

Stereolithographie¹ als generatives Verfahren in der Zahntechnik

¹ Stereolithographie ist ein eingetragenes Warenzeichen von 3D Systems, Valencia, CA, USA

S. Witkowski^a und R. Lange^b

^a ZTM, Laborleiter, Abteilung Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik (Ärztlicher Direktor: Prof. Dr. J. R. Strub)

^b Dipl. Ing. Chemie, DeltaMed GmbH

Schlüsselwörter:

CAD/CAM, Stereolithographie, Gusstechnik, Schienenherstellung, Perfactory

Korrespondenzadresse:

Siegbert Witkowski, ZTM, Laborleiter
Abteilung Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
Hugstetterstr. 55
79106 Freiburg
Tel. 0761-270 – 4979
Fax 0761-270 – 4824
E-Mail: witkowski@zmk2.ukl.uni-freiburg.de

(Texte français voir page 879)

Mit der Verfügbarkeit von CAD (Computer-Aided-Design)-Konstruktionsverfahren in der Zahntechnik werden geeignete CAM (Computer-Aided-Manufacturing)-Anlagen für die eigentliche Herstellung des Zahnersatzes aus unterschiedlichen für Zahnersatz geeigneten Materialien nötig. Neben dem bereits eingeführten Fräsen und Schleifen mit CAM-Anlagen werden weitere Verfahren, die in der Industrie eingesetzt werden, für die Zahntechnik geprüft und falls erforderlich für deren Bedürfnisse angepasst. Dies gilt für die in dem «schnellen Prototypenbau» (Rapid Prototyping, RP) gebräuchliche Technologie der sog. Stereolithographie (SL). Als spezielles System steht hier die Perfactory® (DeltaMed GmbH, Friedberg). Mit Hilfe eines lichtempfindlichen Kunststoffes, der mit einer Licht-Maskenprojektion ausgehärtet wird, werden Strukturen als Vorlage für die Feigusstechnik oder als Endprodukt z. B. für Schienen und Platzhalter hergestellt. Das Verfahren erhält seine Berechtigung bei umfangreichen Zahnersatzkonstruktionen, bei denen durch eine CAD-Konstruktion und ein CAM-Verfahren die Modellationszeiten in Wachs ersetzt und die notwendige Gesamtarbeitszeit deutlich reduziert werden kann. Das hier vorgestellte Verfahren soll die Gusstechnik durch anforderungsgerechte CAD- und CAM-Technologien rationalisieren. Weitere Anwendungen sind mit der Perfactory in der Entwicklung.

Baubeispiele, die mit der Perfactory® hergestellt wurden. Die Vollkronen wurden auf den Stützen, die als Baubasis dienen, aufgebaut. Die Stützen werden in einem weiteren Arbeitsprozess entfernt (Post-processing).

Exemple d'une maquette de couronne à recouvrement complet fabriquée par l'unité Perfactory® (extrados et intrados). A noter la série d'étais supportant toute la circonférence marginale de la couronne; ces supports seront enlevés dans une étape ultérieure de finition («post-processing»).

Einleitung

Mit der Einführung von CAD (Computer-Aided-Design)-Arbeitsplätzen in der Zahntechnik ist es möglich geworden, unterschiedliche Fertigungstechnologien als CAM (Computer-Aided-Manufacturing)-Komponenten in einer Prozesskette anzusteuern und zu nutzen. Diese Anlagen sind in der Zahn-

technik in den meisten Fällen geschlossene CAD/CAM-Systeme, bei denen alle Komponenten wie Scanner, CAD, CAM und das jeweilige Material aufeinander abgestimmt sind. Die verfügbaren CAM-Verfahren für eine zahntechnische Applikation lassen sich in drei Bereiche unterscheiden (WITKOWSKI 2002a) (Abb. 1):

1. Subtraktiv aus einem Materialblock

Die gebräuchlichste Fertigungsart für Zahnersatz ist subtraktiv mittels Fräsen und Schleifen mit 3–6-achsigen CAM-Anlagen aus Materialblöcken (LUTHARDT et al. 2001a, b; WITKOWSKI 2001). Hier kommen unterschiedliche Materialien für eine Gerüsterstellung zum Einsatz. Vollkronen mit einer Kaufläche sind zurzeit aus Silikatkeramiken, Edelmetalllegierungen und Titan möglich. Im Procera-AllTitan-System (Nobel Biocare, Köln) (ANDERSSON et al. 1998) findet eine Kombination aus Fräsen und der Funkenerosion zum Herausarbeiten von Gerüsten aus Titanstangen statt.

2. Additiv auf einem Stumpf aufbauen

Zwei CAD/CAM-Systeme generieren das Material additiv auf einem Stumpf. Bei dem Procera-AllCeram-System (Nobel Biocare, Köln) (ANDERSSON & ODÉN 1993) erfolgt dies auf einem kopierten und vergrößerten Metallstumpf des Gipsstumpfes, beim EPC 2019, Wöl-Dent-System direkt auf dem Gipsstumpf. Additiv arbeitende Technologien wie die Elektrophorese (Wöl-Dent, Ludwigshafen) wurden für den Einsatz in der Zahntechnik angepasst und eingeführt. Hierbei wird das zu entstehende Kronen- und Brückengerüst aus einem keramischen Material (In-Ceram Alumina, In-Ceram Zirconia, Vita, Bad Säckingen) aufgebaut (WOLZ 2002).

3. Generativ als Freiform in Schichten aufbauen

Das erste Verfahren dieser Art in der Zahntechnik ist das Wachsdrucken (WITKOWSKI 2002c), welches nach dem «Ink-Jet»-Prinzip (Thermo Jet™, 3D Systems Valencia, CA, USA) arbeitet. Hierbei werden maschinell kleine Tropfen eines wachsartigen Thermoplasts zu Vollkronen und Gerüsten als Halbzeug für die dentale Gusstechnik generiert. Dieses Gerät wird seit 2002 von Cynovad (F-Dijon) unter dem Namen WaxPro® für den Dentalbereich vertrieben und in firmeneigenen Produktionsstationen als Dienstleistung eingesetzt. Bei einem anderen Verfahren, einer Entwicklung aus dem Bereich des «Selektiven Laser-Sintern» (SLS) (GEBHARDT 2000b) werden serienidentische und sinterfähige Pulverwerkstoffe von unterschiedlicher Korngrösse schichtweise zu 3D-Formen aufgebaut. Jede aufgetragene Pulverschicht wird hierbei mittels eines Laserstrahls diffusionsgesteuert gesintert (Medifactory, Bego Medical AG, Bremen) (DOLABDJIAN & STRIETZEL 2000; STRIETZEL 2001). Im Medifactory-System werden so Gerüste für fest sitzenden Zahnersatz aus Titan und Edel- und Nichtedelmetalllegierungen in einem Produktionszentrum hergestellt.

Eine Technologie aus dem Bereich des «schnellen Prototypenbaues» (Rapid Prototyping, RP), die Stereolithographie (SL) (GEBHARDT 2000a), wird derzeit in einer speziellen Anlage zur Anwendungsreife für die Zahntechnik gebracht. Bei dieser Technik werden Bauteile (dentale Restaurationen) aus lichtempfindlichem Kunststoff aufgebaut und können per konventioneller Gusstechnik in jede beliebige Legierung umgesetzt werden. Ausserdem können z.B. Schienen und Platzhalter für diagnostische oder definitive Lösungen auf der Grundlage einer CAD-Konstruktion hergestellt werden (BANNUSCHER & BANNUSCHER 2000).

