3D-Postpolymerisationsprotokolle und Chairside-Lösungen

Die additive Fertigung hat sich in den letzten Jahren von einer Labortechnologie zu einem zentralen Baustein der digitalen Zahnmedizin entwickelt. Moderne harzbasierte Systeme ermöglichen die effiziente Herstellung von Modellen, Schienen, Prothesenbasen sowie provisorischem Zahnersatz und zunehmend auch definitiven Kronen und Brücken.[3] Im Vergleich zu konventionellen Verfahren, wie dem Fräsen oder Pressen, bietet der 3D-Druck eine hohe Designfreiheit bei komplexen Formen, einen reduzierten Materialverbrauch und eine potenziell effizientere Fertigung.[3] Für den langfristigen klinischen Erfolg solcher Restaurationen ist jedoch entscheidend, dass die polymerbasierten Werkstoffe vollständig aushärten und ihre mechanischen Eigenschaften auch nach längerer Belastung erhalten bleiben.

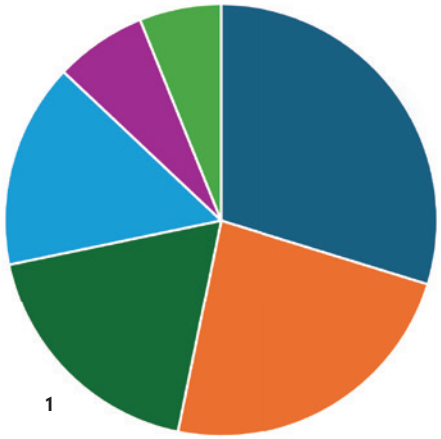
Juliana Miggisch, Univ.-Prof. Dr. Dipl.-Ing. (FH) Bogna Stawarczyk, M.Sc., ZT John Meinen, Annett Kieschnick, Priv.-Doz. Dr. Marcel Reymus, Prof. Dr. med. dent. Nadja Rohr, MBA

Der Postpolymerisationsprozess spielt dabei eine zentrale Rolle, da er die mechanischen Eigenschaften wesentlich beeinflusst.[4] Aktuelle Veröffentlichungen betonen außerdem den Trend zu individualisierten, digital gesteuerten Versorgungen sowie eine zunehmende Verlagerung von Labor- zu Praxis- und damit Chairside-Workflows.[5] Bei der Chairside-Herstellung kommen verschiedene Systeme zum Einsatz. Als Beispiele hierfür werden später der SprintRay MIDAS Drucker und die Asiga PrintPods genauer dargestellt. Letztere sind eine Neuentwicklung von Asiga, welche 2025 auf der IDS vorgestellt wurden und demnächst auf dem Markt erhältlich sein werden.

Infobox

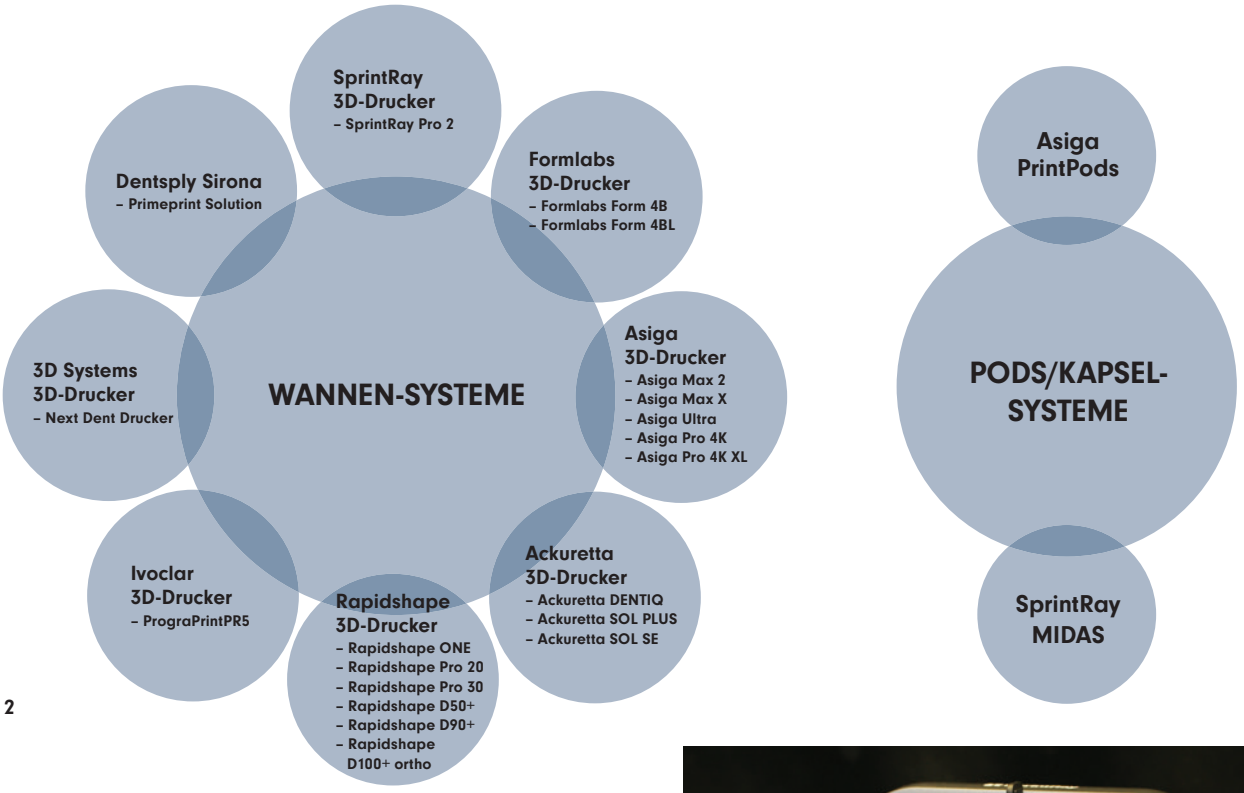
Die additive Fertigung hat sich in ihrer fast 40-jährigen Geschichte nach der Erfindung des ersten 3D-Druckers 1986 rasant weiterentwickelt und gilt als eine fortschrittliche, vielversprechende Technologie.[1] In den 1990er-Jahren breitete sich der Einsatz der 3D-Drucktechnologie zunehmend von der Industrie auf den medizinischen Bereich, einschließlich der Zahnmedizin, aus. Bis Mitte der 2000er-Jahre erweiterten Entwicklungen in der Materialwissenschaft sowie der computergestützten Konstruktion und Fertigung die Möglichkeiten der Technologie.[2] Im Herstellungsprozess wird aus einer digitalen Datei ein dreidimensionales Objekt erstellt. Der Prozess umfasst das Aufeinanderlegen der Rohmaterialien, um durch schichtweises Drucken ein dreidimensionales Objekt zu konstruieren, welches somit ohne Materialverschwendung entsteht.[1]

Anwendungsbereiche des 3D-Drucks in der Zahnmedizin.[6]



