



Jan Hajtó

J. Hajtó^a, C. Marinescu^b, N. RFA Silva^c

Morphogenic Designer – An Efficient Tool to Digitally Design Tooth Forms

Morphogeneric Designer – Ein effizientes Werkzeug zur digitalen Konstruktion von Zahnformen

Zusammenfassung

Derzeit stehen verschiedene digitale Softwarewerkzeuge zur Verfügung, um anatomisch korrekten Zahnersatz für den Front- und Seitenzahnbereich zu konstruieren. Die aktuellen Konzepte weisen Schwächen auf, die sich möglicherweise durch fortschrittlichere Modellierungswerkzeuge beheben ließen, wie sie in professioneller CAD-Grafiksoftware bereits zur Verfügung stehen (CAD = Computer Aided Design).

Ziel: Dieser Beitrag hat zum Ziel, den Morphogeneric Designer (MGD) als effiziente und einfache Methode zum digitalen Entwerfen von Zahnformen für den Front- und Seitenzahnbereich zu beschreiben.

Methode: Zahnformen aus dem Front- und Seitenzahnbereich, die subjektiv als „durchschnittlich“ bewertet worden waren, wurden aus einer Sammlung digitalisierter natürlicher Zähne ausgewählt. Die Modelle in Form von STL-Dateien wurden gefiltert, bereinigt, idealisiert und neu trianguliert, um den Spezifikationen des verwendeten Software-Pakets zu entsprechen. Die Formen wurden dann als Wavefront „.obj“-Datei in die Software Modo 701 importiert, die zum Erstellen von Modellen, Texturen, Visualisierungen und Animationen dient.

Abstract

Background and purpose: Different digital software tools are available today for the purpose of designing anatomically correct anterior and posterior restorations. The current concepts present weaknesses, which can be potentially addressed by more advanced modeling tools, such as the ones already available in professional CAD (Computer Aided Design) graphical software.

Aim: This study describes the morphogenic designer (MGD) as an efficient and easy method for digitally designing tooth forms for the anterior and posterior dentition.

Materials and Method: Anterior and posterior tooth forms were selected from a collection of digitalized natural teeth and subjectively assessed as “average”. The models in the form of STL files were filtered, cleaned, idealized, and re-meshed to match the specifications of the software used. The shapes were then imported as wavefront “.obj” model into Modo 701, software built for modeling, texturing, visualization, and animation.

Results: In order to create a parametric design system, intentional interactive deformations were performed on the average tooth shapes and then further defined as morph targets.

a Dr. med. dent. Jan Hajtó, Privatpraxis in München

b Costin Marinescu, DDS, Privatpraxis in München

c Nelson RFA Silva, DDS, MSc PhD, Professor of Department of Restorative Dentistry, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Brazil

By combining various such parameters, several tooth shapes were formed virtually and their images presented.

Conclusion: MGD proved to be a versatile and powerful tool for the purpose of esthetic and functional digital crown designs.

Keywords: *computerized dentistry, dental 3D modeling, morphogenic tooth design, digital tooth design*

Introduction

Several digital software tools exist today for the purpose of designing anatomically shaped tooth restorations. In most cases, these tools perform different types of localized deformations such as:

1. Adding, smoothing, and removal tools, which deform a defined (usually circular) region according to a profile. The size of the region, the strength of the effect and sometimes the characteristic of the profile curve can usually be changed via settings or modifier keys. In some cases, the tool is singular, meaning that the region can be simply grabbed and pushed, pulled, or smoothed. In other cases, the tool can be used in a continuous way allowing for sculpting lines, eg, for grooves and ridges, or larger areas. Typically such tools are used on polygon meshes.
2. Push or pull deformations that are attached to predefined features of the tooth shape. Such features may include one or more lines, dots, or areas; sometimes they involve characteristic anatomical landmarks such as ridges, cusp tips, grooves or other morphological surface elements. These feature elements can be pre-set on the tooth template or individually drawn by the user, prior to the deformation. Such tools work on both parametric surfaces and dense meshes.

