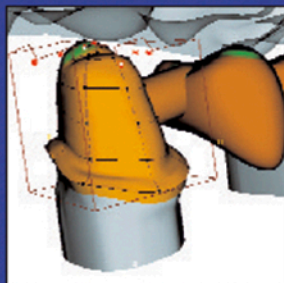
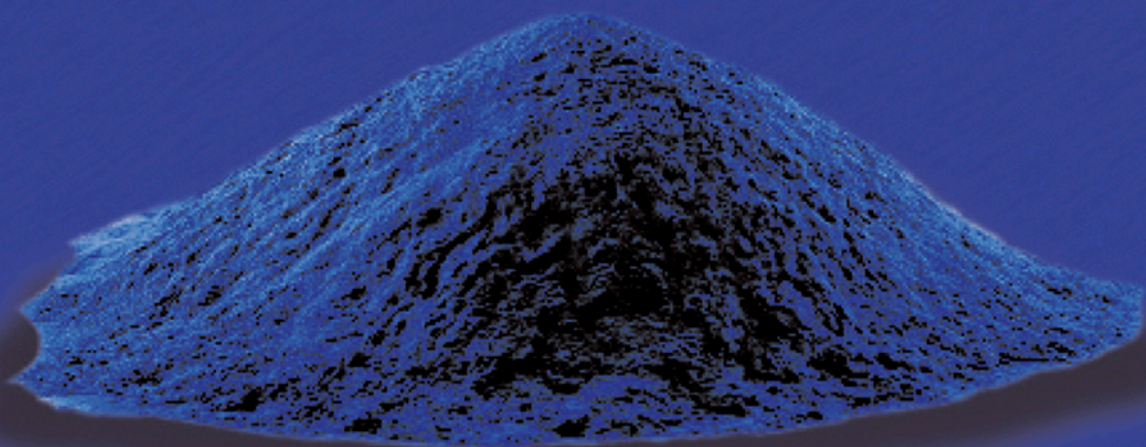


Dr. Roland Strietzel/Dr. med. dent. Claudia Lahl

CAD/CAM - Systeme in Labor und Praxis



Verlag Neuer Merkur GmbH

Vorwort

Das vorliegende Buch basiert auf der Dissertation von Frau Dr. med. dent. C. Lahl [46]. Schon bei der Vergabe des Dissertationsthemas war eigentlich schon die Unmöglichkeit sichtbar, die Entwicklung von dentalen CAD/CAM-Systemen vollständig zu beschreiben.

In akribischer Kleinarbeit wurden von Frau Dr. Lahl die Informationen über die einzelnen Systeme zusammengetragen. Meine Aufgabe bestand darin, die einzelnen Kapitel zu überarbeiten, zu erweitern und zu aktualisieren sowie neue einzufügen.

Schon während der Dissertation änderten sich einige Daten. Systeme kamen neu dazu, andere wurden vom Markt genommen oder wechselten ihren Besitzer oder Vertrieb. Auch im Hinblick auf neue Materialien hat sich in den letzten Jahren viel getan. Voll-Keramik-Systeme haben sich aufgrund der CAD/CAM-Technologie stark verbreitet.

Ich glaube, dass es gelungen ist, einen Überblick über die Materialien, Verfahrenstechniken sowie Verfahren zu geben und wir genug

Material zusammentragen und aufbereiten konnten, so dass Zahntechniker, Zahnmediziner oder sonstige Interessierte genug Informationen zu den einzelnen Systemen, ihrer Materialien und ihrer Funktion bekommen. Nicht zuletzt sollten Grundlagen aufbereitet werden. Aufgrund der hohen Komplexität konnten einige Bereiche nur gestreift werden. Auch ist der Wandel bei den Systemen sehr groß und schnelllebig.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass Firmen- und Produktnamen dem Copyright und gegebenenfalls anderen urheberrechtlichen Vorschriften unterworfen sind, auch wenn dies nicht ausdrücklich erwähnt worden ist.

Auch möchte ich mich bereits an dieser Stelle bei allen bedanken, die dieses Buch ermöglicht haben.

Roland Strietzel
01.02.2006 Lilienthal

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5	1.6.3	Kunststoffe	63
Inhaltsverzeichnis	7	1.6.4	Verbundwerkstoffe	64
		1.6.5	Vergleich von metallischen und keramischen Gerüsten	64
1 Einführung in die CAD/CAM-Systeme	11	1.7 Ausblick	68	
1.1 CAD/CAM-Verfahren	12	1.7.1	Ziel zukünftiger Entwicklungen	68
1.1.1	12	1.7.2	Auswirkungen auf die Zahntechnik	69
1.1.2	12	1.7.3	Auswirkungen für die Zahnärzte	71
1.1.3	19	1.7.4	Auswirkungen für die Patienten	72
1.2 Einteilung dentaler CAD/CAM-Verfahren	22	2 Die einzelnen Systeme	75	
1.2.1	24	2.1 BEGO Medifactoring-System	77	
1.2.2	24	2.1.1	Technische Beschreibung	77
1.2.2.1	25	2.1.1.1	Datenerfassung	78
1.2.2.2	26	2.1.1.1.1	Präparation	79
1.2.3	27	2.1.1.1.2	Vorbereitung für das Digitalisieren	79
1.2.3.1	27	2.1.1.1.3	Dreidimensionale Erfassung der Präparation	79
1.2.3.2	29	2.1.1.2	Modellation des Zahnersatzes	81
1.2.3.2.1	32	2.1.1.2.1	Definition der Präparationsgrenze	81
1.2.3.2.2	34	2.1.1.2.2	Gestaltung der Restauration	81
		2.1.1.3	Herstellung des Zahnersatzes	85
1.3 Verwendete Software	37	2.1.1.3.1	Fertigungsprozess	85
1.3.1	37	2.1.1.3.2	Nachbearbeitung und Fertigstellung	88
1.3.2	38	2.1.1.3.3	Einsetzen des Zahnersatzes	89
1.3.2.1	38	2.1.2	Materialien	89
		2.1.3	Indikationsbereiche	89
1.3.2.2	40	2.1.4	Vorliegende Untersuchungen	89
		2.1.4.1	In-vitro-Untersuchungen	89
1.3.3	42	2.1.4.2	Klinische Untersuchungen	94
		2.1.5	Zusammenfassung	95
1.4 Art der Produktion	42	2.2 CEREC 1	97	
1.4.1	44	2.2.1	Technische Beschreibung	97
1.4.2	44	2.2.1.1	Datenerfassung	97
1.4.3	45	2.2.1.1.1	Präparation	97
1.4.4	46	2.2.1.1.2	Vorbereitung für das Digitalisieren	98
		2.2.1.1.3	Dreidimensionale Erfassung der Präparation	99
1.5 Ort der Produktion	47	2.2.1.2	Modellation des Zahnersatzes	100
1.6 Materialien für CAD/CAM-Systeme	50	2.2.1.2.1	Definieren der Präparationsgrenze	100
1.6.1	50	2.2.1.2.2	Gestaltung der Restauration	100
1.6.2	51	2.2.1.3	Herstellung des Zahnersatzes	101
1.6.2.1	53	2.2.1.3.1	Fertigungsprozess	101
1.6.2.2	54			
1.6.2.3	55			
1.6.2.4	56			
1.6.2.5	58			
1.6.2.6	59			
1.6.2.7	62			