1

Prothetik und restaurative Zahnmedizin	29,76 Prozent
Chirurgie und orale Pathologie	23,45 Prozent
Interdisziplinäre Zahnmedizin	18,52 Prozent
Implantologie und Parodontologie	15,31 Prozent
Endodontie	6,85 Prozent
Kieferorthopädie und pädiatrische Zahnmedizin	6,11 Prozent



2

Einsatzbereiche des 3D-Drucks in der Zahnmedizin

Die Besonderheit des 3D-Drucks ist das individuelle Design, das die Kontrolle von Formen, Strukturen und speziellen Funktionen erleichtert.[1] Der optimierte digitale Workflow reduziert außerdem die Behandlungszeit und die Anzahl der Praxisbesuche des Patienten.[2]

Aufgrund dieser Vorteile und Eigenschaften hat der 3D-Druck besonders in der Zahnmedizin bedeutende Perspektiven und wird unter anderem in der Prothetik, in der Kieferorthopädie und in der Chirurgie inklusive der Implantologie genutzt.[1] In allen Bereichen ermöglicht die Integration von digitalen Verfahren die Erstellung anschaulicher virtueller Modelle, anhand derer man Patienten stärker in Behandlungsentscheidungen miteinbeziehen kann. Diese Darstellungsmöglichkeiten unterstützen die Patientenaufklärung, indem sie die vorgeschlagene Behandlung veranschaulichen, was zu besser informierten Patienten und einer erhöhten Akzeptanz der Behandlung führt.[2] Eine Übersicht der Anwendungsbereiche des 3D-Drucks in der Zahnmedizin zeigt Abbildung 1. Balhaddad et al.[6] untersuchten hierzu 934 Studien zur Anwendung des 3D-Drucks in der Zahnmedizin, die zwischen 2011 und 2020 veröffentlicht wurden. Abbildung 1 zeigt die prozentuale Verteilung der Studien auf die zahnmedizinischen Fachgebiete.

Einsatz des 3D-Drucks in der Prothetik

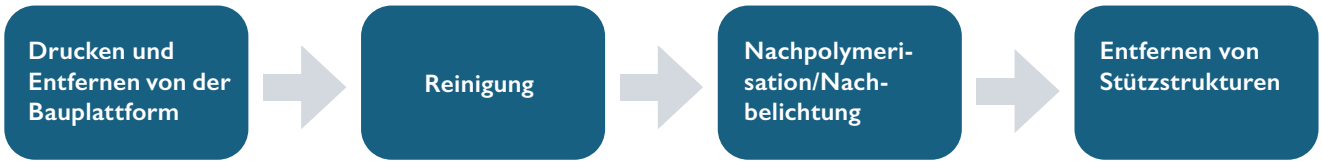
Da Zahnverlust infolge von Karies, Parodontitis, Traumata oder anderen pathologischen Ursachen ein häufig auftretendes Problem in der Bevölkerung darstellt, ist die Bereitstellung von adäquatem Zahnersatz von zentraler Bedeutung. Eine geeignete prothetische Versorgung ermöglicht nicht nur die Wiederherstellung der Funktion und Ästhetik



3

Abb. 2: Beispiele für Chairside-Systeme im 3D-Druck. – **Abb. 3:** SprintRay Midas. Abb. 1+2: *© OEMUS MEDIA AG (Quelle: Werkstoffkunde Prothetik LMU)*

des Gebisses, sondern trägt zudem wesentlich zur Lebensqualität und oralen Gesundheit der Patienten bei.[2] 3D-Drucktechnologien bieten eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten[2] und viele Vorteile gegenüber der herkömmlichen Herstellung, da sie eine schnellere Verarbeitung und die präzise Herstellung individuell gestalteter Produkte ermöglichen. Die herkömmliche Herstellung künstlicher Zähne oder Prothesen ist oft komplex, zeitaufwendig und kann Schwierigkeiten bei der exakten Anpassung von Größe und



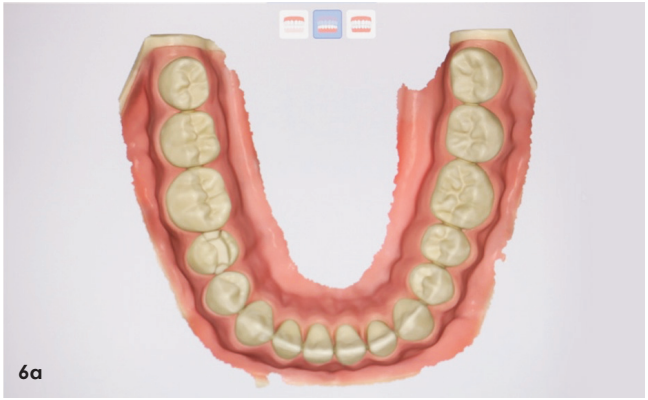
4

Abb. 4: Ablauf der Nachbearbeitung. – **Abb. 5:** Präparation eines Inlays an Zahn 45. – **Abb. 6a+b:** Digitale Abformung.

Form mit sich bringen. Eine unzureichende Passung des Zahnersatzes kann nicht nur zu Komforteinbußen und funktionellen Einschränkungen beim Patienten führen, sondern birgt zudem das Risiko einer langfristigen Knochenresorption.[1] Zu den vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten des 3D-Drucks in der Prothetik gehören Diagnosemodelle, Schablonen für die geführte Implantation, maßgeschneiderte Implantate, individuelle Abformlöffel, festsitzender Zahnersatz und herausnehmbare Teilprothesen.[1,2] Außerdem können Inlays, Onlays und Veneers mittels 3D-Druck angefertigt werden. Der Herstellungsweg über den 3D-Druck weist eine Überlegenheit im Bereich Genauigkeit und Passform gegenüber gefräster Restaurationen auf.[7] Die Herstellung erfolgt im digitalen Workflow, wobei virtuelle Modelle auf Basis eines Intraoralscans erstellt werden. Der Zahnersatz wird digital konstruiert und gedruckt. Im Vergleich zu herkömmlichen Methoden oder CAM-Frästechnologien kann ein 3D-Drucker kostengünstig präzise Restaurationen mit weniger Materialverbrauch und bei verringerter Produktionszeit herstellen.[8] Darüber hinaus findet der 3D-Druck auch bei der Behandlung von Kiefergelenkserkrankungen Anwendung. Individuell gefertigte Versorgungen, wie beispielsweise Knirscherschienen, können virtuell entworfen und mittels 3D-Druck gefertigt werden, was gegenüber konventionellen Herstellungsverfahren Produktionszeit einspart.[3,9]



5



6a



6b

Einsatz des 3D-Drucks in der Chirurgie

In der chirurgischen Zahnmedizin wird der 3D-Druck unter anderem zur Anfertigung individueller Bohrschablonen für die Implantologie eingesetzt. In Kombination mit dreidimensionaler Bildgebung und digitaler Planung ermöglicht dieses Verfahren eine präzise präoperative Planung sowie eine kontrollierte chirurgische Führung. Dadurch wird eine exakte Implantatpositionierung unterstützt, was zu einer geringeren operativen Invasivität, verkürzten Behandlungszeiten sowie einer verbesserten Vorhersagbarkeit und Erfolgswahrscheinlichkeit von Implantationen führt.[2]

