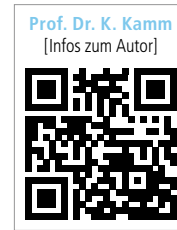


Aufgrund des wachsenden Wunsches der Patienten nach vollkeramischem ästhetischem Zahnersatz haben sich die Zahn-technik und die Zahnmedizin in den letzten Jahren im Bereich der Diagnose- und Verfahrenstechnik grundsätzlich gewandelt. Neben den Keramikwerkstoffen entwickelt sich derzeit insbesondere die digitale Technologie in der Zahnmedizin rasant weiter. Die Entwicklung universell einsetzbarer Werkstoffe und einer universellen Workflow-Kette in der digitalen Technik ist heute jedoch noch nicht komplett realisiert. Die zunehmende Digitalisierung und die neuen, komplexen Möglichkeiten in der restaurativen Zahnmedizin steigern jedoch auch die Anforderungen an die Zahnmedizin und die Zahntechnik. Diese Entwicklung stellt beide Seiten in Zukunft vor neue Herausforderungen bezüglich der digitalen Ausbildung.



Was ist heute schon Realität, was ist Vision in der digitalen Technologie?

Prof. Dr. Karsten Kamm, Dr. med. dent. Susann Kamm

Der angekündigte Wandel im Berufsbild des Zahntechnikers und dessen Arbeitsplatzes hat bereits eingesetzt und wird sich nach der IDS 2017 weiter vollziehen. Aufgrund der industriellen Fertigung werden viele handwerkliche und gute Techniken verloren gehen, die über Jahrzehnte zu einer erfolgreichen individuellen Patientenversorgung geführt haben. Dies ist eine Folge auch eines veränderten weltweiten Marktes. Vergleichen wir dies mit der klassischen Fotografie, wer macht heute noch analoge Fotos? Auf diesen Weg müssen Zahntechnik und Zahnmedizin mitge-

nommen und die Ausbildung und das Studium angepasst werden. Beide Seiten müssen die Neuentwicklungen bewerten können, um wissenschaftlich die beste Behandlungsoption für den jeweiligen Patientenfall zu eruieren.

Ziele der digitalen Zahnmedizin/Zahntechnik

Die Digitalisierung bedeutet vor allem gesteigerte Präzision, Sicherheit durch virtuelle Vorplanung, reproduzierbare hohe Qualität des Zahnersatzes und Kosteneffizienz. Ziel digitaler Zahnme-

dizin ist es, möglichst viele Daten und Arbeitsschritte der Therapie zu digitalisieren und entsprechend am Computer und mithilfe geeigneter Software und Maschinen zu verarbeiten. Ferner machen moderne zahntechnische Werkstoffe (Tab. 1), allen voran, die Nutzung der CAD/CAM-Fertigungstechnik erforderlich.

Im Laufe der Zeit wurden die Chairside-CAD/CAM-Keramikblöcke optimiert und werden heutzutage in zwei Materialkategorien unterteilt: erstens Feldspat- oder Leuzitkeramiken, die nach dem Schleifvorgang der Restaura-

metallische Werkstoffe	Keramiken	Polymere
<ul style="list-style-type: none"> – Titan – CoCrMb: gefräst, lasergesintert, Sintermetall 	<ul style="list-style-type: none"> – Feldspatkeramik (VITA Mark III) – Oxidkeramik (Zirkondioxid) – Infiltrationskeramik (VITA Inceram) – Glaskeramik: leuzitverstärkte Glaskeramik (Empress), Lithiumdisilikat LS2 (e.max), zirkonverstärktes Lithiumsilikat ZLS (Celtra Duo/Suprinity) 	<ul style="list-style-type: none"> – PMMA – PEEK – Hybridkeramik: Enamic 3M ESPE, CERASMART GC, SHOFU Block HC, Lava Ultimate

Tab. 1: CAD/CAM-Materialien.

tion nicht zwingend gebrannt werden müssen, zweitens Lithiumdisilikat- oder Zirkonoxidkeramiken, die nach dem Schleifprozess einem Brennvorgang unterzogen werden müssen [Rinke 2011]. Eine weitere Materialkomponente stellen heute Komposite dar, welche aus mindestens zwei unterschiedlichen Komponenten zusammengesetzt sind. CAD/CAM-Komposite bestehen aus einer Matrix von polymerisierten Methacrylaten, die unterschiedliche Füller (Glas oder Keramik) enthalten. Beispiele sind u. a.:

- Verbundkeramik auf Basis der Resin-Nanokeramik-Technologie (Lava Ultimate)
- CAD/CAM-Block aus Hybridkeramik (CERASMART)
- höchästhetischer auf Keramik basierender Werkstoff (SHOFU Block HC)

Ein weiteres CAD/CAM-Block-Material, VITA Enamic (VITA Zahnfabrik), unterscheidet sich sowohl von keramischen Materialien als auch von Kompositen. Hierbei handelt es sich um eine polymerinfiltrierte poröse Keramik.

Computergestützte Herstellungsverfahren

Die Etablierung computergestützter Herstellungsverfahren hat in den vergangenen Jahren im Bereich der prothetischen Zahnmedizin zu einem Wandel der Versorgungskonzepte geführt. Neben neuartigen Fertigungstechniken stehen dabei insbesondere innovative Materialien im Fokus (Abb. 1). Mehrere In-vitro-Untersuchungen belegen heute die hervorragende Passgenauigkeit von CAD/CAM-gefertigten Konstruktionen (Abduo und Lyons, 2013; Abduo, 2012). Festsitzende implantatgestützte, prothetische Versorgungen zeigen für Suprakonstruktionen hohe Überlebensraten (Jung et al. 2012, Pjetursson et al. 2012). Parallel zeigte sich aber, dass vermehrt technische Komplikationen aufgetreten sind. So stellte sich u. a. eine hohe Inzidenz für Verblendkeramikfrakturen auf implantatgetragenen Rekonstruktionen (Chipping > 20%) heraus (Wittneben et al. 2014, Sailer et al. 2015, Fehmer

et al. 2015, Pjetursson et al. 2007). Das Versagen der Verblendkeramik bildet immer mehr die Hauptkomplikatonsrate vollkeramischer Restaurationen mit Zirkondioxidgerüsten auf implantatgetragendem Zahnersatz. Dies führte in den letzten zwei Jahren zu einem rasanten Anstieg der monolithischen Versorgungen.

CAI – Computer Aided Impression

Beim dentalen CAD/CAM-Verfahren wird die Abformung der präparierten Zähne mittels eines Scanners in den PC eingelesen und auf dem Bildschirm als virtuelles Modell dargestellt.