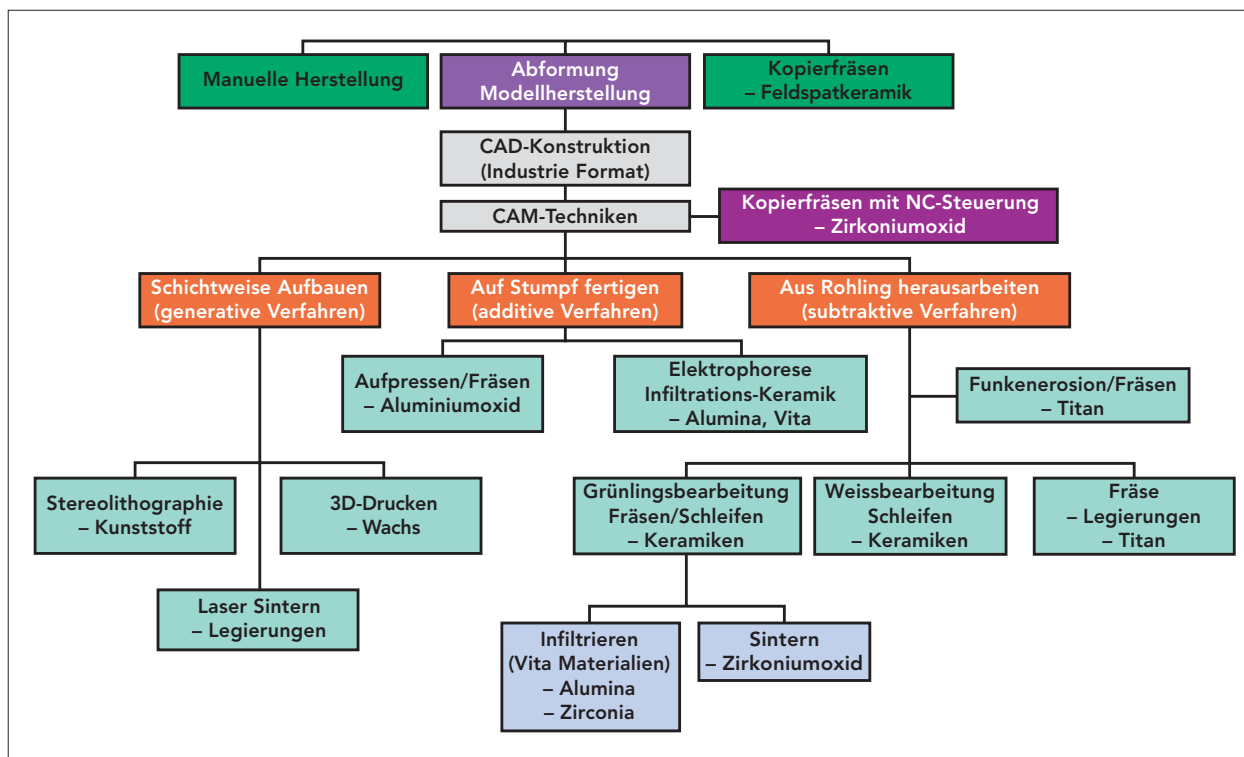


Abb. 1 Die Grafik gibt einen Überblick über den derzeitigen Stand der CAD/CAM-Technologie in der Zahntechnik. Die CAM-Systeme sind in 3 Hauptgruppen nach Art der Technik aufgeteilt: 1. Subtraktiv aus einem Materialblock 2. Additiv auf einen Stumpf aufbauend 3. Generativ in Schichten als Freiform aufbauend.

SCHER 2. November 2002) (Abb. 2 bis 5). Das Ausgangsmaterial ist ein flüssiger Kunststoff, der durch einen Laserstrahl oder eine Lichtprojektion hochpräzise in Schichten auspolymerisiert wird. Die Stereolithographie basiert demnach auf einer Kombination aus CAD, Polymerchemie und Belichtungssystem. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die Entstehung und Funktionsweise der SL-Technologie und stellt den derzeitigen Entwicklungsstand der SL-Anlage Perfactory® (DeltaMed GmbH, Friedberg) vor.

Die Entstehung und Weiterentwicklung der Stereolithographie

Die Stereolithographie ist der Urvater aller industriell angebotenen RP-Verfahren und repräsentiert mit dem Stand von 1998 mit weltweit 1735 verkauften Anlagen die meisten industriellen Applikationen (WOHLER 2002). Der Grundgedanke dieser Technologie wurde vom Japaner H. Kodama (KODAMA 1981) formuliert. Im Jahre 1984 erhielt C. Hull ein Patent (HULL 1986) über das Verfestigen von flüssigem Monomer durch Polymerisation und entwickelte den «Stereolithography-Apparatus»

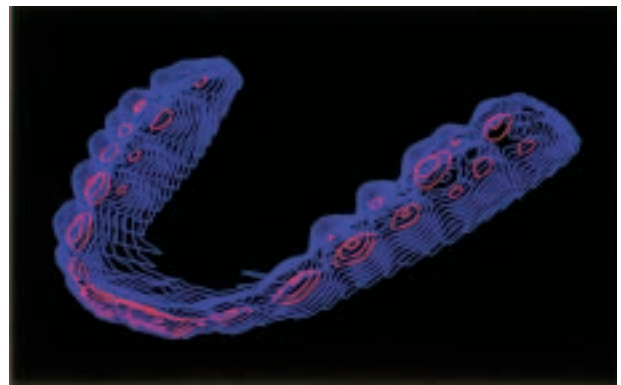


Abb. 3 Netzdarstellung einer digitalen Aufbissschiene. Die Grundlage für ein individuelles okklusales Relief ist eine CAD-Konstruktion (R. Bannuscher ZTM, Workstation, Medical Solutions, Essen).

Fig. 3 Représentation filaire d'une gouttière occlusale conçue par technique numérique. Une construction CAO sert de base pour la création du relief occlusal individuel (R. Bannuscher, ZTM, Workstation, Medical Solutions, Essen, Allemagne).

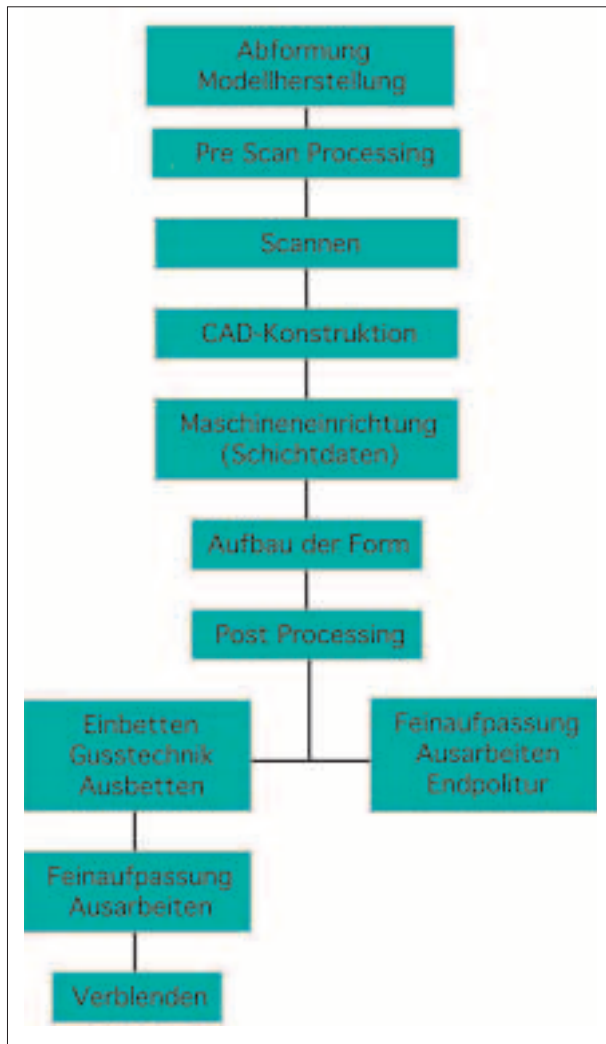


Abb. 2 Die Prozesskette und Anwendung der Stereolithographie in der Zahntechnik. Es können Halbzeuge für die Gusstechnik und Endprodukte aus Kunststoff angefertigt werden.