Einsatz des 3D-Drucks in der Endodontie

In der Endodontie wird der 3D-Druck zum einen zur Modellherstellung für die Lehre und Ausbildung verwendet, zum anderen in der Therapieplanung. Außerdem findet er Anwendung bei der Herstellung von Schablonen für geführte Kavitätenpräparationen, Wurzelspitzenresektionen und Autotransplantationen. In einer Übersichtsarbeit von Joeng et al.[3] 2023 werden Ergebnisse von Studien aufgeführt, welche geringe Abweichungen bei der Zugangskavität und geringe Abweichungen des Zugangswinkels für die Kavitätenpräparation unter Verwendung von 3D-gedruckten Führungsschablonen zeigen.[3,9] Jun et al.[9] beschreiben in einem Artikel von 2025 den Vorteil, dass Übungsmodelle mittels 3D-Druck schneller als auf konventionellem Wege hergestellt werden können und 85 Prozent der Studierenden diese als hilfreiches Übungsmittel betrachteten. Zudem eignen sich 3D-gedruckte Wurzelkanalmodelle zur Bewertung und Prüfung neuer Instrumente und Materialien in der Endodontie.

Zeig uns *deinen* Workflow.



© ikonoklast – stock.adobe.com

Vom Scan bis zur fertigen Versorgung. Wir machen deine Arbeit sichtbar.

Auch Einsteiger sind ausdrücklich willkommen.

Deine Benefits unter www.dentalautoren.de



Nimm Kontakt mit unserer Redaktionsleitung auf.

Kerstin Oesterreich
Fachredaktion
Zahntechnik/Klinik/Labor
k.oesterreich@oemus-media.de

Einsatz des 3D-Drucks in der Kieferorthopädie

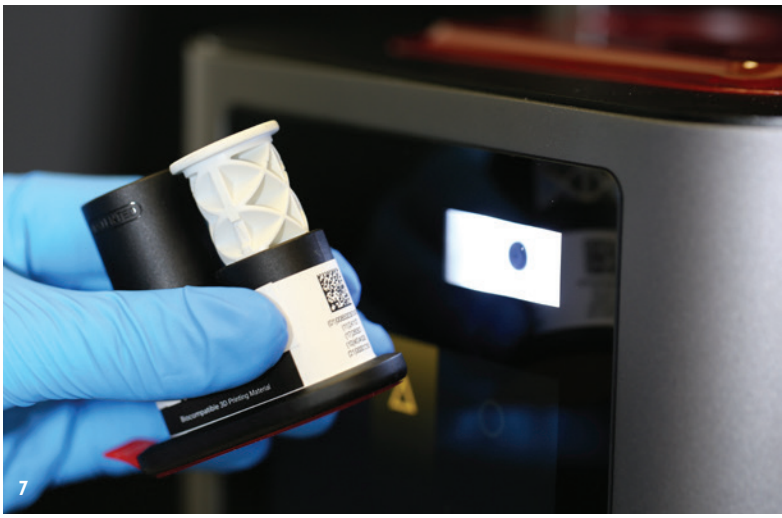
Die Kieferorthopädie stellt ein bedeutendes Einsatzgebiet des 3D-Drucks dar. Es können Modelle, kieferorthopädische Apparaturen sowie Bonding Trays mittels 3D-Druck hergestellt werden. 3D-gedruckte Modelle stellen eine geeignete Alternative zu konventionellen Gipsmodellen dar. Sie zeichnen sich durch eine hohe Maßgenauigkeit aus und tragen durch ihre reproduzierbare Herstellung zu einer effizienteren Gestaltung des Arbeitsablaufs bei.[9] Während früher nur Modelle durch 3D-Druck hergestellt und die Aligner mittels Tiefziehverfahren aus thermoplastischem Material gefertigt wurden, sind mittlerweile zunehmend 3D-gedruckte Aligner auf dem Vormarsch.

Im Vergleich zu konventionellen Verfahren wie dem Fräsen oder Pressen bietet der 3D-Druck eine hohe Designfreiheit bei komplexen Formen, einen reduzierten Materialverbrauch und eine potenziell effizientere Fertigung.

Durchsichtige Aligner bieten im Vergleich zu konventionellen Brackets zahlreiche Vorteile, darunter eine verbesserte Mundhygiene, ein höherer Tragekomfort und eine ansprechendere Ästhetik, was zu ihrer hohen Akzeptanz bei Patienten beiträgt. Der digitale Workflow ermöglicht eine reproduzierbare Herstellung. Laut neueren Studien weisen 3D-gedruckte Aligner eine bessere Passgenauigkeit, größere Belastungsresistenz und geringere Verformung auf als Aligner, die aus thermoplastischem Material gefertigt wurden. Ein wesentlicher Vorteil des 3D-Drucks liegt in der Möglichkeit, individuelle Patientensituationen exakt zu berücksichtigen und patientenspezifische Lösungen passgenau herzustellen. Es bestehen allerdings weiterhin Herausforderungen hinsichtlich der Haltbarkeit, Langzeitanwendung und der Biokompatibilität, weshalb weitere Forschung in dieser Hinsicht notwendig ist.[1, 3, 9]

Digitaler Workflow in der restaurativen Zahnmedizin

In der restaurativen Zahnmedizin ermöglichen digitale Arbeitsabläufe einige Vorteile für Behandler und Patienten gegenüber konventionellen Vorgehensweisen. Der digitale Workflow führt zu einer deutlichen Zeitersparnis und damit gesteigerter Effizienz, da er Laborprozesse und den technischen Herstellungsprozess der Restaurationen verkürzt. Im Vergleich zu konventionellen Verfahren, wird für die digitale Konstruktion und Fertigung deutlich weniger Zeit benötigt, da viele zeitintensive manuelle Arbeitsschritte entfallen oder reduziert werden können.[10, 11] Digitale Arbeitsabläufe in der Zahnmedizin beruhen auf computergestützten Konstruktions- und Fertigungsverfahren – das Computer Aided Design (CAD) und das Computer Aided Manufacturing (CAM). Zuerst wird eine digitale Abformung mittels Intraoralscan durchgeführt, anschließend wird die Restauration mit einer CAD-Software digital entworfen. Die Herstellung kann danach durch Fräsen oder 3D-Druck erfolgen. Nach der jeweiligen Nachbearbeitung ist die Restauration fertiggestellt.[11]



