

## **3. Literaturübersicht**

### **3.1. Allgemeine Überlegungen**

#### **3.1.1. Okklusion und Okklusionskonzepte**

##### **Definition Okklusion**

In der Zahnmedizin beschreibt der Begriff Okklusion jeden dentalen Kontakt zwischen Ober- und Unterkiefer. Man unterscheidet die statische und die dynamische Okklusion [10, 21, 26, 57, 62].

Bei der statischen Okklusion kommen die Zahnkontakte ohne Translation, Latero-, Mediotrusion oder Retrusion des Unterkiefers zustande. Man unterteilt die statische Okklusion weiter in zentrische, habituelle und maximale Okklusion [21, 57]. Die zentrische Okklusion beschreibt diejenigen Zahnkontakte, bei denen sich die Kondylen in zentrischer Position in der Gelenkpfanne befinden. Das bedeutet, dass die Kondylen nicht seitenverschoben und bei physiologischen Lagebeziehungen der anatomischen Strukturen und physiologischer Belastung der beteiligten Gewebe in der Fossa articularis liegen. Als habituelle Okklusion werden diejenigen Zahnkontakte bezeichnet, die bei gewohnheitsmäßigem Schluss der Zahnreihen zustande kommen. Im Idealfall stimmen zentrische und habituelle Okklusion überein [21, 26]. Unter der maximalen Okklusion – auch als maximale Interkuspitation bezeichnet – versteht man die Position, bei der die Ober- und Unterkieferzähne die maximale Anzahl von Kontakten zueinander haben (maximaler Vielpunktkontakt) [8, 21].

Im Gegensatz zur statischen Okklusion beschreibt die dynamische Okklusion die Zahnkontakte, die bei der zahngeführten Bewegung des Unterkiefers auftreten.

Gemäß *Ziebert* sind die stabilsten Kontakte diejenigen, bei denen eine Höckerspitze auf eine plane Fläche des Antagonisten (z.B. Fossa-Boden oder Randleisten) trifft [71]. Betrachtet man die Kontaktbeziehungen zweier Zähne von vestibulär nach oral, so findet man im Idealfall eine Abstützung in drei Punkten (A-, B- und C-Kontakt) [57]. Die sogenannte Tripodisierung (Drei-Punkt-Kontakt) ist bei der Gestaltung des okklusalen Reliefs anzustreben, um eine sichere Okklusionsstabilität zu gewährleisten. Durch zunehmende Abnutzung der Zähne löst sich diese Tripodisierung zugunsten einer „Mörser-Pistill“-Okklusion auf, bei der die im Laufe der Jahre abradieren Höcker tiefer in die antagonistischen Fossae greifen [57]. Die Verzahnung wird unterschieden in die alternierende Verzahnung (1-zu-2-Zahnbeziehung) und den singulären Antagonismus (1-zu-1-Zahnbeziehung) [57], wobei der 1-zu-2-Zahnkontakt nach aktuellen wissenschaftlichen und klinischen Erkenntnissen vorzuziehen ist [21].

Nach der Nomenklaturkommission der AG für Funktionsdiagnostik innerhalb der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK) werden vier Formen der dynamischen Okklusion unterschieden: die frontzahngeschützte, die eckzahngeschützte, die unilateral balancierte und die bilateral balancierte Okklusion [5, 67].

- **Frontzahngeschützte Okklusion**

(Synonyme: Frontzahnführung, Front-Eckzahn-Führung)

Nur die Ober- und Unterkiefer-Frontzähne haben bei Protrusion, Laterotrusion und Mediotrusion Kontakt. Alle übrigen Zähne diskulieren sofort und sind vor nicht-achsialen Schubkräften weitestgehend geschützt. Dieses Konzept wird bei feststehendem Zahnersatz angestrebt.

- **Eckzahngeschützte Okklusion**

(Synonym: Eckzahnführung)

Nur die Oberkiefer- und Unterkiefer-Eckzähne haben Kontakt bei Protrusion und Laterotrusion, die übrigen Zähne diskluieren und sind somit vor nicht-achsialen Schubkräften geschützt.

- **Unilateral balancierte Okklusion**

(Synonym: Gruppenführung)

Bei der Laterotrusion führen alle Seitenzähne und der Eckzahn auf der Arbeitsseite (Laterotrusionsseite) – es kommt zum sogenannten Gruppenkontakt. Alle übrigen Zähne, d.h. die Frontzähne und die Seitenzähne der Nichtarbeitsseite (Mediotrusionsseite) diskluieren. Bei der Protrusion kommt es zur sofortigen Disklusion der Seitenzähne. Dieses Konzept wird häufig bei Teilprothesen verwendet, wenn eine frontzahngeschützte Okklusion nicht möglich ist.