2.2.1.3.2	Nachbearbeitung und Fertigstellung	102	2.5.1.1.2	Vorbereitung für das Digitalisieren	123
2.2.1.3.3	Einsetzen des Zahnersatzes	102	2.5.1.1.3	Dreidimensionale Erfassung der Präparation	124
2.2.2	Materialien	102	2.5.1.2	Modellierung des Zahnersatzes	124
2.2.3	Indikationsbereiche	103	2.5.1.2.1	Definieren der Präparationsgrenze	124
2.2.3.1	Vorliegende Untersuchungen	103	2.5.1.2.2	Gestaltung der Restauration	124
2.2.3.1.1	In-vitro-Untersuchungen	103	2.5.1.3	Herstellung des Zahnersatzes	125
2.2.3.1.2	Klinische Studien und Diskussion	105	2.5.1.3.1	Fertigungsprozess	125
2.3	CEREC 2	111	2.5.1.3.2	Nachbearbeitung und Fertigstellung	126
2.3.1	Technische Beschreibung	111	2.5.1.3.3	Einsetzen des Zahnersatzes	126
2.3.1.1	Datenerfassung	111	2.5.2	Materialien	126
2.3.1.2	Präparation	111	2.5.3	Indikationsbereiche	126
2.3.1.2.1	Vorbereitung der Abdruckfläche	111	2.5.4	Vorliegende Untersuchungen	126
2.3.1.3	Dreidimensionale Erfassung der Präparation	111	2.5.4.1	In-vitro-Untersuchungen	127
2.3.1.3.1	Modellierung des Zahnersatzes	112	2.5.4.2	Klinische Studien und Diskussion	127
2.3.1.4	Definieren der Präparationsgrenze	112	2.6	DCS PRECIDENT	128
2.3.2	Gestaltung der Restauration	112	2.6.1	Datenerfassung	128
2.3.3	Herstellung des Zahnersatzes	113	2.6.1.1	Präparation	128
2.3.3.1	Fertigungsprozess	113	2.6.1.2	Vorbereitung für das Digitalisieren	128
2.3.3.2	Nachbearbeitung und Fertigstellung	114	2.6.1.3	Dreidimensionale Erfassung der Präparation	129
2.3.4	Einsetzen des Zahnersatzes	114	2.6.1.4	Modellierung des Zahnersatzes	130
2.3.5	Materialien	114	2.6.1.4.1	Definieren der Präparationsgrenze	130
2.3.5.1	Indikationsbereiche	114	2.6.1.4.2	Gestaltung der Restauration	130
2.3.6	Vorliegende Untersuchungen	114	2.6.2	Herstellung des Zahnersatzes	131
2.3.7	Klinische Untersuchungen	117	2.6.2.1	Fertigungsprozess	131
2.4	CEREC 3	118	2.6.2.1.1	Nachbearbeitung und Fertigstellung	133
2.4.1	Technische Beschreibung	118	2.6.2.1.2	Einsetzen des Zahnersatzes	133
2.4.1.1	Datenerfassung	118	2.6.3	Materialien	133
2.4.1.1.1	Präparation	120	2.6.3.1	Indikationsbereiche	134
2.4.1.1.2	Vorbereitung für das Digitalisieren	120	2.6.4	Vorliegende Untersuchungen	134
2.4.1.1.3	Dreidimensionale Erfassung der Präparation	120	2.6.4.1	In-vitro-Untersuchungen	134
2.4.1.2	Modellierung des Zahnersatzes	120	2.6.4.2	Klinische Studien und Diskussion	134
2.4.1.2.1	Definieren der Präparationsgrenze	121	2.7	DENTICAD	137
2.4.1.2.2	Gestaltung der Restauration	121	2.7.1	Technische Beschreibung	137
2.4.1.3	Herstellung des Zahnersatzes	121	2.7.1.1	Datenerfassung	137
2.4.1.3.1	Fertigungsprozess	121	2.7.1.2	Präparation	137
2.4.1.3.2	Nachbearbeitung und Fertigstellung	122	2.7.1.2.1	Vorbereitung für das Digitalisieren	138
2.4.1.3.3	Einsetzen des Zahnersatzes	122	2.7.1.2.2	Dreidimensionale Erfassung der Präparation	138
2.4.2	Materialien	122	2.7.1.3	Modellierung des Zahnersatzes	138
2.4.3	Indikationsbereiche	122	2.7.1.3.1	Definieren der Präparationsgrenze	139
2.4.4	Vorliegende Untersuchungen	122	2.7.1.3.2	Gestaltung der Restauration	139
2.5	CICERO	123	2.7.2	Herstellung des Zahnersatzes	139
2.5.1	Technische Beschreibung	123	2.7.2.1	Fertigungsprozess	139
2.5.1.1	Datenerfassung	123	2.7.2.2	Nachbearbeitung und Fertigstellung	140
2.5.1.1.1	Präparation	123			

2.7.3	Einsetzen des Zahnersatzes	141	2.10.1.2	Modellation des Zahnersatzes	152
2.7.3.1	Materialien	141	2.10.1.2.1	Definieren der Präparationsgrenze	152
2.7.3.2	Indikationsbereiche	141	2.10.1.2.2	Gestaltung der Restauration	152
2.7.4	Vorliegende Untersuchungen	141	2.10.1.3	Herstellung des Zahnersatzes	153
2.7.4.1	In-vitro-Untersuchungen	141	2.10.1.3.1	Fertigungsprozess	153
2.7.4.2	Klinische Studien und Diskussion	142	2.10.1.3.2	Nachbearbeitung und Fertigstellung	153
2.8	DIGIDENT	142	2.10.1.3.3	Einsetzen des Zahnersatzes	153
2.8.1	Technische Beschreibung	142	2.10.2	Materialien	157
2.8.1.1	Datenerfassung	142	2.10.3	Indikationsbereiche	157
2.8.1.2	Präparation	142	2.10.4	Vorliegende Untersuchungen	157
2.8.1.2.1	Vorbereitung für das Digitalisieren	143	2.11	PROCERA	158
2.8.1.3	Modellation des Zahnersatzes	144	2.11.1	Technische Beschreibung	158
2.8.1.3.1	Definieren der Präparationsgrenze	144	2.11.1.1	Datenerfassung	158
2.8.1.3.2	Gestaltung der Restauration	144	2.11.1.1.1	Präparation	158
2.8.1.4	Herstellung des Zahnersatzes	144	2.11.1.1.2	Vorbereitung für das Digitalisieren	158
2.8.1.4.1	Fertigungsprozess	144	2.11.1.1.3	Dreidimensionale Erfassung der Präparation	159
2.8.1.4.2	Nachbearbeitung und Fertigstellung	145	2.11.1.2	Modellation des Zahnersatzes	159
2.8.1.4.3	Einsetzen des Zahnersatzes	146	2.11.1.2.1	Definieren der Präparationsgrenze	159
2.8.2	Materialien	146	2.11.1.2.2	Gestaltung der Restauration	160
2.8.2.1	Indikationsbereiche	147	2.11.1.3	Herstellung des Zahnersatzes	160
2.8.2.2	Vorliegende Untersuchungen	147	2.11.1.3.1	Fertigungsprozess	160
2.9	DURET	148	2.11.1.3.2	Nachbearbeitung und Fertigstellung	161
2.9.1	Technische Beschreibung	148	2.11.1.3.3	Einsetzen des Zahnersatzes	162
2.9.1.1	Datenerfassung	148	2.11.2	Materialien	162
2.9.1.2	Präparation	148	2.11.3	Indikationsbereiche	162
2.9.1.2.1	Vorbereitung für das Digitalisieren	148	2.11.4	Vorliegende Untersuchungen	162
2.9.1.2.2	Dreidimensionale Erfassung der Präparation	148	2.11.4.1	In-vitro-Untersuchungen	163
2.9.2	Modellation des Zahnersatzes	149	2.11.4.2	Klinische Studien und Diskussion	165
2.9.2.1	Definieren der Präparationsgrenze	149	2.12	Weitere CAD/CAM-Systeme	169
2.9.2.2	Gestaltung der Restauration	149	2.12.1	CeraSys-System	169
2.9.3	Herstellung des Zahnersatzes	150	2.12.2	CEREC-inLab/infiniDent-System	169
2.9.3.1	Fertigungsprozess	150	2.12.3	Decim-System	171
2.9.3.2	Nachbearbeitung und Fertigstellung	150	2.12.4	etkon-System	172
2.9.3.3	Einsetzen des Zahnersatzes	150	2.12.5	EVEREST-System	174
2.9.4	Materialien	150	2.12.6	GN-1-System	177
2.9.4.1	Indikationsbereiche	151	2.12.7	Xawex-System	177
2.9.5	Vorliegende Untersuchungen	151	2.12.8	ZENO TEC-System	177
2.10	LAVA-System	152	3	Kopiersysteme	179
2.10.1	Technische Beschreibung	152	3.1	CELAY	179
2.10.1.1	Datenerfassung	152	3.1.1	Technische Beschreibung	179
2.10.1.1.1	Präparation	152	3.1.1.1	Datenerfassung	179
2.10.1.1.2	Vorbereitung für das Digitalisieren	152	3.1.1.1.1	Präparation	180
2.10.1.1.3	Dreidimensionale Erfassung der Präparation	152	3.1.1.1.2	Vorbereitung der Abdruckfläche	180

3.1.1.1.3	Dreidimensionale Erfassung der Präparation	180	4	Systemvergleich	193
3.1.1.2	Modellation des Zahnersatzes	180	4.1	Allgemeine Überlegungen	193
3.1.1.2.1	Definieren der Präparationsgrenze	180	4.2	Vergleich der Systeme	196
3.1.1.2.2	Gestaltung der Restauration	181	4.2.1	Vergleich mit konventionellen Methoden	197
3.1.1.3	Herstellung des Zahnersatzes	181	4.2.2	Passung	200
3.1.1.3.1	Fertigungsprozess	181	4.2.3	Zeitaufwand	201
3.1.1.3.2	Nachbearbeitung und Fertigstellung	181	4.2.4	Verwendbare Materialien	202
3.1.1.3.3	Einsetzen des Zahnersatzes	182	4.3	Ausblick	203
3.1.2	Materialien	182			
3.1.3	Indikationsbereiche	182		Danksagung	205
3.1.4	Vorliegende Untersuchungen	182		Stichwortverzeichnis	206
3.1.4.1	In-vitro-Untersuchungen	182			
3.1.4.2	Klinische Untersuchungen und Diskussion	182			
3.2	CERCON	184			
3.2.1	Technische Beschreibung	184			
3.2.1.1	Datenerfassung	184			
3.2.2	Präparation	184			
3.2.2.1	Vorbereitung für die Digitalisierung	184			
3.2.3	Modellation des Zahnersatzes	184			
3.2.3.1	Herstellung des Zahnersatzes	185			
3.2.3.1.1	Fertigungsprozess	185			
3.2.3.1.2	Nachbearbeitung und Fertigstellung	185			
3.2.3.2	Einsetzen des Zahnersatzes	185			
3.2.4	Materialien	185			
3.2.4.1	Indikationsbereiche	186			
3.2.5	Vorliegende Untersuchungen	186			
3.3	ZirkonZahn	187			
3.3.1	Technische Beschreibung	187			
3.3.1.1	Datenerfassung	187			
3.3.1.2	Präparation	187			
3.3.1.3	Vorbereitung für die Digitalisierung	187			
3.3.1.3.1	Modellation des Zahnersatzes	187			
3.3.1.3.2	Definieren der Präparationsgrenze	187			
3.3.1.3.3	Gestaltung der Restauration	187			
3.3.2	Herstellung des Zahnersatzes	188			
3.3.2.1	Fertigungsprozess	188			
3.3.2.2	Nachbearbeitung und Fertigstellung	191			
3.3.2.3	Einsetzen des Zahnersatzes	191			
3.3.3	Materialien	191			
3.3.3.1	Indikationsbereiche	191			
3.3.4	Vorliegende Untersuchungen	192			

