

# Vollautomatische Extraktion der Präparationsgrenze für zahnärztliche Restaurationen aus 3D-Messdaten von Kiefermodellen

Volker Ahlers<sup>1</sup>, Paul Weigl<sup>1</sup> und Hartmut Schachtzabel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, Klinikum der J. W. Goethe-Universität, Theodor-Stern-Kai 7, 60590 Frankfurt am Main

<sup>2</sup>Institut für Mathematik, Universität Potsdam, Postfach 601553, 14415 Potsdam  
Email: v.ahlers@med.uni-frankfurt.de

**Zusammenfassung.** Die CAD/CAM-basierte Herstellung von Zahnersatz ermöglicht die effiziente Verarbeitung hochwertiger keramischer Materialien; sie basiert auf 3D-Messdaten der präparierten Kiefersituation. Die vorliegende Arbeit beschreibt ein Verfahren zur vollautomatischen Extraktion der Präparationsgrenze (der unteren Grenzlinie zwischen Zahnersatz und präpariertem Zahnstumpf). Das Verfahren kombiniert mehrere Algorithmen zur Konturfindung und nutzt einen Klassifikator, um aus den verschiedenen Ergebnissen die korrekte Präparationsgrenze zu bestimmen. Da sich die Algorithmen stark voneinander unterscheiden, z. B. kontur- oder flächenbasiert sind, wird eine hohe Erfolgsrate für die verschiedensten Arten von Präparationen erzielt.

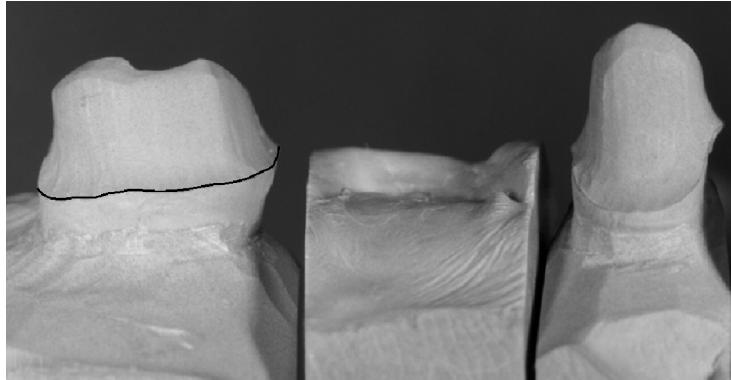
## 1 Einleitung

Verfahren zur CAD/CAM-basierten Herstellung von Zahnersatz werden seit den neunziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts intensiv erforscht und entwickelt. Ein Grund dafür ist der Wunsch, Zahnersatz effizienter und kostengünstiger herzustellen. Darüber hinaus verlangen jedoch auch neue, vor allem keramische Materialien nach innovativen Fertigungsmethoden, da sie nicht wie Edelmetalle gegossen werden können. Ein Höchstmaß an Festigkeit, Biokompatibilität und Ästhetik bietet HIP-Zirkonoxid-Keramik, die in gesintertem Zustand fräsend verarbeitet wird.

Die typische Prozesskette eines zahnmedizinischen CAD/CAM-Systems sieht wie folgt aus: Von einem Abdruck der präparierten, d. h. beschliffenen Zähne wird ein Gipsmodell hergestellt (siehe Abb. 1), das mit Hilfe eines 3D-Scanners digitalisiert wird. Basierend auf den 3D-Messdaten wird in einem CAD-System der Zahnersatz konstruiert. Anschließend wird in einem CAM-Modul die Fertigung vorbereitet, die dann mit einer CNC-Fräsmaschine durchgeführt wird.