Die Genauigkeit der Scanverfahren liegt heute bei folgender Abweichungstoleranz: am Einzelzahn bei 20 µm, am Quadranten bei 35 µm und bei der Ganzkieferabformung 50 bis 80 µm. Trotzdem wird der größte Anteil der Abformungen immer noch konventionell mit Abformlöffel durchgeführt, nur 5 bis 10% der Zahnärzte nutzen das Potenzial der digitalen Abformung mit Intraoralscannern.

Vorteile der CAI - Computer Aided Impression

- Kurze Prozesskette (nur ein Arbeitsschritt bis zum virtuellen Modell)
- Komplette digitale Prozesskette möglich
- Wenige verfahrenstechnische Einflussfaktoren
- Standardisiertes Vorgehen



Abb. 1: Prettau® Anterior®, monolithisches hochtransluzentes Zirkon.

- Direkte Analyse der Präparation/ selektive leichte Wiederholbarkeit (Qualitätsverbesserung)
- Zeitersparnis/Effizienz durch direkte Generierung des virtuellen Modells
- Schnelle Kommunikation zwischen der Zahnmedizin und der Zahntechnik
- Archivierbarkeit/kein Modellverschleiß/ Materialersparnis
- Chairside-Optionen
- Virtuelle Verlaufskontrollen für die Diagnostik (Zahnwanderungen, Gingivarezession, Abrasionen)
- Data-Fusion: Verknüpfung von unterschiedlichen Datensätzen (STL, DICOM, OBJ, IGES)

Als Analyseoption können bei digitalen Modellen wichtige Präparationsparameter (Abb. 2) direkt am Bildschirm kontrolliert werden, z. B. die Präparationsgrenzen, Einschubachse oder der Abstand zum Antagonisten. Im Bereich der Diagnostik sind Verlaufskontrollen möglich, hierzu genügt eine Vergleichssoftware (z. B. der Firma GOM inspect) welche einen 3-D-Vergleich eines Ausgangsbefundes mit nachfolgenden Aufnahmen darstellt. Weiterführend kann aus einer Vielzahl digitaler Daten eine umfassende

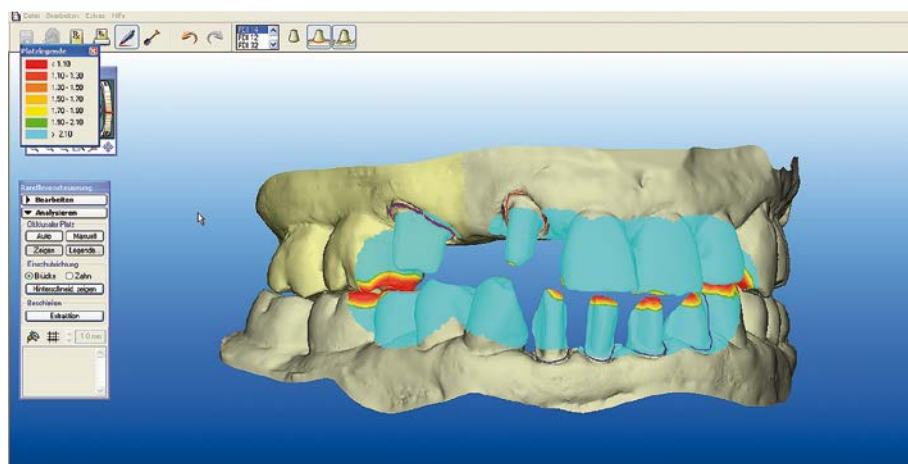


Abb. 2: Intraoraler Scan Höhenprofil.

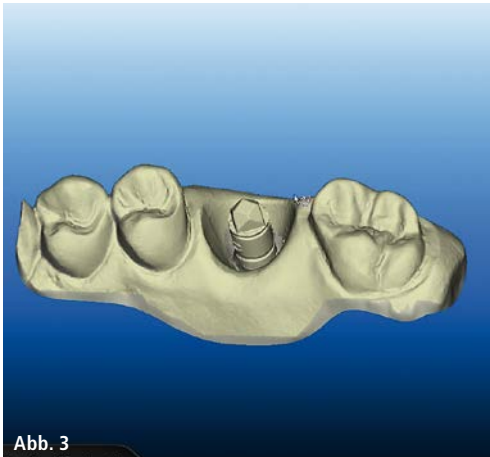


Abb. 3



Abb. 4

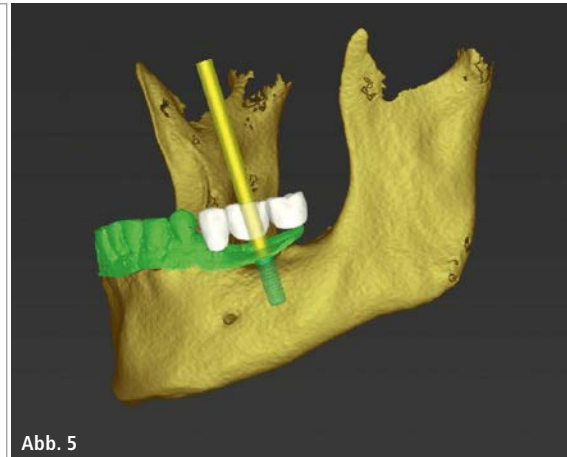


Abb. 5

Abb. 3: Intraoraler Scan eines Implantatbodies. – **Abb. 4:** Intraoraler Ultraschallscanner der Firma whitesonic. – **Abb. 5:** Backward Planning mit virtuellem Wachs-up.

Beurteilung der Funktion des Kausystems erfolgen. Kiefergelenkspezifische Werte können aus der Röntgenaufnahme, aus dem Gesichtsscan, dem Plansystem oder aus diversen elektronischen Registriersystemen in das Modell der Intraoralabformung übernommen werden. Diese Information stellt die Ausgangsbasis dar, um die digitale Kauflächengestaltung und die Oberflächenrekonstruktion durchzuführen. Die Simulation der dynamischen Okklusion ist bei einigen Systemen mithilfe des virtuellen Artikulators möglich. Die beiden Varianten der Datenerfassung (intraoral, extraoral) haben jeweils Vor- und Nachteile. Intraorale Scanner bedeuten zuerst einmal Arbeit, Aufwand und Kosten, die konventionelle Abformung ist hingegen Praxisalltag. Die neue Technik erfordert aber auch ein Umdenken. Die digitalen Systeme eröffnen ganz neue Anwendungsgebiete. Die bildge-

bende Kontrolle der Präparation (wie in Abb. 2 Präparationsrand, Einschubrichtung, Platzbedarf) erhöht in erster Linie die Qualität. Fehler werden erkannt und können sofort korrigiert werden. Studien, die beide Wege vergleichen zeigen, dass konventionelle Abformung und Modellherstellung enorme potenzielle Fehlerquellen bergen (Luthardt et al. 2008). Der Vergleich zwischen Intraoralscan und Extraoralscan zeigt einen Präzisionsvorsprung von 15 µm beim Intraoralscan (Rudolph et al. 2015, Rumpf et al. 2012.) Die modernen intraoralen Scanner erreichen heute einen Genauigkeitsfehler von ca. 0,1%. Dies bedeutet bei einer großen Restauration von ca. 5 cm sagittaler und transversaler Länge, eine maximale Ungenauigkeit von 50 µm, was absolut den prothetischen Anforderungen entspricht (Rudolph et al. 2015). Mithilfe von Scanbodies können auch Implantate abgescannt werden (Abb. 3).

