

**Autor**  
Wissenschaftler  
**Status**  
Aktuell  
**Kategorie**  
Überblick

# Kommunikation ist alles – Schnittstellen der CAD/CAM-Systeme

Sebastian Quaas, Dr. Heike Rudolph

**Um beim Einsatz dentaler CAD/CAM-Verfahren – dem computergestützten Design und der computergestützten Fertigung – eine hohe Präzision der Restaurationen zu gewährleisten, müssen mögliche Fehlerquellen eliminiert werden. Beim Transport der Daten zwischen den einzelnen Komponenten (Digitalisiergerät, CAD-Software, Fertigungsverfahren / CAM) können sich durch die nötige Datenverarbeitung und die eventuell unterschiedliche Dateninterpretation Einzelfehler summieren. In offenen CAD/CAM-Systemen sind deshalb definierte Schnittstellen für die einwandfrei funktionierende Kombination verschiedener Einzelkomponenten unverzichtbar. Der folgende Beitrag soll vorhandene sowie mögliche Schnittstellen offener Systeme aufzeigen und Hintergrundinformationen zu eventuellen Fehlerquellen geben.**

Für die Herstellung von zahnärztlichen Restaurationen zur Wiederherstellung der Zahnreihe ist eine hohe Präzision erforderlich (interne Passgenauigkeit 100 bis 200 µm, marginale Passgenauigkeit < 100 µm). Die konventionelle Herstellung mittels Gusstechnik ist eine aufwendige handwerkliche Tätigkeit mit einer Vielzahl an Einzelschritten und birgt somit ein entsprechendes Risiko hinsichtlich eines reibungslosen Ablaufs. Obgleich alle Einzelschritte wie Abformung, Modellherstellung, Modellation, Einbetten, Guss, Ausarbeiten und Aufpassen sowie alle verwendeten Materialien aufeinander abgestimmt sind, lassen sich Fehler nicht vollständig vermeiden. So kann es beispielsweise zu Lunkern, nicht ausgeflossenen Rändern oder zu engen beziehungsweise zu weiten Restaurationen kommen. Aus diesem Grund wurde seit den 1970er Jahren versucht, durch die

Entwicklung neuer, automatisierter Technologien im Maschinenbau Fehlerquellen bei handwerklich-manuellen Vorgehensweisen zu eliminieren, Schnittstellen zwischen den einzelnen Schritten zu standardisieren und Arbeitsvorgänge zu rationalisieren.

## CAD/CAM: Entwicklungsgeschichte

Die ersten CAD (Computer Aided Design)-Programme wurden 1965 bei dem amerikanischen Luft- und Raumfahrtunternehmen Lockheed (US-Bethesda) eingesetzt. Für computerunterstützte Fertigungstechniken hat sich der Begriff CAD/CAM (Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing), auf deutsch computergestütztes Design / computergestützte Herstellung, manifestiert. Bereits 1971 begann François Duret mit den ersten theoretischen und experimentellen Forschungsarbeiten zur CAD/CAM-gestützten Herstellung von Restaurationen in der Zahnmedizin. 1979 folgten ihm Paul Heitlinger und Frederic Rodder. Werner Mörmann und Marco Brandestini begannen 1980 mit der Entwicklung eines Chairside-Systems, aus dem später das CEREC-System (Sirona Dental Systems, D-Bensheim) entstand.

Der erste Prototyp einer dentalen CAD/CAM-Einheit wurde erst 1983 auf der „Garancière Conference“ in Frankreich vorgestellt. Jedoch ließen sich die Erfahrungen aus der Industrie nicht uneingeschränkt auf die Fertigung von zahnärztlichen Restaurationen übertragen. Zum einen handelt es sich bei allen Restaurationen um individuelle Einzelstücke und nicht um universell einsetzbare Teile, welche mit gewissen Stückzahlen oder gar in Serie gefertigt werden wie beispielsweise in der Industrie. Zum anderen konnte auch dieser Prototyp zwei Hauptprobleme nicht beseitigen: Die Fertigung war mit einem enormen Zeitaufwand verbunden und die nötige Präzision

wurde nicht erreicht. Fehler, welche in einzelnen Komponenten wie beispielsweise bei der Digitalisierung oder beim CAD auftraten, mussten bei späteren Arbeitsschritten (CAM, Fertigung) wieder korrigiert werden. Nur so konnte die Summe aller Fehler klein gehalten und somit eine möglichst gute Passung der Restauration erzielt werden. Wird zum Beispiel, bedingt durch das Messsystem, ein präparierter Zahn leicht vergrößert dargestellt und dieser Umstand durch das Fräsen einer entsprechend verkleinerten Restauration ausgeglichen, so können die einzelnen Komponenten einer solchen CAD/CAM-Prozesskette nur als Einheit funktionieren. Werden sie einzeln und in Kombination mit anderen, nicht abgestimmten Komponenten verwendet, kann kein zufriedenstellendes Endergebnis erreicht werden.

