

# Ein Überblick: CAD/CAM-gestützte Fertigungsverfahren

| Dr. med. dent. Sebastian Quaas

Die Herstellung zahnärztlich-zahntechnischer Restaurationen erfolgt mehr und mehr durch CAD/CAM-gestützte (CAD/CAM = Computer Aided Design, Computer Aided Manufacturing = computergestützte Konstruktion und Fertigung) Fertigungsverfahren. Dabei wurden aus der Industrie CAM- und Rapid-Prototyping-Verfahren für die Anwendung in der Zahnheilkunde adaptiert. Industriell wurden diese Verfahren für Groß- bzw. Kleinserienfertigung entwickelt.

Zahnärztlich-zahntechnische Restaurationen sind jedoch stets patientenindividuelle Einzelstücke. An die zu verarbeitenden Werkstoffe werden deshalb besondere Anforderungen hinsichtlich der Biokompatibilität und Mundbeständigkeit gestellt, welche durch das Fertigungsverfahren nicht gemindert werden darf. Weiterhin sind präparierte Zähne nicht klar geometrisch definiert, hierbei handelt es sich um sogenannte Freiformflächen. Daher können die Präparation oder Formen eines Zahnes ein Herstellungsverfahren an seine technologischen Grenzen bringen.

Scharfe Kanten einer Inlaypräparation im Bereich des okklusalen Kastens beispielsweise können nicht in entsprechende keramische Ecken und Kanten der Restauration umgesetzt werden.

## Systematik

Die ersten Fertigungstechnologien, welche aus der Industrie in die Dentalwelt exportiert wurden, waren subtraktive Verfahren. Vor allem das Schleifen stand dabei im Vordergrund. Viele keramische Restaurationen werden heute subtraktiv durch das (Aus-)schleifen der Restauration aus präfabrizierten Blöcken im dicht- oder teilgesinterten Zustand hergestellt (z.B. CEREC, Sirona; Lava, 3M ESPE; Everest, KaVo; etkon Straumann usw.). Neben subtraktiven Verfahren werden seit der Jahrtausendwende vermehrt additive Verfahren in

Rapid-Prototyping-Technologie	Materialien
3-D-Drucken (3D Printing, 3DP)	Wachs, Thermoplaste
Electron Beam Melting (EBM)	Titan, Titanlegierung → kein Einsatz in der Zahnheilkunde, Fertigungstoleranzen sind zu groß, für medizinische Implantate geeignet
Fused Deposition Modeling (FDM)	Thermoplaste
Laminated Object Modelling (LOM)	Papier → kein Einsatz in der Zahnheilkunde
Selektives Lasersintern (SLS oder SLA)	Thermoplaste, Metallpulver (EM, EMF)
Stereolithografie (SLA)	Fotopolymere

Tabelle 1: Rapid-Prototyping-Technologien und Werkstoffe, die damit verarbeitet werden können.

der Zahnheilkunde eingesetzt (siehe Grafik 1). Dabei kommen Rapid-Prototyping-Technologien zur Anwendung. Das sind Fertigungsverfahren, welche möglichst direkt und schnell vorhandene CAD-Daten in Restaurationen umsetzen können. Dabei werden Restauration oder andere Therapiemittel schichtweise additiv aufgebaut. Für den Einsatz in der Zahnheilkunde sind unterschiedliche Rapid-Prototyping-Technologien (RP) geeignet, welche unterschiedliche Materialien verarbeiten können (Tabelle 1).

Grundlegend lassen sich CAD/CAM-, Rapid-Prototyping- und auch konventionelle Herstellungstechnologien in direkte und indirekte, additive und subtraktive Formgebungsverfahren unterteilen (Tabelle 2). Zusätzlich kann zwischen Systemen mit zentraler und dezentraler Fertigung unterschieden werden. Manche Systeme bieten auch beides an.