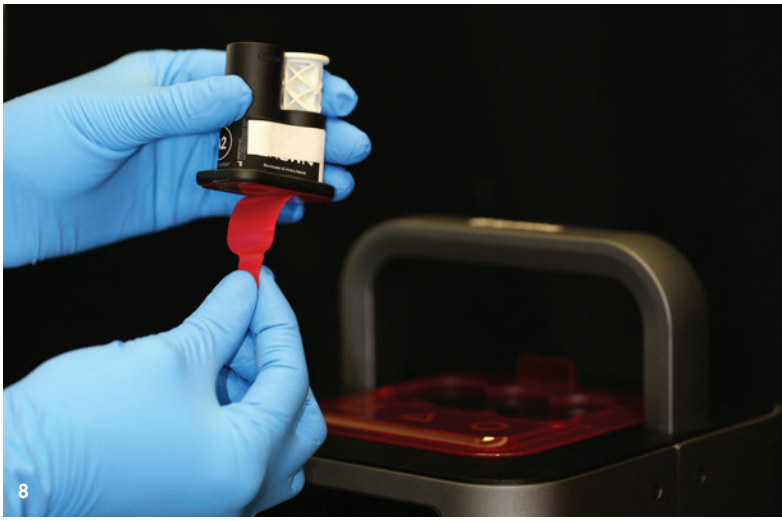
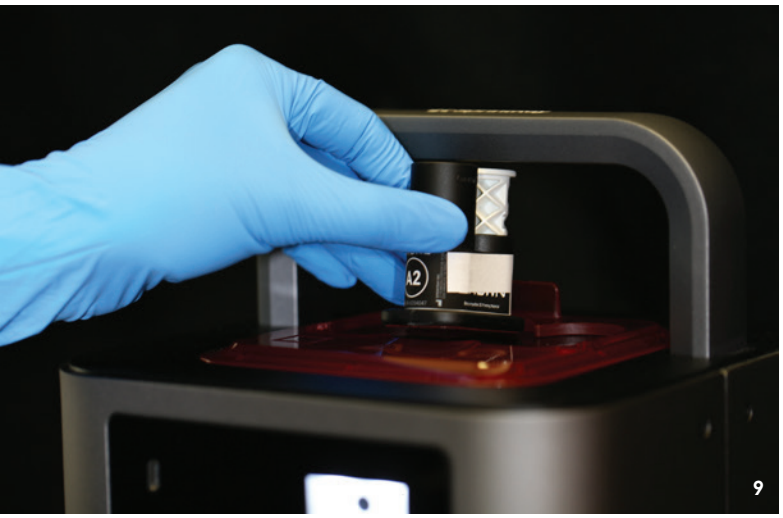


Abb. 7: Scannen der Kapsel. – **Abb. 8:** Abziehen der Schutzfolie.

Chairside und Labside

Digitale Fertigungsverfahren teilen sich in zwei Möglichkeiten. Zum einen kann die Fertigung direkt am Patientenstuhl und in der Praxis durch den Zahnarzt erfolgen (Chairside-Fertigung), zum anderen ist die Herstellung der Arbeit durch einen Zahntechniker im Dentallabor oder in einem Fräszentrum möglich (Labside-Fertigung).



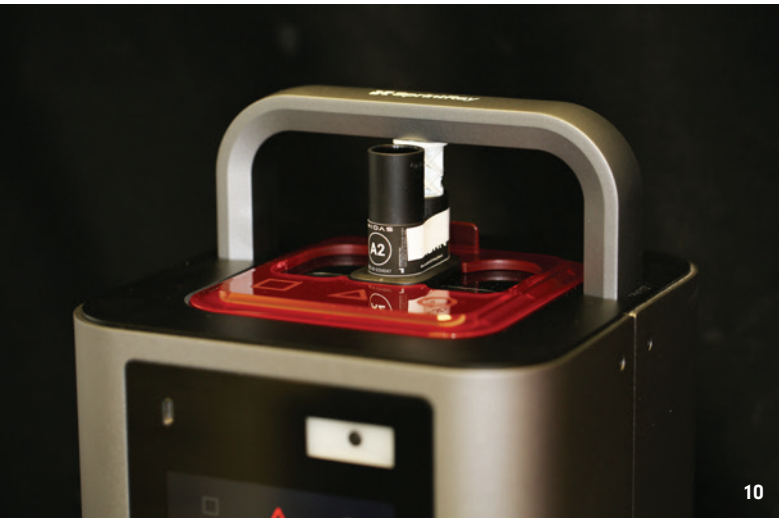


Abb. 9: Einsetzen der Kapsel. – **Abb. 10:** Eingesetzte Kapsel.

Verschiedene Chairside-Systeme im 3D-Druck

Im Folgenden werden verschiedene Beispiele für 3D-Druck Chairside-Systeme dargestellt. Es gibt zahlreiche etablierte Wannensysteme für den 3D-Druck polymerbasierter Materialien, welche sowohl Lab- als auch Chairside genutzt werden können. Diese Darstellung der Systeme erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Neu sind kapselbasierte beziehungsweise Pod-Systeme erhältlich, welche spezifisch für die Chairside-Anwendung entwickelt wurden. Einige Beispiele hierzu sind in Abbildung 2 aufgeführt.[12-20]

WANNENSYSTEME

Es gibt eine Vielzahl an 3D-Druckern, die mit Wannensystemen arbeiten. Je nach Zulassung und gewünschtem Einsatzzweck können verschiedene resinbasierte Werkstoffe im jeweiligen Drucker verwendet werden.[21] Eine gängige Drucktechnik ist das Digital Light Processing (DLP), welches einen UV-Projektor verwendet, der jeweils ganze Schichten aushärtet. Als Ausgangsstoffe dienen hierzu Photopolymere. DLP gilt als kosteneffizient und besonders für den klinischen Alltag geeignet, da es eine hohe Oberflächenqualität mit einem schnellen Druckvorgang kombiniert.[1, 2]

KAPSEL-/PODS-SYSTEME

Kapsel-/Pods-Systeme vereinfachen die Chairside-Behandlung, da das Material in geschlossenen, vordosierten Einheiten verarbeitet wird und somit offene Harzwannen entfallen. Dadurch reduzieren sich Reinigungsaufwand und workflowbedingte Unterbrechungen während der Behandlung sowie potenzielle Kontaminationen.

SprintRay MIDAS

Der SprintRay MIDAS ist ein auf Chairside-Anwendung spezialisiertes System zur Herstellung von Kronen, Inlays, Onlays und Veneers. Es kombiniert ein Kapselsystem mit automatisierten Workflows, um schnell und präzise Zahnrestaurationen herzustellen. Technische Grundlage des Verfahrens ist die Digital Press Stereolithiography (DPS), bei der ein hochgefülltes Kompositharz unter mechanischem Druck und UV-Licht (385 nm) schichtweise polymerisiert wird. Der zusätzliche Druck reduziert Porositäten und verbessert die Schichtanbindung, wodurch mechanisch stabilere, definitive Restaurationen mit reproduzierbaren Eigenschaften entstehen. Die offene Harzwanne und die Bauplattform werden durch eine geschlossene Kapsel ersetzt, welche sowohl das Material als auch die Bauplattform selbst enthält. Die Kapsel wird vor dem Druckvorgang am Drucker selbst gescannt. Durch das Einlesen der Kapsel werden dem Gerät alle nötigen Materialinformationen übermittelt. Danach wird die Kapsel in den Drucker gesetzt und der Druck automatisch gestartet, sobald die richtige Position der Kapsel erkannt wurde. Nach dem Druckprozess, der nur wenige Minuten dauert, kann die Restauration entnommen und entsprechend der Herstellerangaben nachbearbeitet werden. MIDAS ist ein geschlossenes System, in dem alle Schritte und Komponenten aufeinander abgestimmt sind. Nur das dazugehörige Druckmaterial (CeramicCrown) kann verwendet werden. Das führt dazu, dass bei diesem System sehr hohe mechanische Eigenschaften, vor allem die Festigkeit und E-Modul, erreicht werden. Der E-Modul ist mit dem gefräster Komposite vergleichbar.[22, 23]