- **Bilateral balancierte Okklusion**

(Synonym: Balancierte Okklusion)

Bei Bewegungen des Unterkiefers kommt es sowohl auf der Arbeits- als auch auf der Nichtarbeitsseite zu dynamischen Okklusionkontakten, d.h. es liegt allseitiger Kontakt bei Vorschub- und Seitwärtsbewegungen vor. Dieses Konzept wird typischerweise für Hybrid- und Totalprothesen gewählt, weil dadurch eine zusätzliche Lagestabilisierung erreicht wird.

*Kordaß:* „Diese ‚klassischen‘ Okklusionskonzepte verstehen sich im wesentlichen als Therapiekonzepte und dienen dazu, bei Verlust von Zähnen bzw. Zerstörung von Zahnhartsubstanz diese zu restaurieren und unter biomechanischen Gesichtspunkten so optimal wie möglich zu gestalten“ [57].

### **3.1.2. Okklusale Stabilität und Okklusionsstörungen**

Bei einer okklusalen Therapie ist das oberste Ziel die Wiederherstellung der okklusalen Stabilität. Funktion und Anatomie der Kaufläche sollten so aufeinander abgestimmt sein, dass die Kontinuität und Integrität der okkludierenden Zähne im Zahnbogen gewahrt wird und die Kiefergelenke zentriert und stabilisiert werden [57]. Das wird gewährleistet durch ein gleichzeitiges, allseitiges und gleichmäßiges Aufeinandertreffen der Zähne mit ihren Antagonisten. Eine Schädigung des Kauorgans durch Vorkontakte, okklusale Interferenzen und/oder Gleithindernisse muss bei einer okklusalen Therapie vermieden werden.

Der Einfluss einer regelrechten Okklusion hinsichtlich der Entstehung von Myoarthropathien („Störung der neuromuskulären Balance“) wurde und wird sehr kontrovers diskutiert. Die Entstehung von Funktionsstörungen ist multifaktoriell [47]. Nicht alle Abweichungen von der funktionellen Norm führen zu pathologischen Zuständen. Zumeist erfolgt eine Kompensation der Funktionsstörungen durch Adaptation. Werden die adaptiven Limits überschritten, besteht jedoch jederzeit die Gefahr einer Dekompensation, die dann unweigerlich zu pathologischen Veränderungen an irgendeiner Struktur des Kauorgans führt [23, 62].

Prinzipiell lassen sich zwei Gruppen okklusaler Störungen unterscheiden. Das sind zum einen vorzeitige Kontakte, die den Simultanschluss der Zahnreihen verhindern, zum anderen Gleithindernisse, die das interferenzfreie Eingleiten in die maximale Interkuspidationsposition beeinträchtigen [57]. Okklusale Interferenzen wirken bei vorgespannter Muskulatur als sogenannte Triggerfaktoren und lösen so parafunktionelle Bewegungsabläufe aus [62]. Diese Parafunktionen wie Bruxismus und Pressen können die Zahnhartsubstanz

schädigen, die Muskulatur überbeanspruchen oder/und die Kiefergelenksfunktion pathologisch verändern, um nur einige Auswirkungen zu nennen. Auch gibt es Theorien, die weiterführende Veränderungen wie unspezifischen Kopfschmerz und Haltungsschäden beschreiben. Deshalb hat eine sorgfältige Konstruktion der okklusalen Strukturen einer Restauration mit Berücksichtigung der Antagonisten und Nachbarzähne eine außerordentliche Bedeutung.

### **3.1.3. Anforderungen an eine funktionelle Kaufläche**

Bei der Fertigung von Zahnrestorationen kommt der Gestaltung einer funktionellen Kaufläche zentrales Augenmerk zu. Anzahl und Lokalisation okklusaler Kontakte stehen in direktem Zusammenhang mit der Kaufeffizienz [19]. Die Okklusalfäche sollte immer einer natürlichen Zahnform mit funktionellen Fissuren und Höckern entsprechen, angepasst an die anatomische Form der Nachbarzähne und Antagonisten.

Die wichtigsten Anforderungen an eine funktionelle Kaufläche sind demnach:

- Optimale Kau-, Sprech- und Abbeißfunktion
- Abstützungs- und Stabilisierungsfunktion
- Prävention kranio-mandibulärer Dysfunktionen durch protektiven Strukturerhalt [57]

### **3.1.4. Darstellung okklusaler Kontaktmuster**

Zur Sichtbarmachung okklusaler Kontaktpunktmuster stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Die am häufigsten im klinischen Bereich angewandte Methode ist die Verwendung von ver-

schiedenfarbigem Kontaktpapier (Okklusionspapier). Als weitere konventionelle Materialien stehen spezielle Wachse oder in Okklusion erhärtende Registrierpasten zur Verfügung [57]. Eine digitale Lösung zur Darstellung der Kontaktpunkte war bisher die Möglichkeit, über eine Drucksensorfolie die Stärke der Kontaktpunkte und deren Verteilung darzustellen (T-Scan-System) [18, 19, 31, 57].

