

Nach dem Vorbild der Natur

Automatische Kauflächenrekonstruktion durch intelligente CAD/CAM-Software

M. Kern¹, A. Mehl²

¹Arbeitsgemeinschaft für Keramik in der Zahnheilkunde e. V., Ettlingen

²Poliklinik für Zahnerhaltung, München

Es ist nicht immer so, dass bahnbrechende Erfindungen innerhalb kurzer Zeit ihre Würdigung erhalten und Eingang in die Praxis finden. Doch das Forschungsteam an der Ludwig-Maximilian-Universität in München, Dr. Juliane Richter und Dr. Andreas Litzenburger, erhielt 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 Registern 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 herzustellen. Die resultierende Rekonstruktion muss sich nach statischen und funktionellen Gesichtspunkten harmonisch in die vorhandene Gebissituation einfügen.

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 nachbilden. 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 praktizierte Vorgehensweise bestand darin, 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. Diese hatte jedoch nicht die perfekte Lösung gebracht. Zum einen sind zu viele Interaktionen zur Verbesserung des virtuellen Vorschlages erforderlich, zum anderen sind die Modellationschritte am 2D-Bildschirm umständlich und räumlich schwer zu 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 Zahnmorphologien kann man anhand eines Wissensbalkens grob veranschaulichen (Abb. 1): 100% würde einer vollständigen Beschreibung der Kaufläche entsprechen. Das, was man bisher für den Computer als metrisch verwertbare Information nutzen kann, liegt bei ca. 10%, ca. 60-

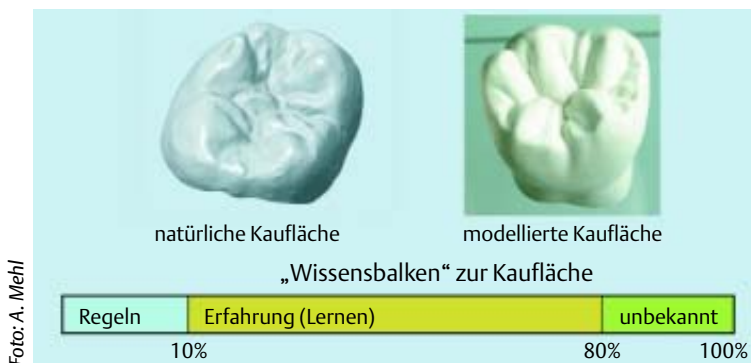


Foto: A. Mehl

Abb. 1 Wissensstand zur Kauflächenmorphologie: Nur ein 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.

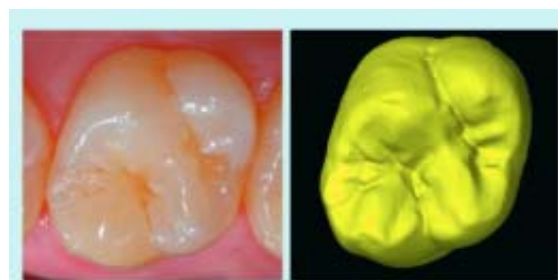


Foto: A. Mehl

Abb. 2 Für die Zahnbibliothek wurden karies- und füllungs freie Zahnoberflächen von Probanden abgeformt und die Gipsmodelle dreidimensional mit einer Auflösung von ca. 150 000 Messpunkten vermessen.