1 Einführung in die CAD/CAM-Systeme

Mit Beginn der Automation in der Industrie kündigten sich die Vorboten der Computertechnologie schon seit 1808 an. Seit mehr als 150 Jahren wurden initial handwerkliche Fertigungsweisen auf Maschinen übertragen und so zunehmend komplexere Arbeitsabläufe zusammengefasst und automatisiert. Die sich daraus ergebenden Vorteile bestanden nicht nur in kürzeren Herstellungszeiten. Auch konnten die Produkte billiger, fehlerfreier und in größerer Serie gefertigt werden.

Der erste Schritt zur Kontrolle über eine Maschine und den Herstellungsvorgang unter Anwendung eines Programms gelang auf mechanische Weise mit Hilfe so genannter Lochkarten.

Erfolgt die Steuerung der Arbeitseinheiten durch Eingabe von Zahlenwerten, wird dieses Vorgehen mit dem Begriff Numeric Control (NC) bezeichnet. 1948 wurde hierbei zum ersten Mal ein Computer eingesetzt. Diese Art der Steuerung wird Computer Numeric Control (CNC) genannt.

Die rasante Entwicklung auf diesem Gebiet hatte zur Folge, dass auch die Maschinen ständig an die gestiegenen Fähigkeiten der Programmsteuerung angepasst wurden. So konnten durch Erweiterung der Bewegungsmöglichkeiten der Werkzeuge immer kompliziertere Werkstücke hergestellt werden. Die dabei anfallenden höheren Investitionskosten wurden ausgeglichen, indem innerhalb kürzerer Herstellungszeiten wesentlich höhere Stückzahlen an Produkten gefertigt wurden, die zudem noch eine verbesserte Qualität aufwiesen [81].

Die Weiterentwicklung der Computertechnologie führte bald zum Einsatz von Rechnern als Zeichenhilfe für die Planung und Konstruktion eines Werkstücks. Die computerunterstützte Arbeitsweise bot vor allem den

herausragenden Vorteil, allein am Bildschirm schnelle Änderungen bei der Gestaltung eines Objekts durchzuführen.

War nach beliebig wiederholter Abwandlung die gewünschte Form entworfen, wurde mit Hilfe der gespeicherten Daten anschließend ein NC-Fräsprogramme zur Fertigung des Werkstücks erstellt. Die ersten Anwendungen dieser Technologie fanden Ende 1970 im Bereich der Raumfahrt und der Automobilindustrie statt [69; 71].

Betrachtet man nun die traditionelle Herstellung von Zahnersatz vom technischen Standpunkt aus, so ergeben sich zwei zu berücksichtigende Faktoren. Einerseits handelt es sich hierbei um ein exakt passendes Werkstück, dessen manuelle Einzelanfertigung andererseits hohe Kosten verursacht. So erscheint es verständlich, dass auch im zahnmedizinischen Bereich die Forderung nach Einführung der Computertechnologie gestellt wird. Neben einer angestrebten Kostensenkung durch die Reduktion des enormen manuellen Aufwands bei der Herstellung konventioneller Restaurationen soll durch den Wegfall der gusstechnischen Verarbeitung die Qualität des Werkstücks Zahnersatz erhöht werden.

Zur Verwirklichung dieser Ziele unternahm die Dentalindustrie in den letzten Jahren die unterschiedlichsten Lösungsansätze, meist verbunden mit großen Investitionskosten. Vieles konnte bei der Entwicklung computerunterstützter Systeme für den dentalen Bereich aus der Industrie übernommen werden. Allerdings fand die Computertechnologie in der Zahnmedizin im Gegensatz zu ihrem industriellen Einsatz bislang nicht die gleiche Verbreitung.

Ein wesentlicher Grund hierfür ist der finanzielle Aufwand, der sowohl für die Entwicklung als auch beim Erwerb eines entsprechenden Geräts zu erbringen ist.

Die Zahnmedizin aber stellt einen begrenzten Markt dar, dessen finanzielle Möglichkeiten außerdem in zunehmendem Maß restringiert werden. Zudem erlaubt das besondere Anforderungsprofil dentaler Restaurationen keine Massenproduktion, welche in der Industrie zur raschen Tilgung der Anschaffungskosten von Maschinen führt. Der allgemeine Vorteil der vollautomatischen Herstellung beliebig vieler gleichartiger Werkstücke steht also im völligen Gegensatz zum zahnmedizinischen Anspruch, die Form des Zahnersatzes individuell an den Patienten anzupassen [8].

1.1 CAD/CAM-Verfahren

1.1.1 Definition und Zielsetzung

Der Computer wird in der Industrie benutzt, um mit Hilfe spezieller Programme die Konstruktion von Werkstücken zu erleichtern und ihre Herstellung zu automatisieren. Diese beiden meist miteinander verknüpften Prozesse werden mit dem Akronym CAD/CAM bezeichnet, welches für die englischen Bezeichnungen Computer-Aided Design (CAD) und Computer-Aided Manufacturing (CAM) steht. Diese Begriffe wurden im technischen Maschinenbau geprägt und beschreiben die dreidimensionale Planung eines Werkstücks am Bildschirm eines Rechners (CAD) sowie seine anschließende automatisierte Herstellung durch eine computergesteuerte Werkzeugmaschine (CAM).

CAD/CAM bietet somit die schnellste Methode, um von der Konzeption eines Designs zu seiner tatsächlichen Herstellung zu gelangen und stellt mittlerweile ein Standardverfahren in der industriellen Produktion dar.

Für den Einsatz dentaler CAD/CAM-Systeme gilt dabei das besondere Augenmerk der immer wieder gestellten Forderung nach Herstellung von qualitativ hochwertigen Restaurationen in kürzerer Zeit [69].

Aus einem möglichen Computereinsatz auf dem zahnmedizinischen Gebiet ergeben sich

zahlreiche Vorteile. Zum einen ist durch den Wegfall manueller Bearbeitungsschritte und ihrer möglichen Fehlerquellen eine Verbesserung der Qualität gegenüber der konventionellen Technik zu erreichen. Die Herstellung von Gerüsten erfolgt derzeit meist über das Gießen von Metallen. Jeder Herstellungsschritt birgt die Gefahr von Fehlern. Je händischer der Prozessschritt ist, desto höher ist diese Gefahr.

Des Weiteren wird mittels der computergestützten Gestaltung und Herstellung des Zahnersatzes die Beeinflussung der Passgenauigkeit durch schwer kalkulierbare Werkstoffeigenschaften von Abform- und Modellmasse, Wachs und Einbettmaterial verhindert.

1.1.2 Historischer Überblick

Die Anwendung der CAD/CAM-Technologie zum Nutzen der Zahnmedizin beschäftigte verschiedene Forschergruppen bereits seit den siebziger Jahren (Abb. 1.1). Sie arbeiteten zunächst unabhängig voneinander. Erst Mitte der achtziger Jahre kam es zur gegenseitigen Kenntnisnahme. Das primäre Ziel aller Forschungen war die Entwicklung eines dreidimensionalen Messverfahrens zur Erfassung der Präparation, da die Digitalisierung der Stumpffdaten als die unabdingbare Voraussetzung für die computerunterstützte Gestaltung und Herstellung von Zahnersatz gilt [71].

Mit der Grundlagenforschung zur Datenaufnahme begannen im Jahr 1977 YOUNG und ALTSHULER rein experimentell auf dem Gebiet der Holografie. Sie entwickelten eine schnelle, verlässliche und hochpräzise Methode zur direkten optischen Datenerfassung. Ihr Prototyp fand Anwendung in der US-Army und Air Force als Teil eines Systems zur dreidimensionalen Oberflächenerfassung [81; 93].

Ebenfalls Pionierarbeit auf dem Gebiet der optischen Vermessung leisteten vorwiegend in den späten siebziger Jahren die drei besonders hervorzuhebenden Gruppen um DURET, MÖRMANN/BRANDESTINI und REKOW.

