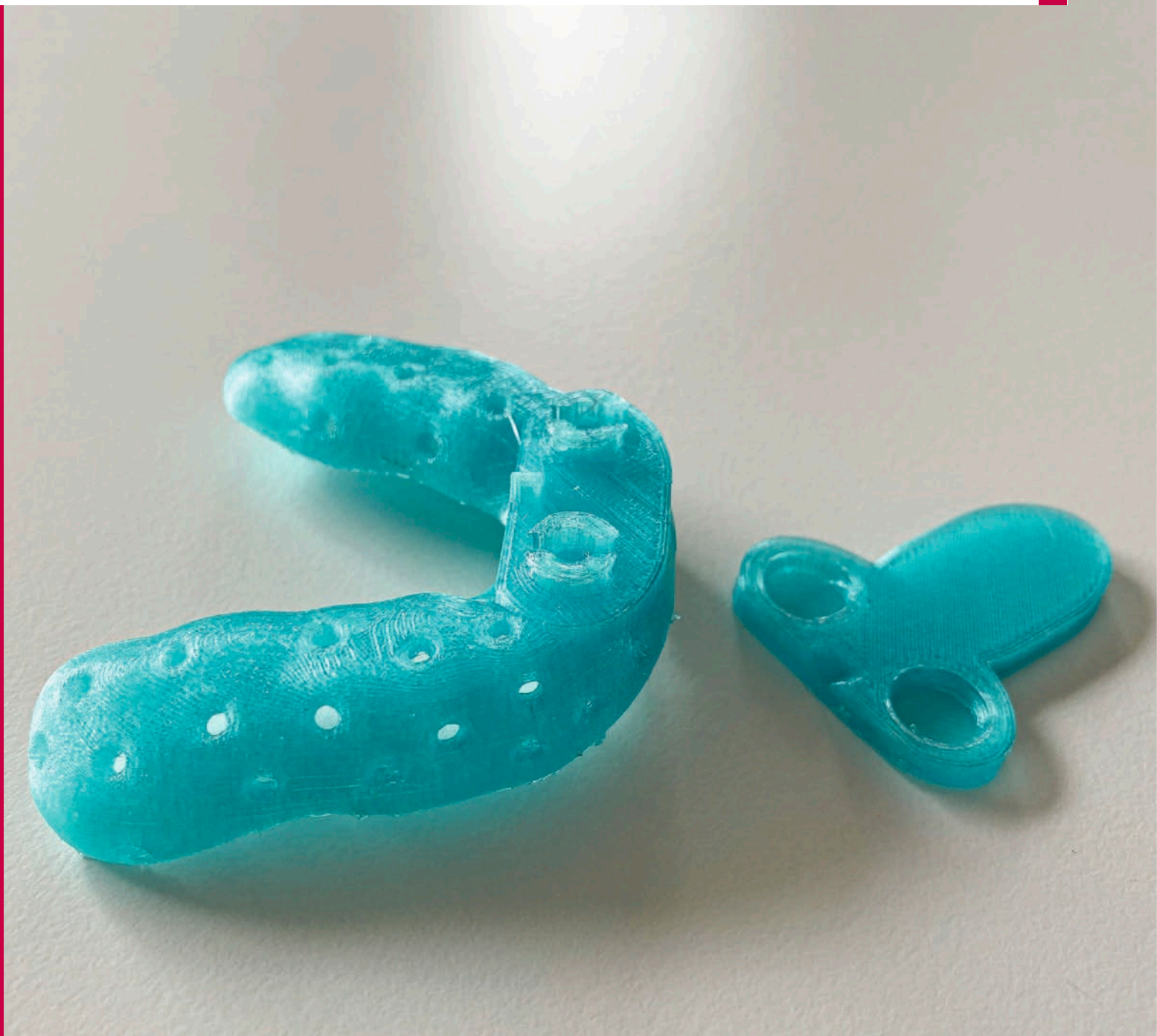
all rights reserved
Quintessenz

Extrusionsbasierte Fertigungsverfahren in der Dentaltechnik – eine Einführung

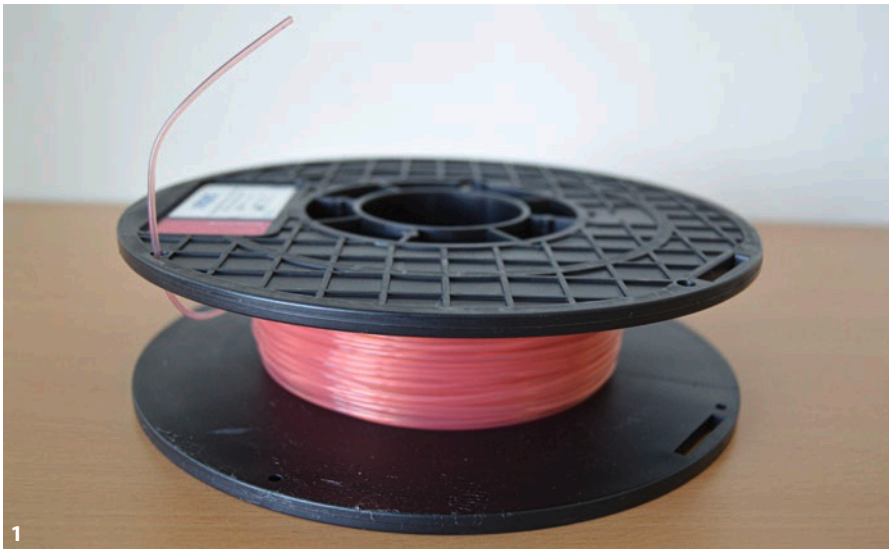
THIES ELTESTE, IRENA ZEIHER-SPINTZYK, SEBASTIAN SPINTZYK



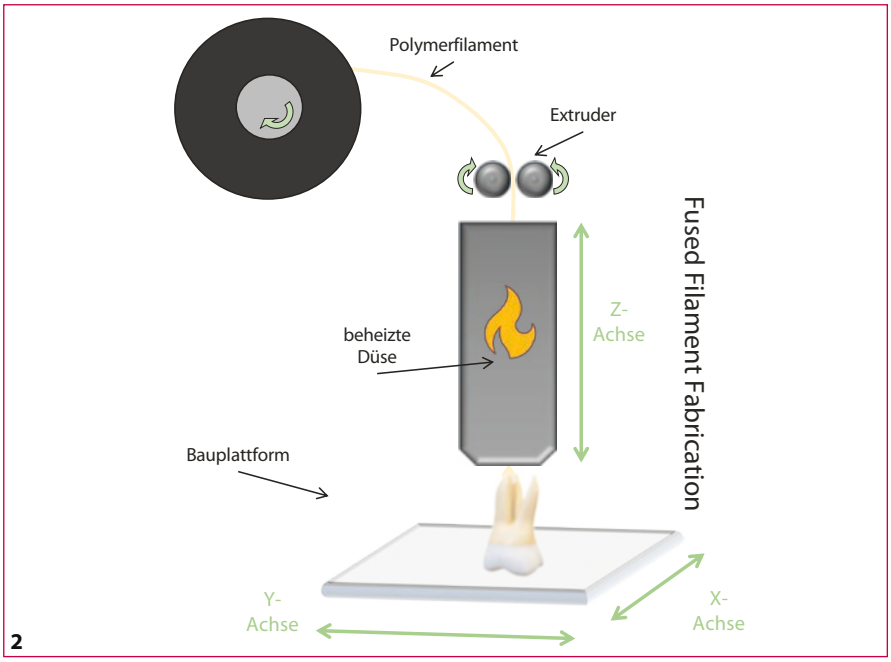
copyright by all rights reserved Quintessenz

Einleitung

Beim Filament-3-D-Druck (Fused Filament Fabrication, FFF) oder beim Fused Deposition Modeling (Anmerkung: FDM ist eine eingetragene Bezeichnung der Fa. Stratasys, Rechovot, Israel) wird nicht mithilfe von Licht auspolymerisiert, sondern es wird ein thermoplastischer Kunststoff lediglich durch Aufschmelzen in Form bzw. Schichten gebracht (Schmelzschichten). Dabei werden die Druckmaterialien in Form eines Garns, auch Filament (Abb. 1) genannt, dem Drucker über eine Rolle zugeführt (Abb. 2). Nach der Einteilung der ISO-



1



2

Abb. 1 Beispiel eines als Medizinprodukt zugelassenen Filaments (Arfona/Valplast, Fa. Weithas, Lütjenburg) für die Verwendung im Extrusionsverfahren. **Abb. 2** Prinzip des FFF-Fertigungsverfahrens.

Zusammenfassung
Das Filament-Extrusionsverfahren stellt eine kostengünstige Möglichkeit dar, um im Dentallabor beispielsweise Modelle und individuelle Abformlöffel zu fertigen. Meist reicht ein Druckkopf aus, um die Bauteile herzustellen. Bei Verwendung von zwei Druckköpfen ist auf die Medizinproduktklasse zu achten, damit es zu keinen Verunreinigungen kommt. Im Vergleich zu fotosensitiven Polymeren sind die Verarbeitung und die Nachbearbeitung bei diesen Verfahren weniger belastend für Umwelt und Anwender.