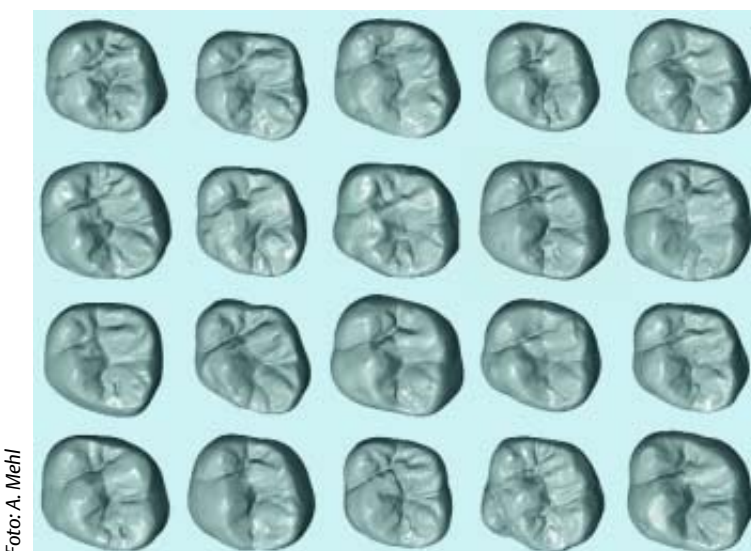


Foto: A. Mehl

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

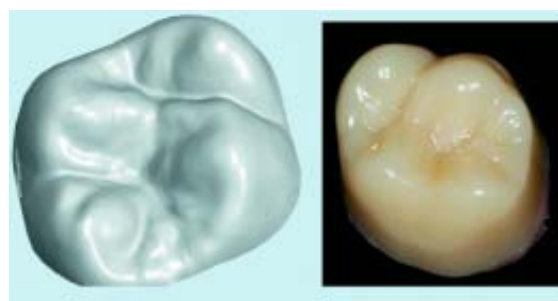


Foto: Merz Dental

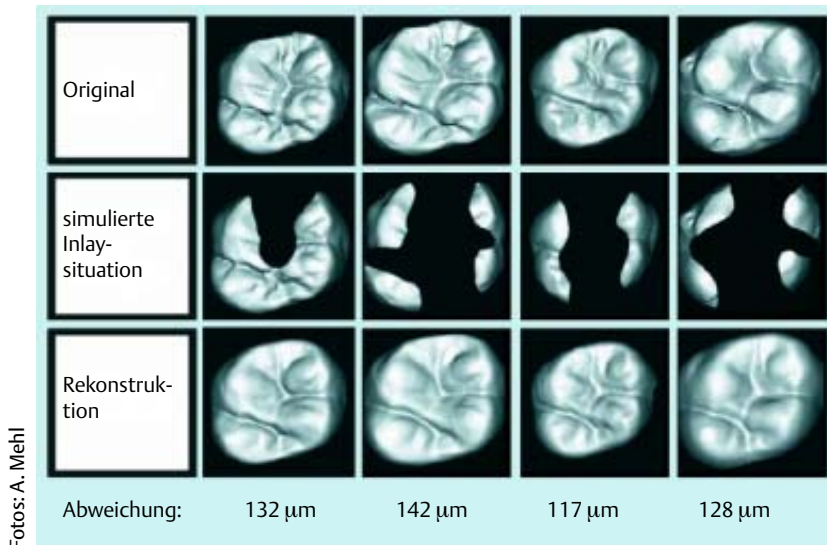
Abb. 4 Links: Berechnung des „Durchschnittszahnes“ aus den Bibliothekszähnen nach Korrespondenzzuordnung – hier der durchschnittliche OK 6er. Es werden vor allem die Merkmale repräsentiert, die den meisten Bibliothekszähnen gemeinsam sind. Diese Merkmale und die metrischen Dimensionen wurden ohne jegliche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

80% 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 und
5. Analyse der häufigsten Abweichungen.

Für den Aufbau der Zahnbibliothek erstellten die Mediziner an karies- und füllungs freien Probanden Abformungen für Gipsmodelle und vermaßen diese Modelle dreidimensional mit einem Laserscanner (Abb. 2, 3). Im nächsten Schritt wurden differenzierende Merkmale mithilfe einer neu entwickelten Lernsoftware zwischen jedem Zahnpaar der Zahnbibliothek in einer Art „genetischen Bauplan“ gespeichert. Zu diesen Merkmalen zählten Höckerspitzen, Fissuren, Randleisten und Höckerabhänge. 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 vor-