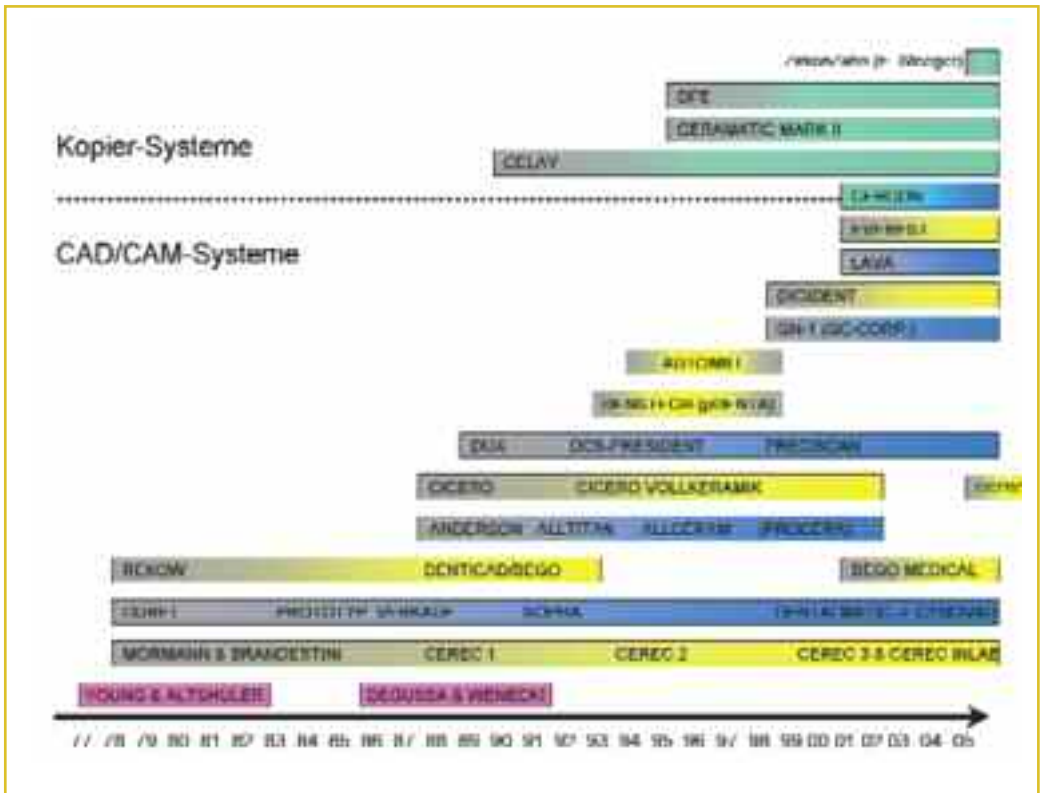


Abb. 1.1 Schematische Darstellung der historischen Entwicklung der CAD/CAM- und Kopier-Systeme nach vorliegender Literatur.

Ihre oberste Zielsetzung stimmte dahingehend überein, eine Technik zur intraoralen Datenaufnahme zu entwickeln, an die unmittelbar im Anschluss die Anfertigung des Zahnersatzes erfolgen konnte. Trotz dieser gemeinsamen Grundlage wiesen ihre hierfür angewandten Methoden starke Unterschiede auf. Auch waren die Forschergruppen im Hinblick auf die klinische Einsatzfähigkeit ihrer Vorgehensweisen unterschiedlich erfolgreich, wie sich bei der weiter unten folgenden Darstellung einzelner CAD/CAM-Systeme erkennen lässt [57].

Der französische Zahnarzt DURET beschäftigte sich seit 1971 zunächst mit der dreidimensionalen Datenerfassung aus der Kombination mehrerer Fotoaufnahmen und

später mit der Technik der Lasertriangulation [81].

Der Elektronikingenieur BRANDESTINI und der Schweizer Zahnarzt MÖRMANN entwickelten mit der Streifenmusterprojektion ein Verfahren zur aktiven Triangulation von Lichtschnitten. 1981 meldeten sie ihr intraoral anwendbares optisches Messverfahren zum Patent an [10; 81].

Die amerikanische Zahnärztin REKOW arbeitete zunächst auf dem Gebiet der Stereophotogrammetrie mit dem Ziel, zweidimensionale Fotoaufnahmen computerunterstützt zu einem dreidimensionalen Bild zusammenzufügen. Aufgrund der Vielzahl der dabei aufgetretenen Probleme widmete sie sich jedoch später der mechanischen Datenerfassung.

Ebenfalls mit der mechanischen Technik befasste sich seit 1987 ANDERSON in Schweden [81].

Ausgehend von zum Teil gemeinsamen Grundlagen verfolgten die einzelnen Forschergruppen die verschiedenen Methoden und leiteten so die Entwicklung ihres speziellen Systems ein.

In Japan betätigten sich ebenfalls zahlreiche Wissenschaftler auf dem Gebiet der dentalen CAD/CAM-Technik [38 – 45]. Die Gruppe um TSUTSUMI begann an der Universität Kyoto als erste ihre Studien zur optischen Datenerfassung. Weiterhin wurden hier neue Materialien untersucht und ein Index für die maschinelle Bearbeitbarkeit von Werkstoffen erstellt [70].

Auch die Arbeiten von KAWANAKA in Tokio, TAKAHASHI in Osaka und HIKITO/UCHIYAMA in Hokkaido, um nur einige Namen zu nennen, wurden in vielfältigen Publikationen dokumentiert. Sie führten jedoch bislang nicht über das experimentelle Stadium hinaus [30; 43 – 45; 71].

Ebenso wenig konnten sich viele interessante Lösungsansätze anderer Entwicklergruppen durchsetzen. Dieses lag zum einen an den hohen Investitionskosten innerhalb der Forschung bei zunehmend eingeschränkten finanziellen Möglichkeiten im zahnmedizinischen Arbeitsbereich. Zum anderen aber behinderte häufig eine Ähnlichkeit der Systeme untereinander ihre weitere Differenzierung, da zahlreiche Detaillösungen bereits umfangreich patentrechtlich abgedeckt waren. Die hieraus resultierende Einstellung der Entwicklung vieler CAD/CAM-Verfahren bzw. ihre Weiterveräußerung nach erfolgter Präsentation führte durch die damit verbundene Änderung des Systemnamens oftmals zur Verwirrung. Auch bietet die Literatur hierzu keine übereinstimmenden und kontinuierlichen Aussagen [8; 9].

Die ersten Vorstellungen dentaler CAD/CAM-Systeme fanden 1985 statt. Mit einem Prototyp der von MÖRMANN (Universität Zürich) in Zusammenarbeit mit BRANDESTI-

NI (Firma BRAINS – Brandestini Instruments of Switzerland) entwickelten CEREC-Einheit wurde damals das erste Inlay angefertigt [81]. DURET demonstrierte mit seinem System am 30. November desselben Jahres anlässlich des Internationalen Kongresses der Französischen Gesellschaft für Zahnmedizin die Herstellung einer Krone in weniger als einer Stunde [70].

1986 unternahmen die Firma DEGUSSA Dental GmbH & Co. KG, Hanau-Wolfgang (Deutschland), und der italienische Erfinder MENECKI den Versuch, Geschiebe unter Nutzung der CAD/CAM-Technologie herzustellen. Das Verfahren gelangte jedoch nicht über den Status eines Prototyps hinaus, da die Justierung an die individuelle Patientensituation zu lange dauerte und sich damit als unwirtschaftlich herausstellte [81].

Trotz zahlreicher Bemühungen der Entwickler gestaltete sich die Umsetzung der wissenschaftlichen Arbeiten zur Konzeption dentaler CAD/CAM-Fertigungstechniken für den Praxiseinsatz als sehr schwierig. Oftmals sind die von den Firmen angekündigten Termine zur Serieneinführung nicht eingehalten worden. Auch erlangten insgesamt nur sehr wenige der Geräte die Marktreife oder darüber hinaus eine kommerzielle Verbreitung [1].

1988 begann mit der Serienproduktion des CEREC-Geräts, Firma SIEMENS, heute SIRONA Dental Systems GmbH, Bensheim (Deutschland), die Markteinführung des wohl bekanntesten CAD/CAM-Verfahrens. Ausgehend von den Forschungsarbeiten MÖRMANNs und BRANDESTINIS handelt es sich hierbei um das erste und bisher einzige unmittelbar am Patienten funktionsfähige System. Ermöglicht wurde der frühe direkte Praxiseinsatz bei einem vergleichsweise niedrigen Verkaufspreis nicht zuletzt durch die hier angewandte Problemreduktion. Diese bestand zum einen in Einschränkungen bezüglich des Anwendungsbereichs und verwendeter Werkstoffe, zum anderen im Verzicht auf die Gestaltung einer Kauflächenanatomie. Des Weiteren er-

laubte die Insertion der angefertigten Keramik-inlays mittels adhäsiver Befestigungstechniken geringere Anforderungen an die Passgenauigkeit [9; 10; 30; 81].