Indizes
additive Fertigung, Filament-3-D-Druck, Rapid Prototyping, Materialextrusion, 3-D-Druck

copyright all rights reserved

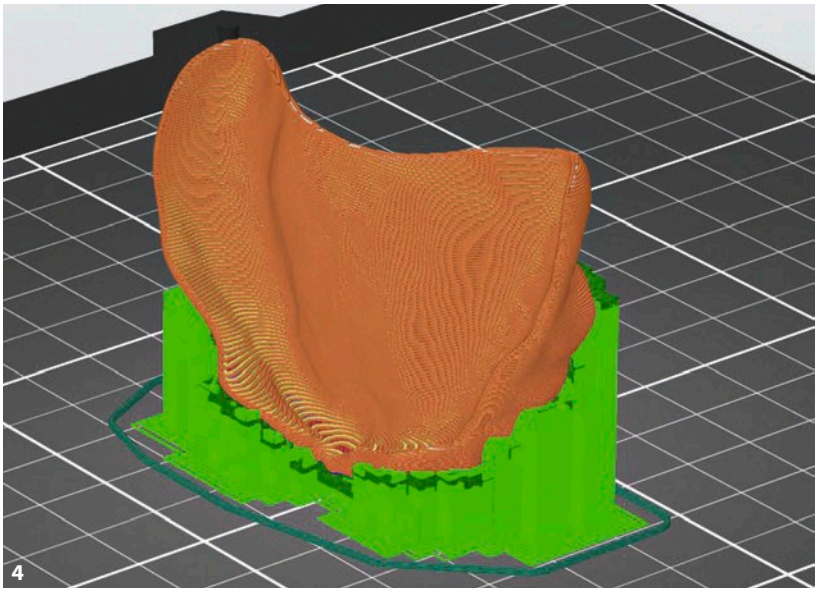


Abb. 3a Individueller Abformlöffel und separater Griff, aus dem Arfona PETG-Filament gefertigt. **b** Zusammengefügter Abformlöffel. **Abb. 4** Digitales Modell in der Slicing-Software; orange: Try-in-Prothesenbasis, grün: Supportstrukturen.

Norm für additive Fertigung gehört diese Herstellungsweise zu den Materialextrusionsverfahren.

Grundsätzlich haben FFF-Drucker eine geringere Auflösung als zum Beispiel Drucker, die nach dem Digital Light Processing (DLP)-Verfahren mit Fotopolymeren arbeiten. So beträgt die FFF-Auflösung circa 50 bis 300 Mikrometer (abhängig vom gewählten Düsendurchmesser), die von DLP- bzw. Stereolithografie (SLA)-Druckern um die 25 bis 100 Mikrometer. Insofern macht der FFF-3-D-Druck im zahntechnischen Bereich in erster Linie bei individuellen Löffeln (Abb. 3a und b), Try-in-Prothesen, Bohrschablonen[3] und einfachen Modellen (zum Beispiel für die Alignertechnik) oder als Kontrollmodelle[5] Sinn. In Studien konnte gezeigt werden, dass individuelle Löffel, die per FFF-Druck hergestellt werden, aufgrund der angerauten Oberfläche einen deutlich besseren Haftverbund zum verwendeten Abformungsmaterial aufweisen als konventionell gefertigte Löffel[6,7].

Der große Vorteil des Filamentdruckes ist, dass anders als bei der Fertigung mit fotosensitiven Harzen keine aufwendige Nachbearbeitung im Dentallabor stattfinden muss. Beim Filamentdruck müssen lediglich die Supports, also die Stützstrukturen, (Abb. 4) abgetrennt werden; es ist aber keine aufwendige Reinigung beispielsweise in einem Isopropanolbad oder eine Nachbelichtung notwendig. Gleichzeitig sind FFF-gedruckte Objekte im gefertigten Zustand deutlich biokompatibler und setzen den Zahntechniker während des Herstellens nicht den hochreaktiven und teils toxischen Flüssigkeiten aus, mit denen beim DLP-Druck gedruckt wird. Nicht ganz außer Acht zu lassen sind die Emissionen, die bei diesem Fertigungsverfahren freigesetzt werden. Diese bedürfen einer genaueren Betrachtung bei der Arbeitssicherheit im Labor[2].

