Zahnmedizin ohne Digitaltechnik und CAD/CAM-Verfahren ist heute nicht mehr vorstellbar. Die intraorale und extraorale Messaufnahme, das Scannen von Antagonisten und Registraten, das dreidimensionale Konstruieren auf dem Bildschirm, die Nutzung unzähliger Zahnformen aus der Zahndatenbank, die Gestaltung anatomischer Kauflächen, das funktionelle Artikulieren am virtuellen Modell, die subtraktive Bearbeitung von Hochleistungskeramiken – all das wäre ohne Computerunterstützung nicht möglich geworden.

CAD/CAM-Technik –
Innovationen bestimmen das Handeln

Autor: Manfred Kern

Der digitale Quantensprung bahnte sich schon 1985 an: mithilfe eines Fairchild CCD-Videosensors, der damals noch militärischen Zwecken diente und deshalb eine Sondererlaubnis zur Nutzung in der Zahnmedizin benötigte, konnte erstmalig eine Präparation – intraoral mit der Triangulationskamera sichtbar gemacht – mehrdimensional vermessen und auf den Bildschirm übertragen werden. Mithilfe eines PCs, einer bildgebenden Software und einer angekoppelten CNC-Fräseinheit wurde das erste Inlay aus Silikatkeramik an der Universität Zürich ausgeschliffen.

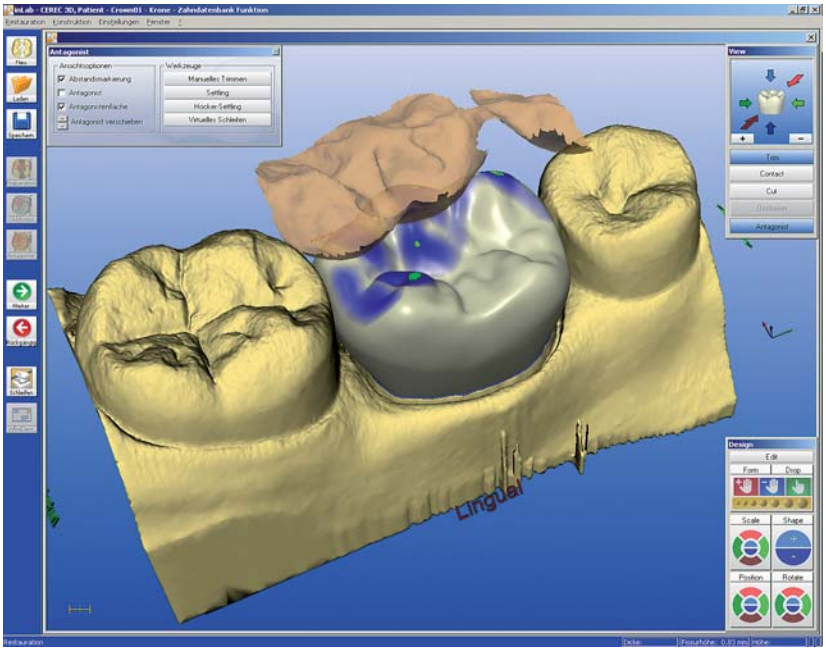


Abb. 1: Virtuelle automatische Rekonstruktion: Die Scandaten des Antagonisten und die Präparation können in toto berücksichtigt werden, um eine nach allen Regeln passende Kaufläche zu gestalten (Quelle: Mehl).

Nur wenige Eingeweihte hatten damals eine Vorstellung von den sich anbahnenden Technologien und von den umwälzenden Therapiemöglichkeiten, die damit der Zahnmedizin bevorstanden. Seitdem sind weltweit über 22 Millionen vollkeramische Restaurationen mithilfe der CAD/CAM-Technik chairside und im ZT-Labor hergestellt worden. Durch die Computerunterstützung ist die subtraktive Bearbeitung von industriell vorbereiteten Silikatkeramiken und Oxidkeramiken für ästhetische, dauerhafte Restaurationen mit einer reproduzierbaren, konstanten Werkstoffqualität bei gleichzeitiger Kostenoptimierung möglich geworden.