Abb. 4 Eine Aufbissschiene unter Anwendung der Stereolithographie in der Perfactory-Anlage. Die Schienen werden in diesem Fall mit der Okklusionsebene im rechten Winkel zur Bauebene generiert.

Fig. 4 Fabrication d'une gouttière occlusale à l'aide de l'installation de stéréolithographie Perfactory. Dans ce cas, le plan d'occlusion des gouttières est placé perpendiculairement au plan de construction.

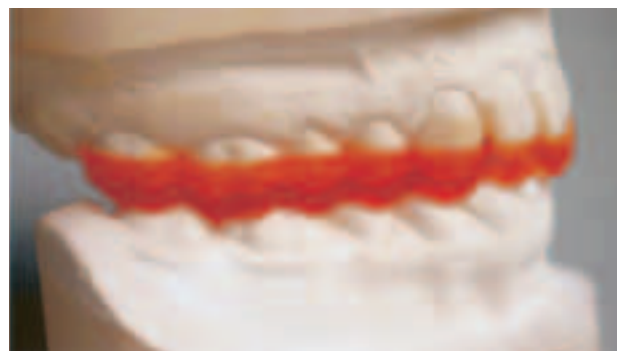


Abb. 5 Aufbissschiene zur okklusalen Kontrolle auf den Arbeitsmodellen im Artikulator.

Fig. 5 Gouttière placée sur les modèles de travail pour le contrôle de l'occlusion.

(Abb. 6). Er gründete 1986 die Fa. 3D-Systems, die 1987 die Anlage kommerziell verfügbar machte. Zur gleichen Zeit entwickelte die Fa. EOS (München) das Verfahren der «Stereografie», das ähnlich funktionierte. Beide Begriffe wurden als Markenzeichen eingetragen. 1997 wurde die Produktlinie der Stereografie von EOS von 3D-Systems aufgekauft und eingestellt. 3D-Systems verfolgte intensiv den Bereich des RP weiter und entwickelte einen Wachsplotter (ThermoJet™), der seit 1997 erhältlich ist.

Ein SL-Verfahren, das ohne Giessform oder Werkzeuge generativ dreidimensionale Formteile nach Vorlage einer CAD-Konstruktion herstellt, wurde von der Fa. DeltaMed im Jahre 1996 aufgegriffen. Die grundlegende Idee, einen lichthärtenden Kunststoff nicht mit einem punktförmigen Laserstrahl schichtweise auszuhärten, sondern über die Belichtung mit einer LCD-Maske, stammte vom Forschungszentrum Informatik (Mikro-Photoverfestigung mittels LCD-Maskentechnik. Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie. Träger: VDI/VDE. Förderungsprogramm Mikrosystemtechnik, 1994–1999) und wurde in einem gemeinsamen Forschungsprojekt zu einer Referenzanlage für die Herstellung von Mikroteilen entwickelt. Die Fa. Envisiontec (Marl) übernahm die Plattformfunktion für die Systementwicklung und Vermarktung. Die DeltaMed GmbH ist für die gesamte Materialentwicklung und Vermarktung der Perfactory® für dentale Anwendungen verantwortlich. Grundlage der Entwicklungstätigkeit ist die Erfahrung bei der Entwicklung und Herstellung lichthärtbarer restaurativer Dentalkunststoffe, wie des Renamel-System (Cosmedent, Chicago, IL, USA) und des Bella-Forte-Systems (Tanaka, Bad Homburg). Bisherige Industriesysteme zeichnen sich zwar durch eine hohe Produktivität aus, sind aber bezüglich ihrer Präzision und der Stützenproblematik für die Zahntechnik verbesserungsbedürftig. Neu an der hier vorgestellten Technik von DeltaMed sind der Einsatz eines

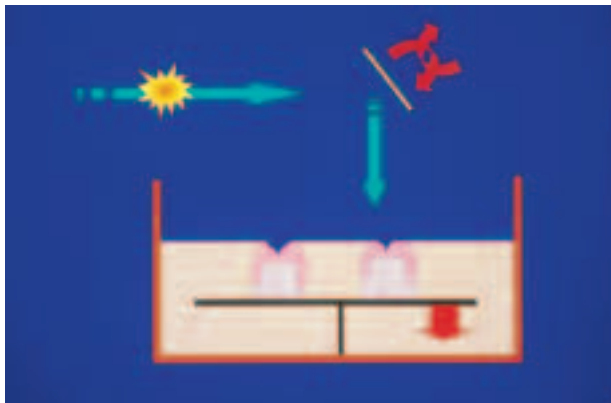


Abb. 6 Das Arbeitsprinzip der Stereolithographie mit einem Laserstrahl zur Aushärtung des lichthärtenden Kunststoffes. Schichtweise werden zuerst die Stützen und dann das Objekt aufgebaut. Die Bauplattform senkt sich um eine Schichtstärke, bevor es zu einer erneuten Aushärtung mit dem Laser kommt. Durch das schichtweise Absenken wird das bereits aufgebaute Objekt mit einer Schicht Flüssigkeit bedeckt.

Fig. 6 Principe de la stéréolithographie utilisant un faisceau laser pour la polymérisation de la résine photo-sensible. Par couches successives, l'installation crée d'abord les éléments de support et ensuite l'objet lui-même. Avant chaque nouvelle étape de polymérisation, la plate-forme est immergée d'un cran correspondant à la couche qui vient d'être polymérisée. De cette façon, l'objet déjà créé est chaque fois enrobé d'une nouvelle couche de résine liquide.

ausbrennbaren Kunststoffes, die besonders feine Auflösung der SL-Anlage (Perfactory®) und die damit einhergehende Baugenauigkeit der Teile (Abb. 7 und 8).

Die Stereolithographie in der Zahnmedizin und Medizin

Die SL-Technologie ist in die Zahnheilkunde bereits eingezogen. In der Kiefer- und Gesichtschirurgie werden Skelettmodelle des Schädels (STOCKER et al. 1992) für eine verbesserte Ope-



Abb. 7 Die Stereolithographie-Anlage Perfactory® (DeltaMed GmbH, Friedberg).

Fig. 7 Vue d'ensemble de l'installation de stéréolithographie Perfactory® (DeltaMed GmbH, Friedberg, Allemagne).