Ultraschallscanner in Zukunft?

Sowohl bei der Verwendung von herkömmlichen Abformmassen als auch bei intraoralen digitalen Scanverfahren wird die Abformung durch Blut- und Speichelfluss beeinträchtigt. Die digitalen Verfahren beruhen derzeit auf optischen Messprinzipien und benötigen daher ebenfalls saubere und trockene Oberflächen. Im Gegensatz dazu können Ultraschallwellen Gingiva, Speichel und Blut noninvasiv durchdringen, was entscheidende Vorteile mit sich bringt, da die Reinigung und Trocknung der Mundhöhle nicht mehr notwendig sind. Gebräuchliche Ultraschallgeräte für die Anwendung in der Medizin und der Materialprüfung sind nur in begrenztem Umfang geeignet, da ihre Auflösung, Präzision und ihr Aufbau die Voraussetzungen für das Scannen in der Mundhöhle nicht erfüllen. Der Ultraschallscanner (Abb. 4) steht kurz vor der Markteinführung und wird nicht nur den Bereich der Abformung, sondern auch den Bereich der Diagnostik (Knochendichte, Knochenabbau, Sekundärkaries usw.) verändern (Vollborn 2014).

Backward Planning

Mit einer CAD-Software wird die Versorgung virtuell konstruiert, mit der Morphologie der Antagonisten und der Nachbarzähne abgeglichen und als Datensatz in die Fräseinheit übertragen. Dort wird die Restauration

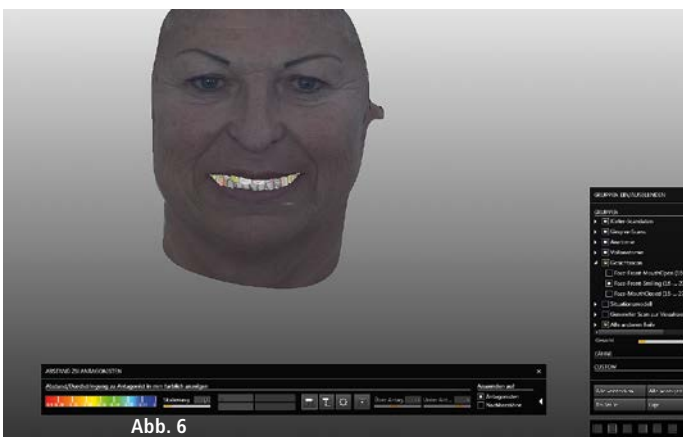


Abb. 6

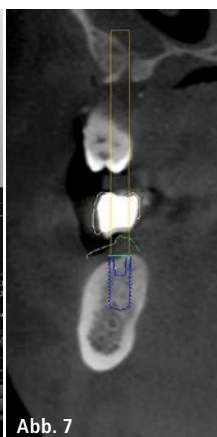


Abb. 7

Abb. 6: FaceHunter Gesichtsscan. – **Abb. 7:** Implantatposition in Bezug zum Knochen, Weichgewebe (virtuelles Wachs-up).

aus industriell vorgefertigten Blocks subtraktiv ausgeschliffen. Diese Technologie ist zeitsparend; sie überspringt im Vergleich zur konventionellen Zahntechnik mehrere Fertigungsstationen. Bei Nutzung eines Intraoralscanners entfällt der konventionelle Abdruck. Die Computerunterstützung wird auch für das Backward Planning (Abb. 5) zur Vorbereitung einer Implantation und Sofortversorgung genutzt. Chirurgische Bohrschablonen können exakt konstruiert und die Fertigung (subtraktiv oder additiv) eingeleitet werden. Mit den Daten eines Gesichtsscanners (Abb. 6) und dem Intraoral-Ganzkieferscan lässt sich das harmonische Zusammenwirken aller Komponenten (Gesicht, Knochen und Zähne) kontrollieren und verändern. Die ästhetischen Komponenten können mit dem Patienten besprochen werden und direkt in der Konstruktion umgesetzt werden.

Veränderungen in der Ästhetik werden eins zu eins sofort in die Konstruktion überführt. Somit wird der Patient direkt in die Konstruktion mit einbezogen. Neben dem Wandel zum „virtuellen Patienten“ durch Computerunterstützung sorgen die digitale Praxis und das digitale Labor für die lückenlose Vernetzung der Abläufe.

Digitale Technologien spielen eine immer größere Rolle in der modernen Implantologie. Zunächst wurden diese Techniken nur für die Diagnostik eingesetzt. Um komplexen Fällen mit einer hohen Anspruchshaltung gerecht zu werden, werden diese mittlerweile auch vermehrt in der präoperativen Planung verwendet und am Patienten mithilfe von exakten Bohrschablonen klinisch umgesetzt. Mithilfe einer virtuellen 3-D-Planung kann anhand der vorhandenen Knochenstruktur eine geeignete Implantatposition unter Berücksichtigung der bereits geplanten prothetischen Versorgung („Backward Planning“) gefunden werden (Abb. 7). Mögliche Indikationen für eine 3-D-Röntgen-diagnostik und navigationsgestützte Implantatinsertion finden sich beispielsweise in der S2k-Leitlinie des AWMF (AWMF, 2011) AWMF-Registernummer: 083-011:

- Deutliche anatomische Abweichungen (z. B.: Reduziertes transversales Knochenangebot)
- Bei zweifelhaftem Erfolg nach Augmentation
- Unsichere Darstellung anatomisch wichtiger Nachbarstrukturen in der 2-D-Diagnostik

- Vorerkrankungen oder Voroperationen
- Spezielle chirurgische und/oder prothetische Therapiekonzepte (z. B. Sofortversorgung)

Durch computergestützte Verfahren ist eine Präfabrizierung des provisorischen Zahnersatzes möglich. Die Aufbereitung des Implantatlagers sowie die Implantatinsertionen erfolgen durch die Bohrschablone. Diverse Systeme werden durch die Implantathersteller bereitgestellt. In den Bohrschablonen sind Implantatposition, -angulation und -tiefe festgelegt.