Blickt man nur einige Jahre zurück, so stand die Diskussion um Passgenauigkeit, Wirtschaftlichkeit und Benutzerfreundlichkeit noch im Vordergrund. Die Qualität von CAD/CAM-Restaurationen wurde kritisch gesehen und es gab nur wenige „Pioniere", die sich mit diesem Thema auch wissenschaftlich auseinandersetzten. Inzwischen hat sich das Blatt gewendet. Aus der zögerlichen und teilweise auch abwartenden Haltung gegenüber dem computergefertigten Zahnersatz ist ein akzeptiertes Standardverfahren geworden. Viele Unternehmen investieren inzwischen in die weitere Entwicklung dieser Technologie.

KaVo ESTETICA® E70

Hier fühlen sich auch Ärzte gut behandelt.

100 KaVo

Mit KaVo Prämienmeilen sammeln.

Info und Registrierung: www.kavo-club.com

Partner von Miles & More Lufthansa

Die neue ESTETICA E70

Einfach komfortabel. Komfortabel einfach. Die neue KaVo ESTETICA® E70:

- Mehr Komfort – durch das neue intuitive Bedienkonzept
- Mehr Komfort – durch die ergonomische Schwebestuhltechnik
- Mehr Komfort – durch individuelle und erweiterbare Ausstattungen
- Mehr Komfort – durch integrierte, automatisierte Hygienefunktionen

Die KaVo ESTETICA® E70. Behandlungskomfort neu definiert.

www.kavo.com/E70

KaVo. Dental Excellence.

KaVo Dental GmbH · D-88400 Biberach/Riß · Telefon +49 7351 56-0 · Fax +49 7351 56-1488 · www.kavo.com

Abb. 2

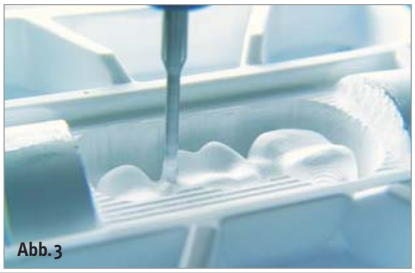


Abb. 3

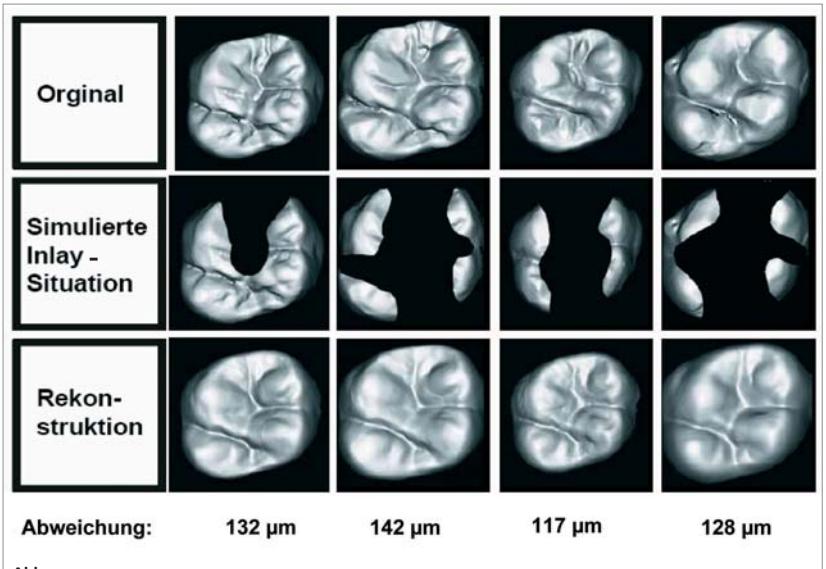


Abb. 4

Abb. 2: Fräszentren sind auf standardisierte Fertigungsverfahren unter besonders wirtschaftlichen Gesichtspunkten eingestellt (Quelle: etkon-Straumann). – **Abb. 3:** Großdimensionierte Fräsautomaten liefern eine hohe Passgenauigkeit der Gerüste (Quelle: 3M ESPE). – **Abb. 4:** Automatische Rekonstruktion von Inlaykavitäten mittels des biogenerischen Zahnmodells. Oben: Unversehrter Originalzahn. Mitte: Kavität. Unten: Nur anhand der Restzahnsubstanz (Mitte) automatisch rekonstruierte Kaufläche. Die angegebenen Abweichungen sind die metrischen Unterschiede zwischen Rekonstruktion und Originalzahn im Bereich der Kavität (Quelle: Mehl).