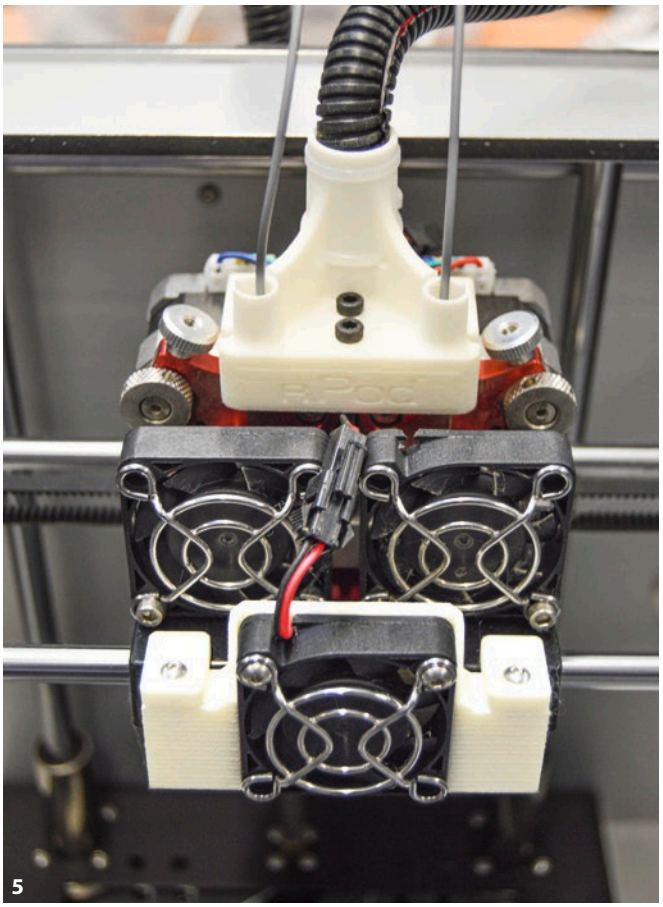
Neben den reduzierten Arbeitskosten sind sowohl die Drucker als auch die Materialien erheblich günstiger als im DLP-Druck. Die Materialkosten beim FFF-Druck betragen für die jeweiligen Indikationen oft weniger als die Hälfte im Vergleich zu entsprechenden Fotopolymeren. Hier muss aber auch klar darauf hingewiesen werden, dass die validierte Prozesskette ein wichtiger Punkt ist, wenn

copyright by all rights reserved Quintessenz

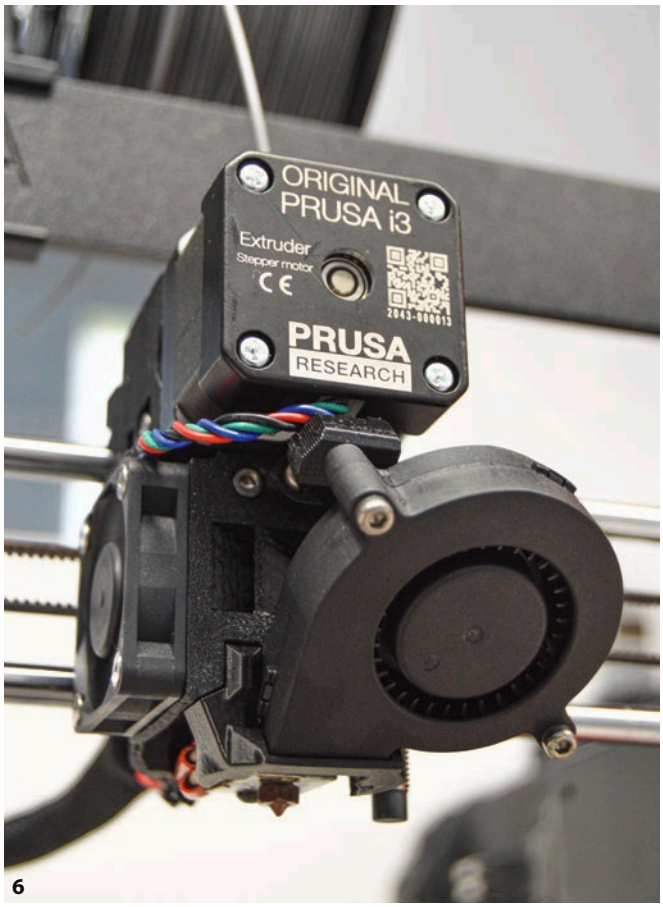
es um die Herstellung von Sonderanfertigungen unter der Verwendung von Medizinprodukten geht. Dies sollte aus Sicht des Qualitätsmanagements mit berücksichtigt werden. Natürlich kommen die FFF-Geräte nicht für jede Indikation der Zahntechnik infrage. Eine aktuelle Übersicht von Materialien findet sich bei Xepapadeas et al.; dort wird auf biobasierte Filamente und den Recyclingprozess der Materialien eingegangen[5].

Im Bereich des FFF gibt es Filamentdrucker mit einem oder auch mit zwei Druckköpfen (Abb. 5; r.pod, Fa. Arfona, Englewood Cliffs, NJ, USA). Zwei Druckköpfe bieten sich an, wenn unterschiedliche Materialien oder Farben für ein Objekt benötigt werden oder um beispielsweise Stützstrukturen aus einem anderen Material zu drucken, damit diese sich leichter vom Hauptmaterial abtrennen lassen. Allerdings sind die Drucker in der Regel deutlich teurer und aufwendiger. Des Weiteren zeigen unterschiedliche Materialeigenschaften von verwendeten Filamenten (hart und weich) ein Potenzial bei der Anwendung im Dualextruderverfahren, wie bei Lüchtenborg et al. gezeigt[3].