Alternativ bieten sich auch Okklusionseinbisse in einem Silikonmaterial an [18]. In diesem Zusammenhang wurde das GEDAS – „Greifswald Digital Analyzing System“ entwickelt, welches anhand digitalisierter Silikon-Registrate die Stärke, Ausdehnung und Lokalisation statischer Kontakte in Interkuspidation darstellt [19]. Mittels dieses Systems können Einschätzungen zur Qualität okklusaler Kontakte vor und nach Eingliederung zahnärztlicher Restaurationen vorgenommen werden.

### **3.1.5. Artikulatoren**

Üblicherweise ist es die Aufgabe von Artikulatoren, okklusale Kontakte im Detail darzustellen. Dabei werden in dynamischer Hinsicht Bewegungen der Kiefergelenke nachgeahmt und deren Auswirkungen auf die Okklusion untersucht.

Das Kiefergelenk ist aufgrund seiner dreidimensionalen, räumlichen Bewegungen eines der kompliziertesten Bewegungssysteme im menschlichen Körper. Möchte man dieser Tatsache Rechnung tragen, so ist ein möglichst genauer Bewegungssimulator notwendig, der es ermöglicht die komplexen Bewegungen nachzuvollziehen.

Der Artikulator ist dabei eines der wichtigsten Hilfsmittel in der Zahntechnik, um adäquate Restaurationen mit exakter Passgenauigkeit zu fertigen. Die heutigen Artikulatoren lassen sich nach ihrer Gelenksituation und den Möglichkeiten der Justierung einteilen [5].

Bezüglich der Gelenksituation unterscheidet man Arcon- und Non-Arcon-Artikulatoren. Bei den Arcon-Artikulatoren (in Anlehnung an die englischen Begriffe „articulator“ und „condyle“) sind kugelförmige Imitationen der Kondylen starr auf dem Unterteil befestigt und die Führungsflächen befinden sich am korrespondierenden Oberteil, wobei bei Non-Arcon-Artikulatoren die Gelenkpfanne am Unterteil und das Gelenkköpfchen am Oberteil des Artikulators zu finden ist [1, 66]. Reine Scharnierartikulatoren können nur Drehbewegungen des Kiefergelenks nachahmen und eignen sich daher nicht für eine individuelle Kauflächengestaltung [26]. Hinsichtlich der Justierung werden Mittelwertartikulatoren und individuelle Artikulatoren unterschieden. Bei Mittelwertartikulatoren sind keine individuell ermittelten Werte einstellbar, jedoch ist die Nachahmung von Protrusions- und Laterotrusionsbewegungen möglich. Die Gefahr, dass nach Fertigstellung der Restauration Okklusionsstörungen im Mund des Patienten auftreten und korrigiert werden müssen, ist aber gegeben [15]. Die individuellen Artikulatoren werden in teil- und volljustierbare unterschieden. Bei teiljustierbaren Artikulatoren ist eine schädelbezügliche Modellmontage Voraussetzung. Dementsprechend sind Bewegungen des Unterkiefers individuell reproduzierbar. Mit diesem Artikulatortyp lässt sich z.B. die Funktionsanalyse nach Gerber durchführen [17, 32]. Bei volljustierbaren Artikulatoren ist ebenfalls eine schädelbezogene Modellmontage mittels Gesichtsbogen oder elektronischer Aufzeichnung der Unterkieferbewegungen (Pantografie) Voraussetzung. Die Bewegungen können so weitgehend naturgetreu nachgeahmt werden.

Eine besondere Form des Artikulators ist der von *Bisler et al.* vorgestellte virtuelle Artikulator [6, 14, 24]. Im Gegensatz zum mechanischen Artikulator werden die Patientendaten und -werte nicht arbiträr ermittelt, sondern die exakte Bewegungsbahn des Kiefergelenks elektronisch aufgezeichnet [14]. Am Bildschirm kann die

Okklusion und Bewegung des Unterkiefers gegen den Oberkiefer nachvollzogen werden. Vor allem für die Analyse von komplexen statischen und dynamischen Okklusionsbeziehungen bringt der virtuelle Artikulator große Vorteile. Seine Präzision ist bisher ungeschlagen, da mechanische Imponderabilien, die bei einem mechanischen Artikulator durch notwendige Arbeitsschritte wie den Einbau der Modelle entstehen können, entfallen [14]. Kombiniert mit der CAD/CAM-Technik hat der virtuelle Artikulator ein immenses Potential – beispielsweise für die Planung von Implantaten, wo auch die Möglichkeit besteht, mit einer CAD-Software die Implantate im Kiefer in Relation zu den Nachbarzähnen darzustellen und mittels einer CNC-Fräse herzustellen [6], aber auch für die Kieferorthopädie tun sich mit ihm neue Anwendungsbereiche auf [14].