Die abgeschlossene Kapsel bietet den Vorteil der Viskositätsunabhängigkeit, da hochgefüllte, keramisch verstärkte Materialien verarbeitet werden können, welche bei klassischen 3D-Druckern nicht verwendbar wären. Zudem besteht die Option, mehrere Restaurationen in einem Durchlauf herzustellen, da das Einsetzen von bis zu drei Kapseln gleichzeitig möglich ist. Laut Hersteller lassen sich so bis zu drei Kronen in zehn Minuten drucken. Pro Kapsel können eine Krone oder bis zu drei Veneers gedruckt werden. Durch den

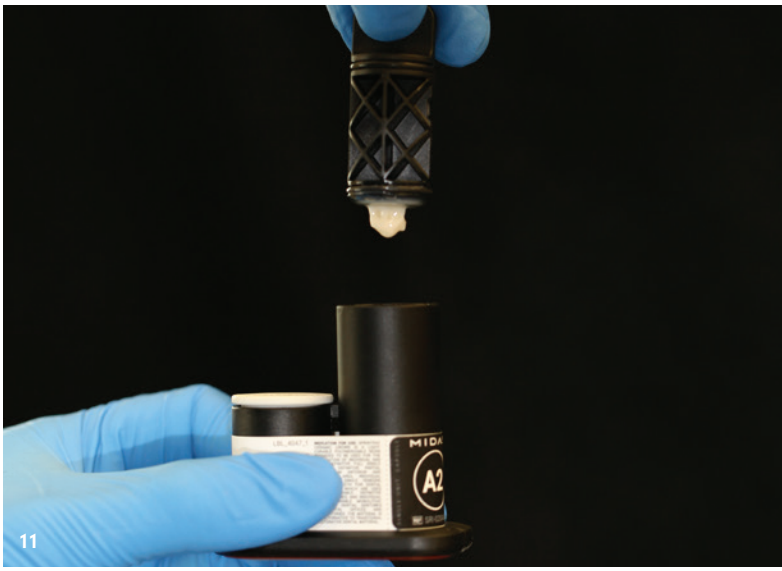
Wegfall des offenen Harzbeckens ergibt sich auch hier der Vorteil eines sauberen Arbeitsumfeldes inklusive verringertem Reinigungsaufwand. Die gesamte Vorrichtung ist außerdem platzsparend gestaltet.[24] Die SprintRay MIDAS Kapseln sind entgegen der Asiga PrintPods Einwegkapseln und werden nach dem Druck entsorgt.[18, 22]

Asiga PrintPods

Die Asiga PrintPods sind ein Materialkapsel-System, mit welchem bestehende Asiga 3D-Drucker speziell für den Chairside-Einsatz adaptiert werden können. Somit können mit den Kapseln ein Asiga-Drucker erweitert und die offene Harzwanne durch die PrintPods ersetzt werden, während der Drucker an sich nicht ausgetauscht werden muss. Gleichzeitig bieten die PrintPods weiterhin die Freiheit der Materialwahl, da sie mit beliebigen Harzen befüllbar sind.[18]
Der Umbau des Druckers erfolgt über den Austausch der Harzwanne durch das PrintPod-Modul, in welches der PrintPod mit dem enthaltenen Druckharz eingesetzt werden kann. Das System eignet sich insbesondere zur Herstellung von Einzelkronen, Inlays und Veneers – je nach genutztem Material für die definitive oder temporäre Versorgung. Der Workflow umfasst die digitale Abformung mittels Intraoralscanner, CAD-Design der Restauration, Einsetzen des PrintPods mit gewünschtem Material, 3D-Druckvorgang, Nachbearbeitung und das Einsetzen am Patienten. Durch die kurzen Druckzeiten von nur wenigen Minuten eignet sich das System für Same-Day-Versorgungen.[25] Laut Hersteller sinkt der Preis pro Restauration dadurch, da die Pods mehrfach befüllt sind und nicht pro Druck ein neuer Pod benötigt wird. Die Nachfüllbarkeit bringt zudem den Vorteil mit sich, dass weniger Müll produziert wird und das System so deutlich nachhaltiger ist als etwa Einwegkartuschen. Die Drucktechnik basiert weiterhin auf DLP-Technologie.[26] Die Asiga PrintPods positionieren sich zwischen offenen Labside-Systemen und geschlossenen Chairside-Systemen. Die Asiga PrintPods sind demnächst bei Asiga erhältlich.[18]

Ablauf und Einfluss des Postprocessing

Nachbearbeitungsverfahren sind unerlässlich, um die erforderliche Oberflächenbeschaffenheit zu erzielen. Dies ist wichtig, um sicherzustellen, dass die endgültige Restauration den Standards entspricht, da die Nachbearbeitung Einfluss auf die Materialeigenschaften hat.[2,27] Wie in Abbildung 4 dargestellt, wird nach dem Druck das hergestellte Element von der Bauplattform entfernt, gereinigt, nachpolymerisiert, und die Stützstrukturen werden entfernt.[27]
Bei der Reinigung wird mittels eines Lösungsmittels, wie beispielsweise Isopropanol, unpolymerisiertes Harz von der Oberfläche entfernt. So können Restmonomere, kurzkettige Polymere und Photoinitiatoren eliminiert und die Biokompatibilität sowie die dimensionale Stabilität verbessert werden.[4] Die Ergebnisse von Gekle et al.[28] 2025 zeigen, dass die Wahl des Nachpolymerisationsprotokolls entscheidenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von 3D-gedruckten Dentalharzen hat. Die Nachpolymerisation verbesserte die Umsetzungsrate und Martenshärte. Ebenso zeigen die Ergebnisse des Übersichtsartikels von de Melo-Soares et al.[4] 2025, dass die Nachpolymerisation einen Einfluss auf die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der 3D-gedruckten Harze hat. So erhöhten zum Beispiel längere Nachpolymerisationsdauern die Biegefestigkeit, die Mikrohärte und die Umsetzungsrate. Eine hohe Umsetzungsrate kann die physikalischen und mechanischen Eigenschaften verbessern, jedoch auch interne Spannungen, Sprödigkeit und optische Veränderungen hervorrufen. Eine niedrige Umsetzungsrate hingegen erhöht die Wasseraufnahme und -löslichkeit, sowie die Freisetzung potenziell zytotoxischer Stoffe, was wiederum einen negativen Einfluss auf die Biokompatibilität hat.