Von zentraler Wichtigkeit für alle zahnmedizinischen CAD/CAM-Verfahren ist ein exakter Abschluss des Zahnersatzes an den präparierten Zähnen. So darf zwischen dem unteren Rand einer Krone und dem beschliffenen Zahnstumpf keine Lücke existieren, da sonst die Gefahr besteht, dass Krankheitserreger zwischen Krone und Zahnstumpf gelangen. Die Kurve, die den Abschluss zwischen

**Abb. 1.** Gipsmodell mit zwei präparierten Zahnstümpfen und einer Lücke zur Konstruktion einer dreigliedrigen Brücke. Am linken Zahnstumpf ist zur Veranschaulichung die Präparationsgrenze eingezeichnet.



Zahnersatz und präpariertem Zahn beschreibt, wird als Präparationsgrenze bezeichnet (siehe Abb. 1). Diese kann entweder interaktiv oder automatisch aus den 3D-Messdaten bestimmt werden.

## 2 Stand der Technik

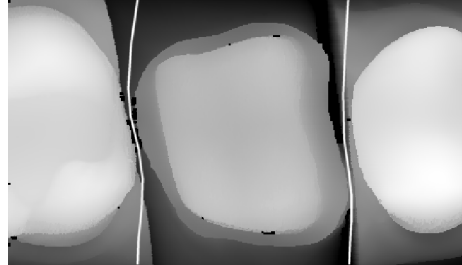
Die derzeit auf dem Markt befindlichen zahnmedizinischen CAD/CAM-Systeme erfordern ein hohes Maß an Interaktion durch den Benutzer; auch die Präparationsgrenze muss zumeist am Bildschirm definiert werden [1, 2]. Einige Systeme schlagen nach Definition eines oder mehrerer Startpunkte eine Präparationsgrenze vor, die durch den Benutzer korrigiert werden kann. Andere Systeme verlangen eine spezielle, z. B. farbliche Markierung der Präparationsgrenze im Gipsmodell.

## 3 Wesentlicher Fortschritt durch den Beitrag

Um eine effiziente Konstruktion des Zahnersatzes zu ermöglichen, ist es erstrebenswert, den Anteil an Interaktion mit dem Benutzer zu minimieren. Insbesondere die Erkennung der Präparationsgrenze ist ein Schritt, der vollautomatisch durchgeführt werden kann. Unser im Folgenden beschriebenes Verfahren leistet dies für präparierte Zahnstümpfe, ohne dass der Benutzer Startwerte vorgeben oder die Präparationsgrenze im Modell markieren muss.

Da CAD/CAM-Systeme zur automatischen Herstellung von Zahnersatz nicht direkt am Patienten eingesetzt werden, ist eine Zertifizierung der Software und ihrer Algorithmen nach dem Medizinproduktegesetz unkritisch. Der Zahntechniker hat die Gelegenheit zur manuellen Nachbearbeitung des automatisch produzierten Zahnersatzes, und die endgültige Entscheidung, ob der Zahnersatz eingesetzt wird, trifft stets der behandelnde Zahnarzt. Auf der Materialseite steht eine große Auswahl an zertifizierten Keramiken und Metallen zur Verfügung.

**Abb. 2.** Grauwertdarstellung des gemeinsamen Höhenprofils eines Zahnstumpfes und seiner beiden Nachbarzähne. Hellere Pixel entsprechen größeren  $z$ -Werten, weiß eingezeichnet sind die Pfade zur Trennung der Kieferelemente.



## 4 Methoden

### 4.1 Vorverarbeitung

Zunächst wird aus den 3D-Messdaten ein  $2\frac{1}{2}$ -dimensionales Höhenprofil berechnet, dessen  $z$ -Richtung die Einschubrichtung ist, in der der Zahnersatz später auf den Zahnstumpf geschoben wird. Sofern die einzelnen Kieferelemente (Stümpfe, Lücken, Nachbarzähne, siehe Abb. 1) gemeinsam vermessen wurden, werden sie anschließend getrennt. Dazu werden mit Hilfe des A\*-Algorithmus [3] Pfade mit minimalem  $z$ -Wert zwischen den Kieferelementen gesucht (siehe Abb. 2).