## **3.2. Dentalkeramiken**

### **3.2.1. Definition und Geschichte**

Unter Keramik versteht man verschiedene nichtmetallische anorganische Verbindungen, die in Wasser schwer löslich und zu mindestens 30% kristalliner Struktur sind [33]. Der Begriff Keramik stammt aus dem Altgriechischen. „Keramos“ war die Bezeichnung für Ton und die aus ihm durch Brennen hergestellten formbeständigen Erzeugnisse [11, 62]. Die Produktion von Keramik gehört zu den ältesten Kulturtechniken der Menschheit.

Bereits im 18. Jahrhundert war man bestrebt, eine dem natürlichen Zahn ähnliche Substanz, die für den Einsatz im Mund beständig war, zu erfinden. Versuche, die natürliche Zahnhartsubstanz nachzubilden, gehen auf *Guillemeau*, *Fauchard*, *Reaumus* und *Morin* zurück. 1710 schlug *Guillemeau* eine Masse aus zu Pulver zerkleinerten Korallen, Mastix und Harz zum Ersatz von Zahnschmelz vor. *Fauchard*



versuchte 1728 den Zahnersatz durch Emaillierung natürlicher zu gestalten [62]. Das Porzellan wurde 1708 durch *Ehrenfried Walther von Tschirnhaus* in Meißen im Auftrag des damaligen sächsischen Kurfürsten August dem Starken erfunden. Nach dessen Tod brachte *Johann Friedrich Böttger* 1709 die Erfindung *Tschirnhaus'* zur fabrikmäßigen Fertigung<sup>1</sup> [11] und man versuchte, das Porzellan als zahnärztlichen Werkstoff einzusetzen [62]. *Duchateau* ließ sich 1774 von dem Zahnarzt *Dubois de Chémant* die erste Prothese aus Porzellan brennen [11]. Einige Jahre später stellte *Chémant* Porzellanzähne her und beschrieb 1802 erstmals einen Stiftzahn mit Porzellankrone. Zusammen mit *Ash* begründete er 1837/38 die erste Fabrikation der Porzellanzähne in England, 1844 begann *White* die Produktion von Porzellanzähnen in Amerika (S.S. White Corporation) und erst 1893 eröffnete in Deutschland die Firma *Wienand* eine Produktion für Porzellanzähne. 1887 brannte *Charles Land* die erste Jacketkrone auf Platinfolie – sein 1897 beschriebenes Verfahren wird heute noch angewandt [62]. Durch die Frakturanfälligkeit von Porzellanjacketkrone kam es zur Entwicklung von metallkeramischen Kronen (VMK-Technik). 1962 ließen sich *Weinstein, Katz* und *Weinstein* dies patentieren. Gleichzeitig verbreiteten in Europa die Firmen Vita-Zahnfabrik und Degussa Dental die VMK-Technik. Im Frontzahnbereich gewann die Keramikmantelkrone von *Lewin* und *Brill* (1925) an Bedeutung. Diese wurde durch neue keramische Massen, Präparationsinstrumente, Brennöfen, Abformmaterialien und -methoden weiter optimiert. Problematisch blieb aber bei vollkeramischen Restaurationen fortwährend die indikationseinschränkende geringe Bruch- und Scherfestigkeit. Entscheidende Materialverbesserungen wurden 1965 durch die Empfehlung von *McLean* und *Hughes*, Aluminiumoxidkristalle als Keramikverstärkung einzusetzen, eingeleitet. Leuzitkristalle,

---

<sup>1</sup> Internetseite, *Meißener Porzellan*. [http://de.wikipedia.org/wiki/Mei%C3%9Fener\\_Porzellan](http://de.wikipedia.org/wiki/Mei%C3%9Fener_Porzellan)

Glimmer, Hydroxylapatit, Doppeloxyd Kristalle und keramische Kurzfasern (Whisker) wurden ebenso als Verstärkung für die Keramik verwendet und sind auch teilweise noch heute gebräuchlich [11, 22]. *Ron Garvie* prägte den Namen des „ceramic steel“ und erfand 1975 das teilstabilisierte Zirkoniumoxid. Durch die Entwicklung der CAD/CAM-Verfahren in den 80er Jahren konnten vorgefertigte Vollkeramikblöcke durch Frästechniken bearbeitet und damit ungünstige Materialeigenschaften zunehmend umgangen werden.