Im Gegensatz dazu handelte es sich bei DURETs System um das Verfahren mit dem größten technischen Aufwand, was auch den geplanten hohen Preis der Einheit rechtfertigen sollte. Die Serienproduktion des zum damaligen Zeitpunkt in Zusammenarbeit mit der Firma HENNSON, Vienne (Frankreich), entwickelten Geräts wurde für 1987 angekündigt, ist bis heute jedoch nicht erfolgt. Zwischenzeitlich aber wurde die Lizenz auf verschiedene Firmen übertragen, so dass es wie bereits beschrieben zu zahlreichen Namensänderungen kam. 1990/91 wurde das System unter der Bezeichnung SOPHA, Firma SOPHA Bioconcept, Vienne (Frankreich), vorgestellt und verfügte über zwei Bearbeitungseinheiten für Titan und Keramik. Bedauerlicherweise existiert im Zusammenhang mit diesem Verfahren seit Beginn seiner Entwicklung nur sehr wenig Literatur [10; 30; 67; 81].

Von der dritten bereits erwähnten Forschergruppe um REKOW (Universität Minnesota) wurde in Zusammenarbeit mit dem US National Institute of Dental Research und der deutschen Firma BEGO, Bremen, das DENTICAD-System entwickelt. Seine ersten öffentlichen Demonstrationen erfolgten 1989 anlässlich des Keramik-Symposiums in Berlin und im April 1992 auf der Internationalen Dentalausstellung in Köln. Als Alternative zum problematischen Gussverfahren sollte das Gerät die vollautomatische Anfertigung von Zahnersatz aus Titan bieten und dabei gleichzeitig eine Passgenauigkeit unter $50\ \mu\text{m}$ erzielen. Die ursprünglich geplante optische Datenerfassung mit Hilfe der enorm hochauflösenden Stereophotogrammetrie wurde später in eine mechanisch-manuelle Methode umgewandelt. Eine direkte Vorgehensweise konnte jedoch mit keiner der beiden Techniken verwirklicht werden. 1990 erfolgte die Abgabe der Lizenz an die Firma BEGO, Bremen (Deutschland). Seither

wurden keine Informationen über eine weitere Entwicklung des DENTICAD-Verfahrens publiziert [3; 10; 30; 73; 81].

1991 wurde die Einheit PROCERA AllTitan der Firma NOBELPHARMA, heute NOBEL BIOCARE, Göteborg (Schweden), eingeführt. Bei diesem von ANDERSON entwickelten Verfahren mit mechanischer Datenerfassung geschieht die Herstellung des Zahnersatzes nur im weitesten Sinne computerunterstützt. Eine Kombination aus Kopierfräsung und Funkenerosion ermöglicht hier die Bearbeitung von Titan [81; 94].

Im selben Jahr brachte die Firma GIM-Alldent, Varel (Deutschland), das DUX-System auf den Markt, bei welchem die Datenaufnahme ebenfalls mit Hilfe der mechanischen Methode durchzuführen war. Es bot damals als einziges Gerät die Möglichkeit, kleine Brücken anzufertigen. Bereits 1989 in Berlin vorgestellt wurde mit dieser Einheit 1992 in Köln zum ersten Mal die Herstellung kleiner Pontics demonstriert. 1993 kam das Gerät DCS bzw. mittlerweile DCS PRECIDENT, Firma DCS Dental AG, Allschwill (Schweiz), als Nachfolger der DUX-Einheit auf den Markt [10; 15; 17; 30; 94].

Das CELAY-System der Firma MIKRONA Technologie, Spreitenbach (Schweiz), wurde als Kopierverfahren für die Keramikbearbeitung von EIDENBENZ an der Züricher Universität entwickelt. Nach seiner Präsentation 1990 in München erfolgte die Markteinführung in Europa im Jahr 1992. Als einfachste Vorgehensweise der mechanischen Datenerfassung wurde hierbei die Abtastung der konventionell modellierten Restauration direkt und ohne Computeranschluss an eine Fräsmaschine gekoppelt [17; 55; 66].

1993 konnte das CICERO-System, Firma ELEPHANT Dental B. V. bzw. Tochterunternehmen CICERO Dental Systems B. V., Hoorn (Niederlande), mit seiner optischen Modellvermessung als reines Laborverfahren für die Anfertigung vollkeramischen Zahnersatzes vorgestellt werden. Seit 1988 in Entwicklung, sah

es ursprünglich die Herstellung von Metall-Keramik-Restaurationen mittels geschichteter Sintertechnik vor. In der gegenwärtigen klinischen Erprobungsphase wird jedoch nur noch hochfeste Aluminiumoxidkeramik als Kappchenmaterial verarbeitet [10; 20; 30; 94]. Mit dem Kauf der Firma Elephant durch Degudent/Dentsply fand, zumindest nach außen hin, keine sichtbare Weiterentwicklung statt. Seit 2005 ist das CICERO-System wieder auf dem Markt.

Im selben Jahr demonstrierten die Entwickler ROHLEDER und KAMMER in Köln den Prototyp ihres DENSTECH-Systems, Firma DENS, Berlin (Deutschland). Die geplante Markteinführung sollte 1994 stattfinden, konnte jedoch nicht realisiert werden. Inzwischen an die Firma MIKRODENTA, Berlin (Deutschland), abgegeben, ging aus ihm das μ DENTA-Gerät hervor, ebenfalls ausgestattet mit einer optischen Datenmesseinrichtung. Weitere Informationen zu diesem Verfahren wurden nicht veröffentlicht [30].

Auch am ursprünglich geplanten CAD/CAM-System INLAC der ehemaligen Firma RITTER, Karlsruhe (Deutschland), wurde in den vergangenen Jahren nicht weitergearbeitet.

Seit September 1994 ist das CEREC 2-Gerät, Firma SIRONA Dental Systems GmbH, Bensheim (Deutschland), mit verbesserter Software und einem erweiterten Indikationsbereich verfügbar [30].

Ebenfalls 1994 begann die Einführung des AUTOMILL-Systems, Firma ALLDENT, Ruggell (Liechtenstein), zur automatischen Herstellung keramischer Kronen- und Brückenrestaurationen nach mechanischer Datenerfassung auf dem Modell [30].

Mit der CERAMATIC MARK II-Einheit, Firma CERAMATIC AB, Göteborg (Schweden), wurde im selben Jahr ein weiteres Kopiersystem auf den Markt gebracht. Eine kommerzielle Verbreitung gelang ihm jedoch genauso wenig wie den ebenfalls analogen Verfahren DCP, Firma VIVADENT, Schaan (Liechtenstein), bzw. EROSONIC, Firma

ESPE Dental AG, Seefeld (Deutschland) [30].

1995 erfolgte die Vorstellung des DFE-Geräts der Firma KRUPP Medizintechnik GmbH, Essen (Deutschland), zur erosiven Bearbeitung von Metall bzw. Keramik [30]. Auch dieses System wurde nicht weiter verfolgt.

1996 wurde das PROCERA-System um das für Keramik vorgesehene Verfahren PROCERA AllCeram der Firma NOBEL BIOCARE, Göteborg (Schweden), erweitert [30; 61 – 63].

Seit 1999 wird die DCS PRECIDENT-Einheit, Firma DCS Dental AG, Allschwil (Schweiz), durch die vollautomatische Lasermesseinrichtung PRECISCAN ergänzt, ebenfalls Firma DCS Dental AG [4; 15; 54].

Im gleichen Jahr begann die Einführung des WOL-CERAM-Verfahrens der Firma WDT-Wolz-Dental-Technik GmbH, Ludwigshafen (Deutschland) [91].

Ebenfalls 1999 konnte mit dem DENTAL-MATIC-Gerät, Firma DENTAL Technologies, Paris (Frankreich), ein Verfahren demonstriert werden, dessen Entwicklungsteam zum Teil der Forschergruppe um DURET entsprang. Das System wurde konzeptionell auf der Internationalen Dentalausstellung 2001 in Köln vorgestellt. Die geplante Markteinführung sollte ebenfalls in diesem Jahr erfolgen. Seit der IDS 2005 in Köln wird das System von der Firma DENTAURUM (Ispringen) in Deutschland vertrieben.

Für das DECIM-Verfahren der Firma DENTRONIC A/S, Aarhus (Schweden) war die kommerzielle Verbreitung für 1999 bzw. 2000 geplant, es finden sich in der Literatur jedoch keine einheitlichen Berichte darüber. Aus patentrechtlichen Gründen wurde der Vertrieb in Schweden eingestellt. Im Jahr 2001 übernahm die Firma IVOCLAR VIVADENT, Schaan (Liechtenstein), das System und entwickelte es unter dem Namen CAD.ESTHETICS weiter. Die Markteinführung war geplant [5], das Verfahren wurde jedoch wieder veräußert.

Bereits erhältlich ist das GN-1-System der Firma GC Corporation, Tokyo (Japan). Die

genauen zeitlichen Angaben seiner Vermarktung sind jedoch nicht bekannt [4].

Auch für das sich bereits am Markt befindliche Verfahren DIGIDENT, Firma GIRRBACH Dental GmbH, Pforzheim (Deutschland), können keine konkreten Daten bezüglich seiner Erstvorstellung gemacht werden [4; 5]. Hier arbeitete die damalige Softwarefirma HintEls im Hintergrund. Diese lieferte z. T. auch die Software für das BEGO Medifactoring-System. Seit ca. 2004 bietet die Firma HintEls ein eigenes komplettes System an.

