

NACH DEM VORBILD DER NATUR

Automatische Kauflächenrekonstruktion durch intelligente CAD/CAM-Software

Prof. Dr. Albert Mehl, Manfred Kern, AG Keramik

München – Es ist nicht immer so, dass bahnbrechende Erfindungen innerhalb kurzer Zeit ihre Würdigung erhalten und Eingang in die Praxis finden. So erhielt das Forschungsteam an der Ludwig-Maximilians-Universität in München, Frau Dr. Juliane Richter und Dr. Andreas Litzenburger, für das Projekt „Vollautomatische Rekonstruktion von Zähnen mittels biogenerischem Zahnmodell“ im Auftrag der Stiftung für Zahnärztliche Wissenschaften den „Förderpreis für junge Wissenschaftler“ des Freien Verbandes Deutscher Zahnärzte (FVDZ).

>>> Vor einigen Jahren hatte die Forschungsgruppe unter Leitung des Physikers und Zahnarztes Prof. Dr. Albert Mehl, München, in Zusammenarbeit mit der Universität Zürich begonnen, die biogenerische Rekonstruktion von patientenspezifischen Kauflächen mittels der Informationstechnik zu entwickeln. Damit wurde die Grundlage geschaffen, dass gnathologisch gestaltete Okklusalfächen mit Computerunterstützung in der Praxis hergestellt und in vollkeramische Restaurationen integriert werden können. Als weiterer Nutzen kann durch Einsatz von okklusalen und funktionellen Registraten das schädelbezogene Einartikulieren über das Gegenkiefermodell umgangen werden.

Neue Wege zur Kauflächenrekonstruktion von Inlays und Onlays

Ziel der konservierenden und prothetischen Rekonstruktion ist, die fehlenden Außenflächen und insbesondere die Kauflächen der verloren gegangenen Zahnschubstanz wieder so herzustellen, dass sich die Rekonstruktion nach statischen und funktionellen Gesichtspunkten harmonisch in die vorhandene Gebissituation einfügt. Wurde bisher die Kaufläche in der Zahntechnik manuell nach erlernten Vorbildern reproduziert, wies die Informationstechnik einen neuen Weg für eine Software, die automatisch natürliche Kauflächen gestaltet. Das Projekt wurde vom Wunsch geleitet, möglichst viele Prozessschritte zu automatisieren, um Zeit und Kosten zu sparen und gleichzeitig einen hohen Qualitätsstandard zu sichern. Die bisher praktizierten Vorgehensweisen, durch erfahrene Zahntechniker „typische“ Standardzähne modellieren zu lassen, diese zu vermessen und dann als Datensatz zur Verfügung zu stellen, oder mit virtuellen Wachsmessern und Software-Werkzeugen die CAD-Rekonstruktion durchzuführen, hatten in der Vergangenheit nicht die perfekte Lösung gebracht. Zum einen sind zu viele Interaktionen zur Verbesserung des virtuellen Vorschlages erforderlich, zum anderen sind die Modellationsschritte am 2-D-Bildschirm umständlich und räumlich schwer zu



Abb. 1: Wissensstand zur Kauflächenmorphologie: Nurein kleiner Anteil der Kaufläche ist durch (metrische) Regeln determiniert und kann für die Computerrekonstruktion sinnvoll genutzt werden, ein großer Teil liegt in der Erfahrung des Einzelnen. Selbst dann erkennt man oft noch, ob es sich um eine modellierte oder natürliche Zahnoberfläche handelt.

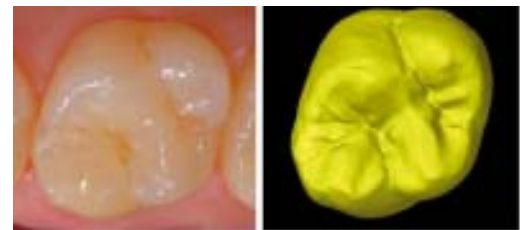


Abb. 2: Für die Zahnbibliothek wurden karies- und füllungsfreie Zahnoberflächen von Probanden abgeformt und die Gipsmodelle dreidimensional mit einer Auflösung von ca. 150.000 Messpunkten vermessen.

interpretieren. Wenn der Aufwuchsprozess auf den Computer übertragen wird und auch noch automatisch ablaufen soll, müssen metrische und mathematische Gesetzmäßigkeiten der Kauflächenmorphologie bekannt sein.