Neue Technologien

Aus technischer Sicht trieben neben leistungsgesteigerten Mikroprozessoren besonders CCD-Bildsensoren mit auflösungsstarken Fotodioden sowie optische und taktil arbeitende Scanner die Entwicklung der dreidimensionalen Bilderfassung voran, um Präparation und Modell zu „lesen" und in die Software zu laden. Die Impulskapazität zur Reproduktion der Zahnoberflächen erreicht bei Laserscannern inzwischen eine Geschwindigkeit von 10.000 Messpunkten pro Sekunde. Weiterentwickelte CAD-Software mit 3-D-Grafikapplikationen übernimmt die digitalen Signale und formt daraus die klinische Situationsoberfläche, die sie mittels einem okklusalen „Settling" mit präformierten Kauflächen aus der Zahndatenbank virtuell ergänzt. Die Höcker der Kaufläche werden in ihre okklusale Position „eingerüttelt". Ein Artikulationsprogamm übernimmt die okklusalen Merkmale von Antagonisten und Nachbarzahn-Kauflächen und erzeugt ein Kontaktpunktmuster, das die Kriterien der individuellen Funktion erfüllt. Ein zusätzlich gewonnenes, regionales FGP-Registrat (Functional Generated Path) spürt Störstellen des freien Gleitraums auf und reduziert diese automatisch (Abb. 1).

Den Impetus bezog diese Entwicklung aus zwei Quellen: Die Protagonisten der computergestützten Chairside-Versorgung wollten eine industriell hergestellte Keramik mit definierten physikalischen Eigenschaften unmittelbar an der Behandlungseinheit bearbeiten und den Patienten in einer Sitzung ohne Provisorium versorgen. Der andere Ansatz war, Oxidkeramiken – z. B. Zirkoniumdioxid – mithilfe der CAD/CAM- bzw. Frästechnik für Kronen- und Brückengerüste nutzbar zu machen. Durch die Weiterentwicklung der CAD-Software konnten vielfältige Konstruktionsmöglichkeiten geschaffen und die Qualität der Schleif- und Fräseinheiten durch Einsatz mehrerer Steuerungsachsen optimiert werden. Heute ist Wirtschaftlichkeit bei gleichzeitig hoher Qualität der gefertigten Restaurationen das „Markenzeichen" der CAD/CAM-Technik. Davon profitiert der Zahnarzt und Zahntechniker durch standardisierte und kontrollierte Behandlungs- bzw. Fertigungsabläufe – und letztlich auch der Patient. Deshalb werden heute ca. 84 Prozent der vollkeramischen Restaurationen in Deutschland computerunterstützt hergestellt.

Ein Blick in die Zukunft

Die Entwicklung der Digitaltechnik schreitet schnell voran. Unter der Leitung von Prof. Bernd Kordaß, Universität Greifswald, stellten Nachwuchswissenschaftler, Informatiker, Ingenieure der interdisziplinären „Informatik-Sektion der Deutschen Gesellschaft für computergestützte Zahnheilkunde e.V." (DGCZ), die sich aus dem ehemaligen Arbeitskreis für „Angewandte Informatik in der Zahnmedizin der DGZMK" entwickelt hatte, neue computergestützte Verfahren vor, die künftig die Behandlung in der Zahnarztpraxis unterstützen können. So können laut Informatiker U. Heil, Greifswald, Röntgenaufnahmen mit einer Software analysiert und daraus virtuell 3-D-Modelle errechnet und mehrschichtig abgebildet werden – ein Beitrag zur besseren Beurteilung der Anatomie. Informatiker D. Hintzen, Leipzig, demonstrierte, dass Okklusionsfolien zwar die Kontaktpunkte zeigen, aber nicht die Schichtdicke der Kontaktfläche. Mit einer digitalen Messmethode kann die Durchdringung der Kontaktfläche ermittelt werden. Diese Technik ist für den habituellen Biss relevant, weil einer Studie zufolge 40 Prozent von prothetisch ersetzten Zähnen keinen oder einen zu geringen Kontakt zum Antagonisten haben. Eine virtuelle Analyse von Knochenverlust in der Maxilla durch Fehlbelastungen, z. B. bei insuffizienten Implantataufbauten oder bei Bruxismus, ermöglicht laut C. Kober, München, die Simulation mit der Finite Element-Methode. Ein „Stereomatching", das mithilfe eines Flachbettscanners Modelle unbezahnter Kiefer digitalisiert und den Austausch der Bilddaten mit dem Zahntechniklabor ermöglicht, entwickelte M. Busch, FH Osnabrück. S. Ruge, Greifswald, stellte virtuell die dynamische Okklusion eines vollbezahnten 3-D-Modells vor, die automatisch Kontakte und Gleitflächen auf Funk-