Bei der dezentralen Fertigung wird die Restauration vor Ort im zahntechnischen Labor oder im Praxislabor hergestellt. Dies ermöglicht einen frühzeitigen Einstieg in die Wertschöpfungskette. Die Konstruktion der Restaurationen können vor Ort modifiziert werden, sofern die CAD-Software dies zulässt. Die Anschaffung eines Digitalisiergerätes ist Voraussetzung für die dezentrale Fertigung. Ebenso kann ein Gerät zur Fertigung einschließlich notwendiger Einschulung und Service notwendig sein, gegebenenfalls auch Software oder spezielle Sinteröfen für die Fertigstellung von z.B. teilgesinterten Kronen aus Zirkoniumdioxid. Die zentrale Fertigung erlaubt die Herstellung der Restaurationen unter kontrollierten industriellen Bedingungen (z.B. Reinraumbedingungen). Dadurch entfallen die für das Labor oder die Praxis notwendige Investitionen in kostspielige Fräsmaschinen. Wenn eine konventio-

IPS<sup>®</sup> e.max<sup>®</sup>

„DIE ZUKUNFT  
IST HEUTE. MIT  
LITHIUM-DISILIKAT.“

Oliver Brix, Zahntechniker, Frankfurt.

Seien Sie ein Visionär: Denken Sie an Morgen,  
aber handeln Sie im Heute. Mit IPS e.max  
Lithium-Disilikat fertigen Sie wirtschaftlich und  
flexibel Restaurationen – und müssen nicht auf  
Ästhetik verzichten.

all ceramic  
all you need

[www.ivoclarvivadent.de](http://www.ivoclarvivadent.de)

Ivoclar Vivadent GmbH

Dr. Adolf-Schneider-Str. 2 | D-73479 Ellwangen, Jagst | Tel.: +49 (0) 79 61 / 8 89-0 | Fax: +49 (0) 79 61 / 63 26

ivoclar<sup>®</sup>  
vivadent<sup>®</sup>  
passion vision innovation

Fertigungsverfahren	Material	Additiv direkt ohne Form	Additiv direkt mit Form		Subtraktiv indirekt ohne weitere Bearbeitungsschritte	Subtraktiv indirekt mit weiteren Bearbeitungsschritten
			Gesamte Form	Teilform (Innenform)		
CAD/CAM von dichtgesinterter Keramik	Oxidkeramiken aus $ZrO_2, Al_2O_3$				x	
CAD/CAM von teilgesinterter Keramik	Oxidkeramik ( $ZrO_2$ )					x
Urformen, Direkte Formgebung	Oxidkeramik ( $ZrO_2, Al_2O_3$ )		x			
Totale Prothese	Kunststoff (Acrylate)		x			
Galvanotechnik	Gold			x		
CAD/CAM von Infiltrationskeramik	Poröse Keramik ( $ZrO_2, Al_2O_3, MgAl_2O_4$ )					x
Schlickertechnik	Oxidkeramik ( $ZrO_2, Al_2O_3$ )			x		
Lasersintern	Edelmetall- und Edelmetallfreie-Legierungen	x				
Stereolithografie	Fotopolymere	x				
3-D-Drucken (Wachslotter)	Wachs, danach klassische Gusstechnik	x	→ x			
Fused Deposition Modeling	Thermoplaste	x				
Heißpresskeramik	Silikatkeramik, Lithiumdisilikatkeramik		x			
Aufpressen (Einzelkronen)	Oxidkeramik ( $ZrO_2, Al_2O_3$ )			x		
CAD/CAM von Metall-Legierungen und Kunststoffen	EM, EMF, Titan, Titan-Legierung, Polymere				x	
Klassische Gusstechnik	Edelmetall- und Edelmetallfreie Legierungen, Titan, Titan-Legierung		x			
CAD/CAM von Glaskeramik	Feldspat- oder Speckstein als Silikat-träger ggf. verstärkt (z.B. Leuzit, Hydroxylapatit, $Al_2O_3, Mg$ )				x	x

Tabelle 2: Einteilung der Fertigungsverfahren nach der Systematik von Rudolph, Quaas und Luthardt.

nelle Abformung genommen und ein klassisches Meistermodell hergestellt wird, ändert sich am gewohnten Ablauf (Zahnarzt-Labor-Zahnarzt) aus zahnärztlicher Sicht nur sehr wenig (Zahnarzt-Labor-Fertigungszentrum-Labor-Zahnarzt).