Ein Vergleich zwischen navigierten Verfahren und der Freihandmethode zeigte, dass die navigierten Verfahren eine signifikant höhere Präzision aufweisen (Sarmant, Sukovic, Clinthorne, 2003), (Nickenig, Eitner, 2010). Mithilfe von 3-D-Druck werden präzise Bohrschablonen (Abb. 8) mit individuellen Hülsen für die gesteuerte Implantation hergestellt.

Das Arbeitsmodell – Meistermodell

Bislang war die Modellherstellung im digitalen Workflow eine Lücke, die häufig



Abb. 8



Abb. 9



Abb. 10

Abb. 8: 3-D-Druck Bohrschablone, BEGO. – Abb. 9: Polyurethanmodell. – Abb. 10: Modell der Firma Stratasys mit Triple Jetting-Technologie.

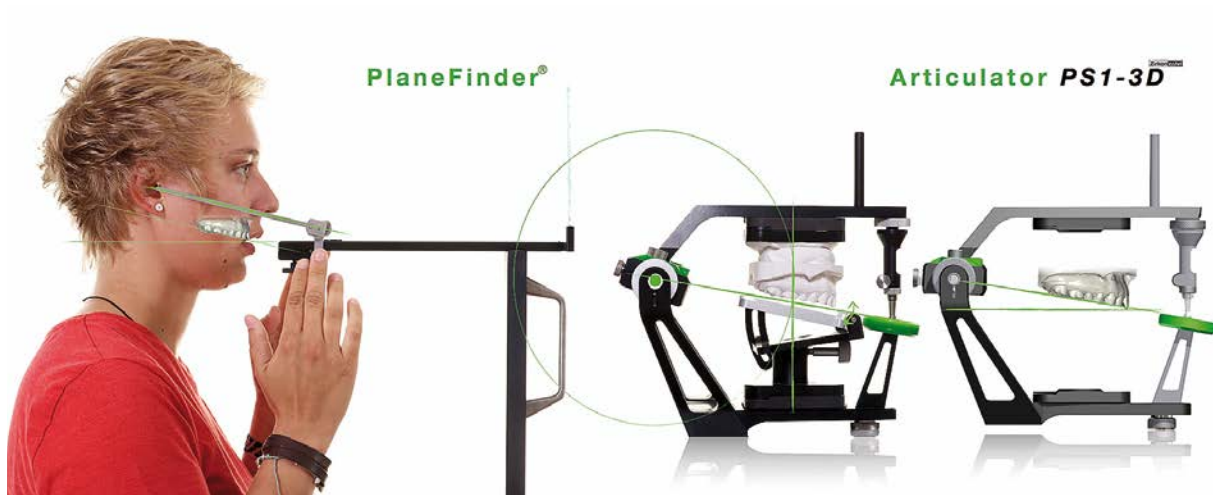


Abb. 11: PlaneSystem nach Udo Plaster.

nur über Umwege geschlossen werden konnte. Der 3-D-Druck ermöglicht nun aus Scan- oder Abformdaten aus der Praxis ein physisches Modell zu erstellen. Bisher wurde versucht Modelle mit einer Fünf-Achs-Fräsmaschine zu fertigen. Allerdings resultiert aus dem subtraktiven Verfahren ein vergleichsweise hoher Materialverbrauch. Hierbei werden die Modelle aus einem speziellen Gipsblank oder Polyurethan (Abb. 9) gefräst. Die wirtschaftlich überzeugendste Lösung ist der 3-D-Druck mit einem

Laborgerät, welches ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis bietet. Die meisten Verfahren arbeiten mit der DLP-Technologie (Digital Light Processing), dabei werden die einzelnen Schichten des Objektes (Software Slice-Modelle in Ebenen) mithilfe von UV-Licht auf die Oberfläche des flüssigen Materials projiziert. Vor allem die präzise Lichtsteuerung ermöglicht scharfe Kanten, insbesondere beim Präparationsrand. Abzuwarten bleibt allerdings noch, wie viele Modelle in einer bestimmten Zeit gedruckt

werden können und wie formstabil (dimensionsstabil, abriebfest) diese Modelle sind. Die Zeit für die Produktion korreliert dabei mit der Genauigkeit der Modelle. Während ein Modell schichtweise gedruckt wird, kann aber schon mit der Konstruktion begonnen werden. Die Aufbaurrate beträgt bei 50 µm Genauigkeit ca. 20 mm/h. Bei 100 µm sind dies 40 mm/h. Es können aber gleichzeitig mehrere Modelle gedruckt werden. Nach dem Drucken erfolgen eine Lichthärtung und eine Reinigung im Ethanol-



Abb. 12

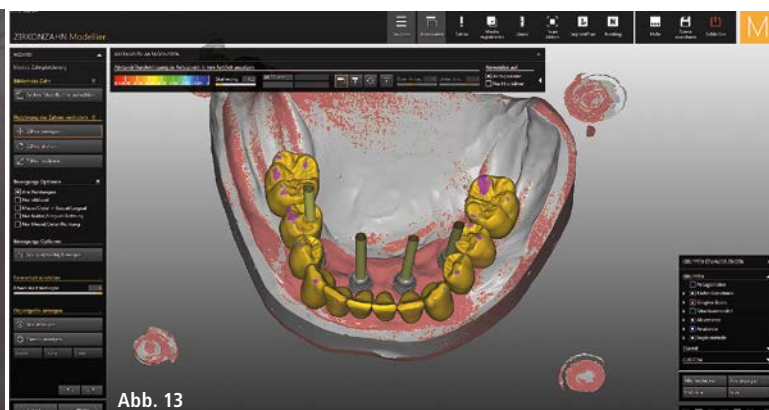


Abb. 13



Abb. 14



Abb. 15

Abb. 12: Virtuelles Wax-up nach Gesichtsscan. – Abb. 13: Monolithisches Zirkon. – Abb. 14: Konstruktion einer monolithischen Zirkonrestauration als All-on-four-Fall. – Abb. 15: Konstruktion mit Cut-Back.



Abb. 16: Fertige monolithische Zirkonarbeit mit vestibulärer Verblendung.

bad, dies beeinflusst die Genauigkeit und die Langzeitstabilität.