### 3.2.2. Vollkeramik

Die heutigen Vollkeramiken besitzen durch ihre mechanischen Eigenschaften eine gute Widerstandskraft gegenüber dem Kaudruck im Molarenbereich. Sie verfügen über eine dem Schmelz vergleichbare thermische Leitfähigkeit und einen ähnlichen Elastizitäts-Modul, besitzen eine exzellente Biokompatibilität, eine hohe Mundbeständigkeit mit geringer Abrasion und Farbstabilität [41]. Durch eine ähnliche Lichtbrechung wie der Zahnschmelz sind sie ideal für die Frontzahnästhetik. Der sogenannte Chamäleoneffekt lässt eine vollkeramische Restauration kaum von der natürlichen Zahnhartsubstanz unterscheiden [70]. Auch *Cavel* und *Anusavice* stellten als Vorteile gegenüber metallkeramischen und Vollgussrestorationen die Ästhetik und eine höhere Biokompatibilität gegenüber dem Parodont und der Pulpa heraus [2, 9].

Die biologische Verträglichkeit und Mundbeständigkeit macht sie zu einem bedeutenden Werkstoff in der Medizin und Zahnmedizin. Schon vor vielen Jahren begann die rehabilitierende Medizin, Keramik für Hüftgelenk- und Knochenersatzimplantate anzuwenden. Im Hinblick auf die ständige Zunahme von Patientenfällen, die mit Allergiesymptomen in der Zahnarztpraxis erscheinen und bei derma-

tologischen Tests selbst auf Edelmetall allergisch reagieren, bietet sich mit der Vollkeramik ein wachsendes Potential an. Auf keramischen Flächen ist die Plaqueakkumulation geringer als am natürlichen Zahn. Dadurch kann das Risiko einer Sekundärkaries am versorgten Zahn reduziert werden.

Für CAD-CAM-Geräte wie das CEREC-System werden Vollkeramikblöcke verwendet, die nur noch kalt bearbeitet werden. Diese Keramik ist polierbar, oder mit Mal- und Glanzbrandmassen überbrennbar und verfügt über einen stabilen Megapascal-Wert [70]. Der Vorteil der industriell gefertigten Blöcke ist, dass sie unter aufwendigsten und bestmöglichen Bedingungen und Gerätschaften standardisiert herzustellen sind. Somit werden Prozessvariablen, wie beispielsweise die Qualität der zahntechnischen Laborausstattung, weitestgehend ausgeschlossen [34].

Da auf dem Gebiet der vollkeramischen Restaurationen in den letzten Jahren die Hochleistungskeramiken – hier vor allem Zirkoniumoxid – durch ihre guten mechanischen Eigenschaften an Bedeutung gewonnen haben, ist es verständlich, dass der Herstellungsprozess dieser Keramiken im Blickwinkel der Dentalindustrie steht [61].

### **3.3. CAD/CAM-Systeme**

Die Abkürzung CAD (Computer-Aided-Design) steht für die Konstruktion einer Zahnrestauration am Computer, CAM (Computer-Aided-Manufacturing) bedeutet die Herstellung des konstruierten Zahnersatzes durch vollautomatisierte Fräs- und Schleifeinheiten. Schwierigkeiten bei maschinell erstelltem Zahnersatz ergeben sich durch die individuellen dreidimensionalen Formen der Kavitäten [53, 68], wodurch eine exakte Passung der Restaurationen erschwert wird. *Tinschert et al.* sprechen auch von der sogenannten „Notwendigkeit der Unikatfertigung“ [68]. Erst durch den technologischen

Fortschritt in den letzten Jahrzehnten ist es möglich, adäquaten Zahnersatz mit Hilfe von CAD/CAM-Systemen herzustellen [3].

Die computergestützten Konstruktions- und Fertigungsmöglichkeiten von Zahnersatz charakterisieren sich durch einen subtraktiven Arbeitsprozess, während die konventionellen Verfahren wie „Lost-Wax“- oder Sintertechniken die additive Herstellung von Keramikrestorationen ermöglichen [34]. Aus der subtraktiven Arbeitsweise, bei der mit materialspezifischen Werkzeugen die gewünschte Form aus einem vorgefertigten Block automatisch herausgearbeitet wird, ergeben sich verschiedene Vorteile. Das Blockmaterial kann industriell unter optimierten Bedingungen hergestellt werden, wodurch eine Verbesserung der biologischen und technischen Eigenschaften zahnärztlicher Restaurationen ermöglicht wird [4]. Die maschinellen Herstellungsmethoden können in computergestützte Verfahren (CAD/CAM-Verfahren) oder in analoge Verfahren unterteilt werden. Zu den analogen Systemen zählen das Kopierfräsen wie beim Celay-System oder das Erodierverfahren. Bei diesen Systemen wird in der Regel die gewünschte Zahnrestauration erst in einer Prorestauration angefertigt und nicht am Monitor konstruiert [34].