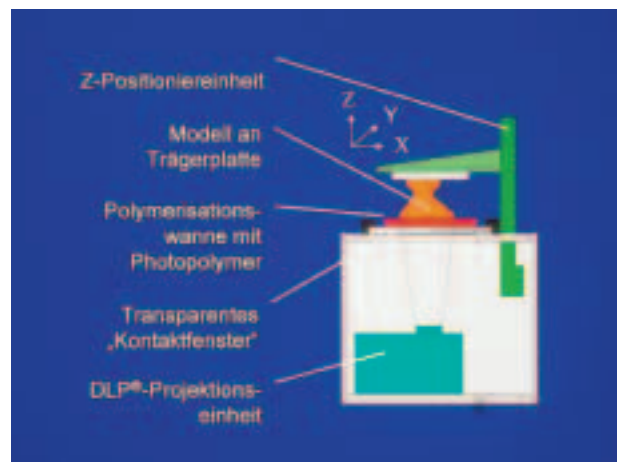


Abb. 8 Aufbau der Perfactory®-Anlage im Querschnitt.

rationsplanung (WOLF et al. 1993), Bohrschablonen für die Implantologie (BILL et al. 1993) und Vermessung bei Gesichtssymmetrien (Z'GRAGGEN et al. 2002), von erhobenen Computertomogramm(CT)-Daten, erstellt. Dieses Verfahren ermöglicht im Gegensatz zu einer Frästechnik die Anlage von geschlossenen Hohlräumen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,25$ mm (WOLF et al. 1993). Seit Mitte 1999 verwendet die Fa. Aligen-Technology (Santa Clara, CA, USA) für die Herstellung von Tiefziehschienen für die Kieferorthopädie (Invisalign™) Modelle, die mittels SL-Technik (SLA 7000, 3D-Systems, Valencia, CA, USA) aufgebaut werden (MUHAMMAD & HUAFENG 2001). MORRIS et al. (MORRIS et al. 2000) berichtete über erste Versuche, diagnostische Schablonen für die orale Implantologie mittels SL-Technik in Form von Zahnprothesen anzufertigen. In einem Forschungsprojekt an der Catholic University of Leuven, Belgien, werden mit Hilfe eines eigens entwickelten Softwareprogrammes (LITORIM) und der SL-Technik Bohrschablonen für die Implantologie angefertigt, die ihre Passgenauigkeit auf dem Knochen finden (VAN STEENBERGHE et al. 2002). Auf der Grundlage von 2 CT-Aufnahmen, die übereinander gelegt werden, ist es möglich, die Kieferstrukturen und eine im Munde befindliche Prothese in ein korrektes dreidimensionales räumliches Verhältnis zu setzen. Das SL-Modell (Schablone) wird mit prothetisch sinnvollen Führungshilfen für die Implantation ausgestattet. Die Firma Materialise, München, bietet hierzu eine geeignete Softwarelösung (Surgi Guide) an.

Ein Beispiel aus dem Bereich Medizin ist die Anfertigung von Knochenersatzkonstruktionen, die am MIT (Massachusetts Institute of Technology) entwickelt wurden (ZELTINGER et al. 2001). Hierbei werden für die rekonstruktive Chirurgie Knochentransplantate aus Ersatzmaterialien exakt nach einer CAD-Vorlage über einen 3D-Drucker (Theri Form™, Therics Inc., Princeton, NY, USA) aufgebaut. Das CAD wird direkt von CT-Scandaten mit der zu versorgenden Knochenstruktur bestückt. Ein ähnliches Konzept entwickelte eine Forschergruppe an der Universität in Freiburg, die ihre Innovation als Biplotter (Envision Technologies GmbH, Marl) vermarktet (LANDERS et al. 2001).

Ein CAD liefert eine 3D-Konstruktion an die Perfactory

Damit sich die Perfactory®-Anlage in Bewegung setzt und eine gewünschte Form aufbauen kann, muss diese Anlage mit entsprechenden Volumendaten angesteuert werden. Diese Daten entstehen in einem CAD-Programm durch die Konstruktion bzw. das Design eines Zahntechnikers am Bildschirm (Abb. 9). Um das zu versorgende Umfeld des jeweiligen Mundes zu berücksichtigen, wird diese Situation von einem Arbeitsmodell digitalisiert (scannen) und dient als Aufbaugrundlage für die Konstruktion. Diese verwendete Konstruktionssoftware stellt ein dreidimensionales Volumenmodell (Vektordaten) her und speichert dies in einem industriekompatiblen allgemeinverständlichen Dateiformat (z.B. STL) eine «Sprache» ab. Diese kompatiblen Daten werden in einer systembezogenen Software der Perfactory® in Schichten umgewandelt, die als einzelne Belichtungsbilder für den Aushärtungsprozess von einigen Sekunden dienen (WIRTH 2002). Hierzu müssen neben Kauflächen auch Geschiebe, Stege und Sekundärteile in der CAD-Konstruktion möglich sein (Abb. 10, 11, 12 und 13).

Konkrete Scanner und Softwareprodukte sind hierfür bei unterschiedlichen Firmen für die Zahntechnik in Vorbereitung: Workstation (Medical Solutions, Essen) (WITKOWSKI & BANNUSCHER

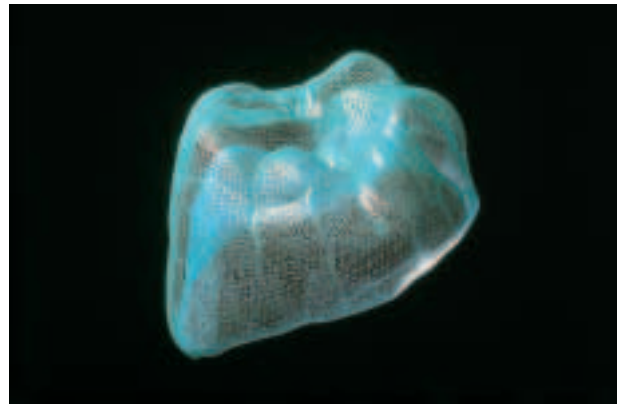


Abb. 9 Grundlage für die Herstellung eines Bauteiles mittels Stereolithographie ist eine 3D-Konstruktion mit einer CAD-Software in neutralen Volumendaten.

Fig. 9 Le modèle virtuel 3D créé par le logiciel CAO, exprimé en données volumiques neutres, sert de base à la FAO d'une pièce prothétique par stéréolithographie.

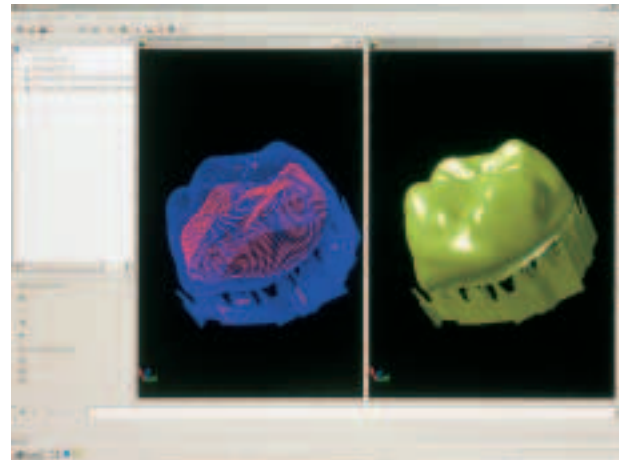


Abb. 10 Darstellung einer Vollkrone in der Anlagensoftware der Perfactory®. Es wurden bereits Stützen an das Objekt gesetzt. Links und rechts ist die Krone in unterschiedlichen Darstellungsarten abgebildet.

Fig. 10 Représentation d'une couronne à recouvrement complet à l'écran de l'unité Perfactory®. A noter que des étais de support ont déjà été placés à la base de l'objet. Image de gauche: représentation filaire; image de droite: représentation de la surface en 3D.