tion mit hoher Auflösungsgenauigkeit prüft. Die Passgenauigkeit von Zirkonoxidkeramik-Brückengerüsten, ausgehend vom identischen Ausgangsmodell und hergestellt auf verschiedenen CAD/CAM-Systemen, prüfte O. Moldovan, Ulm. Die virtuell konstruierte Brücke zeigte tendenziell eine höhere Passgenauigkeit als das Gerüst, vom Wax-up-Modell gescannt. Die Rekonstruktion der Frontzähne 11 und 21 unter Nutzung des kontralateralen Replikats, das die Außenform des Nachbarzahns kopiert, zeigte F. Probst, München. Da Frontzähne selten symmetrische Ähnlichkeiten aufweisen, wurde zur Individualierung des Replikats ein Referenzzahn mithilfe von Ähnlichkeitsmerkmalen aus der Zahndatenbank übertragen.

Diese computerunterstützten Methoden mögen aus heutiger Sicht noch Entwicklungsaufwand benötigen, um den Praxiseinsatz zu rechtfertigen. Doch es zeigt auch, dass die Digitaltechnik in der Lage ist, in Zukunft viele Aufgaben intelligent und ressourcenschonend zu lösen.

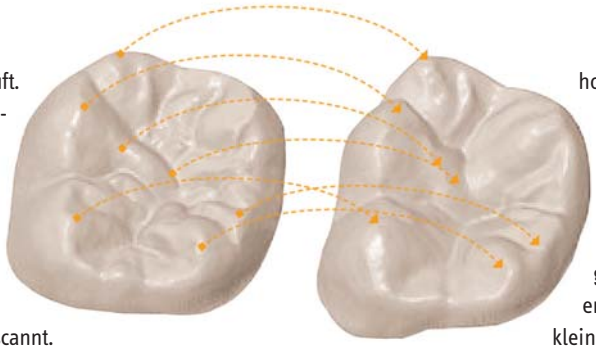


Abb. 5: Okklusale Merkmale zwischen unterschiedlichen, natürlichen Zahnmorphologien gehen in das algorithmische Modell ein; die Software rekonstruiert eine patientenspezifische Kaufläche (Quelle: Mehl).

Natürliche, patientenspezifische Kauflächen

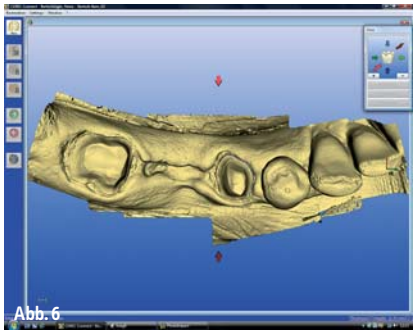
Worauf wird sich nun der aktuelle CAD/CAM-Trend konzentrieren? Wer sich mit der Thematik eingehend beschäftigt, konnte schon sehr früh voraussehen, dass Fertigungszentren eine entscheidende Rolle spielen würden: Hohe Auslastung, spezialisiertes Personal, zentralisierte Materialbeschaffung und hohe Qualitätsmaßstäbe an die „Standardversorgung" ermöglichen einen wirtschaftlichen Durchsatz, der die Amortisierung der Investitionen in hochentwickelte Fertigungsmaschinen ermöglicht und gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit erhöht (Abb. 2 und 3). Mittlere und kleinere ZT-Labors werden ihre Kernkompetenz in der computergestützten Herstellung hochwertiger, ästhetischer Restaurationen und in der Spezialanfertigung im Bereich der Teilprothetik und Implantatprothetik nutzen.