Werden in einem Dualextruder-Gerät Filamente verwendet, die als Medizinprodukte deklariert sind, muss unbedingt darauf geachtet werden, dass in beiden Heizköpfen mindestens die gleiche oder höhere Medizinprodukteklasse verwendet wird, die von der Indikation der Sonderanfertigung vorgegeben wird. Für die Hauptindikationen des FFF im Dentalbereich (Modelle, Löffel, Bohrschablonen, Try-in-Prothesen) ist grundsätzlich ein Drucker mit einem Druckkopf (Abb. 6, Fa. Prusa Research, Prag, Tschechien) ausreichend. Dentalmodelle benötigen in der Regel keine Stützstrukturen, bei Löffeln und Bohrschablonen lassen sich diese Stützstrukturen genauso einfach entfernen, auch wenn sie aus dem gleichen Hauptmaterial gedruckt werden. Im Gegensatz dazu haben Drucker mit nur einem Druckkopf den Vorteil, dass die Druckergebnisse deutlich sauberer



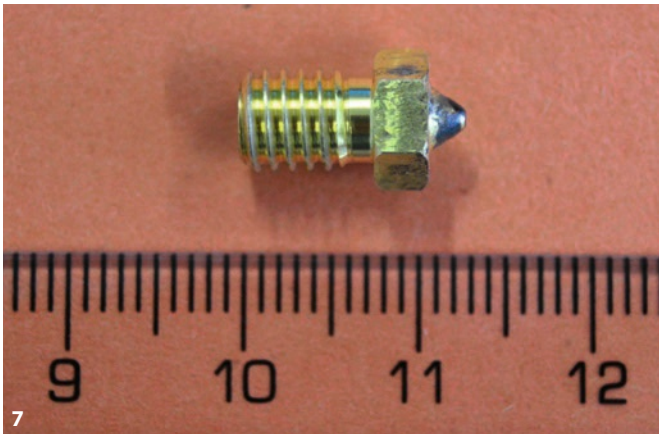
5



6

Abb. 5 Druckkopf eines Dualextruder-Gerätes, das ermöglicht, mit zwei Materialien zu arbeiten. **Abb. 6** Druckkopf eines 3-D-Druckers mit nur einem Extruder und entsprechend nur mit einer Düse.

copyright by all rights reserved Quintessenz



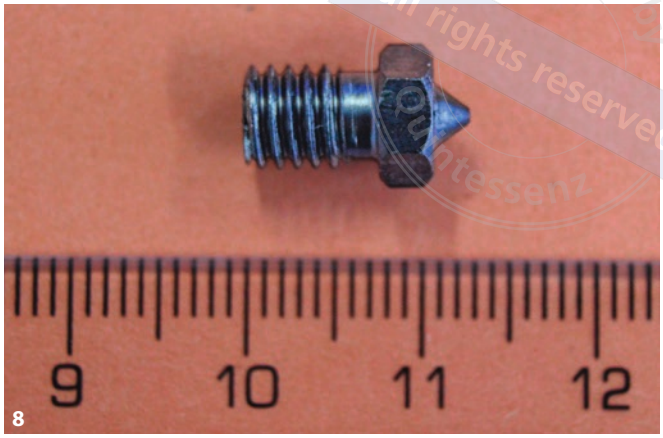


Abb. 7 Ausgebaute Druckdüse aus Messing. **Abb. 8** Ausgebaute Druckdüse aus einem gehärteten Stahl.

sind, da es hier keinen „unbeschäftigten" Druckkopf gibt, der den Druck des anderen verunreinigen könnte. Darüber hinaus arbeiten die Drucker mit nur einem Extruder etwas schneller, da der Wechsel zwischen den zwei Druckköpfen hier entfällt.

Viele FFF-Drucker verwenden normierte Standarddüsen, die sich recht leicht auswechseln lassen. Wichtig für den Dentalbereich ist, dass die FFF-Drucker mit Edelstahldüsen drucken. Die häufig verwendeten und standardmäßig gelieferten Messingdüsen sind aufgrund des in der Regel vorhandenen, wenn auch geringen Bleianteils in der Legierung nicht für den Druck von Medizinprodukten geeignet. Sollen nur technische Bauteile (Modelle) gedruckt werden, spielt das Düsenmaterial keine Rolle.

Es gibt am Markt unterschiedliche Düsendurchmesser, die die Auflösung des gedruckten Objektes definieren. In der Regel werden die FFF-Drucker standardmäßig mit 0,4-Millimeter-(Messing-) Düsen ausgeliefert (Abb. 7). Gleichzeitig bedeutet ein feinerer Düsendurchmesser aber auch eine verlängerte Druckzeit. Der Düsendurchmesser kann einen großen Einfluss auf die mechanischen und auf die geometrischen Eigenschaften der Bauteile haben[4].