2002), ADG-Software (WEIGL 2002), ZFN-CAM, (ZFN, Warin) (REDAKTIONSMITTEILUNG 2002). Die Firmen etkon AG (Gräfelfing) (WEBER & ABELS 2002) und Bego Medical AG (Medifactory) (Strietzel 2001) bieten jeweils einen 3D-Scanner, eine Software und eine Dienstleistung zur Herstellung von Restaurationen in einem Produktionszentrum an, bei denen ein industriekompatibler (STL-Format) Datenfluss aufgebaut wird. Die Komponenten Scanner und Software arbeiten in einer kompatiblen Sprache (Format) und das Fertigungszentrum ist aus technischer Sicht offen für alle industriell üblichen Volumendatensätze in diesem Format. Diese offenen CAD-Programme sind in der Lage, Fräs-, Schleifanlagen und generative Verfahren in speziellen Zentren anzusteuern, die diese Daten verarbeiten können (WITKOWSKI 2002b) (Abb. 14). Seit dem Jahre 2002 verfolgen immer mehr CAD/CAM-Anbieter dieses Konzept (WITKOWSKI 2002a).



Abb. 11 Mit der Anlagenssoftware (Windows-Oberfläche) werden die einzelnen Teile auf der Bauplattform der Perfactory® verteilt. Parameter, wie Lage der Stütze und Dichte der Objekte, werden überwacht und ggf. korrigiert.

Fig. 11 Le logiciel de CFAO de l'unité Perfactory® (interface de type Windows) permet de répartir les différentes pièces sur le plateau de support pour la FAO et de surveiller différents paramètres, comme la position de la plate-forme de fabrication et la densité des objets sous construction.



Abb. 12 Die 3D-Volumendaten der Kronen werden in Schichtdaten für die einzelnen Belichtungsschritte (Schichten) umgewandelt. Diese Schichtdaten werden in ein Belichtungsbild umgesetzt und auf den Boden des Flüssigkeitsbehälters projiziert.

Fig. 12 Les données volumiques en 3D des couronnes sont transformées en strates pour les étapes successives de polymérisation par exposition à la source lumineuse. Les différentes couches servent de masques de projection de la lumière de polymérisation à travers le fond transparent de la cuve de résine liquide.



Abb. 13 Darstellung einzelner Schichten einer Krone als Belichtungsmasken.

Fig. 13 Vue de détail de trois couches (masques de projection) de la couronne.

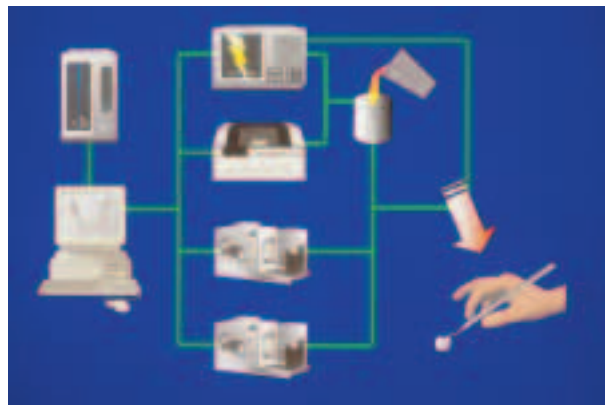


Abb. 14 Mit neutralen, kompatiblen Industriedaten können eine Vielzahl von CAM-Anlagen angesteuert werden. Die Anlagenssoftware der jeweiligen Maschinen erstellt die Maschinenparametersätze automatisch. Für die Stereolithographie sind es Schichtdaten. Für Fräs-/Schleifanlagen werden Fräsbahnen generiert.

Fig. 14 Les données neutres, compatibles avec les standards industriels permettent de commander un grand nombre d'installations. Les logiciels des différentes unités transforment automatiquement les données CAO reçues en langage machine. Pour la stéréolithographie, il s'agit de données définissant les différentes strates. Pour les installations de fraisage/usinage, il s'agit de trajets d'outils de fraisage.

Die Funktionsweise der Stereolithographie

Alle Verfahren in der Stereolithographie, die mit der Verfestigung von flüssigen Ausgangsstoffen arbeiten, basieren auf dem Prinzip der Photopolymerisation von Acrylaten oder Epoxiden. Die Perfactory® verwendet eine zähflüssige Zubereitung aus mono- und multifunktionellen Acrylaten, welche mit geeigneten Photo-Katalysatoren durchsetzt ist. Bei Bestrahlung mit Licht geeigneter Wellenlänge beginnt spontan eine Polymerisation, in Folge derer das flüssige Monomer bzw. Oligomer zu einem festen Polymer wird. Dieses Verfahren wird für die besonderen Belange des RP bezüglich der Belichtungsstrategie modifiziert. Bei der am meisten verbreiteten Methode von 3D Systems schreibt ein feiner Laserstrahl die Kontur des jeweiligen Querschnittes auf die Oberfläche des Harzbades und erzeugt örtlich so die notwendige kritische Energiedichte und folglich nötigen Verfestigungen. Anschließend erfolgt die Generierung der nächsten Schicht. In dem angewendeten Verfahren der Fa. DeltaMed erfolgt die Polymerisation nicht durch Abfahren der Schicht mit einem «teuren» Laser, sondern der gesamte Querschnitt einer Schichtprojektion wird auf einmal als Maske abgebildet und diese mit Hilfe einer geeigneten Lichteinheit und Optik auf die Oberfläche des Harzbades projiziert (Abb. 15 und 16). Diese Belichtung erfolgt durch den transparenten Boden des Kunststoffbehälters. In der RP-Technik wird dies als Lampen-Masken-Verfahren (Solid Ground Curing, SGC) bezeichnet (POLLACK et al. 2001).

Die SL-Maschine besteht aus einer Polymerisationswanne mit flüssigem Monomer, die mit einer verschiebbaren Trägerplatte und einer Lichtprojektionseinheit ausgestattet ist (Abb. 8). Die Projektionseinheit projiziert die aktuelle Schichtinformation als Maske durch den transparenten Boden der Anlage auf das Flüssigkeitsbad. Die an der Z-Positionierungseinheit angebrachte Trägerplatte taucht in den flüssigen Kunststoff der Polymerisationswanne ein. Die geplante Schichtstärke entsteht durch den Abstand zwischen dem transparenten «Kontaktfenster»

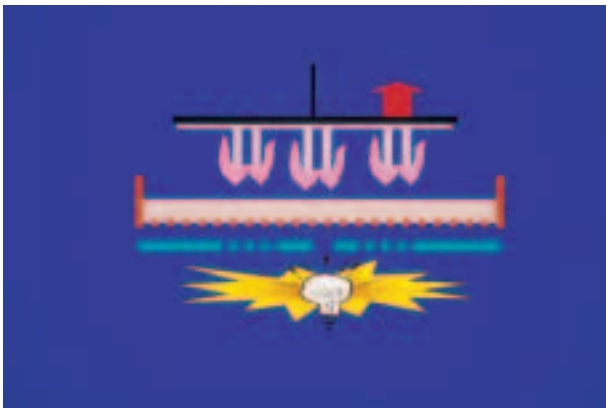
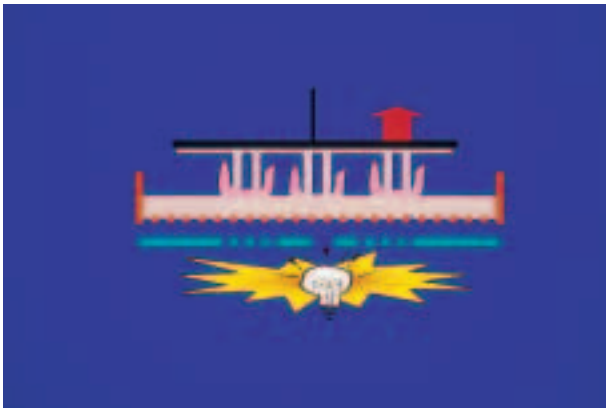


Abb. 15 und 16 Bei der Perfactory® erfolgt die schichtweise Belichtung der lichthärtenden Flüssigkeit durch den Boden des Flüssigkeitsbehälters. Das Objekt wächst von unten nach oben. Die Bauplattform hebt sich um eine belichtete und ausgehärtete Schichtstärke. Dann folgt die nächste Belichtung.