Neue intraorale Digitalisierverfahren zusammen mit Rapid-Prototyping-Technologien können die konventionelle Abformung und Modellherstellung teilweise ersetzen. Das Meistermodell wird nach der Datenerfassung im Mund anhand digitaler Daten generiert (meist im zentralen Fertigungszentrum). Dieses generierte Modell und die daraufhin hergestellte Restauration werden dann an das zahntechnische Labor geschickt, um das Gerüst zu verblenden (Lava C.O.S., 3M ESPE; CEREC

Connect, Sirona). Auch kann schon die Verblendung direkt industriell hergestellt werden (Lava DVS, 3M ESPE). Die Abfolge der am Prozess beteiligten ändert sich dadurch grundlegend (Zahnarzt-Fertigungszentrum-Labor-Zahnarzt oder Zahnarzt-Fertigungszentrum-Zahnarzt) (siehe Grafik 1).

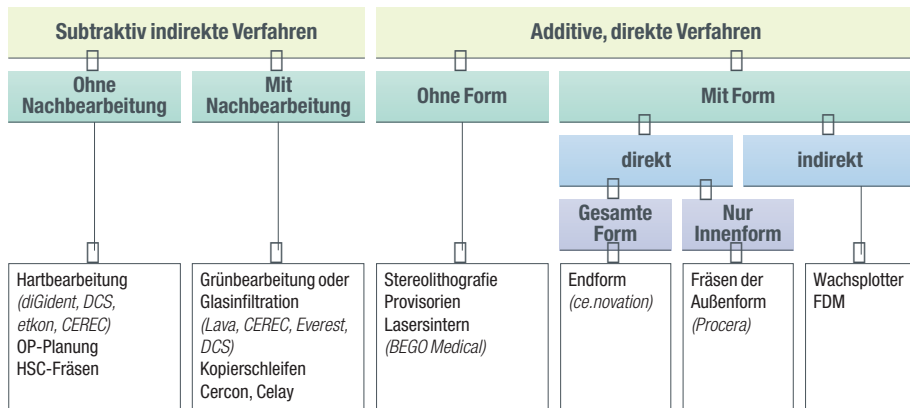
### Subtraktive Verfahren

Die Restaurationen werden bei den indirekten subtraktiven Verfahren durch einen mehrstufigen Prozess hergestellt. Aus dem Grundmaterial werden zunächst Rohlinge gefertigt (Pressen aus keramischem Pulver), aus denen dann die eigentliche Restauration abtragend hergestellt wird (Schleifen einer vollkeramischen Krone aus einem präfabrizierten Block). Einige subtraktive Ver-

fahren benötigen keine weitere Nachbearbeitung der Restauration, andere Verfahren bedingen im Anschluss an die Fertigung ein Sintern oder Glasinfiltrieren der Restauration.

Das am häufigsten benutzte Fertigungsverfahren bei der Herstellung zahnmedizinischer Restaurationen ist derzeit das subtraktive Herausarbeiten der Restauration aus einem teilgesinterten keramischen Block mit anschließender Nachbearbeitung (Sintern). Dabei wird aufgrund der zuvor erstellten Konstruktionsdaten (CAD-Daten) durch das CAM-Modul Fräsbahnen für eine CNC-Maschine (Computer Numeric Control, computergestützte numerische Steuerung) berechnet. Das CAM-Modul erlaubt die Festlegung der notwendigen technologischen Parameter, wie die Frässtrategie (z.B. das Fräsen von Höhenlinien), der benutzten Werkzeuge (Schleifer) und der Eingriffsgrößen (Schnitttiefe, Vorschub, Bearbeitungsrichtung, Drehzahl usw.) Diese Eingriffsgrößen bestimmen maßgeblich die Bearbeitung des Werkstoffes. Sie müssen auf das jeweilige zu bearbeitende Material abgestimmt sein. Falsche Parameter können das Material bei der Bearbeitung schädigen (besonders bei Keramik kann dieses Problem auftreten). Vor Fräsbeginn wird durch das CAM-Modul der Weg des Schleifers bei der Bearbeitung, die Fräsbahn, generiert und mit dem NC-Postprozessor auf die Maschinensteuerung abgestimmt. Beim Fräsen wird Material durch die spanabhebende Bearbeitung mit ein- oder mehrschneidigen Werkzeugen mit einer geometrisch definierten Schneide abgetragen. Im Gegensatz dazu ist das Schleifen ein abtragendes Bearbeiten des Werkstückes mit geometrisch undefinierten Schneiden. Meist werden dafür Diamantschleifer verwendet, wie sie auch am Patienten zum Einsatz kommen.