### **3.3.1. Entwicklung der CAD/CAM-Systeme**

Die durch die Automatisierung der Produktionsabläufe mögliche Einsparung der Kosten und eine gleichbleibend hohe Produktqualität sind wichtige Eigenschaften, die die Entwicklung von CAD/CAM-Systemen für die Zahnheilkunde interessant machen [30].

Der Stein um die Entwicklung der CAD/CAM-Technologien wurde in den 80er Jahren ins Rollen gebracht. Zunächst beschränkte man sich auf die schwer verarbeitbaren Titan-Legierungen, später eroberten die Oxidkeramik und Hartkernkeramiken wie Zirkonoxidke-

ramik ihren Platz bei den CAD/CAM-Systemen. Heute steht diesen Systemen eine breite Werkstoffpalette offen.

*François Duret*, Begründer der von CAD/CAM-Systemen produzierten Zahnrestorationen, begann bereits 1971 mit der Planung eines CAD/CAM-Systems [53, 68]. 1985 konnte mit Hilfe des *Duret-Systems* unter erheblichem Aufwand die erste Krone gefräst werden. Die Entwicklung dieses Systems wurde 1993 eingestellt. *Altschulter* stellte 1973 als Erster ein auf Holografie basierendes optisches Abdruckverfahren vor. *Mörmann* und *Brandestini* begannen Anfang der 80er Jahre mit der Entwicklung des CEREC-Systems [35, 38, 53]. Im Jahre 1988 wurde das CEREC-System als erstes CAD/CAM-System, das Chairside (am Patientenstuhl in einer Sitzung) angewandt werden konnte, zur praktischen Anwendung in der Zahnheilkunde eingeführt [7, 61]. Mitte der achtziger Jahre bemühte sich eine große Anzahl von Forschern CAD/CAM-Systeme zur Herstellung zahnmedizinischer Restaurationen zu entwickeln. Allerdings waren alle Systeme Anfang der neunziger Jahre nicht auf dem technologischen Stand, um rationell einen hochwertigen Zahnersatz herzustellen. Die erzielte innere Passgenauigkeit war nicht zufriedenstellend, hinzu kamen hohe Anschaffungskosten und ein erheblicher Bedienungs- und Schulungsaufwand. Durch die individuelle Präparationsform und die nötige Genauigkeit ergibt sich eine große Datenmenge, die eine hohe Rechenleistung und eine aufwendige Software voraussetzt. Ältere Computersysteme konnten eine solche Datenmenge nicht verarbeiten. Bis Mitte der neunziger Jahre war deshalb das Interesse an CAD/CAM-Systemen rückläufig [35]. Erst in den letzten Jahren kam es durch die enormen Fortschritte in der Computer- und Fertigungstechnologie wieder zur Entwicklung von mehreren CAD/CAM-Systemen [3, 35, 61]. Zur Zeit sind weltweit etwa 20.000 Systeme im klinischen Einsatz.

### 3.3.2. Einteilung der CAD/CAM-Systeme

Auf dem heutigen Markt gibt es zahlreiche verschiedenartige CAD/CAM-Verfahren, die auf unterschiedlichen Bereichen Anwendung finden. So kann man die Systeme nach ihrer Funktionsweise, aber auch nach den zu verarbeitenden Materialien einteilen.

Vier Technologie-Grundformen, mit denen CAD/CAM-Systeme arbeiten, können unterschieden werden:

- die Hartbearbeitung dichtgesinterter oder zusätzlich gehippter Oxidkeramik (hip = „hot isolated pressed“, Technik zur weiteren Reduktion der Restporosität des keramischen Rohmaterials und somit Verbesserung der Festigkeit)
- die Bearbeitung keramischer Blockmaterialien, die eine anschließende Nachbearbeitung (Sintern, Glasinfiltrieren) erfordern
- das Aufbringen von Keramik-Pulver oder -Schlicker
- Laserverfahren zur Verarbeitung von Metalllegierungen [59, 58]

Abhängig vom jeweiligen System wurden in sehr unterschiedlichem Ausmaß Arbeitsschritte der konventionellen Zahnmedizin und Zahntechnik durch neue CAD/CAM-Arbeitsschritte ersetzt. Die Möglichkeiten reichen vom reinen Kopierschleifen, also ohne computer-gestützte Konstruktion, bis hin zur hochkomplexen Experten-Software [28, 29].