## Generelle Anordnung der Komponenten

Nachdem anfangs nur Einzelzahn-Restaurationen (Inlays) CAD/CAM-gestützt gefertigt werden konnten, erstreckt sich derzeit das Spektrum auf bis zu 14-gliedrige Brücken und Gerüste für abnehmbaren Zahnersatz (envisionTEC, D-Gladbeck) über CAD/CAM-gefertigte Bohrschablonen für die Implantologie (med3D, CH-Zürich; Materialise, BE-Leuven; Nobel Biocare, CH-Glattbrugg) bis hin zu Kunststoffschienen für die kieferorthopädische Behandlung (Align Technology, US-Santa Clara). Die prinzipielle Anordnung der Komponenten ist jedoch gleich geblieben (Abb. 1): Grundlage der CAD/CAM-gestützten Fertigung ist die Digitalisierung der klinischen Situation. Bei der Arbeit mit Modellen kann dies durch optische oder mechanische Digitalisiergeräte erfolgen, alternativ durch radiographische Verfahren wie Computertomographie (CT) oder Digitale Volumetomographie (DVT).

Bereits während beziehungsweise unmittelbar im Anschluss an die Datenerfassung, also an die Digitalisierung, werden messsystemspezifische Fehler im Rahmen der Verarbeitung der Digitalisierdaten teilweise eliminiert. Die Daten werden an ein CAD-Programm übermittelt, mit welchem die Konstruktion („Modellation“) der Restauration oder der Schablone erfolgen kann. Das CAD-Programm übermittelt die fertige Konstruktion an das CAM-Programm, welches

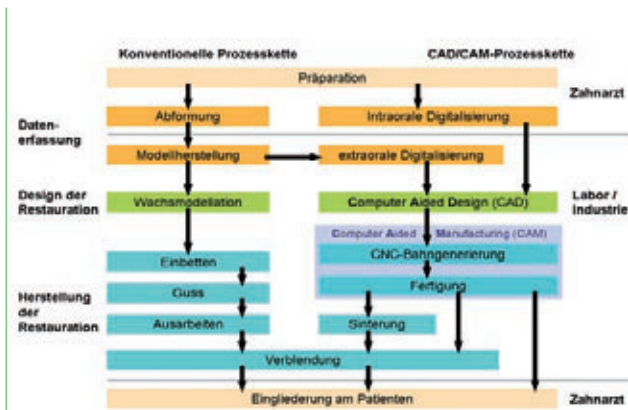


Abb. 1: Gegenüberstellung von konventioneller Fertigung und CAD/CAM-Prozesskette bei der indirekten Herstellung von Zahnrestorationen.

die Konstruktionsdaten für die Fertigung aufbereitet. Dies kann beispielsweise in Form von Fräsdaten, Laser-Steuerungsdaten (zum An- oder Aufschmelzen von pulverigem Material) oder Steuerungsdaten für andere Lichtquellen (zur Verfestigung von flüssigem Material) erfolgen. Die Fertigungseinheit stellt schließlich die Restauration oder die (Bohr-) Schablone her. Die patientenindividuellen Daten werden entweder durch Auftragsnummern anonymisiert oder spezifisch durch das jeweilige Fertigungszentrum verwaltet. Wird die gesamte Verfahrenskette beim Einsatz von CAD/CAM-Systemen zur Herstellung von Zahnrestorationen betrachtet, zeigen sich mehrere Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten / Herstellungsschritten.