Die Bearbeitung durch Fräsen kann drei- oder fünfschneidig erfolgen. Neben drei translatorischen Achsen beim Dreiachs-Fräsen werden beim fünfschneidigen Fräsen zusätzlich zwei rotatorische Achsen angesteuert. Kronen- und Brückengerüste in gleichmäßiger Gerüststärke und ohne Kauflächengestaltung können mit Dreiachs-Maschinen hergestellt werden. Für die Ferti-



Grafik 1.

gung unter sich gehender Bereiche werden sogenannte Drei- plus Zweiachsen benötigt. Hierbei wird entweder das Werkzeug oder das Werkstück in der Achse angestellt, die Bearbeitung erfolgt weiterhin dreiaxsig. Okklusionsflächen von Kronen und Zähnen sind so komplex, dass sie in der Regel nur durch eine Fünffachs-Bearbeitung hergestellt werden können. Eine zunehmende Anzahl der Freiheitsgrade und der Bewegungsachsen steigert die Komplexität der NC-Programmierung. Problematisch ist dabei vor allem die Kollisionsprüfung, die im Vorfeld prüft, ob das Werkzeug beim Abfahren der Werkzeugbahn das Werkstück ungewollt beschädigt.

Die Strategie beim subtraktiven Fertigen gliedert sich in der Regel in das Schruppen und das Schlichten. Bei Schruppen wird ein großes Materialvolumen schnell zerspannt (großes Zeitspannvolumen) und das Werkstück nähert sich grob der fertigen Kontur. Das Schlichten fertigt die Endkontur mit einer möglichst hohen Genauigkeit und Qualität.

Nicht alle Fertigungsverfahren können die Restauration so wie im CAD-Modul dargestellt herstellen. Dabei ist vor allem in der Zahnheilkunde entscheidend, ob es Abweichungen vom CAD-Modell gibt, die den Limitationen der Maschine oder des Materials geschuldet sind. Das „WYSIWYG-Prinzip“ (What-You-See-Is-What-You-Get) trifft derzeit nicht auf alle subtraktiven Fertigungsverfahren und Materialien zu, daher ist die Übereinstimmung von CAD-Modell und realem Teil stets kritisch zu betrachten.

Untersuchungen zur Passgenauigkeit CAD/CAM-gefertigter Restaurationen zeigten prinzipiell eine klinisch ausreichende Passgenauigkeit. Systemabhängig wurden keine signifikanten Unterschiede der internen und marginalen Passgenauigkeit zwischen CAD/CAM-gefertigten Restaurationen und konventionellen metallkeramischen Restaurationen nachgewiesen.

#### Additive Verfahren

Die additiven direkten Fertigungsverfahren in der Zahnheilkunde können in RP-Technologien (Verfahren, die für die Herstellung keine zusätzliche Form benötigen, da der Aufbau der Restaurationen oder Therapiemittel schichtweise erfolgt) und in Fertigungsverfahren mit Herstellung einer speziell angefertigten Form unterschieden werden.

Bei allen additiven Verfahren wird das Rohmaterial (Metallpulver, Fotopolymer, Keramiken, Thermoplaste) direkt von dem CAD-Modell in die jeweilige Restauration oder das Therapiemittel überführt. Auftretende Volumenänderungen durch den Herstellungsprozess müssen bereits bei der Konstruktion des CAD-Modells berücksichtigt werden (teilgesinterte Keramiken aus Aluminiumoxid schrumpfen um etwa 18%, die aus Zirkoniumdioxid um etwa 27%; Fotopolymere und Acrylate um etwa 3–4%).