Ein weiterer Trend ist die computergestützte Fertigung von Inlays, Onlays, Teilkronen und Einzelkronen im Chairside-Verfahren oder unter Einbeziehung des Praxislabors mit CAD/CAM-Ausrüstung. Zielgruppe für dieses Konzept ist der Zahnarzt. Die biogenerische Kauflächengestaltung ermöglicht die Rekonstruktion der fehlenden Kaufläche bei Inlays, Onlays, Teilkronen und Kronen nach dem Vorbild der Natur (Abb. 4). Erstmalig ist es gelungen, den genetischen Bauplan von Morphologie und Okklusion zu entschlüsseln und Algorithmen zu deren Berechnung zu finden. Die Software analysiert unverwechselbare Merkmale im Zahnbild und rekonstruiert eine patientenspezifische Kaufläche. Die individuelle Okklusion sichert eine bessere Funktionalität des restaurierten Zahns (Abb. 5).

CAD/CAM und Vollkeramik werden oft in einem Atemzug genannt, was auf der anderen Seite aber auch viel zu kurz greift. Gerade das enorme Potenzial, das in der Fräsbearbeitung und seit Kurzem auch im Lasersintern von Metallen steckt, wird oft völlig vergessen. Die Herstellung von Metallrestaurationen (z. B. NEM, Titan) wird daher ebenfalls über kurz oder lang eine Domäne der CAD/CAM-Technik werden.

Was wird kommen?

Die 3-D-Vermessung von Quadranten wird zumindest teilweise die abdruckfreie Praxis ermöglichen (Abb. 6). So können Daten einer intraoralen Aufnahmesequenz mithilfe eines 3-D-Printers im Rapid-Prototyping-Verfahren Arbeitsmodelle für die Zahntechnik produziert werden, auf denen konventionell oder im CAD/CAM-Verfahren Zahnersatz gefertigt wird (Abb. 7). Intraorale Scans lichtoptischer Situationsabformungen können vom Zahnarzt über Internetportale an den Zahntechni-



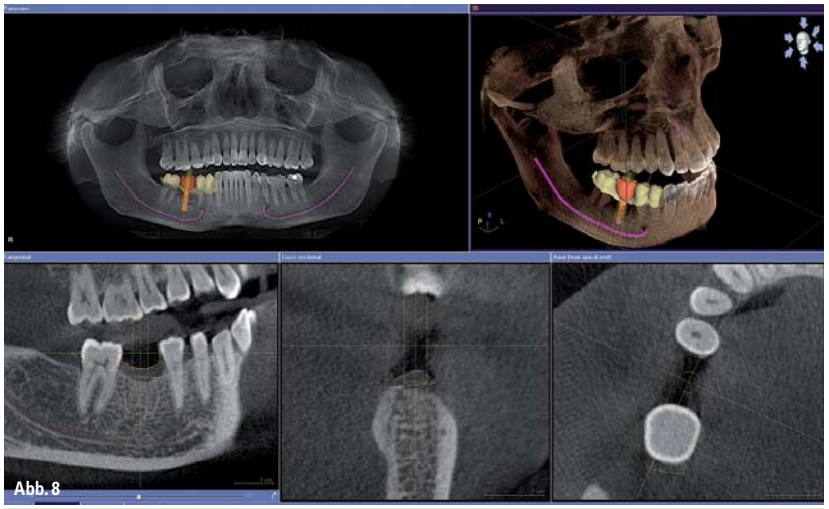


Abb. 6: Intraoral generierte, optoelektronische Abformung – Ausgangspunkt für die Modellherstellung (Quelle: Baltzer). – **Abb. 7:** Stereolithografisches Kunststoffmodell, hergestellt auf Basis des digitalen Datensatzes mit Gegenbezahnung (Quelle: Baltzer). – **Abb. 8:** Implantatplanung: DVT-Aufnahmen mit überlagerter Suprastruktur zur Bestimmung von Implantatposition, Einschubrichtung und prothetischem Aufbau (Quelle: Ritter).