Eine andere Technik stellt die Triple Jetting-Technologie dar: Triple Jetting 3-D-Drucker arbeiten mit der fortschrittlichsten PolyJet-Technologie. Vergleichbar mit InkJet-Druck auf Papier, tragen PolyJet 3-D-Drucker feine Schichten aus flüssigem Photopolymer auf eine Bauplattform auf und härten diese mit UV-Licht aus. Die übereinander aufgetragenen Schichten formen ein 3-D-Bauteil bzw. einen Prototypen. Vollständig ausgehärtete Bauteile können direkt und ohne zusätzliche Nachbearbeitung verwendet werden. Gemeinsam mit den ausgewählten Materialien tragen Triple Jetting 3-D-Drucker auch ein gelartiges Stützmaterial auf, das während des Druckvorgangs den Aufbau von Überhängen und komplexen Geometrien ermöglicht. Nach der Fertigstellung kann das Gel einfach mit einem Wasserstrahl entfernt werden. Aus diesem Grund sind sehr dünne Wandstärken zu realisieren. Mit dieser Technik können eindrucksvolle Modelle in lebensechter Optik und Haptik hergestellt werden (Abb. 10). Hierbei kommen bis zu 600 Farben und verschiedene Glättungsgrade zum Einsatz.

Die Gingiva (Gingivamaske) kann in Farbe und Härte somit variiert werden.

Vorteil dieses Verfahrens ist, man kann gleichzeitig verschiedene Materialien mit jeweils unterschiedlichen Eigenschaften drucken.

Wie bekomme ich meine Funktionsebenen in den virtuellen Artikulator?

Das Ziel der Gesichtsbogenübertragung von Modellen ist heute das gleiche wie vor 60 Jahren: Man möchte das Oberkiefermodell passend zur terminalen Scharnierachse in den Artikulator schädelbezogen übertragen. Man bedient sich in der Regel hilfsweise gedachter Bezugslinien, wie der Camper'schen Ebene oder der Frankfurter Horizontalen sowie der sogenannten Patientenhorizontalen. Man nimmt eine dieser Bezugslinien und verbindet sie mit dem Oberkiefer des Patienten mithilfe eines Übertragungsbogens. Doch hierbei kann es trotz standardisierten Vorgehens zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Aus dem Alltag ist bekannt, dass es sehr vieler Einproben und Korrekturen bedarf, bis der Patient mit der funktionalen Gestaltung seines Zahnersatzes zufrieden ist. Grund hierfür sind unvollständige Informationen hinsichtlich des Oberkiefers, denn bei den gewohnten Vermessungsmethoden

suptraktive Verfahren

- Fräsen (Zerspanen)
- Schleifen
- Ultra Kurzpulslasern

additive Verfahren

- SLA Stereolithografie
- DLP Digital Light Processing
- 3-D Printing
- MJM Mult Jet Modeling
- FDM Fused Deposition Modeling
- SLS/SLM Selective Laser Sintern/Melting

Tab. 1: Fertigungsverfahren.

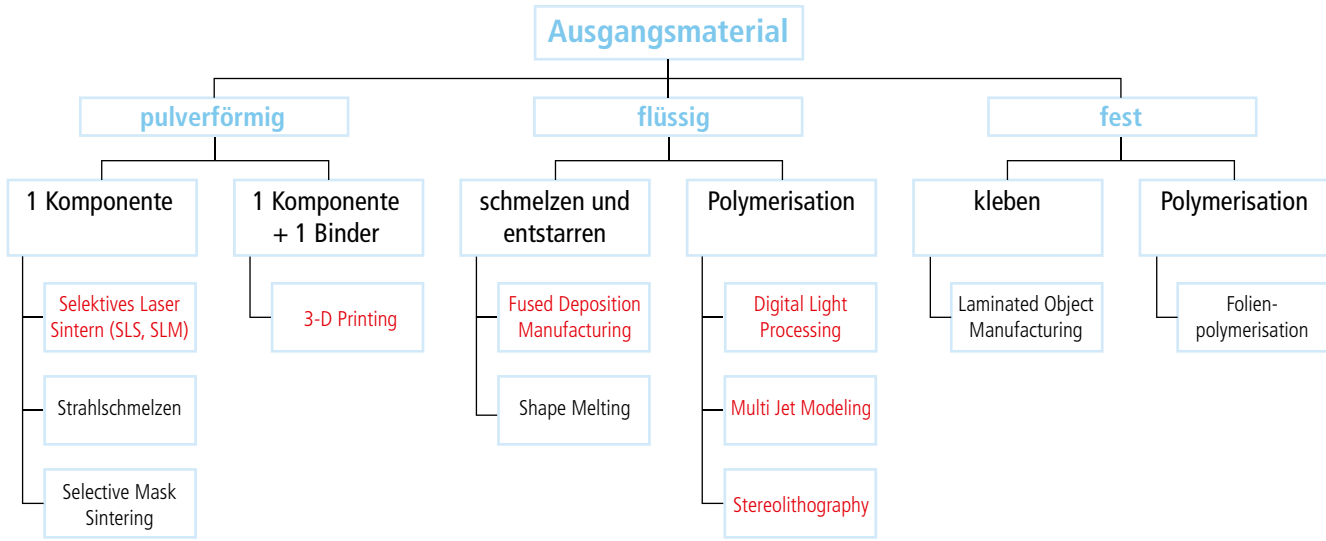


Abb.17: Additive Verfahren nach Kamm.

fehlen Bezugspunkte bzw. Bezugsebenen, mit deren Hilfe die natürliche Lage des Oberkiefers registriert und anschließend in den Artikulator übertragen werden kann (Plaster 2014). Welche Daten benötigt die digitale Zahntechnik: Wichtig sind Lage des OK, die Mittellinie, das Kauzentrum und die Okklusionsebenen. Daten über die Lage des Oberkiefers sind aber Voraussetzung dafür, die Mittellinie und die Okklusionsebene am Patienten feststellen und anschließend bei der Herstellung des Zahnersatzes berücksichtigen zu können. Diese beiden Parameter benötigt der Zahntechniker, um die Zahnrekonstruktionen so im Kiefer zu positionieren, dass die natürliche Idealsituation imitiert werden kann und der Zahnersatz nicht zu asymmetrischen Belastungen im Körper führt. Nach dem Prinzip des PlaneSys-

tems (Abb. 11) von Udo Plaster (2012 bis 2015) können neue Gesichtsebenen als Ausrichtungspunkte zur Modellübertragung berücksichtigt werden. Hiermit hat man erstmalig die Möglichkeit nach Funktionsanalyse okklusionsebenengerecht am Computer patientengerecht zu arbeiten. Dieser neuartige Ansatz zum Abgreifen patientenindividueller Informationen wie Natural Head Position (NHP) und Ala-Tragus-Ebene zur exakten Bestimmung von Okklusionsebene, eventueller natürlicher Asymmetrien, sowie der ästhetischen Position des Patienten erhöht die Qualität der Rekonstruktion. Mit dem Gesichtsscan kann mithilfe der Transferfork das Gesicht mit den Modellen schädeltgerecht zusammengeführt werden (Abb. 12) und so die Zahnrestauration an ästhetische Er-

fordernisse und die Physiognomie des Gesichtes angepasst werden. Ein virtuelles Wax-up kann gefertigt werden und mit dem Behandler und Patienten fotorealistisch mit allen Bezugsebenen besprochen werden. Eine Veränderung der Ästhetik wird sofort in der Software auf die Konstruktion umgerechnet. Das virtuelle Wax-up kann bei Bedarf in ein Mock-up umgesetzt und aus Kunststoff gefräst werden.