Analysiert man die Konzepte der Aufwachstechnik, so kommt man zum Schluss, dass alle Aufwachsregeln rein deskriptiver Natur sind und nur wenig metrische Anhaltspunkte enthalten – so für Fissurenverlauf, Tiefe der Fissuren, Höckerabstand, Neigungswinkel der Höcker. Dass konventionell gefertigte Kauflächen gut gelingen, liegt daran, dass zu den gelernten Regeln der Aufwachstechnik vor allem die Erfahrung zählt, z.B. wie eine gute Zahnoberfläche aussieht bzw. welche Zahnoberfläche in die jeweilige klinische Situation mit Nachbarzähnen und Antagonisten passt. Den aktuellen Kenntnisstand über Zahnmor-

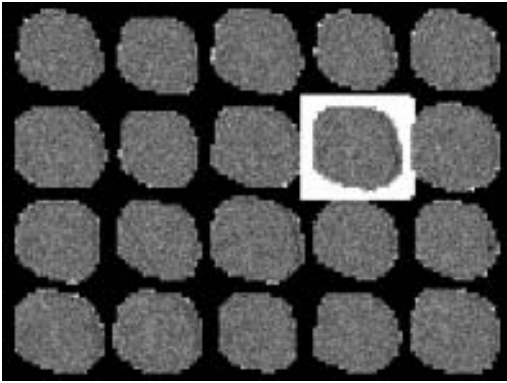


Abb. 3: Beispiele von Zahnoberflächen aus der OK 6er-Molaren-Bibliothek. Zurzeit liegen ca. 400 Zahnoberflächen pro Seitenzahntyp vor.



Abb. 4: Links: Berechnung des „Durchschnittszahnes“ aus den Bibliothekszähnen nach Korrespondenzzuordnung – hier der durchschnittliche OK 6er. Es werden vor allem die Merkmale repräsentiert, die den meisten Bibliothekszähnen gemeinsam sind. Diese Merkmale und die metrischen Dimensionen wurden ohne jegliche Vorkenntnis über Zahnmorphologien gefunden, können also als objektiv betrachtet werden. Rechts: Prothesenzahn maschinell aus den Daten des Durchschnittszahnes (links) hergestellt (Approximalflächen wurden nicht berücksichtigt).

phologien kann man anhand eines Wissensbalkens grob veranschaulichen (Abb.1): 100 Prozent würde einer vollständigen Beschreibung der Kaufläche entsprechen. Das, was man bisher für den Computer als metrisch verwertbare Information nutzen kann, liegt bei ca. 10 Prozent, ca. 60–80 Prozent dürften aus dem Erfahrungsschatz des jeweiligen „Modellierers“ stammen.

Für den automatisierten Rekonstruktionsprozess reichen die Aufwachsregeln nicht aus, sondern es müssen die Parameter für eine natürliche und für die jeweilige klinische Situation am besten passende Zahnoberfläche erlernt werden. Ergebnisse aus den Neurowissenschaften und der Maschinenautomatisierung zeigen, dass komplexe mathematische Algorithmen diesen Lernvorgang nachbilden können. Folgende Projektschritte waren notwendig:

1. Aufbau einer Zahnbibliothek aus natürlichen Zahnoberflächen
2. Vollautomatische Ermittlung korrespondierender Merkmale
3. Berechnung eines „Durchschnittszahnes“
4. Berechnung der Abweichungen jedes einzelnen Bibliothekszahnes von diesem Durchschnittszahn
5. Analyse der häufigsten Abweichungen.

Für den Aufbau der Zahnbibliothek wurden an karies- und füllungs-freien Probanden Abformungen für

Gipsmodelle erstellt und diese Modelle mit einem Laserscanner dreidimensional vermessen (Abb. 2, 3). Im nächsten Schritt wurden mittels einer neu entwickelten Lernsoftware zwischen jedem Zahnpaar der Zahnbibliothek differenzierende Merkmale wie Höckerspitzen, Fissuren, Randleisten, Höckerabhänge in einer Art „genetischem Bauplan“ gespeichert. Die Zuordnung erfolgte vollautomatisch und nur mit den Informationen des Höhenfeldes und der Steigungen (Krümmungen). Dies entspricht genau den Informationen, die das Auge dreidimensional wahrnimmt. Sind alle Merkmale eines Zahnes den Strukturen aller anderen Zähne zugeordnet, so kann man den Durchschnitt dieser Strukturen berechnen. Man erhält eine Oberfläche, bei der die Merkmale verstärkt übrig bleiben, die bei nahezu allen Zahnoberflächen eines Zahntyps vorhanden sind, während die Merkmale, die variabler sind, mehr oder weniger „herausgemittelt“ werden. Das Ergebnis kann man als „typischen“ Repräsentanten eines bestimmten Zahntyps interpretieren. Diese erstmalige, mathematische Berechnung eines Durchschnittszahnes ist am Beispiel des OK 6ers (Abb.4) zu sehen.