11

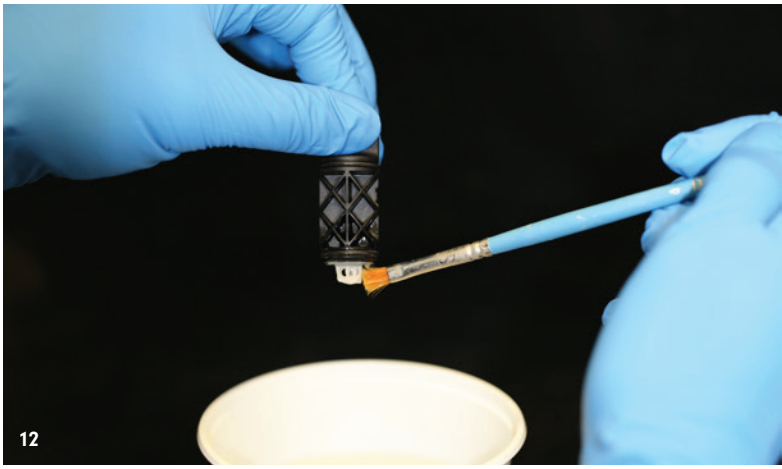

12

Abb. 11: Öffnen der Kapsel. – **Abb. 12:** Reinigung der Restauration.

Darstellung eines kapselbasierten Chairside-Workflows

Im Folgenden wird die Herstellung eines Inlays am Zahn 45 mittels SprintRay MIDAS dargestellt. Nach erfolgter Präparation des Zahnes 45 für ein Inlay wird dieser mittels eines Intraoralscanners digital erfasst. Danach wird basierend

auf dem digitalen Scan das Inlay konstruiert und eine Druckdatei erstellt, welche der jeweilige Drucker zur Herstellung nutzt.
Für den SprintRay MIDAS Drucker kann nun die Kapsel mit gewünschtem Material ausgewählt, mittels ihres QR-Codes gescannt und anschließend eingesetzt werden. Hier wurde als Material das SprintRay CeramicCrown in der Farbe A2

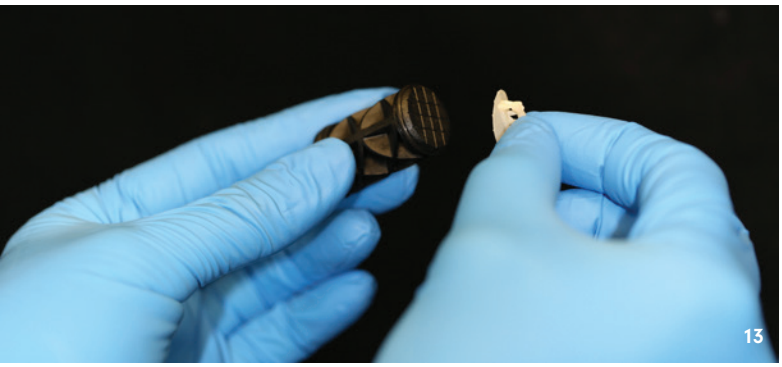




Abb. 13: Abnehmen der Restauration von der Bauplattform. – **Abb. 14:** SprintRay NanoCure.

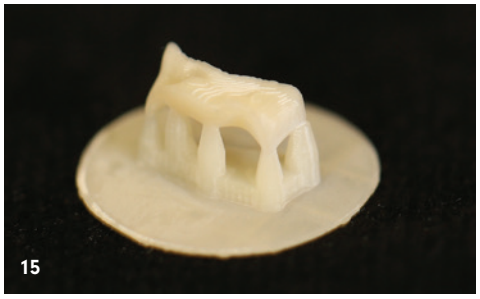
verwendet. Durch das Scannen des QR-Codes werden die Informationen zum Material automatisch an den Drucker übertragen.
Der Druckvorgang wird nun gestartet. Währenddessen zeigt der Drucker stets die verbleibende Zeit an. Der Druck des Inlays dauerte 4 Minuten und 30 Sekunden. Am Ende des Druckvorgangs kann die Kapsel geöffnet und die Bauplattform aus der Kapsel entnommen werden. Die Restauration befindet sich nun auf der Bauplattform und kann gereinigt sowie anschließend abgenommen werden. Zur Reinigung sind die jeweiligen Herstellerangaben zu beachten.

Die gedruckte und von der Bauplattform entfernte Arbeit wird im Anschluss im SprintRay NanoCure Nachhärtungsgerät nachpolymerisiert. Die gedruckte Arbeit wird hierzu nach dem Abnehmen von der Bauplattform im dazugehörigen Nachhärtungsgerät positioniert, das verwendete Material kann ausgewählt und der Nachhärtungsvorgang gestartet werden. Dieser dauerte für das verwendete Material 3 Minuten und 11 Sekunden. Die Restauration wird nach dem Curing entnommen, Stützstrukturen werden entfernt und es erfolgt die Ausarbeitung. Danach ist das Inlay fertig und kann am Patienten einprobiert sowie adhäsiv eingesetzt werden. Der Workflow Guide hierzu ist online bei SprintRay verfügbar.[29]

Kapsel-/Pods-Systeme vereinfachen die Chairside-Behandlung, da das Material in geschlossenen, vordosierten Einheiten verarbeitet wird und somit offene Harzwannen entfallen.

Vorteile des 3D-Drucks im Bereich der Chairside-Anwendung

Zusammenfassend lässt sich zu den Vorteilen des 3D-Drucks sagen, dass Material eingespart und Abfall reduziert werden kann, da CAD/CAM-Technologien und der einhergehende digitale Workflow mittels Intraoralscanner zum Beispiel Abformmaterialien und Gips einspart.[30] Zusätzlich werden Transportwege zu Laboren verringert, ebenso wie Fahrtwege für die Patienten, da innerhalb des Chairside-Workflows die Behandlung in nur einer Sitzung möglich wird.[31] So werden Emissionen vermieden, was die Umweltbelastung reduziert. Die Relevanz dieses Vorteils wird vor allem unter dem Aspekt deutlich, dass Reisen und Transport die höchsten Kohlenstoffemissionen in der Zahnmedizin verursachen.[30] Im Vergleich zu konventionellen Verfahren bietet der 3D-Druck außerdem eine hohe Designfreiheit auch bei komplexen Formen.[3] Speziell für die Chairside-Anwendung des 3D-Drucks gibt



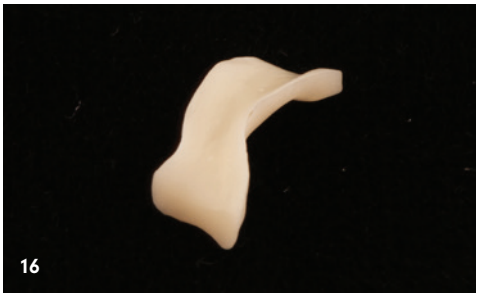




Abb. 15: Inlay für den Zahn 45 nach Druck, Reinigung und Nachhärtung. – **Abb. 16:** Inlay für den Zahn 45 nach Entfernen der Stützstrukturen und Ausarbeitung. – **Abb. 17:** Inlay-Einprobe am Zahn 45.