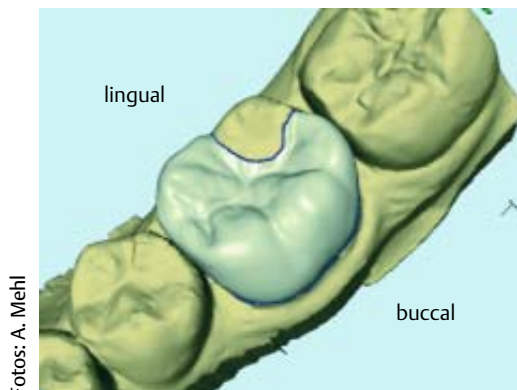
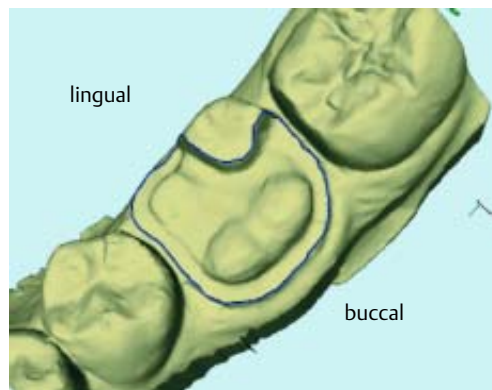
Fotos: A. Mehl

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 Restzahnsubstanz (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%-Quantil als Maß).

handen sind. Die Merkmale, die variabler sind, werden dabei mehr oder weniger „herausgemittelt“. Das Ergebnis kann man als „typischen“ Repräsentanten eines bestimmten Zahntyps interpretieren. Diese erstmalige, mathematische Berechnung eines Durchschnittszahnes ist am Beispiel des 1. Molaren im OK (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.

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

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 natürli-



Fotos: A. Mehl

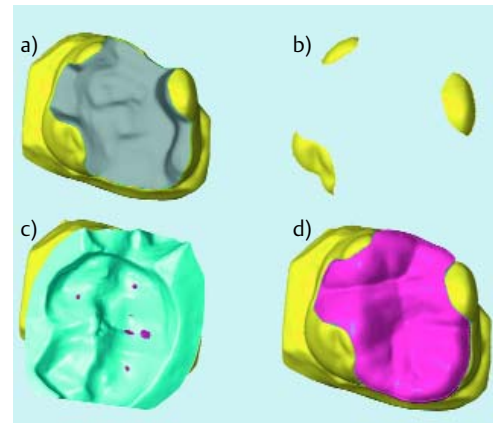


Foto: A. Mehl

Abb. 6 Automatische Onlay-Rekonstruktion mit dem biogenerischen Zahnmodell unter Einbeziehung des Antagonisten, der stetigen und glatten Fortsetzung der Restzahnsubstanz und der Einhaltung der Mindestschichtstärke; a) Ausgangssituation, b) Restzahnsubstanz, 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.

chen Zahnoberflächen handelt. Die Eigenschaften des Modells wurden im Rahmen einer Studie an 27 verschiedenen Inlay-Situationen getestet. Dabei wurden an natürlichen, unversehrten Testzähnen unterschiedliche Kavitätenformen simuliert (Abb. 5). Die verbliebene Restzahnsubstanz 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, wie bei Inlay- und Onlay-Situationen, wenig Restzahnsubstanz vorhanden ist. In diesem Fall muss die Rekonstruktion stufenlos und mit gleicher Neigung (d.h. glatt am gesamten Präparationsrand von der Restzahnsubstanz ausgehend) fortgesetzt werden. Dies ist der Grund, warum der Fokus für die ersten Tests des biogenerischen Zahnmodells auf

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

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 Modelationen 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 zeitaufwändige 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.

Literatur bei den Verfassern

Korrespondenzadresse

Prof. Albert Mehl, Manfred Kern
Arbeitsgemeinschaft für Keramik
in der Zahnheilkunde e.V.
Postfach 100117, 76255 Ettlingen
E-Mail: info@ag-keramik.de