Seit 2000 ist das CEREC 3-Gerät, Firma SIRONA Dental Systems GmbH, Bensheim (Deutschland), erhältlich, dessen Unterschiede zu seinen Vorgängern neben zahlreichen Neuerungen hinsichtlich der Software vor allem in einer Modulbauweise zum Ausdruck kommen [80].

Ebenfalls 2000 vorgestellt, wurde im vierten Quartal 2001 die kommerzielle Verbreitung des LAVA-Systems der Firma ESPE Dental AG, Seefeld (Deutschland), eingeleitet [5; 21].

Auch die Firmen DEGUSSA Dental GmbH & Co. KG, Hanau-Wolfgang (Deutschland), bzw. KAVO, Leutkirch (Deutschland), gingen mit den CAD/CAM-Verfahren CERCON bzw. EVEREST zum Ende des Jahres 2001 an den Markt [5; 35; 90].

Im dritten Quartal 2003 führte die Firma BEGO Medical AG, Bremen (Deutschland), das BEGO Medifactoring-System (Arbeitstitel: FUTUREDEDENT-System) ein [6; 84].

Während also bei einigen der erwähnten Systeme die Entwicklung bereits eingestellt wurde, ist der Beginn der Markteinführung vieler anderer Verfahren noch nicht abzusehen (Tab. 1). Bisher erreichten nur einige Verfahren eine weltweite Verbreitung, wobei die Mehrzahl der Anwender in Deutschland, Skandinavien und den USA zu finden ist. Doch durch die raschen Fortschritte auf den Gebieten der Computertechnologie und der Fertigungsverfahren bietet die PC-unterstützte Arbeitsweise neue Einsatzmöglichkeiten zur automatischen Herstellung von Zahnersatz.

Das aktuell steigende Interesse an der CAD/CAM-Technologie sowie ihre zunehmende Bedeutung auf dem Markt spiegeln sich deutlich in der Tatsache wider, dass mittlerweile nahezu jede Dentalfirma an der Entwicklung ihres eigenen Systems arbeitet. Mit der Präsenz ihrer computergestützten Fertigungsverfahren auf der Internationalen Dentalausstellung 2001 in Köln demonstrierten bereits 15 Anbieter die Ergebnisse ihrer Forschungsarbeit.

Eine weitere Marktdurchdringung in naher Zukunft scheint daher unausweichlich, wobei das Entwicklungspotenzial noch lange nicht ausgeschöpft ist [30; 52; 53; 78].

System	Hersteller	Markteinführung
DURET (Nachfolger: SOPHA)	HENNSON, Vienne (Frankreich)	1985 ² , 1987 ^{1,3}
CEREC 1	SIEMENS, Bensheim (Deutschland)	1985 ² , 1988
DENTICAD (Nachfolger: FUTUREDENT)	BEGO, Bremen (Deutschland)	1989 ² , 1992 ^{2,3}
DUX (Nachfolger: DCS PRECIDENT)	GIM Aildent, Varel (Deutschland)	1989 ² , 1991
SOPHA (Vorläufer: DURET Nachfolger: DENTALMATIC)	SOPHA Bioconcept, Vienne (Frankreich)	1990/91 ^{2,3}
CELAY	MIKRONA Technologie AG, Spreitenbach (Schweiz)	1990 ² , 1992
PROCERA	NOBELPHARMA, Götebeorg (Schweden)	1991
DENSTECH (Nachfolger: μ DENTA)	DENS, Berlin (Deutschland)	1993 ² , 1994 ¹
CICERO	ELEPHANT Dental B. V., Hoorn (Niederlande) Wiederaufnahme des Vertriebs	1993 ² , 1999 2005
DCS PRECIDENT (Vorläufer: DUX)	DCS Dental AG, Allschwill (Schweiz)	1993
CERAMATIC MARK II	CERAMATIC AB, Göteborg (Schweden)	1994
CEREC 2	SIRONA Dental Systems, Bensheim (Deutschland)	1994
AUTOMILL	ALLDENT, Rugell (Liechtenstein)	1994
DFE	KRUPP Medizintechnik, Essen (Deutschland)	1995
PROCERA	NOBELPHARMA, Götebeorg (Schweden)	1996
WOL-CERAM	WDT-Wolz-Dental-Technik GmbH, Ludwigshafen (Deutschland)	1999
DECIM (Nachfolger: CAD. ESTHETICS)	DENTRONIC A/S, Aarhus (Schweden)	1999 ² , 2000 ¹⁽⁷⁾
Cynovad (DENTALMATIC) (Vorläufer: DURET/SOPHA)	DENTAL Technologies, Paris (Frankreich) Vertrieb durch Fa. Dentaurum	1999/2000 ² , 2001 ¹ seit 2005
CEREC 3	SIRONA Dental Systems, Bensheim (Deutschland)	2000
LAVA	ESPE Dental AG, Seefeld (Deutschland)	2000 ² , 2001
CERCON	DEGUSSA Dental GmbH & Co. KG, Hanau-Wolfgang (Deutschland)	2001
CAD. ESTHETICS (Vorläufer: DECIM)	IVOCLAR VIVADENT, Schaan (Liechtenstein)	2001 ²
EVEREST	KAVO, Leutkirch (Deutschland)	2001 ²
BEGO Medifactorying-System (ehemals: Futuredent)	BEGO, Bremen (Deutschland)	2003
ZirkonZahn	E. Steeger	2005
CeraSys	CeraSys (Korea)	2006 <small>(bislang nur in Korea)</small>
DCP	VIVADENT, Schaan (Liechtenstein)	?
DIGIDENT	GIRRBACH Dental GmbH, Pforzheim (Deutschland)	? (am Markt)
EROSONIC	ESPE Dental AG, Seefeld (Deutschland)	?
GN-1	GC Corporation, Tokyo (Japan)	?
INLAC	RITTER, Karlsruhe (Deutschland)	- ³
μ DENTA (Vorläufer : DENSTECH)	MIKRODENTA, Berlin (Deutschland)	?

¹ geplant, ² vorgestellt, ³ gestoppt, ⁷ nicht bekannt

Tab. 1.1 Überblick über Herstellerfirmen und Markteinführung verschiedener CAD/CAM- und Kopierverfahren [5; 11; 15; 20; 21; 27; 30; 35; 55; 56; 60 – 63; 80; 91; 94].

1.1.3 Vergleich der Fehler von zahntechnischen und Fehler von CAD/CAM-Prozessen

Im Idealfall erfolgt die Anfertigung der Restauration unmittelbar nach der direkten Erfassung der Patientensituation, um so bereits Fehler in der Datenübertragung zu vermeiden. Weitere verarbeitungsbedingte Mängel konventioneller Fertigungstechniken werden durch die Umgehung des Gießprozesses beseitigt. Die maschinelle Bearbeitung eines Werkstoffs mittels Fräsen oder Schleifen bewirkt keinerlei Veränderung in seiner Gefügestruktur. Zudem können industriell vorgefertigte Werkstücke mit hoher Güte verwendet werden. Da die Gießbarkeit der Rohstoffe nun also keine Einschränkung mehr darstellt, resultiert eine relativ hohe Materialunabhängigkeit. Es kommen Werkstoffe zur Anwendung, deren Verarbeitung bisher nur unbefriedigend oder mit erheblichem Aufwand durchgeführt werden konnte. Aber auch bzw. gerade im Hinblick auf die stetig steigenden Anforderungen an Ästhetik und Biokompatibilität besitzt der Einsatz neuer Materialien ein hohes Potenzial. So ist beispielsweise die Verarbeitung moderner Hochleistungskeramiken, wie z. B. Zirkoniumdioxid mit konventionellen Methoden nicht möglich [10; 81].

Ein weiteres Ziel der CAD/CAM-Technologie ist die Senkung des Zeitaufwands bei der Anfertigung dentaler Restaurationen. Die Rationalisierung geschieht einerseits durch die maschinelle Übernahme arbeitsintensiver Routinearbeiten, andererseits durch die Einsparung bestimmter, bei der konventionellen Methode unverzichtbarer labortechnischer Einzelschritte (Abb. 1.2).

Der Vorteil der Zeitersparnis zeigt sich jedoch bereits während der zahnärztlichen Behandlung. Die fast ausnahmslos von allen Entwicklern angestrebte direkte Vorgehensweise mit Hilfe der intraoralen Datenerfassung ermöglicht die Versorgung des Patienten innerhalb einer Sitzung. Dadurch entfällt zum ei-

nen die üblicherweise erforderliche zweite Sitzung und zum anderen die Notwendigkeit einer provisorischen Versorgung, was wiederum zur Kostenersparnis führt [66; 81].

Im Zuge der Forschungsarbeiten stellte sich allerdings heraus, dass die in der Industrie angewandten Produktionsverfahren keineswegs unproblematisch auf das Gebiet der Zahnmedizin übertragen werden konnten. Zudem traten bei der Umsetzung der theoretischen Grundlagen in praktische Einsatzmöglichkeiten neue Fragestellungen auf, die bis heute noch nicht zur vollen Zufriedenheit gelöst werden konnten.