Additiv arbeitende RP-Technologien sind die Stereolithografie, das Lasersintern, das Fused Deposition Modeling und das 3-D-Drucken (auch Wachspotter genannt). Alle genannten Verfahren bauen schichtweise die Restauration oder das Therapiemittel



#### Pico



Filigranes Polieren von Fisuren mit Polistar Beige auf Composite

#### Micro



Feines Polieren von Inlays mit Polistar Rot auf AuPt

#### Miniatuur



Zügiges Vorpulieren von KLB mit Polistar Weiß auf NEM

#### GEZA



Intensive Kauflächenpolitur mit Polistar Grün auf PdAg

**HATHO** GmbH  
[www.hatho.de](http://www.hatho.de)

(Schiene, Bohrschablone) entsprechend dem zuvor erstellten CAD-Modell auf. Dabei wird die Genauigkeit des Herstellungsprozesses von den Schichtdicken bestimmt. Je feiner diese sind, desto besser ist die Oberflächenqualität und umso länger dauert der Aufbau des Werkstückes. Bei der Stereolithografie werden schichtweise Fotopolymere aufgetragen. Die Härtung erfolgt dabei mit sichtbarem Licht. Seit Längerem werden damit Operationsplanungsmodelle, Epithesen sowie Modelle in der Kieferorthopädie hergestellt. Präzise STL-Modelle ersetzen mehr und mehr das konventionelle Meistermodell nach erfolgter intraoraler Digitalisierung (siehe oben).

### Selektives Lasersintern

Das Selektive Lasersintern (SLS) ist ebenfalls ein additives Fertigungsverfahren. Dabei wird mit einer Rolle Material in Pulverform (Legierungen) auf eine Bauplattform geschoben. Ein Laserstrahl wird über einen Spiegel entsprechend der computergestützten Konstruktion auf das Pulver geleitet und schmilzt dieses kurz und punktuell an. Dieses Lasersintern verdichtet das Material an dieser Stelle. Restaurationen, welche aus EMF-Legierungen und Titan mittels SLS gefertigt wurden, werden derzeit kostengünstig angeboten. SLS wird auch Selektives Laserschmelzen (Selective Laser Melting, SLM) genannt. Eine klinische Studie zur Passgenauigkeit metallkeramischer Einzelzahnrestaurationen zeigte vergleichbare Ergebnisse mit konventionell hergestellten Restaurationen. Statt Legierungen oder Fotopolymere kann Wachs zum Aufbau von Restaurationen in großen Stückzahlen benutzt werden. Dieses als Wachsdrucken oder Wachsplotten bezeichnete Verfahren beruht wieder auf dem Aufbau in Schichten mit einem „Druckkopf“, welcher mit mehreren Düsen ausgestattet ist. Dieses Prinzip funktioniert ähnlich wie bei einem Plotter für Zeichnungen. Feine Schichten erzeugen sehr glatte Oberflächen, benötigen aber mehr Zeit bei der Herstellung. Bevor die Wachsrestaurationen mit der konventionellen Gusstechnik in Restaurationen umgesetzt werden können, müssen diese in der Regel nachbearbeitet werden. Ther-

moplastische Kunststoffe können nach einem ähnlichen Prinzip verarbeitet werden; dieses Verfahren wird Fused Deposition Modeling (FDM) genannt.

### Direkte additive Verfahren

Direkte additive Herstellungsverfahren, welche eine Form benutzen, sind auch die konventionellen zahntechnischen Verfahren: die Anfertigung von Restaurationen aus Heißpresskeramik, die Herstellung von totalen Prothesen sowie die klassische Gusstechnik. Dabei werden die Ausgangsmaterialien Presskeramik, Prothesen-Kunststoff und Legierungen direkt in die jeweilige Form aus Gips (oder Einbettmasse) eingebracht. Durch die auf unterschiedlichste Weise angefertigte Form wird sowohl die Innenseite (Kroneninnenseite, Prothesenbasis) als auch die Außenseite (Kronenaußenform) hergestellt. Weitere konventionelle zahntechnische Herstellungsverfahren sind die Galvanotechnik und die Schlickertechnik, welche aber nur eine Innenform benötigen. Die Abscheidung von Gold bzw. Keramik erfolgt direkt auf dem Gipsstumpf, der die Innenform der Restauration darstellt. Bei allen diesen additiven, direkten, konventionellen Verfahren werden die Formen konventionell und nicht mittels CAD/CAM-Technologien gefertigt.