Literaturliste

- ¹Ash M. Wheeler's dental anatomy, physiology and occlusion, 7th ed. Philadelphia, W. B. Saunders Co. 1993
- ²Blanz V, Mehl A, Vetter T, Seidel H-P. A Statistical Method for Robust 3D Surface Reconstruction from Sparse Data. In 2nd Int. Symp. On 3D Data Proc, Visualization and Transmission, 3DPVT 2004; 293-300
- ³Caesar H, Schulz D. Naturgemäße Aufwachstechnik. Heraeus-Kulzer, 1991
- ⁴Kern M, Mehl A. Vorteile von CAD/CAM und Vollkeramik ergänzen sich. DZW 2003; 43: 10-13
- ⁵Kern M, Mehl A. Neue Perspektiven für CAD/CAM in der Zahnheilkunde?. Quintessenz Zahntechnik 2002; 11, 1242-1248.
- ⁶Lotzmann U. Die Prinzipien der Okklusion. Verlag Neuer Merkur, 1981
- ⁷Mehl A, Blanz V, Hickel R. Was ist der „Durchschnittszahn“? DZZ 2005; 60: 335-341
- ⁸Mehl A, Blanz V, Hickel R. Was ist der „Durchschnittszahn“? Ein mathematisches Verfahren für die automatische Berechnung einer repräsentativen Kaufläche. Dtsch Zahnärztl Z 2005; 60: 335-341
- ⁹Mehl A, Blanz V. A new approach for automatic reconstruction of occlusal surfaces with the biogeneric tooth model. Int J Comput Dent 2005; 8: 13-25
- ¹⁰Mehl A, Blanz V, Hickel R. A new mathematical process for the calculation of average forms of teeth. J Prosthet Dent 2005; 94: 561-566
- ¹¹Mehl A, Blanz V, Hickel R. Biogeneric tooth: a new mathematical representation for tooth morphology in lower first molars. Eur J Oral Sci 2005; 113: 333-340
- ¹²Mehl A, Blanz V, Hickel R. A new mathematical process for the calculation of average forms of teeth. J Prosthet Dent 2005; 94: 561-566
- ¹³Mehl A, Blanz V, Hickel R. Biogeneric tooth: a new mathematical representation for tooth morphology in lower first molars. Eur J Oral Sci 2005; 113: 333-340
- ¹⁴Mehl A. Der Biogenerische Zahn. Ein neuartiges Verfahren zur hochpräzisen biologisch funktionellen Gestaltung von Zahnrestorationen. Dissertationsschrift, 2003
- ¹⁵Mehl A. CAD/CAM-Fertigungsverfahren – neue Ansätze und Wege. ZWP 2003; 3:16-19
- ¹⁶Mehl A. Zirkonoxid – entdecke die Möglichkeiten. Zahntech Wirtschaft Labor 2002; 3
- ¹⁷Mehl A. CAD/CAM - welche Technik siegt? Dentalmagazin 2002; 2
- ¹⁸Mehl A. CAD/CAM – Mode oder Methode? Quintessenz Zahntech 2002
- ¹⁹Mehl A. 3D-Datenerfassung und CAD/CAM-Technologie in der restaurativen Zahnmedizin – Entwicklung, Einsatz und Perspektiven eines neuen Verfahrens. Habilitation, Universität München, 1998

²⁰Mehl A, Gloger W, Kunzelmann K-H, Hickel R.: A new optical 3-D device for the detection of wear. J Dent Res 1997; 76: 1799-1807

²¹Mehl A. Methoden der 3D-Informationsgewinnung mit dem Lichtschnittsensor. Diplomarbeit, Universität Erlangen-Nürnberg, 1992

²²Neumann T. Angewandte Biomechanik in der Kronen- und Brückentechnik – das biomechanische Aufwachskonzept von M. H. Polz. J Multidisciplinary Collaboration in Prosthodontics-teamwork 2001; 4: 298-311

²³Paulus D, Wolf M, Meller S, Niemann H. Three-dimensional computer vision for tooth restoration. Med Image Analysis 1999; 3: 1-19

²⁴Richter J, Mehl A. Evaluation for the fully automatic inlay reconstruction by means of the biogeneric tooth model. Int J Comput Dent. 2006; 2: 101-11

²⁵Robinson DL, Blackwell PG, Stillmann EC, Brook AH. Impact of landmark reliability on the planar Procrustes analysis of tooth shape. Arch Oral Biol 2002; 47: 545-54

²⁶Schulz D. Interpretationen zum Formen und Funktionskomplex unseres Zahnreliefs. ZahnMundKiefer 1995; 70-73

²⁷Schulz D. Die Naturgemäße Aufwachstechnik. In: R. Suckert, Okklusionskonzepte. Verlag Neuer Merkur, 1992

Kontakt zu den Autoren:

Manfred Kern, Arbeitsgemeinschaft für Keramik in der Zahnheilkunde e.V.
Schriftführung
Tel. (0611) 401278
Mail: kern.ag-keramik@t-online.de
www.ag-keramik.de