Fig. 15 et 16 Dans l'installation de stéréolithographie Perfactory®, l'exposition des strates successives et la polymérisation de la résine photo-sensible sont effectuées à travers le fond transparent de la cuve contenant la résine liquide. Ainsi, l'objet s'accroît par incréments, du bas vers le haut. Le plateau de support est ensuite élevé du bain de résine d'un «cran» correspondant à l'épaisseur de la couche polymérisée, avant la prochaine étape d'exposition/polymérisation.

und der Trägerplatte. Zurzeit betragen mögliche Schichtstärken 40–150 µm. Nach dem Eintauchen belichtet die Projektionseinheit die aktuellen Schichtdaten als Schwarz/weiß-Bild (Abb. 13) auf den im Zwischenraum befindlichen flüssigen Kunststoff. Dieser polymerisiert selektiv an den «weissen» Stellen aus. Die Trägerplatte hebt sich anschliessend um den Betrag der nächsten Schicht aus der Polymerisationswanne heraus. Neuer flüssiger Kunststoff fliesst zwischen die bereits gebaute Schicht und die Bauplattform. Danach kann die nächste Schicht ausgehärtet werden. Das Modell wächst so schrittweise von unten nach oben (Abb. 17 und 18) aus dem Polymerisationsbad heraus. Um dem Bauteil die nötige Stabilität zu geben, ist die tatsächliche Eindringtiefe des Lichtes grösser als die Schichtstärke der generierten Schicht. Damit wird eine Verzahnung mit der darunter liegenden vorangegangenen Schicht erreicht. Die Plattform hält das wachsende Teil auf Stützen, die die Übergänge und freien Teile fixieren und das definitive Aufsetzen und das spätere Entfernen der Baukonstruktion von der Plattform erleichtern. Die gerätebezogene Software dieser Anlagen, die die Stützen automatisch anlegen, sollen diese so gering wie mög-

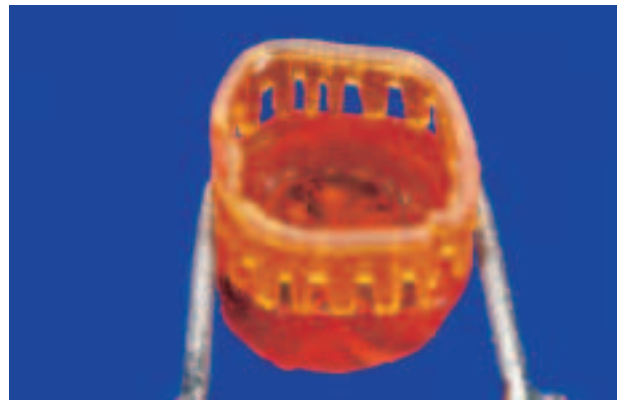


Abb. 17 und 18 Baubeispiele, die mit der Perfactory® hergestellt wurden. Die Vollkronen wurden auf den Stützen, die als Baubasis dienen, aufgebaut. Die Stützen werden in einem weiteren Arbeitsprozess entfernt (Postprocessing).

Fig. 17 et 18 Exemple d'une maquette de couronne à recouvrement complet fabriquée par l'unité Perfactory® (extrados et intrados). A noter la série d'étais supportant toute la circonférence marginale de la couronne; ces supports seront enlevés dans une étape ultérieure de finition («post-processing»).

lich, aber so viel wie notwendig platzieren. Je nach zu stützenden Modell kann der Aufwand zur Generierung und zur Entfernung der Stützen enorm werden.

Diskussion

Zahlreiche neue, digitalgestützte Fertigungstechnologien werden Einzug in die Zahntechnik nehmen. Diese haben ihren Ur-

sprung im Prototypenbau (RP) in der Industrie und bringen dort einen wirtschaftlichen Nutzen durch einen speziellen Produktionsfluss und steigende Flexibilität bezüglich der Kundenwünsche (WOHLER 2002). Die Stereolithographie ist eine dieser Techniken, die für die Zahntechnik nutzbar gemacht wird. Voraussetzung für eine Nutzung durch den Zahntechniker ist ein CAD-Programm, das eine Konstruktion von Zahnersatz ermöglicht und industriekompatible Volumendaten generiert. Dieses Konzept mit einer offenen und allgemein kompatiblen Software ist neu für die Zahntechnik (WITKOWSKI 2002b). Spezielles Fachwissen über CAD und CAM ist Grundvoraussetzung für eine Anwendung. Immer häufiger werden RP-Verfahren als direktes Fertigungsverfahren (Rapid Manufacturing, RM) eingesetzt (REINHART et al. 2001; WOHLER 2002). Die Ausgabematerialien eignen sich dann nicht nur als Zwischenschritt für eine Weiterverarbeitung, sondern bieten gerade für kleine Stückzahlen eine Alternative zur Handarbeit. Dies ist der Fall, wenn mit der Perfactory z. B. Aufbisschienen hergestellt werden.

Bei den neu in der Zahntechnik vorgestellten Applikationen für eine Formherstellung für die Gusstechnik muss die Ausgabqualität der Teile durch die Anlage genau beurteilt werden. Die Abbildungen zeigen die generierten Oberflächen und deren Qualität. (Abb. 19, 20 und 21). Unter dem Begriff «Post processing» wird beschrieben, welche Nacharbeit an den ausgegebenen Werkstücken erforderlich ist. Hierzu kann es gehören, Haltestützen zu entfernen oder ein Teil auf einen Stumpf oder auf ein Primärteil aufzupassen. In Praxistests müssen genaue Zeitanalysen durchgeführt werden, um neue Arbeitsprozesse mit konventionellen vergleichen zu können. Das hier vorgestellte Gerät liefert Teile für die Guss- oder auch Presstechnik in der Zahntechnik. Das Anstiften, Einbetten, Giessen und Ausbetten bleiben wie in der konventionellen Gusstechnik erhalten. Es steht in einem direkten Zeitvergleich zu Systemen, die nach einem CAD-Design mit einem CAM eine Gerüststruktur aus einem zu verblendenden Material herstellen können. Aus der Sicht dieser CAD/CAM-Anlagen ist die Frage berechtigt, warum erst ein Teil ausgedruckt wird und dann per Gusstechnik umgesetzt werden muss, wenn mittels einer Fräs- und Schleifanlage oder eines Laser-Sinterprozesses direkt eine Gerüsther-

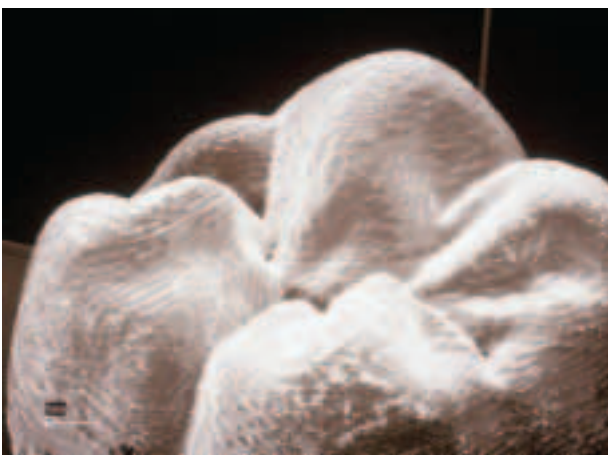


Abb. 19 Mittels Stereolithographie-Technologie aufgebaute Vollkrone. REM 17-fach (M. Bächle, ZMK-Klinik Freiburg), Ansicht von okkusal. 3D-CAD-Design nach Dr. P. Weigel, Frankfurt.