In einem weiteren Schritt können die Differenzen zwischen den einzelnen Bibliothekszähnen und dem Durchschnittszahn berechnet und die in der Natur am häufigsten vorkommenden Abweichungen von diesem Durchschnittszahn analysiert werden. Liegt ein gemeinsamer genetischer Bauplan den verschiedenen Morphologien eines bestimmten Zahntyps zugrunde, so kann man dies anhand dieser Wahrscheinlichkeiten ablesen. Der entscheidende Vorteil des biogenerischen Zahnmodells liegt darin, dass es sich um eine mathematische bzw. metrische Beschreibung von natürlichen Zahnoberflächen handelt. Die Eigenschaften des Modells wurden im Rahmen einer Studie an 27 verschiedenen Inlay-Situationen getestet. Dabei wurden an natürlichen, unversehrten Testzähnen unterschiedliche Kavität-

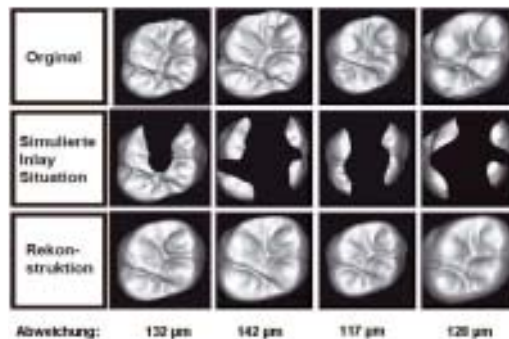


Abb. 5: Automatische Rekonstruktion von simulierten Inlaykavitäten mittels des biogenerischen Zahnmodells (ausgewählte Beispiele). Oben: Unversehrter Originalzahn, nicht in der Zahnbibliothek vorhanden, also unbekannt. Mitte: Simulierte Kavität. Unten: Nur anhand der Restzahnschubstanz (Mitte) automatisch rekonstruierte Kaufläche. Die angegebenen Abweichungen sind ein Maß für die metrischen Unterschiede zwischen Rekonstruktion und Originalzahn im Bereich der Kavität, d.h. nur im Bereich der Inlayoberfläche (20–80-ProzentQuantil als Maß).

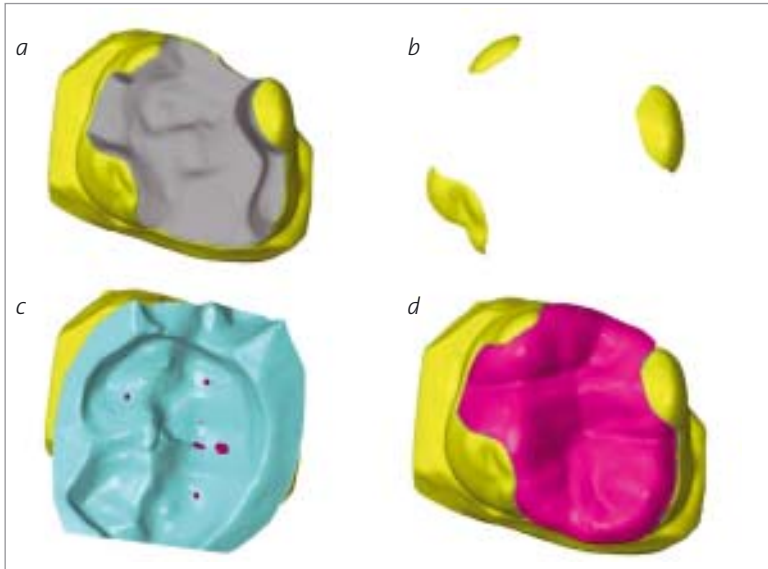


Abb. 6: Automatische Onlay-Rekonstruktion mit dem biogenerischen Zahnmodell unter Einbeziehung des Antagonisten, der stetigen und glatten Fortsetzung der Restzahnschubstanz und der Einhaltung der Mindestschichtstärke: a) Ausgangssituation; b) Restzahnschubstanz, die als alleinige Information für die Rekonstruktion zur Verfügung steht; c) Vollautomatische Berechnung der Okklusalfäche mit automatischem Vorschlag der Kontaktpunktverteilung; d) berechnete Kaufläche mit gewünschter natürlicher und funktioneller Morphologie.

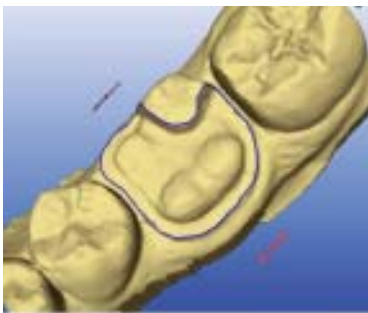


Abb. 7: Klinische Ausgangssituation für die vollautomatische biogenerische Inlay/Onlayrekonstruktion (UK 6er). Dazu wurden die Rekonstruktionssoftware und das biogenerische Modell in die CEREC-Software integriert.