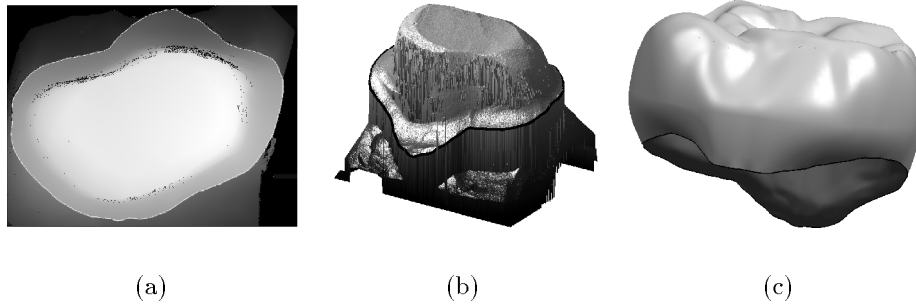
Im Höhenprofil eines Stumpfes erscheint die Präparationsgrenze als Sprung der  $z$ -Koordinate und kann mit Hilfe von Bildverarbeitungsmethoden extrahiert werden. Dazu werden zunächst mit Sobel-Filtern Gradientenbilder erzeugt, in denen anschließend mögliche Startwerte auf den vorhandenen Konturen gesucht werden. Da diese Startpunktsuche vollautomatisch erfolgt, nutzt sie anwendungsspezifisches Vorwissen über die Ausdehnung und Lage der Präparationsgrenze.

### 4.2 Konturfindung

Durch Anwendung verschiedener Konturalgorithmen werden mehrere potentielle Präparationsgrenzen bestimmt. Dabei wird Vorwissen über die mögliche Form, Größe und Lage der Präparationsgrenze genutzt.

Im Einzelnen werden fünf Algorithmen verwendet. Eine Konturverfolgung im Gradientenbild erfolgt auf zwei Arten: Der jeweils nächste Konturpunkt wird im ersten Algorithmus bevorzugt senkrecht zum lokalen Gradientenvektor gesucht [4], im zweiten Algorithmus senkrecht zum lokalen Radiusvektor, d. h. zur Verbindung zwischen dem aktuellen Konturpunkt und dem Stumpfmittelpunkt. Der dritte Algorithmus verwendet aktive Konturen (*Snakes*), für die mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens (*Simulated Annealing*) das Minimum einer Kostenfunktion bestimmt wird, die sich aus der Krümmung der Kontur und ihrer Nähe zu großen Werten des Gradientenbetrages zusammensetzt [5]. Der bereits erwähnte A\*-Algorithmus zur Suche eines optimalen Pfades zwischen

**Abb. 3.** (a) Grauwertdarstellung des Höhenprofils eines Zahnstumpfes und der vollautomatisch extrahierten Präparationsgrenze. (b) 3D-Darstellung desselben Zahnstumpfes. (c) CAD-Geometrie der vollautomatisch konstruierten Zahnkrone mit schwarz eingezeichneter Präparationsgrenze.



zwei gegenüberliegenden Punkten der Kontur bildet den vierten Algorithmus [3]. Grundlage des fünften Algorithmus ist schließlich ein Flächenwachstumsverfahren (*Region Growing*) [4, 6], das vom Mittelpunkt des Zahnstumpfes aus sukzessiv benachbarte Pixel aggregiert, bis eine Kante von vorgegebener Höhe erreicht ist.

### 4.3 Klassifikation

Schließlich entscheidet eine Hierarchie von Klassifikatoren anhand von verschiedenen Merkmalen der gefundenen potentiellen Präparationsgrenzen, welche von ihnen korrekt ist. Verwendete Merkmale der Präparationsgrenze sind Länge, absolute Ausdehnung in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung, Aspektverhältnis der Ausdehnung in  $x$ - und  $y$ -Richtung, Abstand vom höchsten Punkt des Zahnstumpfes, Größe der Ableitung der  $z$ -Koordinate nach dem Kurvenparameter.