## Digitalisierung

Die Digitalisierung oder Datenerfassung der klinischen Situation bildet die Grundlage bei der Anwendung von CAD/CAM-Systemen in der Zahnmedizin. Die Digitalisierung kann dabei intraoral optisch, extraoral optisch oder extraoral mechanisch mit einer hohen Genauigkeit Daten, also die klinische Situation, erfassen. Für die Anwendung in der Zahnheilkunde sollte die Messgenauigkeit eines Digitalisiergeräts in der Regel unter 40 µm liegen. Viele der derzeit eingesetzten Geräte erreichen einen Messfehler von +/-15 µm und weniger. Für die Planung von Implantaten und die Herstellung von Bohrschablonen können CT- oder DVT-Daten genutzt werden. Um einen dreidimensionalen Datensatz zu erhalten, wer-

den die Objekte von mehreren Seiten erfasst. Diese Teilaufnahmen werden dann für die Herstellung eines 3D-Datensatzes zusammengesetzt. Der resultierende Datensatz ist eine Ansammlung von Punkten im Raum (Punktewolke), welche die Objektoberfläche wie beispielsweise den präparierten Zahnstumpf beschreiben. Die Qualität des Datensatzes entscheidet über dessen mögliche weitere Verarbeitung und die später zu erreichende Präzision der Restauration beziehungsweise der Bohrschablone. Sowohl die Genauigkeit (Messunsicherheit) des eingesetzten Digitalisiersystems als auch die weitere Verarbeitung der Punktewolke durch geeignete mathematische Verfahren – sogenanntes Filtern von messbedingtem Rauschen und Streupunkten – beeinflusst die Präzision der herzustellenden Teile.

Eine erste Schnittstelle entsteht zwischen dem Digitalisiergerät nach der Primärbearbeitung der Rohdaten (Filtern, Qualitätswichtung von Einzelpunkten wie z. B. Qualitätswichtung der Punkte in Daten hoher Bedeutung – Präparationsgrenze – und Daten geringer Bedeutung – Stumpfoberfläche und Berechnen der Positionen der einzelnen Aufnahmen vor dem Zusammensetzen des 3D-Datensatzes) und dem CAD-Programm, in welchem nun die Messdaten zu einem 3D-Datensatz zusammengesetzt und die Oberflächen generiert werden. Dabei könnten, neben den Kunden- und Auftragsinformationen, Daten der Punktewolken und 3D-Positionen der Einzelmessungen übermittelt werden. Oftmals wird für die Übertragung der Daten durch diese Schnittstelle das ASCII-Format (American Standard Code for Infor-

mation Interchange) angewandt (Abb. 2). Hierbei liegen die 3D-Koordinaten der Punkte im Klartext vor. Probleme können die verschiedenen Formatierungen („Komma statt Punkt“, Anzahl der Dezimalstellen, Maßeinheit) bereiten. Eine Standardisierung ist im ASCII-Format nicht vorhanden, jedoch verhalten sich die meisten CAD-Programme beim Import der Daten sehr flexibel.

Die anschließende Flächenrückführung, das heißt das Erstellen einer zusammenhängenden CAD-Fläche auf Grundlage der Punktewolken, als Triangulation oder Spline-basierte Fläche kann bereits zu diesem Zeitpunkt erfolgen. Sie findet jedoch meistens im Rahmen der CAD-Konstruktion statt, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

## CAD-Software

Die Qualität der zu erstellenden Restauration ist weiterhin vom exakten Auffinden der Präparationsgrenze und des Zahnäquators sowie dem Erkennen von eventuell auftretenden Hinterschnitten durch die verwendete CAD-Konstruktionssoftware abhängig. Die auf dem Markt erhältlichen Softwarepakete nutzen in unterschiedlicher Komplexität die Möglichkeiten der computergestützten Konstruktion. Ein hohes Maß an Eingriffsmöglichkeiten durch den Anwender ermöglicht einerseits höchst individuelle Konstruktionen, andererseits wird hierdurch eine weitere Fehlerquelle geschaffen.

Sofern die beschriebenen Vorgänge nicht bereits unmittelbar im Anschluss an die Digitalisierung erfolgt sind, findet sich hier, zwischen dem Zusammensetzen der Messdaten zum 3D-Datensatz und der Generierung von Konstruktionen, die zweite Schnittstelle. Häufig wird diese als primäre Schnittstelle zwischen Digitalisiergerät und CAD-Programm benutzt. STL (Surface Tesselation Language beziehungsweise Stereolithographie Language), DXF (Drawing Interchange Format) und IGES (Initial Graphics Exchange Specification) sind für diese Schnittstelle die favorisierten Datenformate. Sie beschreiben Flächen oder Körper dreidimensional. Das dabei am häufigsten verwendete Datenformat für CAD-Modelle (Flächendaten) ist das STL-Format. DXF oder IGES sind dagegen aufgrund der vielfachen Interpretationsmöglichkeiten sehr



Abb. 2: Punktbeschreibung mittels Daten im ASCII-Format.

fehleranfällig für den Datenaustausch. Sie speichern nur die 3D-Daten, mögliche Modifikationen können hier nicht rückgängig gemacht werden.