Folgende (Stahl-)Düsendurchmesser (Abb. 8) empfehlen die Autoren für die jeweilige Indikation:

- 0,4-Millimeter-Düse: individuelle Abformlöffel
- 0,25-Millimeter-Düse: Bohrschablonen, KFO-Modelle, Kontrollmodelle

Software

Ähnlich wie bei der zerspanenden Fertigung können im 3-D-Druck für die Konstruktion der zahntechnischen Objekte die gewohnten CAD-Software-Module von Herstellern wie der Fa. 3Shape® (Kopenhagen, Dänemark), der Fa. Zirkonzahn (Zirkonzahn.Modellier®; Gais, Italien), der Fa. Exocad® (Darmstadt) oder der Fa. Dental Wings® (Montreal, Kanada) oder sonstigen Anbietern verwendet werden. Die Fa. Zirkonzahn bietet eine sehr beliebte Löffelsoftware sogar kostenlos an[8].

Grundlage für den Druck sind auch beim FFF die erzeugten Dateien im STL-Format. Bei der Aufbereitung dieser konstruierten STL-Daten kommt die sogenannte Slicing-Software bei den additiven Fertigungsverfahren zum Einsatz. Anstelle einer Nesting-Software wie beim Fräsen, wird im 3-D-Druck das entsprechende Gegenstück verwendet, die Slicing-Software. Diese zerlegt die STL-Datei in Druckschichten bzw. Druckbahnen, hinterlegt Material- und druckerspezifische Daten, wie beispielsweise Drucktemperaturen, Vorschübe, Heizbetttemperatur, Supports (Form, Position, Dichte), Bauraumgröße, Füllmuster (Geometrien, Dichte, Position) etc.; es gibt sehr viele Parameter, die theoretisch eingestellt werden können (Abb. 9: Prusa-Slicer, Fa. Prusa-Research). Das Ergebnis sind G-Code-Dateien (Abb. 10a und b), die dann auf den 3-D-Drucker transferiert werden. Jeder einzelne Parameter in der Slicing-Software kann unter Umständen einen enormen Einfluss auf das Druckergebnis haben. Daher empfiehlt es sich, anfangs auf die bereits in der Slicing-Software hinterlegten Voreinstellungen für die unterschiedlichen Filamentmaterialien zu setzen. Hierzu gibt es sehr gute wissenschaftliche Veröffentlichungen, die sich mit der Thematik der Slicing-Parameter auseinandergesetzt haben und öffentlich zugänglich sind, um sie bei auftretenden Problemen zurate ziehen zu können[1].

copyright by all rights reserved Quintessenz

Einige FFF-Drucker werden mit eigener Slicing-Software bzw. einer angepassten Standard-Slicing-Software ausgeliefert. In der Regel wird die Software vom Hersteller kostenlos beim Druckerkauf zur Verfügung gestellt bzw. kann für wenig Geld lizensiert werden. Weit verbreitet sind Cura (gratis; Fa. Ultimaker, Utrecht, Niederlande), Simplify3D (überschaubare Kosten; Fa. Simplify3D, Cincinnati, OH, USA) oder der PrusaSlicer (kostenlos; Fa. Prusa-Research).

Fazit

Das FFF-Verfahren hat seine Berechtigung in der Dentaltechnik und ist kostengünstig für ausgewählte Indikationen im Dentallabor einsetzbar. Durch die Limitierung der Fertigungsgenauigkeit und die begrenzte Auswahl der CE-zertifizierten Medizinprodukt-Filamente lässt sich der FFF-3-D-Druck Bereich bis jetzt gut überblicken. Die Zukunft wird zeigen, welche technologischen und materialtechnischen Fortschritte dem FFF-Druck zum breiten Durchbruch in der Dentaltechnik verhelfen können.