CAD-Konstruktion

Wir sind heute in der Lage, den kompletten Workflow von der Planung (Abb. 13) bis zur fertigen monolithischen Rekonstruktion (Abb. 14) komplett digital auszuführen. Hierzu gibt es von verschiedenen Herstellern entsprechende Software.

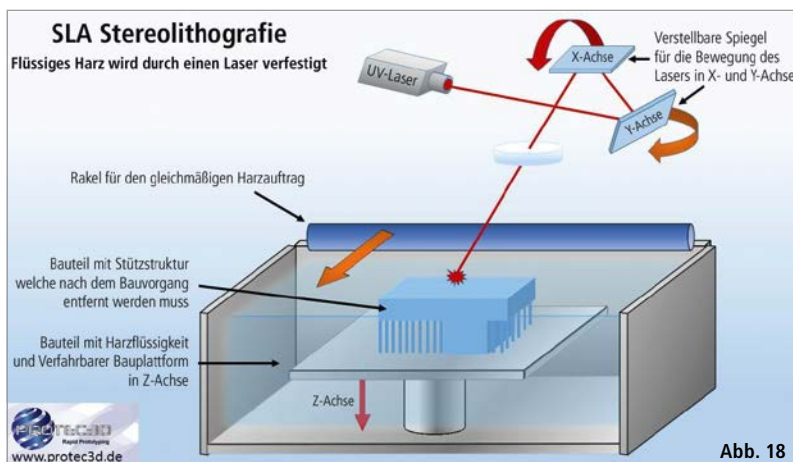


Abb. 18

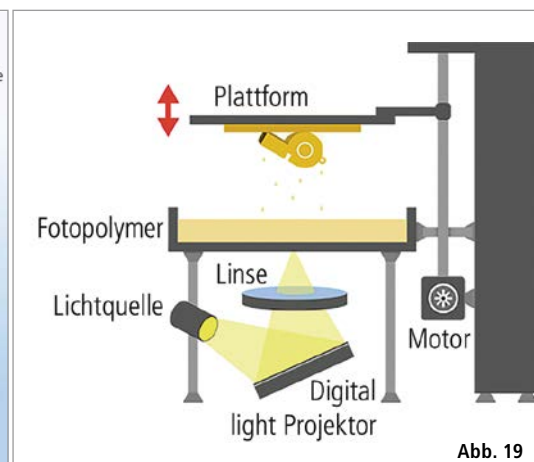


Abb. 19

Abb. 18: Stereolithografie. – Abb. 19: Digital Light Processing – DLP-Verfahren.

Aufgrund unserer praxisspezifischen Ausrichtung wurden bei uns im Eigenlabor im letzten Jahr zu über 80 Prozent monolithische Materialien verarbeitet. Wir verwendeten für unsere Full-Arch-Restaurationen vollanatomische Kronen aus hochtransluzentem Zirkon, das Multilayer-Verfahren, Lithiumdisilikate, zirkonverstärkte Lithiumsilikate und Hochleistungspolymere. Um funktionelle Probleme auszuschließen, haben wir uns die Möglichkeiten, die die CAD/CAM-Technologie bietet, zunutze gemacht, und fertigen standardisiert bei jeder Arbeit einen Prototypen aus Kunststoff an, der vom Patienten mehrere Wochen Probe getragen werden kann. Somit kann der Prototyp auch als Kunststoffprovisorium verwendet werden. Um die Arbeit mit Keramik verblenden zu können, werden vestibuläre Bereiche der Front- und Seitenzahnbereiche in der Konstruktion leicht reduziert. Dieses „Cut-back“ (Abb.15) kann je nach Vorliebe entweder manuell oder virtuell in der Modellersoftware erfolgen. Heute ist es aber auch möglich, komplett mit monolithischen Materialien zu arbeiten und vestibulär zu verblenden (Abb. 16).

Fertigung (subtraktive und additive Verfahren)

Die Restaurationen werden bei den indirekten subtraktiven Verfahren (Tab. 2) durch einen mehrstufigen Prozess hergestellt. Das am häufigsten benutzte Fertigungsverfahren bei der Herstellung zahnmedizinischer Restaurationen ist heute immer noch das subtraktive Herausarbeiten der Restauration aus einem teilgesinterten keramischen Block mit anschließender Nachbearbeitung (Sintern). Dabei werden aufgrund der zuvor erstellten Konstruktionsdaten (CAD-Daten) durch das CAM-Modul Fräsbahnen für eine CNC-Maschine berechnet. Das CAM-Modul erlaubt die Programmierung der notwendigen technologischen Parameter, wie die Frässtrategie, der benutzten Werkzeuge (Fräsen) und der Stellfaktoren (Schnitttiefe, Vorschub, Bearbeitungsrichtung, Drehzahl usw.). Diese Ein-



Abb. 20



Abb. 21

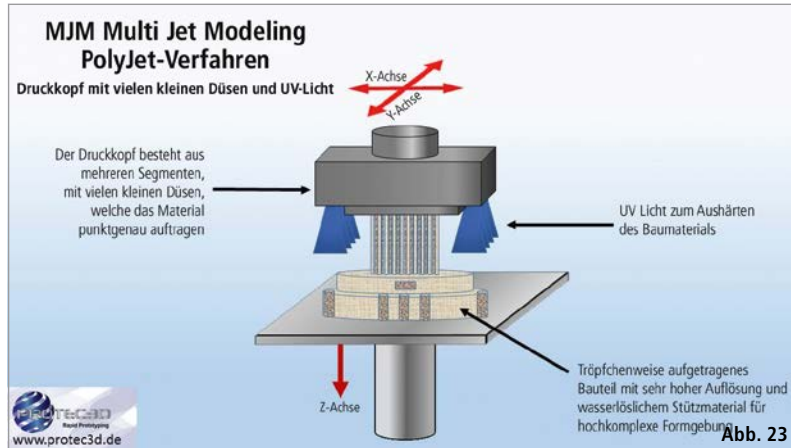
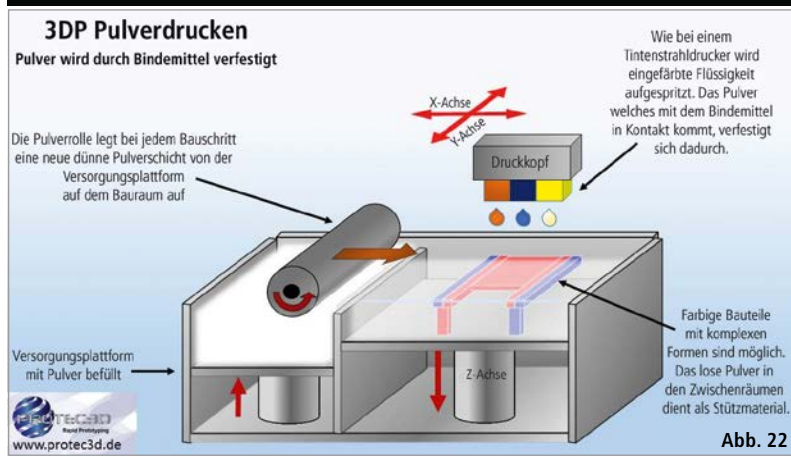