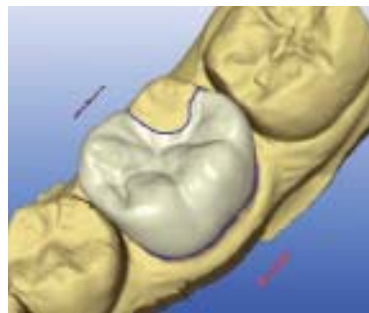


Abb. 8: Ohne weitere Interaktionen und vollautomatisch wird die Rekonstruktion vorgeschlagen.

Abb. 1–3, 5–8 Prof. Mehl, Abb. 4 Merz-Dental

tenformen simuliert (Abb. 5). Die verbliebene Restzahnschubstanz diente als alleinige Information für die automatische Rekonstruktion. Die berechnete Kaufläche wurde ohne weitere interaktive Veränderung mit der Originalkaufläche verglichen. Es wurde ermittelt, dass in allen Fällen eine vollautomatische Rekonstruktion möglich war. Die Standardabweichungen der Rekonstruktionen zur Originalkaufläche lagen bei etwa 144 µm und waren nur in geringem Maße von der Kavitätengröße abhängig. Besonders schwierig wird die Situation dann, wenn noch wie bei Inlay- und Onlay-Situationen wenig Restzahnschubstanz vorhanden ist. In diesem Fall muss die Rekonstruktion stufenlos und mit gleicher Neigung, d.h. glatt am gesamten Präparationsrand von der Restzahnschubstanz ausgehend fortgesetzt werden. Dies ist der Grund, warum der Fokus für die ersten Tests des biogenerischen Zahnmodells auf Inlay- und Onlay-Situationen lag. In Abb. 6 ist hierzu

ein klinisches Beispiel einer Onlay-Präparation zu sehen, die mit dem biogenerischen Modell unter Einhaltung der Randbedingungen vollautomatisch rekonstruiert wurde.

Im Rahmen einer Kooperation wurde die Methode des biogenerischen Zahnmodells mit zugehöriger Rekonstruktionssoftware in ein marktgängiges CAD/CAM-System integriert. Dadurch bestand die Möglichkeit, klinisch unter verschiedenen Bedingungen und mit hoher Fallzahl das Verfahren zu testen (Abb. 7, 8). Die fehlende Okklusalfäche eines präparierten Restzahns, der für ein Inlay oder Onlay vorbereitet wurde, wird aufgrund von Ähnlichkeiten in der Zahndatenbank abgeglichen und die passenden Höcker, Fossa, Fissuren und Kontaktflächenwinkel bereitgestellt. Anhand der Kontaktpunktverteilung und Höckerspitzen sowie Approximalkontakte kann die Software einen gut passenden Zahn berechnen und auf Kollision mit dem Registrat prüfen. Kontaktpunkte werden automatisch justiert. Dieses Auffinden und Rekonstruieren der natürlichen Kaufläche folgt den „genetisch determinierten Mustern“ und kreiert eine natürliche, individuelle und funktionale Kaufläche. Das Ergebnis einer biogenerisch erzeugten Kaufläche kann qualitativ mit den bisher konventionell bzw. manuell hergestellten Modellationen verglichen werden. Zusätzlich wird die Wandstärke der Restauration auf die vorgegebene Mindestschichtstärke der Keramik geprüft. Das biogenerische Zahnmodell wurde in ein chairside arbeitendes CAD/CAM-Restaurationssystem (Cerec 3D) übernommen und hat sich im Praxisalltag bewährt.

Zusammenfassung

Die Berechnungsvorschläge von Kauflächen durch CAD/CAM-Systeme waren in vielen klinischen Situationen unbefriedigend und erforderten zeitaufwendige Nachbesserungen. Die Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz von CAD/CAM-Systemen kann nur erhöht werden, wenn die Kauflächengestaltung weitgehend automatisiert und für jede klinische Situation eine funktionell gut passende Restauration erzielt wird. Der Beitrag beschreibt die Entwicklung und Nutzung eines „Biogenerischen Zahnmodells“, das patientenspezifische Kauflächen rekonstruiert. <<<

Auf Anfrage werden die Literaturangaben von der Redaktion zugesendet.

➤ KONTAKT

Weitere Informationen zur Arbeitsgemeinschaft Keramik erhalten Sie unter www.ag-keramik.de
Ansprechpartner ist Herr Manfred Kern
Tel.: 07 21/9 45 29 29
E-Mail: kern.ag-keramik@t-online.de