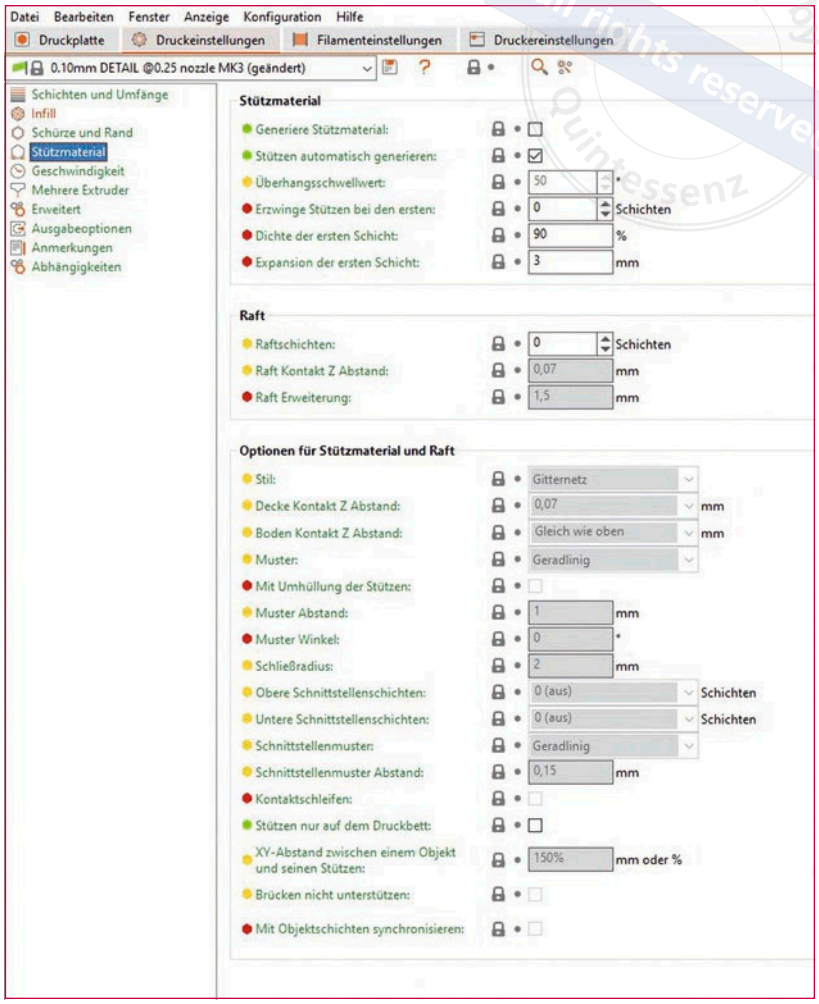


Abb. 9 Beispiel aus einem Slicer-Programm. Dieser Ausschnitt zeigt nur die Einstellungen für das Stützmaterial. Auf der linken Seite sind weitere Parametereinstellungen zu finden.

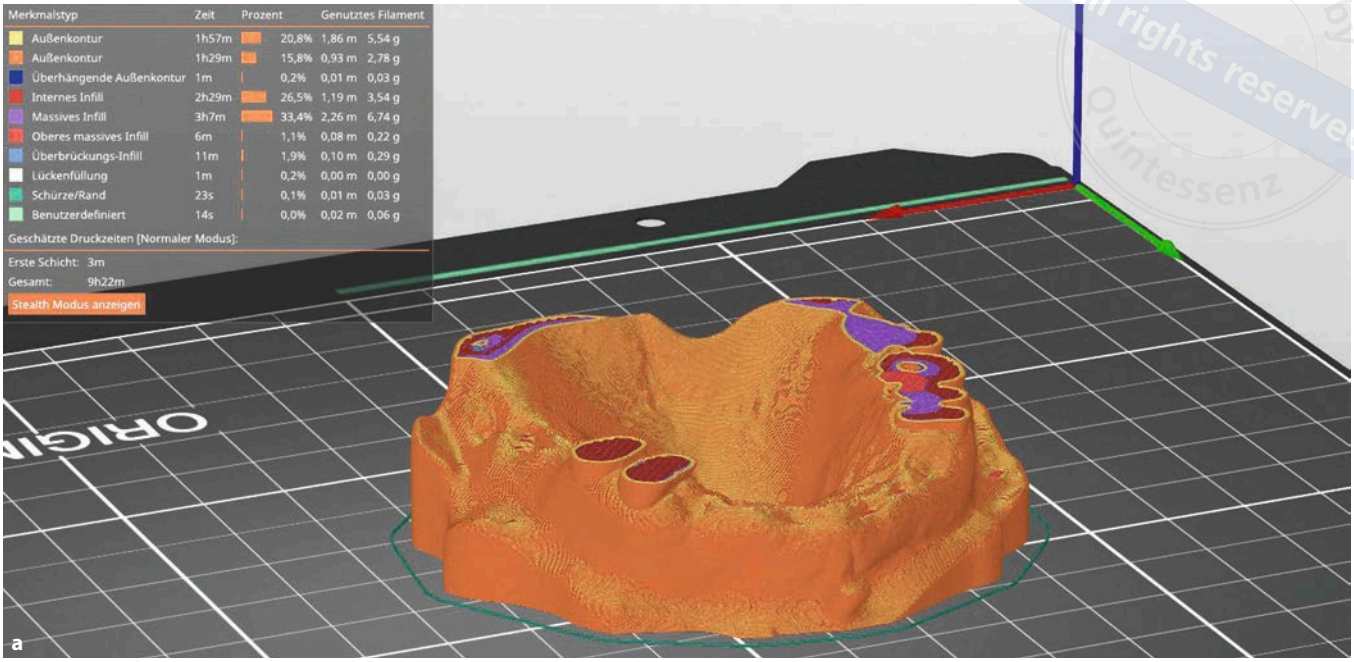
Danksagung

Teile der vorliegenden Forschungsaktivitäten und die daraus folgenden Ergebnisse wurden im Rahmen des Förderprogramms COIN, Programmlinie „Aufbau", 8. Ausschreibung der Österreichischen Forschungsförderungs GmbH (FFG) vom Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort (BMDW) kofinanziert – Projektnummer 884136 (iLEAD).