Abb. 20: Beispiele DLP-Verfahren von BEGO. – Abb. 21: Beispiele DLP-Verfahren der Firma SHERA. – Abb. 22: 3-D-Druck Pulververfahren. – Abb. 23: PolyJet-Verfahren.



Abb. 24: Poly-Jet-Drucker Stratasys Objet260 Dental Selection.

griffsgrößen bestimmen maßgeblich die Bearbeitung des Werkstoffes. Das CAM-Modul generiert vor Fräsbeginn den Weg des Fräasers bei der Bearbeitung und die Fräsbahnen. Die Bearbeitung durch Fräsen kann drei- oder fünfachsiger erfolgen. Beim Fünfachsenprinzip wird entweder das Werkzeug oder das Werkstück in der Achse angestellt, die Bearbeitung erfolgt weiterhin dreiachsiger. Dies ist insbesondere bei komplexen Strukturen wie der Okklusion entscheidend. Das subtraktive Fertigen gliedert sich in der Regel in das Schruppen und das Schlichten. Beim Schruppen wird ein großes Materialvolumen schnell zerspannt (großes Zeitspanvolumen) und die Kontur grob gefräst. Das Schlichten fertigt die Endkontur mit einer möglichst hohen Genauigkeit und Qualität. Das Finishing der Arbeit, die perfekte meisterliche funktionale und ästhetische Fertigstellung, erfolgt dann individuell von Zahntechnikerhand im Dentallabor. Neben den subtraktiven Verfahren nehmen die generativen (additiven) Verfahren in Zukunft einen immer größeren Stellenwert ein. Einteilung der generativen Fertigungsverfahren:

Die heute bekannten additiven Fertigungsverfahren können nach den beiden Gesichtspunkten Ausgangsmaterial und Formgebung eingeteilt werden (Abb. 17).

Für die Dentalbranche sind die rot markierten Verfahren von Bedeutung. Bei der Additiven Fertigung teilt sich das Fertigungsverfahren in die Bereiche Bau-

prozessvorbereitung, hierbei wird eine Konstruktionsdatei (STL) erzeugt. Es werden notwendige Stützstrukturen generiert und das Objekt in Scheiben geslicet. Dann beginnt der eigentliche Bauprozess, die physikalische Herstellung. Beim Post-Processing wird das Bauteil nachbearbeitet (Lichthärtung und eine Reinigung im Ethanolbad).

Stereolithografie SLA

Bei diesem Verfahren wird die CAD-3-D-Konstruktion in einem Kunststoffbad (Photopolymer) mit höhenverstellbarer Plattform hergestellt. Dabei wird ein UV-Laser über bewegliche Spiegel auf das Photopolymer geleitet und härtet somit Schicht für Schicht aus. Die Plattform wird jeweils um die nächste Schichtdicke (z-Achse) gesenkt. Ein Wischer/eine Rakel verteilt das Photopolymer gleichmäßig auf der

Oberfläche und glättet diese. Im Anschluss werden die Stützstrukturen entfernt (Abb. 18).

Vorteile

- sehr detaillierte und feine Oberfläche
- mechanisch teilweise belastbar
- hohe Fertigungsgenauigkeit
- komplexeste Formgebung möglich

Nachteile

- nur UV-härtbare Kunststoffe/Harze verwendbar
- hohe Fertigungskosten
- nur einfarbige Modelle sind möglich
- langsamer Fertigungsprozess
- begrenzt thermisch belastbar

Material: Kunststoffe und Harze welche unter UV-Licht bzw. Hitzeeinwirkung aushärten.

Digital Light Processing – DLP-Verfahren

Das Prinzip ist ähnlich wie bei der Stereolithografie, nur dient als Licht-

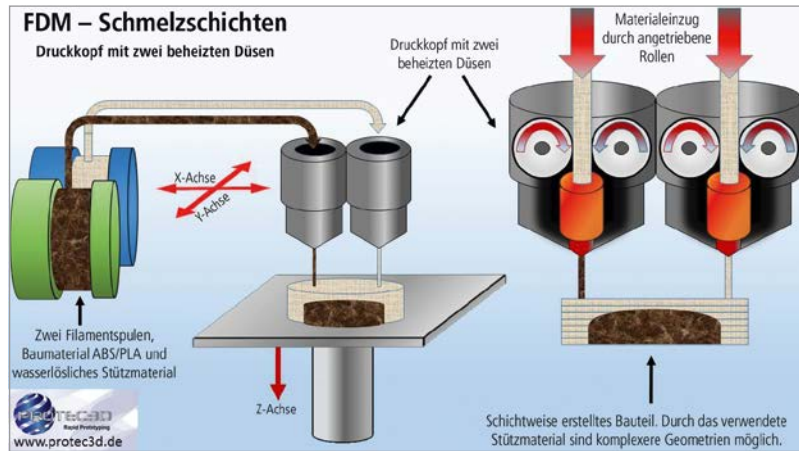


Abb. 25: FDM-Verfahren.