### Studien

Ein CAD/CAM-Verfahren, welches langjährig eingeführt ist, presst keramisches Pulver auf einen um die Sinterschwundung vergrößerten Duplikatstumpf. Dabei wird der Duplikatstumpf, also die innere Form, mittels CAD/CAM-Technologien gefertigt (Procera, Nobel Biocare). Mit diesem Verfahren können ausschließlich Einzelkronen aus Hochleistungskeramik gefertigt werden. Die Außenseite des Gerüsts wird im Anschluss subtraktiv bearbeitet. Für diesen CAD/CAM-gefertigten Zahnersatz gibt es die größte Langzeiterfahrung. In einer multizentrischen, prospektiven klinischen Studie wurden Überlebensraten von 97,7 Prozent nach fünf Jahren und 93,5 Prozent nach zehn Jahren festgestellt. Jedoch können Brückengerüste nicht auf diese Art und Weise in ausreichender Stabilität hergestellt werden. Brückengerüste werden bei die-

sem Verfahren durch subtraktive Bearbeitung aus Blockmaterial gefertigt. Bei der direkten Formgebung wird die vollständige Form (Innen- und Außenseite) computergestützt konstruiert und gefertigt (ce.novation, ce.novation GmbH). Dabei muss die spätere Sinterschwundung bereits bei der CAD-Modellierung beachtet werden. Das keramische Rohmaterial wird in die Form eingebracht, nach dem Entformen getrocknet und im Anschluss dichtgesintert. Eine Dichte des keramischen Materials an der theoretisch erreichbaren Dichte von 100 Prozent garantiert eine hohe Materialqualität mit geringer Restporosität. Bei beiden Verfahren muss die Keramik im teilgesinterten Zustand in speziellen Öfen gesintert werden, damit die Hochleistungskeramiken ihre endgültige Festigkeit erreichen. In einer vergleichenden In-vitro-Studie wurde die interne und marginale Passgenauigkeit der CAD/CAM-gefertigten Restaurationen auf Prüfstümpfen untersucht. Dabei wurden Kronengerüste verglichen, die in einem teilgesinterten Zustand gefräst, in einem durchgesinterten und verdichteten Zustand bearbeitet sowie durch ein direktes additives Formgebungsverfahren hergestellt wurden. Die teilgesinterten Gerüste zeigten dabei eine Randpassung von 35 bis 100 µm und im Bereich der Inzisalkanten und Höckerspitzen von 500 bis 700 µm. Die hartbearbeiteten Gerüste zeigten ähnliche Passgenauigkeiten. Die Restaurationen, welche durch eine direkte additive Formgebung hergestellt wurden, zeigten ähnliche Passung im Rand- und im Mantelbereich wie die anderen untersuchten Restaurationen, jedoch weitaus geringere Abweichungen im Bereich der Höcker (35 bis 100 µm). Daher passten Restaurationen, welche durch ein direktes additives Formgebungsverfahren hergestellt wurden, auf der Innenseite signifikant besser auf den Zahnstumpf.

## kontakt.

### OA Dr. med. dent. Sebastian Quaas

Klinik für Zahnärztliche Prothetik  
 Universitätsklinikum Ulm  
 Albert-Einstein-Allee 11, 89081 Ulm  
 E-Mail:  
 sebastian.quaas@computerzaehne.de  
 www.computerzaehne.de



## ALLES FÜR 'N APPEL UND 'N EI

Die besonders günstigen WIELAND Legierungen

In Zeiten steigender Edelmetallpreise hat WIELAND die Lösung für Sie, um weiterhin Zahnersatz aus Edelmetall anbieten zu können. Unser umfangreiches Legierungsangebot bietet Ihnen Legierungen zu besonders günstigen Bedingungen.

### Normalexpandierende Legierung:

- Simidur REFLEX LC

### Niedrigschmelzende und hochexpandierende Legierungen:

- Aurium HITEX LC
- Eurogold supra
- Eurogold HITEX LC

### Legierung für Überpresstechnik auf Edelmetallbasis:

- Simidur PressX LC

### Für alle Legierungen gilt:

- Überzeugendes Preis-/Leistungsverhältnis
- Hervorragender Metall-Keramikverbund
- Ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit
- Sehr gute Biokompatibilität