Bereits im Rahmen der Flächenrückführung können auf das Fertigungsverfahren abgestimmte Konstruktionsschritte in den Vorgang mit einfließen. Bei der Festlegung des Präparationsrandes und der prothetischen Achse, der Konstruktion von CAD-Modellen, der Generierung von Brückenzwischengliedern und Konnektoren sowie der Gestaltung der Okklusalfächen kann es sich ebenfalls um bereits auf das Fertigungsverfahren und das verwendete Material abgestimmte Prozesse handeln.

Durch die CAD-Software ist es beispielsweise möglich, Gerüste nach werkstoffkundlichen Erkenntnissen ausreichend zu dimensionieren und dabei auch den Platz zu den Nachbarzähnen und Antagonisten zu berücksichtigen. Zum Zeitpunkt der Konstruktion sollte somit der verwendete Werkstoff bereits feststehen, da Glaskeramiken größere Gerüstschichtstärken benötigen als Hochleistungskeramiken wie z. B. Zirkoniumdioxid. Vielfach wird eine einfache, intuitiv bedienbare Software, welche die Fehlermöglichkeiten durch den Benutzer minimiert, im Rahmen von Komplettsystemen angeboten, ist jedoch auch einzeln erhältlich. Bei der Verwendung von „intelligenten Gerüstdesigns“ wird die Konstruktion in allen Bereichen mit genügend Platz zu den Antagonisten verstärkt und das Frakturrisiko in Bezug auf die Gerüste verringert. Die Verblendmassen im Höckerbereich werden von Gerüsten wie diesen besser unterstützt und somit Frakturen, also einem Versagen im Bereich der Verblendkeramik, entgegengewirkt.

## CAM

Die dritte Schnittstelle befindet sich zwischen den teilweise fertigungsspezifischen Konstruktionen und den Programmen für Anpassungen und Korrekturen während des Herstellungsprozesses (Fräsbahn-generierung, Fräserradiuskorrekturen, Kompensation einer Sinterschwindung). Die hierbei verwendete CAM-Software ist meist eng an das Fertigungsverfahren gebunden und bereitet die Konstruktionsdaten für die Fertigung auf. Oftmals wird das Fertigungsgerät (Stereolithographiegerät, CNC-Fräsmaschine)

zusammen mit der angepassten CAM-Software geliefert. Alternativ wird die CAM-Software in zentralen Fertigungszentren genutzt. An dieser Schnittstelle kommen ebenfalls alle gängigen CAD/CAM-Dateiformate, welche Oberflächen darstellen können, zur Anwendung. Die Schnittstelle wird jedoch nur für den Transport der fertig konstruierten Daten in ein Fertigungszentrum benutzt, wenn das verwendete Material und Fertigungsverfahren feststehen.

## Ausblick

Aufgrund der Zentralisierung der CAD/CAM-gestützten Fertigung von Zahnersatz und einer zunehmenden Vernetzung verschiedener Fertigungszentren miteinander, wird der Einsatz von Technologien zur Datenübertragung auch in der Zahnmedizin künftig unverzichtbar sein. Möglich ist hierbei der Rückgriff auf bereits vorhandene Internet-Technologien. Aus diesem Grund ist eine qualitative Standardisierung der Exportformate und Schnittstellen in der Dentalbranche wünschenswert und zugleich notwendige Grundlage für die vollständige Öffnung unterschiedlicher Systeme. ■

### Sebastian Quaas Ulm, Deutschland



■ 1996-2001 Studium der Zahnmedizin an der TU Dresden ■ 2001 Approbation als Zahnarzt

■ 2002-2007 Assistenz Zahnarzt in freier Praxis in Pirna und wissenschaftlicher Mitarbeiter der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, TU Dresden ■ 2005-2007 wissenschaftlicher Mitarbeiter der Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Materialwissenschaft und Werkstofftechnologie ■ seit 2007 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Klinik für Zahnärztliche Prothetik des Department für Zahnheilkunde am Universitätsklinikum Ulm

### Kontakt

[sebastian.quaas@computerzaehne.de](mailto:sebastian.quaas@computerzaehne.de)