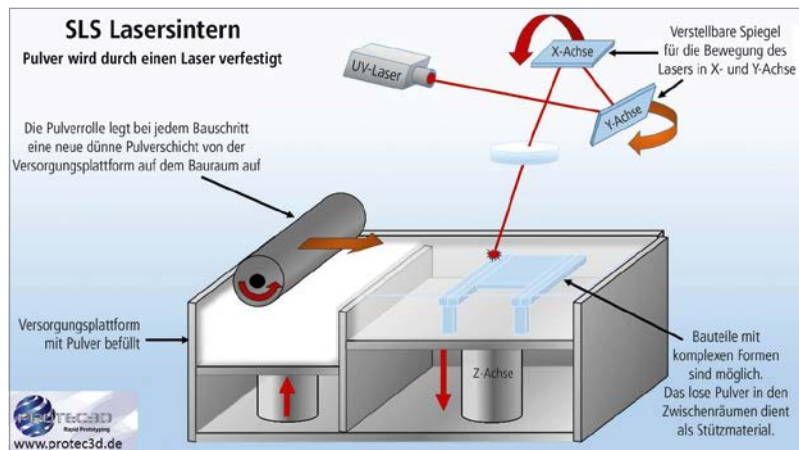


Abb. 26: Lasersintern.



Abb. 27

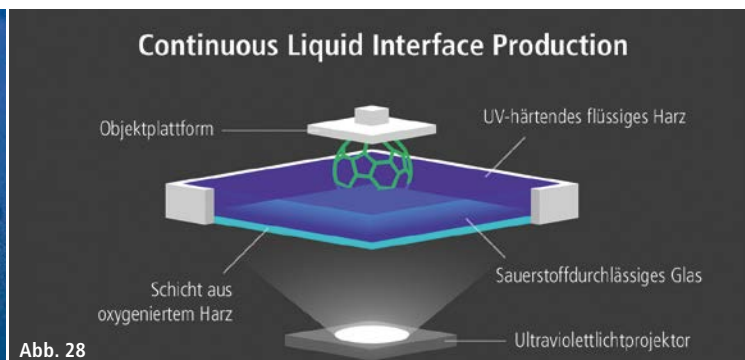


Abb. 28

Abb. 27: SLM Laser-Melting. – Abb. 28: CLIP-Verfahren.

quelle ein DLP-Projektor (Beamer). Bei diesem Druckverfahren wird per Beamer Licht auf eine lichtempfindliche Kunststofflösung geworfen, die bei Kontakt mit UV-Strahlung oder Licht aushärtet. Nach und nach wird so Schicht für Schicht ein Objekt geschaffen, das sich aus dem Behälter mit der Kunststofflösung erhebt. Genau an der Stelle an der das Licht auf die flüssige Kunststofflösung trifft, härtet der Kunststoff also aus (Abb. 19). Die Vorteile liegen auf der Hand: Die Qualität übertrifft alle anderen gängigen 3-D-Drucke. Es können aber vor allen Dingen glatte Oberflächen erschaffen werden, was bei den meisten anderen Techniken nicht, oder schlecht realisierbar ist (Abb. 20–21).

3DP Pulverdruck

Als Grundlage dient eine dünne Pulverschicht, die an bestimmten Stellen durch ein Bindemittel verfestigt wird. Bevorzugt werden hier Anschauungsmodelle hergestellt. Das ist die einzige Druckmethode mit der mehrfarbige hochauflösende Modelle ausgedruckt werden können. Durch das Pulverdrucken sind komplexe Formen möglich. Das nicht verfestigte Pulver, welches sich um das Bauteil herum befindet, dient als Stützmaterial. Nach dem Druckprozess kann dieses problemlos entfernt und wiederverwendet werden. Das Bauteil, welches nach dem Druckprozess noch sehr empfindlich ist, wird mit einem weiteren Füllstoff behandelt, welcher die schlussendlichen mechanischen Eigenschaften verleiht (Abb. 22). Die Oberfläche ist leicht rau, ähnlich wie sandgestrahlte Metalle.

PolyJet-Verfahren (Multi Jet Modeling – MJM)

Bei der PolyJet-Technologie (Abb. 23) werden unterschiedliche Photopolymer-Materialien durch mehrere Druckköpfe in sehr dünnen Schichten aufgetragen, ähnlich wie ein Tintenstrahldrucker. Die Zwischenräume werden automatisch mit einem wasserlöslichen Stützmaterial gefüllt. Jede Photopolymer-Schicht wird direkt nach dem Auftragen durch UV-Licht gehärtet. Dadurch erhalten die Modelle ihre Stabilität und können somit leicht entnommen werden. Das Stützmaterial kann nach dem Druckvorgang, leicht mit einem Wasserstrahl entfernt werden. Mit dieser Technologie sind hochpräzise, glatte Modelle möglich. Es können einfarbige, transparente und auch gummiartige Bauteile mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften in einem Ausdruck gefertigt werden. Durch nachträgliches Härten unter UV-Licht können die mechanischen Eigenschaften weiter verändert werden.

Fused Deposition Modeling – FDM

Ein Kunststoffdraht wird geschmolzen und durch eine Düse an den gewünschten Stellen schichtweise aufgetragen. Dort härtet das Material aus und ein Kunststoffteil wird erzeugt. Da das Bauteil während des Druckprozesses langsam aushärtet, muss auch eine Stützstruktur durch den Drucker (zweite Düse) aufgebaut werden. Dieses Stützmaterial muss nach dem Druckprozess manuell entfernt und dann entsorgt werden. Die Nacharbeit an den Bauteilen ist je nach Form des Bauteils mehr oder weniger aufwendig. Es können einfache, belastbare Modelle gefertigt werden. Die Oberfläche ist leicht rillig strukturiert.

Selektives Lasersintern/-Melting SLS/SLM

Basis ist ein sehr feines Pulver (Kunststoff oder Metall). Im Gegensatz zum Pulverdruck wird hier das Material nicht durch ein Bindemittel verbunden, sondern mithilfe eines Laserstrahls verschmolzen. Die Bauteile haben hier eine leicht raue Oberfläche (wirken wie sandgestrahlt). Sie sind direkt nach dem Fertigungsprozess stabil und müssen kaum nachbearbeitet werden. Die Modelle können nur einfarbig hergestellt werden.

Zukunft: CLIP-Verfahren: „Continuous Liquid Interface Production“ (CLIP) Technologie

Im Gegensatz zu den anderen Schichtverfahren, können mit der CLIP-Technologie Objekte ohne sichtbare Schichten hergestellt werden. Die Photopolymerisation des flüssigen Polymers wird mittels Abstimmung von UV-Licht (Aushärtung) und Sauerstoff (verhindert Aushärtung) gesteuert. Das Verfahren ist 25 bis 100 Mal schneller und wird somit den 3-D-Druck wirtschaftlicher machen.

Kontakt

Prof. Dr. med. dent. Karsten Kamm

Studiengangsleiter Digitale Dentale Technologie
praxisHochschule Köln
Neusser Straße 99
50670 Köln
k.kamm@praxishochschule.de

Dr. med. dent. Susann Kamm

Hans-Bredow-Straße 24
76530 Baden-Baden
Tel.: 07221 391020
info@z-b-b.de
www.z-b-b.de