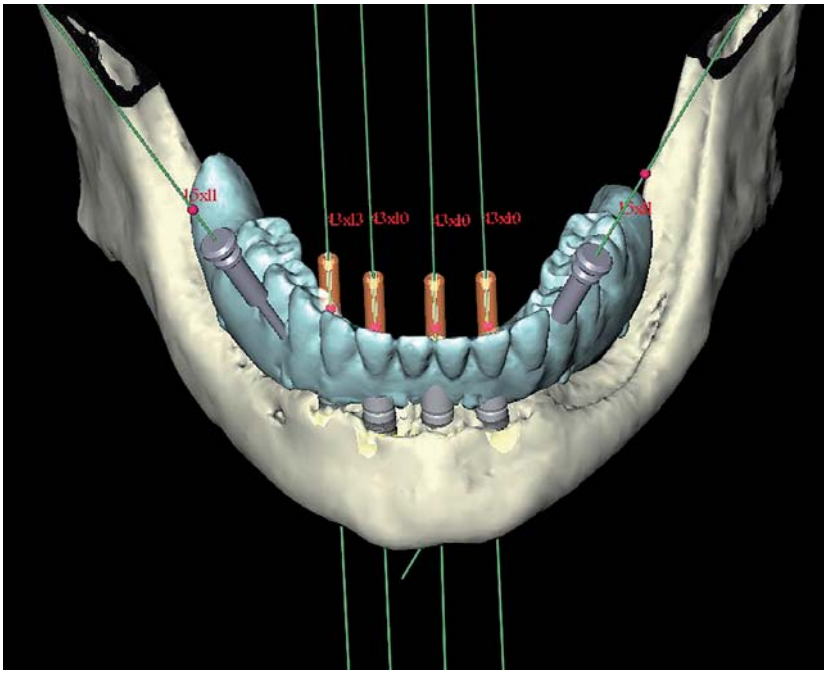


Abb. 9: Screenshot der Implantatplanung im UK mit vier Ancor-Pins zur exakten Fixierung der OP-Schablone (Quelle: Nobel Biocare/Geiselhöringer).

ker gesandt werden, um in das stationäre CAD-System eingespeist zu werden. Die verschiedenen Konzepte der abdruckfreien Praxis bieten einen erheblichen Komfort, weil der Abdruck mit Würgereiz entfällt, Fertigungszeiten verkürzt und die Produktivität auf der zahntechnischen Seite erheblich gesteigert werden kann. Die Geschwindigkeit, die Bedienung und die Genauigkeit der Aufnahmen werden laufend verbessert und der Messbereich ausgeweitet. Hat man einmal einen 3-D-Datensatz der Zahnoberflächen abgespeichert, lässt sich damit auch eine völlig neuartige, zahnmedizinische Diagnostik durchführen, indem man die zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommenen Messdaten miteinander vergleicht, um klinische Veränderungen festzustellen.

Oder nehmen wir das weite Feld der Implantologie und deren Suprastrukturen. Schon heute können Langzeitprovisorium, Abutment und Krone computerunterstützt hergestellt und Behandlungsabläufe reduziert werden. Die digitale Volumentomografie (DVT) bildet die Struktur des Knochens dreidimensional ab und ermöglicht dadurch eine deutlich höhere Qualität der Befundung, verbunden mit der exakten Ortung des Nervus alveolaris. Die Bildqualität ist besonders bei prothetisch teilversorgten Kiefern besser als bei CT-Aufnahmen; die dafür benötigte Röntgendosis ist deutlich geringer. Somit liefert das DVT die Basis für die chirurgische Planung des Implantates. Künftig wird mit der digitalen Messkamera intraoral das Implantatgebiet und die angrenzenden Nachbarzähne gescannt und ein virtuelles Modell gerechnet. Dieses Modell wird vom 3-D-Volumentomogramm überlagert; es erfolgt eine exakte Positionierung einer Krone im Röntgenbild (Abb. 8). Die Position des Enossalpfeilers wird im Mittelpunkt der Kronengrundfläche und in deren Einschubrichtung vorgeschlagen. Die Situation wird auf chirurgische Realisierbarkeit überprüft. Bei Auswahl des für den konkreten Fall vorgesehenen Implantatsystems kann die Situation im 3-D-Röntgenbild komplett simuliert werden. Mit spezieller Software kann künftig auch eine Bohrschablone konstruiert werden, die stereolithografisch gefertigt, eine exakt positionierte Knochenbohrung und Implantatplatzierung sicherstellt (Abb. 9).