Zunächst werden durch Vergleich der Merkmalswerte mit Minimal- und Maximalwerten grob falsche Präparationsgrenzen ausgesondert. Anschließend werden die verbliebenen Präparationsgrenzen mit Hilfe eines Entscheidungsbaumes auf ihre Korrektheit geprüft [7]. Im letzten Schritt wird eine *Support Vector Machine* zur endgültigen Klassifikation verwendet [8].

Das Training der Klassifikatoren erfolgt durch maschinelle Lernverfahren (C4.5- und Perceptron-Algorithmus [7, 8]). Dazu werden die von den einzelnen Algorithmen gefundenen Präparationsgrenzen durch Zahntechniker bezüglich ihrer Korrektheit bewertet.

## 5 Ergebnisse

Zur Kontrolle des Ergebnisses der Extraktion vergleicht der Zahntechniker die 3D-Darstellung des Zahnstumpfes und der Präparationsgrenze mit dem Gipsmo-

dell. Abbildung 3 zeigt die vollautomatisch extrahierte Präparationsgrenze eines Zahnstumpfes in drei verschiedenen Ansichten.

Aktuell erreicht das Verfahren in der Anwendung auf reale klinische Präparationen eine Erfolgsquote von 95 %. Außer von der Qualität der Messdaten ist der Erfolg des Verfahrens in erster Linie abhängig von einer deutlichen Freilegung der Präparationsgrenze im Gipsmodell: Dazu entfernt der Zahntechniker Gips unterhalb der Präparationsgrenze durch Beschleifen des Modells.

## 6 Diskussion

Die vollautomatische Extraktion der Präparationsgrenze aus den 3D-Messdaten präparierter Zähne ist ein wichtiger Baustein für eine effiziente CAD/CAM-Konstruktion von Zahnersatz. Die Kombination verschiedener Konturalgorithmen mit einer anschließenden Klassifikation ermöglicht dies, ohne dass der Benutzer Startpunkte definieren oder die Präparationsgrenze im Gipsmodell speziell markieren muss.

Zum derzeitigen Zeitpunkt beschränkt sich unser Verfahren auf die Extraktion der Präparationsgrenzen präparierter Zahnstümpfe für Kronen und Brücken. Eine Erweiterung auf Inlay-Präparationen ist geplant, erfordert jedoch wegen der anders geformten Präparationsgrenzen einige Änderungen an den verwendeten Algorithmen und einen eigenen Klassifikator.

## Literaturverzeichnis

1. Mehl A, Hickel R. Current State of Development and Perspectives of Machine-based Production Methods for Dental Restorations. *Int J Comput Dent* 1999;2:9–35.
2. van der Zel JM. Heutige CAD/CAM-Systeme im Vergleich. *Quintessenz Zahntech* 1999;25:193–204.
3. Neugebauer PJ. Interactive Segmentation of Dentistry Range Images in CIM Systems for the Construction of Ceramic Inlays using Edge Tracing. In: *Procs CAR*. Springer, Berlin; 1995. p. 969–976.
4. Lehmann TM, Oberschelp W, Pelikan E, Repges R. Bildverarbeitung für die Medizin. Springer, Berlin; 1997.
5. Rückert D. Segmentation and Tracking in Cardiovascular MR Images Using Geometrically Deformable Models and Templates. Ph.D. thesis. Imperial College London; 1997.
6. Beller M, Stotzka R, Gemmeke H. Merkmalsgesteuerte Segmentierung in der medizinischen Mustererkennung. In: *Procs BVM*. Springer, Berlin; 2004. p. 184–188.
7. Quinlan JR. C4.5. Programs for Machine Learning. Morgan Kaufmann, San Mateo; 1993.
8. Duda RO, Hart PE, Stork DG. *Pattern Classification*. 2nd ed. Wiley, New York; 2001.