Fig. 19 Vue de détail de la surface occlusale d'une couronne fabriquée par stéréolithographie (MEB, agrandissement 17×) (M. Bächle, Clinique dentaire de Fribourg). Design CAO 3D selon le Dr P. Weigel, Francfort.

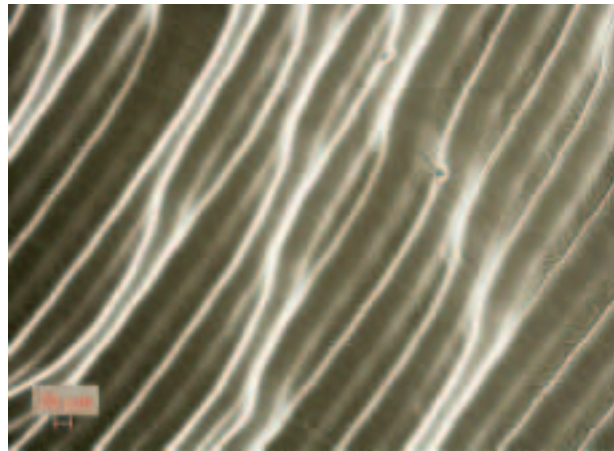


Abb. 20 Oberfläche eines Objektes mit starker Oberflächenkrümmung. REM 250-fach (M. Bächle, ZMK-Klinik Freiburg)

Fig. 20 Vue de détail d'une zone de surface à incurvation importante (MEB, agrandissement 250×) (M. Bächle, Clinique dentaire de Fribourg).

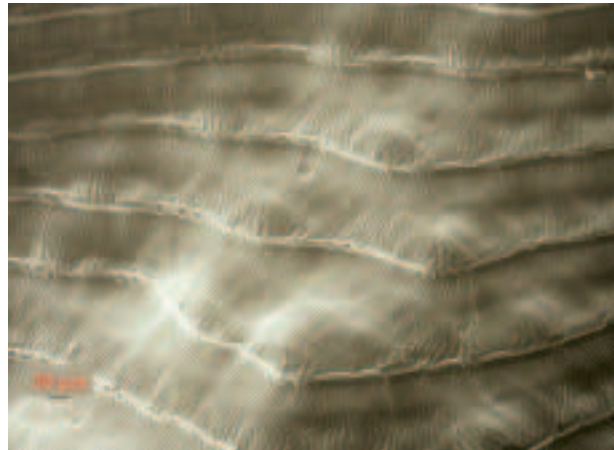


Abb. 21 Oberfläche eines Objektes mit flacher Oberflächenkrümmung. REM 250-fach (M. Bächle, ZMK-Klinik Freiburg)

Fig. 21 Vue de détail d'une zone de surface à faible incurvation (MEB, agrandissement 250×) (M. Bächle, Clinique dentaire de Fribourg).

stellung erfolgen kann. Die Modellvorbereitung, das Scannen und das CAD sind bei beiden Vorgehensweisen gleich (Abb. 22 und 23). Dieses Konzept ist entgegengesetzt zu den Bemühungen, die Gusstechnik zu eliminieren, um Material aus industriell vorgefertigten Rohlingen herzustellen.

Der Ansatz des hier vorgestellten Konzeptes in Verbindung mit einer SL-Anlage ist nicht als eine Alternative oder Verbesserung zum Fräsen, Schleifen und Sintern mit CAD/CAM-Anlagen gedacht, sondern als Versuch, die bisher am weitesten verbreitete Prozesskette der dentalen Gusstechnik zu rationalisieren. Die Möglichkeit, diagnostische und definitive Schienen oder Bohrschablonen herstellen zu können, ist eine sinnvolle Ergänzung der Indikationen.

Abstract

3D-CAD constructions offer the application of CAM-techniques for the fabrication of dental restorations. CNC-units are

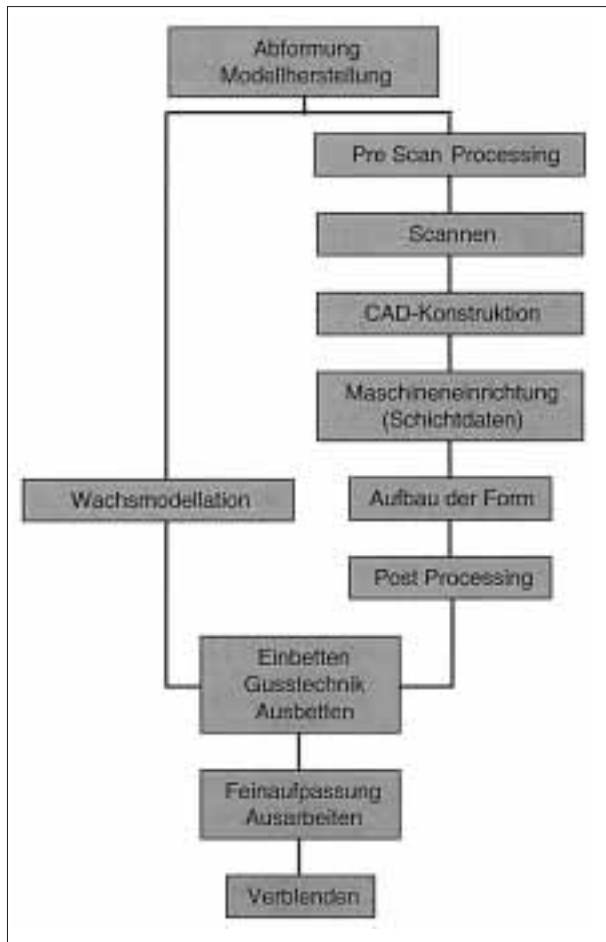


Abb. 22 Ablauf der Arbeitsschritte für die Herstellung von Gussteilen für Zahnersatz. Eine manuelle Herstellung im Vergleich zum Vorgehen mit einem CAD/CAM für eine Teilautomatisierung.