Bei den computerunterstützten Verfahren gilt es, die dreidimensionale Form des präparierten Stumpfes mit hoher Präzision zu duplizieren. Die zur Erfassung der Oberfläche des Zahnes nötige Abtastung kann sowohl auf mechanischem Weg mittels eines Tasters,

aber auch mit Hilfe einer Lichtquelle (optisch) erfolgen. Die meisten CAD/CAM-Systeme, darunter auch das CEREC-System, nutzen eine Weißlichtquelle oder einen Laser, nur einige wenige greifen auf die mechanische Abtastung zurück (Tab. 3.3-1) [53].

**Tab. 3.3-1** Übersicht einiger CAD/CAM-Systeme bezüglich Datenerfassung, Materialien und Indikation nach *Reiss* [53]

<b>System</b>	<b>Datenerfassung</b>	<b>Materialien</b>	<b>Indikation</b>
<b>Cerec 3</b> (Sirona Dental Systems)	Messkamera auf Triangulationsbasis	Keramik	Inlay, Veneer, Kronen
<b>Cerec in Lab</b> (Sirona Dental Systems)	Lasertriangulation	Keramik	Kronen- und Brückengerüste
<b>Cercon</b> (Degussa Dental)	optisch	Keramik	Kronen- und Brückengerüste
<b>Cicero</b> (Elephant/ Degussa)	optischer Lichtschnitt	Keramik	Inlay, Krone, Brücke
<b>Pro 50</b> (Cynovad)	optisch	Keramik	Inlay, Krone, Brücke
<b>Precident</b> (DCS)	optisch	Keramik, Composite, Titan	Kronen- und Brückengerüste
<b>Digident</b> (Girrbach)	optisch	Keramik, Metall	Inlay, Krone, Kronen- und Brückengerüste
<b>Everest</b> (KaVo)	optisch	Keramik, Metall	Inlay, Krone, Brücke, Kronen- und Brückengerüste

<b>G-N1</b> (GC, Nikon, Hitachi)	Lasertriangulation	Keramik, Metall	Inlay, Krone, Brücke
<b>Lava</b> (3M Espe)	Lasertriangulation	Keramik, Metall	Kronen- und Brückengerüste
<b>Procera</b> (Procera, Nobel Biocare)	mechanisch	Keramik	Kronengerüste
<b>Xawex Dentalsystems</b> (Xawex)	optisch	Keramik	Kronen- und Brückengerüste

### 3.3.3. Arbeitsschritte von CAD/CAM-Systemen

Die Herstellung vollkeramischer Restaurationen mit Hilfe von CAD/CAM-Systemen gliedert sich in drei wesentliche Arbeitsschritte/Komponenten [28, 29, 34, 68]:

- Die Digitalisierung der Präparation (3D-Datenerfassung): extraorale oder intraorale Abtastung der Präparation (mechanisch oder optisch) bzw. der Nachbarzähne und Antagonisten
- die computergestützte Konstruktion/Design der Restauration (CAD): Planung und Konstruktion am Computerbildschirm mittels spezieller Software
- die Fertigungstechnologie zur Überführung in eine eingliederungsfähige Restauration (CAM): derzeit überwiegend computergesteuerte Fräs- und Schleifmaschinen



### 3.4. Das CEREC-System

1980 war ein bedeutendes Jahr in der Entwicklung von CEREC: Aus dem praktischen Bedürfnis nach randdichten, dauerhaften zahnfarbenen Restaurationen war das Konzept für eine Chairside-Methode geboren. 1985 konnte am Zahnärztlichen Institut der Universität Zürich das erste mit einem Computergerät gefertigte Keramikinlay adhäsiv eingesetzt werden [38, 39, 44]. Heute ist das CEREC-System eines der bekanntesten und meistverkauftesten Chairside-Systeme weltweit. Die CAD/CAM-Technologie, wie sie im CEREC-System verkörpert ist, ermöglicht die Herstellung von hochwertigen ästhetischen Vollkeramik-Restaurationen in einer Sitzung – die Vorgänge Präparation, Abdruck und definitives Einsetzen der Arbeit können an ein- und demselben Termin erfolgen [38, 40, 50]. Es ist das einzige CAD/CAM-System, das fähig ist, einen intraoralen optischen Abdruck zu nehmen [41, 50]. Um den klinischen Prozess zu vollenden, werden Kunststoff-Zemente verwendet, die eine starke, stressfreie adhäsive Befestigung ermöglichen.