Literatur

1. Hsiang Loh G, Pei E, Gonzalez-Gutierrez J, Monzón M. An overview of material Extrusion troubleshooting. Applied Sciences 2020;10:4776.
2. Karayannis P, Saliakas S, Kokkinopoulos I et al. Facilitating safe FFF 3D printing: A prototype material case study. Sustainability 2022;14:3046.
3. Lüchtenborg J, Burkhardt F, Nold J et al. Implementation of Fused Filament Fabrication in dentistry. Applied Sciences 2021;11:6444.
4. Wang Y, Müller W-D, Rumjahn A, Schmidt F, Schwitalla AD. Mechanical properties of fused filament fabricated PEEK for biomedical applications depending on additive manufacturing parameters. J Mech Behav Biomed Mater 2021;115:104250.
5. Xepapadeas Alexander Basileos, Friedrich Jolanda, Röhler Ariadne, Aretxabaleta Maite. Additive Fertigung nachhaltiger gestalten: Kunstoffverarbeitung per Fused Filament Fabrication. Zahntechnik Magazin 2021;25:392–397.
6. Xu Y, Huettig F, Schille C, Schweizer E, Geis-Gerstorfer J, Spintzyk S. Peel bond strength between 3D printing tray materials and elastomeric impression/adhesive systems: A laboratory study. Dent Mater 2020;36:e241–e254.
7. Xu Y, Unkovskiy A, Klaue F, Rupp F, Geis-Gerstorfer J, Spintzyk S. Compatibility of a silicone impression/adhesive system to FDM-printed tray materials – a laboratory peel-off study. Materials (Basel) 2018;11:1905.
8. Zirkonzahn. Software zur Gestaltung gefräster oder gedruckter individueller Abdrucklöffel. www.zirkonzahn.com/de/cad-cam-systeme/software/zirkonzahn-tray. Zugriff am 31.03.2022.

copyright by all rights reserved Quintessenz




```
; external perimeters extrusion width = 0.25mm
; perimeters extrusion width = 0.25mm
; infill extrusion width = 0.25mm
; solid infill extrusion width = 0.25mm
; top infill extrusion width = 0.25mm
; first layer extrusion width = 0.30mm

M73 P0 R561
M73 Q0 S563
M201 X1000 Y1000 Z200 E5000 ; sets maximum accelerations, mm/sec^2
M203 X200 Y200 Z12 E120 ; sets maximum feedrates, mm / sec
M204 P1250 R1250 T1250 ; sets acceleration (P, T) and retract acceleration (R), mm/sec^2
M205 X8.00 Y8.00 Z0.40 E4.50 ; sets the jerk limits, mm/sec
M205 S0 T0 ; sets the minimum extruding and travel feed rate, mm/sec
M107
;TYPE:Custom
M862.3 P "MK3S" ; printer model check
M862.1 P0.25 ; nozzle diameter check
M115 U3.10.1 ; tell printer latest fw version
G90 ; use absolute coordinates
M83 ; extruder relative mode
M104 S215 ; set extruder temp
M140 S60 ; set bed temp
M190 S60 ; wait for bed temp
M109 S215 ; wait for extruder temp
G28 W ; home all without mesh bed level
G80 ; mesh bed leveling
G1 Z0.2 F720
G1 Y-3 F1000 ; go outside print area
G92 E0
G1 X60 E8 F700 ; intro line
G1 X100 E12.5 F700 ; intro line
G92 E0
M221 S95

; Don't change E value below. Excessive value can damage the printer.
M907 E430 ; set extruder motor current
G21 ; set units to millimeters
G90 ; use absolute coordinates
M83 ; use relative distances for extrusion
M900 K0.05 ; Filament gcode LA 1.5
M900 K30 ; Filament gcode LA 1.0
M107
;LAYER_CHANGE
;Z:0.2
;HEIGHT:0.2
;BEFORE_LAYER_CHANGE
G92 E0.0
;0.2


G1 E-.8 F2100
G1 Z.15 F720
G1 Z.2
```

b

Abb. 10a Digitales Modell nach dem Slicing-Prozess. **b** Auszug aus dem generierten G-Code der Datei.

Thies Elteste
Geschäftsführer
Johannes Weithas GmbH & Co. KG
Gartenstraße 6
24321 Lütjenburg
E-Mail: info@weithas.de

Dr. Irena Zeiher-Spintzyk
Zahnärztlich beratende Tätigkeit an der
Akademie für Österreichs Zahntechnik
Hötzendorfplatz 11
2500 Baden
Österreich

ZT Sebastian Spintzyk, M. Sc.
ADMiRE Lab – Additive Manufacturing, Intelligent Robotics, Sensors and Engineering
Studienbereich Engineering & IT
Fachhochschule Kärnten
Europastraße 4
9524 Villach
Österreich
E-Mail: s.spintzyk@fh-kaernten.at