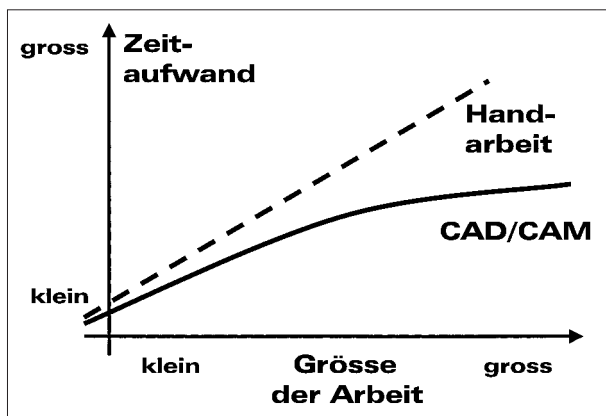


Abb. 23 Die Graphik zeigt einen Vergleich von zwei Herstellungstechniken für Gussteile. Es werden die manuelle Herstellung mit Wachsmodellierung und die Herstellung der Teile mittels Stereolithographie miteinander verglichen. Ein Zeitvorteil der Teilautomatisierung entsteht bei grösseren Arbeiten, bei denen die Modellationszeit durch den Einsatz eines CAD reduziert werden kann.

generally used for milling and grinding. However, the application of new «additive» working technology enables the construction of 3D-solid models. In the field of rapid prototyping

(RP), the process of «three-dimensional printing» allows the fabrication of patterns for the lost-wax casting technique from materials such as wax or resin. This paper describes the use of a light-curing fluid resin in combination with a UV-light projection in means of stereolithography (SL). The presented CAM unit (Perfactory, DeltaMed, D-Friedberg) reduces processing times of large casting patterns by using CAD constructions. This concept focuses on the advancement of the common casting technique in dental technology by application of CAD/CAM technology.

Literatur

- ANDERSSON M, BERGMAN B, BESSING C, ERICSON G, LUNDQUIST P, NILSON H: Clinical results with titanium crowns fabricated with machine duplication and spark erosion. *Acta Odontol Scand* 47: 279–286 (1998)
- ANDERSSON M, ODÉN A: A new all-ceramic crown. *Acta Odontol Scand* 51: 59–64 (1993)
- BANNUSCHER R, BANNUSCHER G: Instrumentelle Funktionsdiagnostik und digitale Konstruktion von okklusalen Schienen und Aufbissbehelfen. *Zahntechnik im Wasserwerk, CAD/CAM-Symposium*, Bonn, (2. November 2002)
- BILL J, REUTHER J, MÜHLING J, WITTENBERG G, ECKSTEIN T, REINHART E, PISTNER H, MEIER J, BETZ T: Stereolithographie – eine neue Methode zur implantologischen Operationsplanung nach Unterkieferrekonstruktion. *Dtsch Zahnarzt Z* 48: 789–792 (1993)
- DOLABDJIAN H, STRIETZEL R: Verfahren zur Herstellung von Zahnersatz und dentalen Hilfsteilen. *DE Pat.* 19901 643 A1, (2000)
- GEBHARDT A: Rapid Prototyping. Kap.: 3.3.1 Stereolithographie (SL). *Hanser Verlag, München*, pp 90–97 (2000a)
- GEBHARDT A: Rapid Prototyping. Kap. 8.2.2 LASER Sintern im Pulverbett-Selective LASER Powder Remelting (SLPR). *Hanser Verlag, München*, pp 333–338 (2000b)
- HULL C: Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. *U.S. Pat. No.* 4 575 330(1986)
- KODAMA H: Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. *Rev Sci Instrum* 52: 1770–1773 (1981)
- LANDERS R, MÜLHAUPT R, JOHN H: Desktop manufacturing and biofunctional processing. *New applications in tissue engineering. Kunststoffe* 91: 58–60 (2001)
- LUTHARDT R, RUDOLPH H, SANDKUHL O, WALTER M: Aktuelle CAD/CAM-Systeme zur Herstellung von keramischem Zahnersatz. Teil 1. *ZWR* 110: 747–754 (2001a)
- LUTHARDT R, RUDOLPH H, SANDKUHL O, WALTER M: Aktuelle CAD/CAM-Systeme zur Herstellung von keramischem Zahnersatz. Teil 2. *ZWR* 110: 797–802 (2001b)
- MORRIS C L, BARBER R F, DAY R: Orofacial prosthesis design and fabrication using stereolithography. *Aust Dent J* 45: 250–253 (2000)
- MUHAMMAD C, HUAFENG W: Creating a positive mold of a patient's dentition for use in forming an orthodontic appliance. *U.S. Pat. No.* 6.210.162 (2001)
- POLLACK S, GERLOFF M, ZIMMERMANN M: Method and device for producing an object by means of stereolithography. *Int. Veröfentl. PCT, WO* 01/00390 A1(2001)
- REDAKTIONSMITTEILUNG: CAD/CAM aus Warin im hohen Norden. *Dental Labor* 50: 1462–1465 (2002)
- REINHART G, MEINDL M, SIGL M: Methoden für die reaktionsfähige Produktion. *wt Werkstattstechnik* 91: 404–408 (2001)

- STOCKER N G, MANKOVICH N J, VALENTINO D: Stereolithographic for surgical planning. *J Oral Maxillofac Surg* 50: 466–471 (1992)
- STRIETZEL R: FutureDent – Preisgünstiger Zahnersatz mit Hilfe eines CAD/CAM-Systems. *Quintessenz Zahntech* 27: 970–978 (2001)
- VAN STEENBERGHE D, NAERT I, ANDERSSON M, BRAJNOVIC I, VAN CLEYNENBREUGEL J, SUETENS P: A custom template and definitive prosthesis allowing immediate implant loading in the maxilla: A clinical report. *Int J Maxillofac Implants* 17: 663–670 (2002)
- WEBER G, ABELS A: In alle Richtungen offen. Scanner es1 mit universeller Schnittstelle. *Pressemitteilung. Dental Labor* 50: 1231 (2002)
- WEIGL P: Persönliche Mitteilung. (2002)
- WIRTH J: Rapid Modeling. Kap. 4: Erzeugen der Fertigungsdaten. Carl Hauser, München, pp 87–128 (2002)
- WITKOWSKI S: Was können (CAD-)/CAM-Systeme in der Zahn-technik 2001? *Zahntech Mag* 5: 129–137 (2001)
- WITKOWSKI S: (CAD-)/CAM in der Zahntechnik: Buyer's Guide 2003. *Zahntech Mag* 6: 696–709 (2002a)
- WITKOWSKI S: Computer Integrated Manufacturing (CIM) als Konzept für das zahntechnische Labor. *Quintessenz Zahn-
tech* 28: 374–386 (2002b)
- WITKOWSKI S: Das Pro 50 CAD/CAD-System mit Produktions-
zentren für Fräs-, Schleif- und Gusstechnik. *Quintessenz
Zahntech* 28: 958–971 (2002c)
- WITKOWSKI S, BANNUSCHER R: 3D-workstation for designing
dental restorations. 51st Annual Meeting, American Academy
of Fixed Prosthodontics. 21.–23. Februar 2002, Chicago, (2002)
- WOHLER T: Wohlers Report 2001. Rapid Prototyping and Tooling
State of the Art of the Industry. Wohlers Associates. Fort
Collins, CO, USA, pp (2002)
- WOLF H P, LINDNER A, SCHINDLER E, GROHMANN R, MILLESI W,
EWERS R: Konstruktion 3-dimensionaler Schädelmodelle mit-
tels Stereolithographie. *Z Stomatol* 90: 303–311 (1993)
- WOLZ S: Das Wol-Ceram-EPC-CAM-System. Teil 1. *dental la-
bor* 50: 1447–1451 (2002)
- ZELTINGER J, SHERWOOD J K, GRAHAM D A, MUELLER R, GRIFFITH L
G: Effect of pore size and void fraction on cellular adhesion,
proliferation, and matrix deposition. *Tissue Eng* 7: 557–572
(2001)
- Z'GRAGGEN M, SCHIEL H, KUNZ C, LAMBRECHT J T: Symmetrie-
vermessung von dreidimensionalen Laser-Technologie-Mo-
dellen. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 112: 735–743 (2002)