Bei kieferorthopädischen Behandlungen, bei der Analyse von Erosionen und Abrasionen, bei parodontalen Veränderungen oder Eingriffen sind so quantitative, dreidimensionale Verlaufskontrollen möglich. Ein ganz entscheidender Vorteil der computergestützten Verfahren im Vergleich zur herkömmlichen Aufwachstechnik ist auch in der funktionellen und morphologischen Kauflächengestaltung zu sehen. Komplexe Algorithmen können ein immenses Grundlagenwissen über Zahnstrukturen und individuelle genetische Zusammenhänge abspeichern. Virtuelle Artikulatoren können beliebig programmierbare Bewegungen simulieren, sodass deutlich mehr Naturgesetzmäßigkeiten und individuelle Parameter als bisher in die Restaurationsoberfläche integriert werden können. Schon heute haben die computergestützten Diagnose- und Restaurationsverfahren dazu beigetragen, die funktionelle Artikulation zu vereinfachen (Abb. 10).

Die Bedürfnisse der CAD/CAM-Technologie haben Themen der Grundlagenforschung beflügelt und damit auch andere Bereiche der Zahnmedizin vorangebracht. Universitäten und Industrie können durch Kooperation eine nützliche Symbiose bilden und diese spannende Entwicklung voranbringen und gestalten. Bis jetzt war CAD/CAM- oder computergestützte Zahnmedizin kein zentrales Thema an den Universitäten. Da wir gerade erst am Anfang stehen und das Leistungspotenzial der CAD/CAM-Technik enorm ist, wird sich das

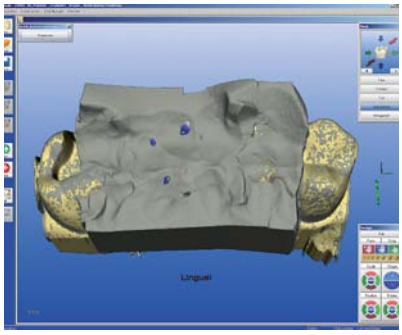


Abb. 10: Funktionelles Bissregistrat für eine Quadrantensanierung (Quelle: DGCZ).

in den nächsten Jahren mit Sicherheit ändern – und hiermit wiederum auch die Ausbildung der Studierenden und indirekt auch die Behandlungsmöglichkeiten in den Praxen beeinflussen.

autor

Manfred Kern
Arbeitsgemeinschaft für Keramik in der Zahnheilkunde e.V.
Postfach 10 01 17
76255 Ettlingen
Tel.: 07 21/9 45 29 29
E-Mail: info@ag-keramik.de
www.ag-keramik.eu

Remin Pro

REMIN PRO –
ERHOLUNG FÜR DIE ZÄHNE

Schützende Zahnpflege mit Hydroxylapatit, Fluorid und Xylitol

- Auffüllen oberflächlicher Schmelzläsionen mit Hydroxylapatit
- Einmalige Applikation nach konservierender Zahnbehandlung sowie besonders nach Bleaching und professioneller Zahnreinigung
- Erhältlich in den Geschmacksrichtungen Mint, Melone und Erdbeere
- Für die Anwendung in der Praxis und zu Hause
- Schafft ein angenehmes Mundgefühl

MADE IN GERMANY 100%

VOCO GmbH · Postfach 767 · 27457 Cuxhaven · Deutschland · Tel. 04721 719-0 · Fax 04721 719-109 · www.voco.de

VOCO DIE DENTALISTEN