Das CEREC-3-System (Sirona), eingeführt im Jahr 2000, vereinfacht und beschleunigt die Herstellung von keramischen Inlays, Onlays, Veneers und Teilkronen für Front- und Seitenzähne [42]. Statt der für CEREC 1 und 2 verwendeten Schleifscheibe werden für das Ausschleifen der Restaurationen zwei diamantierte Schleifkörper – ein zylinder- und ein kegelförmiger – verwendet. Durch den Wegfall der Scheibe und der „einfachen“ Bearbeitung können die Präparationsbeschränkungen weiter gefasst werden [16]. Die 2003 erstmalig vorgestellte 3D-Version weist durch die dreidimensionale Darstellung auf einem LCD-Monitor eine höhere Benutzerfreundlichkeit auf und ermöglicht eine größere Präzision bezüglich der approximalen und okklusalen Kontaktgestaltung [50, 51, 54]. Ebenso konnte *Reich* in einer Studie herausstellen, dass die 3D-Version eine signifi-

kante Zeitersparnis bei der Konstruktion ermöglicht [50]. Allein die Anschaulichkeit des 3D-Modells ist faszinierend und erlaubt jedem Zahnmediziner, mit dem System zurecht zu kommen - CAD/CAM-Experten sind dazu nicht erforderlich [43]. Die Kauflächenform der Restaurationen kann mithilfe von ebenfalls optisch eingescannten Bissregistrator optimal der Okklusion des Patienten angepasst werden – entweder mit Hilfe eines Schlussbissregistrats oder der FGP-Technik (Functionally Generated Pathway) [50, 51, 54].

Die CEREC-Technologie ist kompatibel mit konservativen Präparationsmethoden und vermindert eine Traumatisierung der Pulpa und des parodontalen Gewebes durch die Möglichkeit, komplexe Restaurationen in einer Sitzung fertig zu stellen. Die heutige Generation der CEREC-Technologie kann genutzt werden, um Restaurationen zu fertigen, die kontinuierlich einen Randspalt von etwa 50µm für das adhäsive Befestigungsmaterial aufweisen [46]. Die systematische Analyse der Literatur zu klinischen Untersuchungen von CEREC-Restaurationen beweist einen hohen Grad klinischen Erfolgs. *Reiss* konnte dies mit einer klinischen Langzeitstudie belegen: 1.010 CEREC-Restaurationen wurden gefertigt und über einen Zeitraum von bis zu 18 Jahren beobachtet. Nach der Kaplan-Meier-Methode war die Erfolgswahrscheinlichkeit der Restaurationen nach diesem Zeitraum mit 84,4% noch immer sehr hoch. Dieses Ergebnis untermauert die überwiegend positiven Einschätzungen vorangegangener Untersuchungen und bestätigt die Praxistauglichkeit der CEREC-Methode [52, 55, 56]. *Wiedhahn et al.* konnten eine ausgezeichnete Erfolgsrate für CEREC-Veneers nachweisen [69]. *Otto* und *De Nisco* zeigten eine 10-Jahresüberlebensrate von 90% für mit dem CEREC-1-System hergestellte Onlays und Inlays [48] und *Proschel* und *Kerschbaum* erreichten für 2.328 CEREC-Restaurationen eine 9-Jahresüberlebensrate von 95% [49].

### 3.4.1. Arbeitsweise des CEREC-Systems

Zur Digitalisierung des dreidimensionalen Reliefs der Präparation nutzt das CEREC-System das Prinzip der aktiven Triangulation<sup>2</sup> [39, 44]. Eine Kamera projiziert mit annähernd infrarotem Licht ein Streifenmuster unter einem leichten Triangulationswinkel auf die Präparation und nimmt dieses projizierte Bild wieder auf [16, 25]. Betrachtet man die projizierten Streifen auf der Präparation, erscheint der Streifenverlauf nicht mehr gerade, sondern entsprechend der Tiefe der Präparation gegenüber dem geraden Verlauf verschoben. Ein Flächensensor in der Kamera registriert diese Verschiebung. Der Computer kann daraus die Tiefe errechnen. Der Tiefenmessbereich ist bei diesem Verfahren unter anderem abhängig vom Triangulationswinkel<sup>2</sup> [44]. Das Programm CEREC-3D erzeugt aus diesem Streifenmuster ein virtuelles, farbiges, maßgetreues Arbeitsmodell in zwölfacher Vergrößerung mit einer Auflösung von 25µm. Als Besonderheit gegenüber anderen CAD/CAM-Systemen wurde in das CEREC-3D-System eine Matching-Technologie (von engl. „match“ = passen, übereinstimmen) integriert, die es ermöglicht, durch sukzessiv sich überlappenden Digitalisierungen einen Datensatz zu erzeugen, der die Abmessungen des eigentlichen Messfelds der CEREC-Kamera deutlich überschreitet [12, 50]. Dadurch wird dem Behandler die Quadrantensanierung mit bis zu vier hintereinander gelegenen Restaurationen ermöglicht, woraus ein signifikanter Rationalisierungseffekt resultiert [12]. Zudem können abgeschattete Bereiche aus unterschiedlichen Winkeln aufgenommen werden [60, 68].

---

<sup>2</sup> Internetseite: [www.ag-keramik.de/news18ludhardt.htm](http://www.ag-keramik.de/news18ludhardt.htm)