es einige weitere Vorteile. So zeigen zum Beispiel Zuercher et al.[10] ähnlich erfolgreiche klinische Resultate wie die Labside-Fertigung und eine sehr hohe Patientenzufriedenheit. Mangano et al.[32] verglichen verschiedene digitale Herstellungswege einer Einzelzahnkrone – chairside-additiv, charside-subtraktiv und labside-subtraktiv. Die chairside-additive und die labside-subtraktive Herstellung zeigten jeweils signifikant bessere marginale Genauigkeiten als die chairside-subtraktive Herstellung. Außerdem zeigte sich im Bereich Kosten- und Zeiteffizienz eine Überlegenheit des chairside-additiven Verfahrens. Mit einer Druckzeit von 45 Minuten für fünf Kronen war dies das schnellste System und mit Materialkosten von 8,20 Euro je Krone zudem deutlich günstiger als das chairside-subtraktive System mit 29,20 Euro Materialkosten je Krone. Beim Randschluss sowie bei den approximalen und okklusalen Kontakten gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den verglichenen Herstellungsmöglichkeiten. Zur chairside-additiven Fertigung wurde in dieser Untersuchung ein Stereolithografie-Drucker und Hybridkomposit (Irix Max) verwendet.

Auch ein Übersichtsartikel von Popescu et al.[8] 2025 beschrieb, dass digitale Arbeitsabläufe, insbesondere diejenigen, die den 3D-Druck nutzen, im Allgemeinen kostengünstiger und zeiteffizienter sind als herkömmliche oder subtraktive Fertigungsmethoden in der Prothetik.

Da die Ergebnisse je nach verwendetem System und Material variieren, lassen sich jedoch keine allgemeinen Aussagen zu Genauigkeit und Effizienz 3D-gedruckter Restaurationen treffen.

Grenzen und Herausforderungen des 3D-Drucks

Die Digitalisierung hat die zahnmedizinische Versorgung in den vergangenen Jahren grundlegend verändert und neue Möglichkeiten für präzise, patientenindividuelle und effiziente Behandlungsabläufe geschaffen. Trotz dieser Fortschritte stehen CAD/CAM-Systeme wie der 3D-Druck vor spezifischen Grenzen und Herausforderungen, welche in Abbildung 18 zusammengefasst sind.[2]

Anfangsinvestition und Schulungen

Die Anfangsinvestition in CAD/CAM-Systeme ist hoch, was in der Praxis eine Herausforderung für die Umsetzung darstellen kann.[9] Ebenso kann das Erlernen der nötigen Kompetenzen und der damit einhergehende Zeitaufwand eine Schwierigkeit ergeben. Beim Umstieg auf digitale Systeme und auch in der fortlaufenden Anwendung sind demnach entsprechende Schulungen notwendig, um deren fachgerechte Nutzung zu gewährleisten.[2]

Nachbearbeitungsverfahren und uneinheitliche Standards

Nachbearbeitungsverfahren sind unerlässlich, um die erforderliche Oberflächenbeschaffenheit zu erzielen. Eine Herausforderung besteht darin, dass sich verbindliche Richtlinien zu Sicherheit, Qualitätskontrolle und Produktionsabläufen regional unterscheiden. Dies führt zu einer erschwerten Umsetzung universaler prothetischer Standards.[2]

Materialeigenschaften

Im 3D-Druck wird eine Vielzahl an Materialien eingesetzt, bei denen insbesondere hinsichtlich der Biokompatibilität,

Haltbarkeit, Farbstabilität und der mechanischen Abnutzung Forschungsbedarf besteht, um deren Eignung zu belegen.[2, 9]

Gesundheitsrisiko und Arbeitssicherheit

Eine weitere Problematik im Bereich des 3D-Drucks ist das potenzielle Gesundheitsrisiko für die Anwender. Im zahnärztlichen Bereich werden oftmals Verfahren wie Stereolithografie und Digital Light Processing verwendet. Solche harzbasierten Vorgehensweisen bringen gesundheitliche Risiken mit sich.[33] Das Hauptproblem besteht in der Freisetzung flüchtiger organischer Verbindungen (VOCs), Partikelmaterie (PM) und ultrafeiner Partikel (UFPs) während des Druckvorgangs und der Polymerisation der Harze. Die Emission dieser Stoffe in die Raumluft stellt ein ernstzunehmendes Risiko für Anwender dar, da sie unter anderem mit Atemwegsproblemen, Hautreizungen und krebserregender Wirkung in Zusammenhang steht. Die gesundheitlichen Auswirkungen der freigesetzten Stoffe sind zudem bisher nicht ausreichend untersucht. Häufig freigesetzte VOCs sind in Abbildung 19 aufgeführt. Die Freisetzung potenziell gesundheitsschädlicher Substanzen erfolgt insbesondere dann, wenn flüssige Harze während des Aushärtungsprozesses UV-Strahlung ausgesetzt werden. Aufgrund ihrer sehr geringen Partikelgröße von meist unter 100 Nanometern können die Partikel tief in die Atemwege gelangen und dort negative gesundheitliche Effekte hervorrufen. Messungen zeigen, dass in Räumen mit harzbasierten 3D-Drucksystemen signifikant erhöhte Konzentrationen ultrafeiner Partikel im Vergleich zu anderen Innenraumbereichen auftreten. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass Art und Umfang der Emissionen wesentlich von dem verwendeten Harz, der eingesetzten Drucktechnologie sowie der Dauer des Druckprozesses beeinflusst werden.[33] Insbesondere unter diesem Gesichtspunkt bieten Kapselsysteme wie die Asiga PrintPods oder SprintRay MIDAS einen entscheidenden Vorteil, da sie ohne offene Harzbehälter auskommen und dadurch die Exposition gegenüber flüssigen Harzen und deren Emissionen minimieren.[18]

Es existieren allerdings auch Lösungsansätze zur Minimierung dieser Gesundheitsrisiken. So können beispielsweise emissionsarme Druckharze ausgewählt werden. Bei Anwendung von biokompatiblen Photopolymeren mit geringem Geruch werden nachweislich weniger VOCs freigesetzt. Des Weiteren ermöglichen Messsensoren für die Schadstoffbelastung ein Echtzeit-Feedback und dadurch eine schnellere Intervention. Eine verbesserte Raumbelüftung – beispielsweise durch HEPA-Filter – und die Installation entsprechender Absaugsysteme könnten die Schadstoffbelastung erheblich minimieren. Außerdem sollte der sachgerechte Umgang mit Druckharzen gewährleistet werden, indem Personal entsprechend geschult und angemessene Schutzausrüstung getragen wird.[33]

Zukunft des 3D-Drucks

Im Bereich des 3D-Drucks gibt es aktuell einige interessante und vielversprechende Entwicklungen. Der Einsatz von künstlicher Intelligenz und automatisierten Systemen kann digitale Abläufe effizienter gestalten, indem sie optimierte Designs und vorausschauende Simulationsmodelle unterstützen. Die Etablierung einheitlicher Standards im Bereich 3D-gedruckter dentaler Prothetik treibt gleichzeitig die sichere und breite Anwendung der Technologien voran. Eine weitere interessante Entwicklung ist die Verknüpfung moderner Bioprinting-Techniken mit additiven Fertigungsprozessen.[2] Das 3D-Bioprinting ist eine Weiterentwicklung des 3D-