Die größte Schwierigkeit bereitet hierbei die Übertragung der Präparation in digitale Daten zur anschließenden computergestützten Weiterverarbeitung. Darin besteht gleichzeitig auch der stärkste Unterschied zur industriellen Technologie. Hier beginnt der Arbeitsprozess mit der Planung des Werkstücks am Bildschirm, so dass der digitale Datensatz bereits unmittelbar vorhanden ist. Zudem werden industrielle Werkstücke in der Regel aus geometrisch definierten Grundformen, wie z. B. Kreisen oder Kugeln, in bestimmten Lagebeziehungen aufgebaut. Sind dennoch bei einigen Designanwendungen im Vorfeld Daten aufzunehmen, so handelt es sich hierbei um harmonisch verlaufende, gerundete Flächen. Diese sind mit einer geringen Anzahl von Messpunkten zu erfassen, deren Verbindung mit Hilfe geeigneter mathematischer Näherungsfunktionen die exakte Definition der Objektform gewährleistet. Zwar existieren auch industrielle Abtastverfahren mit linearen Auflösungen bis in den Nanometerbereich, ihre Anwendung in der Zahnmedizin wird allerdings durch die hohen Kosten und die zu großen Abmessungen limitiert. Kleinere Abtastensoren hingegen sind wiederum in ihrer Auflösung begrenzt. Die präzise Duplikation der dreidimensionalen Form des Zahnstumpfs bildet jedoch eine der Grundvoraussetzungen, um Zahnersatz mit einer optimalen Passgenauigkeit anzufertigen. Somit entspricht der Vorgang der Da-

tenerfassung also einer Schlüsseltechnologie für die dentale Anwendung des CAD/CAM-Verfahrens, da diese Problematik im industriellen Bereich nicht routinemäßig auftritt [8; 78; 81].

Eine weitere Besonderheit ergibt sich aus der Tatsache, dass die angestrebte direkte Datenaufnahme am lebenden Individuum stattfindet. Der Patient zeigt Reaktionen und bietet aufgrund seiner anatomischen Gegebenheiten wie Wange, Zunge und interokklusalem Abstand zudem eingeschränkte Platzverhältnisse [68].

Auch im CAD-Bereich sind zahlreiche Fragestellungen zu lösen. So ist es beispielsweise erforderlich, die erfasste Menge an Punktdaten in eine Struktur umzuwandeln, die dem Programm zur Gestaltung des Zahnersatzes als Zeichengrundlage dient. Dieses erfolgt mittels Erstellung einer so genannten Netzgrafik, indem der Raum zwischen den einzelnen Punkten in lineare oder gekrümmte Flächen interpoliert wird [81].

Eine Aufgabe von CAD-Systemen ist es nun, den beschliffenen Stumpf zu einem kompletten Zahn zu vervollständigen. Dabei müssen eine Vielzahl von Parametern, wie z. B. die anatomische Form des Originalzahns und das Verhältnis zum Antagonisten bzw. Nachbarzahn berücksichtigt werden. Entsprechende Daten sind ebenfalls im Vorfeld zu erfassen. Ein CAD-System, das die Rekonstruktion einer oder mehrerer Restaurationen leisten soll, muss also in diesen Beziehungen Wissen und Denkvermögen im Sinne einer intelligenten und umfassenden Programmierung beinhalten.

Die dreidimensionalen Daten des so konstruierten Zahnersatzes werden nun zur weiteren Verarbeitung aufbereitet und in ein entsprechendes Fräsprogramm für die dentale Werkzeugmaschine umgewandelt. Hierzu ist ebenfalls wieder eine Fülle an Informationen nötig, z. B. über den Werkstoff, das Werkzeug und die geforderte Genauigkeit. Dabei erhöht sich der Komplexitätsgrad der Steuerungssoftware zusätzlich, ist diese mit wechselbaren Werkzeugen zur Bearbeitung unterschiedlicher Ma-

terialien und Bereiche der Restauration ausgestattet. Probleme ergeben sich hierbei nicht nur aus den hohen Anforderungen an den Computer und den langen Rechenzeiten, sondern bereits im Vorfeld aufgrund der langwierigen Entwicklung entsprechender Programme.

Betrachtet man nun die einzelnen Schritte des CAD/CAM-Systems, so ist offensichtlich, dass es auch hier zahlreiche Fehlerquellen gibt (Abb. 1.3).

Der erste Schritt bei jedem CAD/CAM-Verfahren ist die Überführung der realen Situation in eine virtuelle. Die Güte des Digitalisierungsprozesses ist von vielen Parametern beeinflussbar:

- **Präparation**

Hier gibt es von der Art des Digitalisierungsgeräts (Scanners) Einschränkungen (z. B. Präparationswinkel, Freilegung/Markierung der Präparationsgrenze usw.).

- **Modellwerkstoff**

Hier benötigt man systemabhängig gelegentlich bestimmte Werkstoffe, z. B. müssen bei mechanischen Abtastsystemen die Modellwerkstoffe besonders abriebfest und hart sein, damit es nicht zu Verfälschungen kommt. Manche optische Systeme benötigen bestimmte Farben, damit es nicht zu Fehlmessungen kommt.

- **Auflösung des Digitalisierungsgeräts**

Ist diese unzureichend, kann es zu Passungsproblemen kommen. Neben dem rein technischen Parameter kann auch die Präparation die Auflösung beeinflussen. Ein zu steiler Präparationswinkel und/oder eine ungünstige „Scan-Strategie“ (es wird nur von „oben“ (axial) gemessen) können zu einer örtlich unzureichenden Auflösung führen. Dies kann z. B. zu zu kurzen oder zu langen Kronen führen.

Aber auch die verschiedenen Software-Pakete können Ungenauigkeiten bedingen. Jeder Rechenschritt bedeutet hier eine Fehlermöglichkeit:

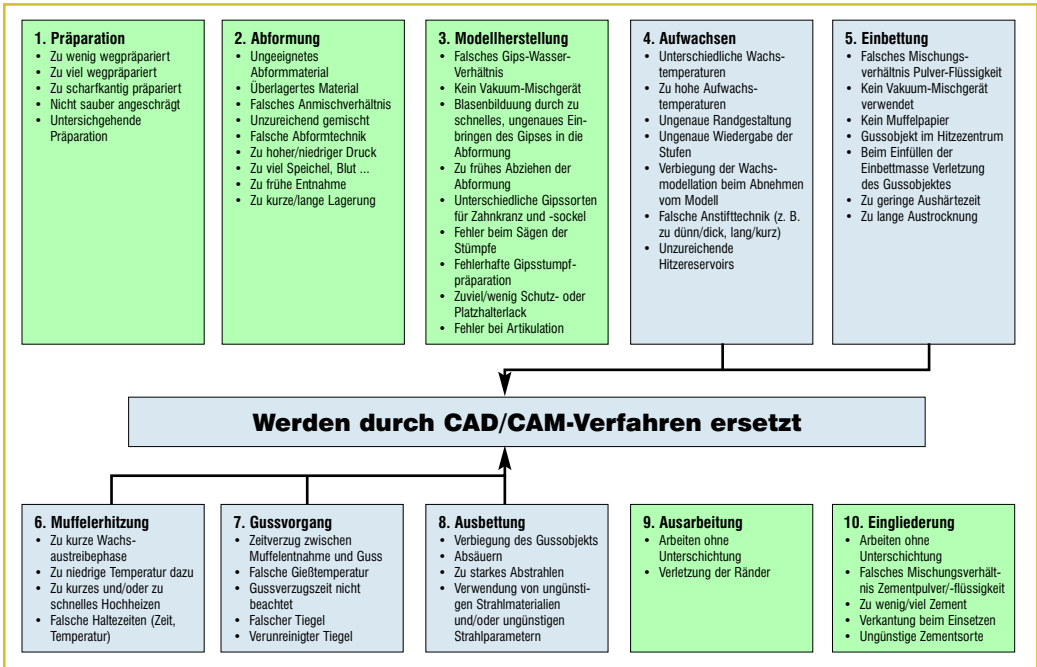


Abb. 1.2 Ersatz von Fehlerquellen beim Gussprozess durch Verwendung von CAD/CAM-

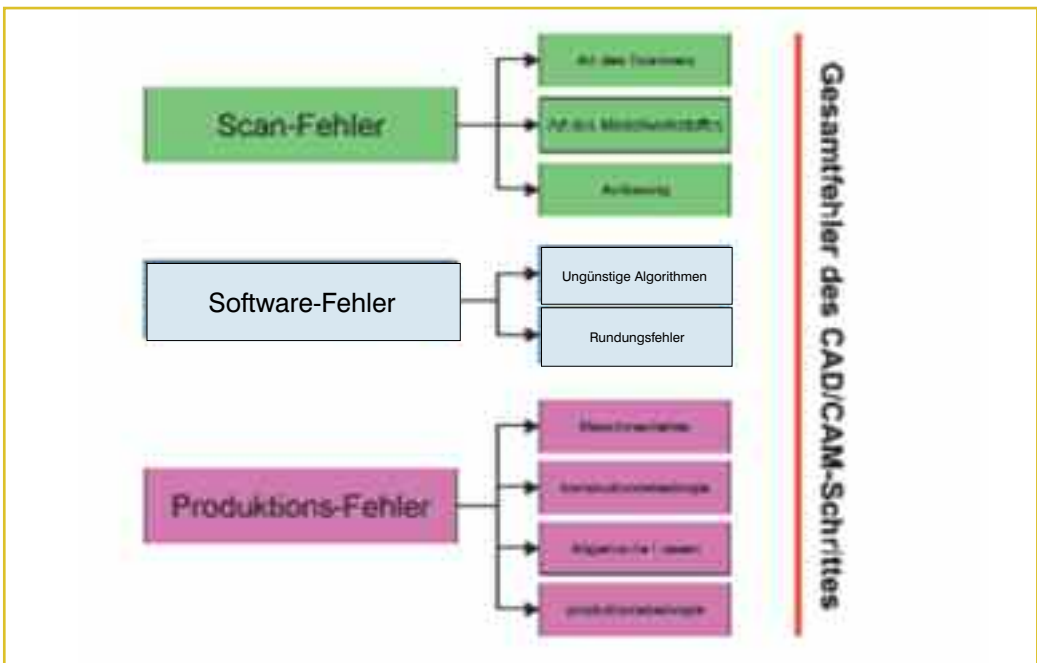


Abb. 1.3 Schematische Darstellung der möglichen Fehler des CAD/CAM-Schrittes.

- Datenreduktion
Erfolgt an vielen Punkten, um die Rechenzeit zu optimieren.
 - ▶ Rundungsfehler: wegen Datenreduktion.
 - ▶ Rechenalgorithmen: wegen Optimierung der Rechenzeit.

Die am schwersten einzuschätzenden und „variabelsten“ Fehlerquellen sind im Produktionsprozess anzusiedeln. Hier gibt es maschinen- und prozessbedingte Fehler. Auch können hier die Materialien und die anzuferdigenden Restaurationen (Größe, Geometrie etc.) vergleichsweise hohen Einfluss nehmen.

- Maschinenfehler
 - ▶ konstruktionsbedingte (z. B. Anzahl der Fräsachsen, Verwendung geeigneter Fräsen etc.),
 - ▶ prozessbedingte (es muss z. B. die Abnutzung der Fräsen berücksichtigt werden).
- Prozessfehler
 - ▶ Geeignete Prozessparameter (z. B. Vorschubgeschwindigkeiten, Drehzahlen etc.).
 - ▶ Konstanz der eingesetzten Rohmaterialien (Rohlinge, Pulver etc.).
 - ▶ Verzug der Restaurationen durch prozessbedingte Parameter (z. B. durch ungleichmäßige Sinterschrumpfung, ungenauer Vorschub von Fräsen etc.).

Es ist daher ein Irrglaube, anzunehmen, dass CAD/CAM-Systeme fehlerfrei sind. Jedoch sind maschinelle Fehler leichter zu kompensieren als solche, die von der Tagesform des Zahntechnikers oder Zahnmediziners abhängen. Insgesamt ist der Fehler der CAD/CAM-Systeme als reproduzierbarer und geringer einzuschätzen als die der händischen Prozesse. Voraussetzung ist natürlich eine eingehende und regelmäßige Wartung der CAD/CAM-Systeme durch Fachkräfte. Dies ist ein weiteres Argument für eine zentrale Produktion. In einem „normalen“ Dentallabor dürfte in den

seltensten Fällen dafür ausgebildetes Personal zur Verfügung stehen.

Bei der Gesamtbetrachtung der aufgezeigten Besonderheiten im zahnmedizinischen Bereich wird ersichtlich, dass die voraussichtlichen Forschungs- und Produktionskosten dentaler CAD/CAM-Systeme leicht in die Millionenhöhe ansteigen. Damit wird die Wirtschaftlichkeit eines solchen Geräts in Frage gestellt. Ziel der Bemühungen um die Finanzierbarkeit ist daher die konsequente Problemreduktion, um einen vertretbaren Aufwand bei der Herstellung von Zahnersatz zu erreichen [81].

Letztendlich handelt es sich bei allen CAD/CAM-Systemen um einen Kompromiss zwischen:

- technischer Machbarkeit,
- zahn technischer/zahnmedizinischer Anforderung,
 - ▶ Indikation,
 - ▶ Qualität,
 - ▶ Materialvielfalt,
- Wirtschaftlichkeit.

1.2 Einteilung dentaler CAD/CAM-Verfahren

CAD/CAM-Verfahren können nach den verschiedensten Gesichtspunkten eingeteilt werden (Abb. 1.4). Die drei wesentlichen Kriterien sind die Datenaufnahme (Scannen), die Produktion und das Material.

Bei fast allen Verfahren zur maschinellen Herstellung von Zahnersatz handelt es sich um so genannte subtraktive (abtragende) Methoden. Diese können nun zunächst allgemein unterschieden werden in digitale CAD/CAM-Systeme und analoge Kopierverfahren [30].

Die digitale CAD/CAM-Technik setzt sich prinzipiell aus drei Komponenten zusammen. Diese umfassen die Datenerfassung der Präparation sowie die Gestaltung (CAD-Ebene) und Herstellung (CAM-Ebene) des Zahnersatz-

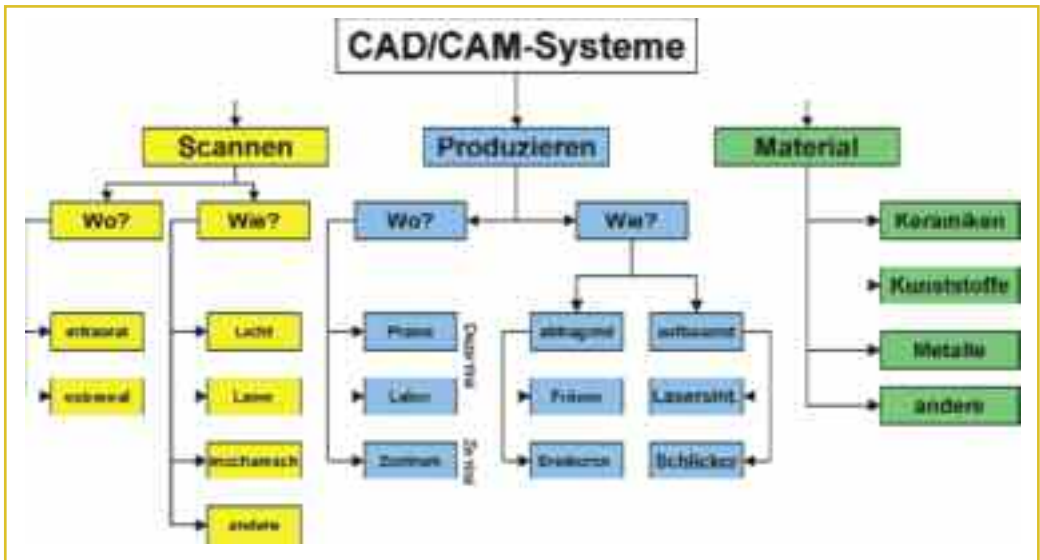


Abb. 1.4 Einteilung von CAD/CAM-Systemen nach dem Scan-Vorgang, Produktionsprozess und verwendetem Material.

zes. Im ersten Schritt werden mit einer geeigneten Abtasteinrichtung die dreidimensionalen Daten der präparierten Zahnoberfläche räumlich erfasst und digitalisiert. Anschließend erfolgt im CAD-Bereich die Planung und Berechnung der Form des Ersatzkörpers am Bildschirm des Computers. Anhand der kon-

struierten Daten wird nun die Restauration computerunterstützt angefertigt. Das erstellte Bearbeitungsprogramm und die unter seiner Kontrolle numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine bilden den CAM-Bereich. Diese Schritte bilden eine Verfahrenskette, die in Abb. 1.5 abgebildet ist.

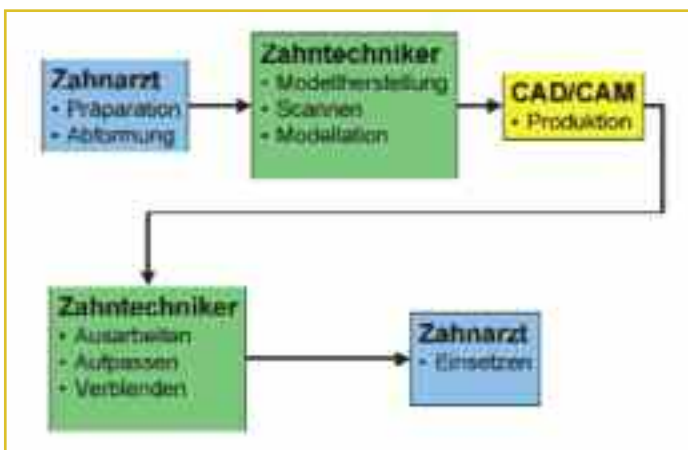


Abb. 1.5 Ablauf des CAD/CAM-Prozesses (nicht „chair-side“, sondern im Dental-Labor).