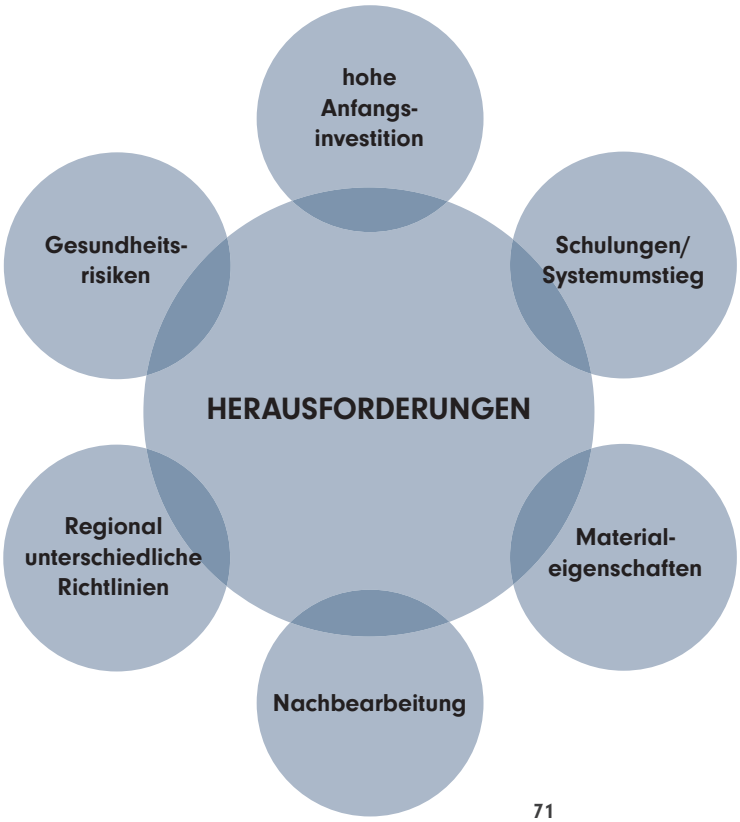


Abb. 18: Herausforderungen des 3D-Drucks

© OEMUS MEDIA AG
(Quelle: Werkstoffkunde Prothetik LMU)

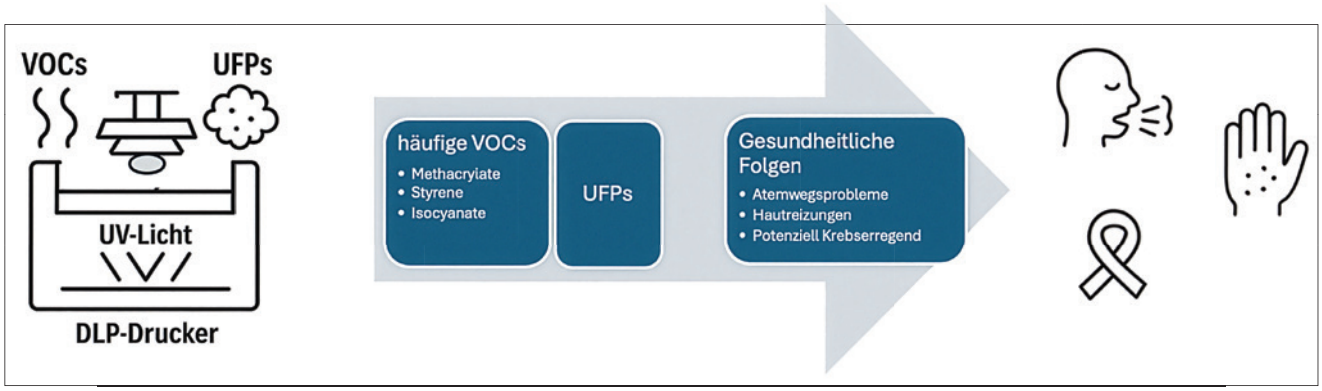


Abb. 19: Freisetzung und Folgen gesundheitsschädlicher Stoffe beim 3D-Druck. *© KI-generiert mit ChatGPT*

Unerlässlich für den 3D-Druck in der Zahnmedizin sind in jedem Fall die angemessene Ausbildung der Anwender, die Auswahl geeigneter Materialien und die korrekte Durchführung der jeweiligen Nachbearbeitungsverfahren.

Drucks und eröffnet neue Möglichkeiten, indem es zellhaltige Biostrukturen sehr präzise Schicht für Schicht verarbeiten kann. Zum Beispiel wird Kollagen, ein natürliches Polymer, welches in Geweben wie Haut und Knochen vorkommt, häufig im 3D-Bioprinting verwendet. Es können so patientenspezifische biologische Gerüste hergestellt werden, was beispielsweise bei der Therapie von Knochendefekten oder zur Regeneration von Parodontalgewebe genutzt werden kann.[1]

Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen: Es gibt für verschiedenste Anwendungszwecke geeignete Systeme, bei denen je nach Einsatzwunsch deren allgemeine Eignung sowie die jeweiligen Vor- und Nachteile abgewogen werden sollten. Die kapselbasierten Systeme bieten einige Vorteile für die Chairside-Anwendung wie schnellere Fertigung, Materialersparnis, reduzierten Reinigungs- und Wartungsaufwand, geringeren Schulungsaufwand durch vereinfachten, oft automatisierten Workflow und weniger Potenzial für freigesetzte gesundheitsschädliche Stoffe. Dahingegen bieten offene Wannensysteme die Möglichkeit, größere Arbeiten oder mehrere Arbeiten gleichzeitig herzustellen, und lassen oft mehr Freiheit in der Materialauswahl als geschlossene Kapseln. Es lässt sich allerdings keine allgemeine Aussage darüber treffen, welches System am besten ist. Die Entscheidung sollte je nach Behandlungsspektrum und Präferenz getroffen werden. Unerlässlich für den 3D-Druck in der Zahnmedizin sind in jedem Fall die angemessene Ausbildung der Anwender, die Auswahl geeigneter Materialien und die korrekte Durchführung der jeweiligen Nachbearbeitungsverfahren.

Literatur

Sofern nicht anders angegeben, alle Abbildungen: © Werkstoffkunde Prothetik LMU

Infos zu den Autoren

Juliana Miggisch
Univ.-Prof. Dr. Dipl.-Ing. (FH) Bogna Stawarczyk, M.Sc.
ZT John Meinen
Priv.-Doz. Dr. Marcel Reymus
Annett Kieschnick

kontakt.

Juliana Miggisch, Univ.-Prof. Dr. Dipl.-Ing. (FH) Bogna Stawarczyk, M.Sc., ZT John Meinen, Priv.-Doz. Dr. Marcel Reymus, Prof. Dr. med. dent. Nadja Rohr, MBA
Werkstoffkundeforschung an der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik am Klinikum der LMU München
wsk-prothetik@med.uni-muenchen.de