While these tools are extensively used in all types of standard 3D computer graphics, they allow for intentional modeling or sculpting of the virtual 3D tooth. However, they do require the user to have a specific "design idea" or shape in mind and experience regarding the specific tool behavior to achieve the envisioned anatomy. The more experienced and

Ergebnisse: Um ein parametrisches Konstruktionssystem zu schaffen, wurden beabsichtigte interaktive Deformationen an die durchschnittlichen Zahnformen gesetzt, die dann weiter als Morph-Ziele definiert wurden. Durch die Kombination verschiedener solcher Parameter wurden differente Zahnformen virtuell geschaffen und die Ergebnisse dargestellt.

Schlussfolgerung: Der MGD erwies sich als vielseitiges und mächtiges Instrument zum Zweck der ästhetischen und funktionellen digitalen Kronenkonstruktion.

Schlüsselwörter: *Computergestützte Zahnheilkunde, 3-D-Zahnmodelle, digitale Morphogenese von Zähnen, digitales Zahndesign*

Einleitung

Derzeit gibt es mehrere digitale Softwarewerkzeuge, um anatomisch geformten Zahnersatz im Front- und Seitenzahnbereich zu konstruieren. In den meisten Fällen führen diese Werkzeuge unterschiedliche Arten lokaler Deformationen durch, beispielsweise:

1. Werkzeuge zum Hinzufügen, Glätten und Entfernen, die eine definierte Region (in der Regel kreisförmig) gemäß einem Profil deformieren; die Größe der Region, die Ausprägung des Effekts und gelegentlich die Eigenschaften der Profilkurve lassen sich normalerweise mittels Einstellungen oder Wahltaasten verändern. In manchen Fällen ist das Werkzeug einseitig, das heißt, dass die Region einfach erfasst und dann gezogen, geschoben oder geglättet werden kann. In anderen Fällen lässt sich das Werkzeug kontinuierlich einsetzen, was es ermöglicht, Linien, beispielsweise für Fissuren und Grate, oder größere Bereiche zu formen. Solche Werkzeuge werden normalerweise auf Polygonnetzen eingesetzt.
2. Zug- oder Schub-Deformierungen, die an vordefinierten Hilfselementen der Zahnform angesetzt werden; solche Elemente können zum Beispiel eine oder mehrere Linien, ein oder mehrere Punkte oder Flächen sein; gelegentlich werden typische anatomische Bezugspunkte einbezogen, wie Höckerkämme und -spitzen, Fissuren oder andere morphologische Oberflächenelemente. Diese Charakteristika können auf einem Bibliothekszahn voreingestellt sein oder vor der Deformierung individuell vom Anwender gezeichnet werden. Solche Werkzeuge funktionieren sowohl auf parametrischen Oberflächen als auch auf dichten Netzen.

Diese Werkzeuge werden zwar in allen Arten von Standard-3-D-Computergrafiken eingesetzt und erlauben die gezielte Modellierung oder Ausformung des virtuellen 3-D-Zahns, doch muss der Anwender eine bestimmte „Design-Idee“ oder Vorstellung von der Form haben und über Erfahrung im Hinblick auf das Verhalten des spezifischen Werkzeugs verfügen, um die gewünschte Anatomie zu erzielen. Je erfahrener und sachkundiger der Anwender bei der Verwendung der Freiform-Werkzeuge ist, umso besser werden die tatsächlichen Ergebnisse.

Vor dem Einsatz dieser 3-D-Funktionen stehen zwei Verfahren, mit denen die Ausgangszahnform erzeugt werden kann:

1. Durch die Auswahl einer Referenz Zahnform aus einer Datenbank. Diese Masterformen können in einer Bibliothek gespeichert oder aus einem 3-D-Scan importiert werden, beispielsweise von einem Wachsmo- dell oder als Spiegelung des kontralateralen Zahns. In man- chen Softwarepaketen kann die Auswahl des Zahns aus der Bibliothek selbst nach konsekutiv durchgeführ- ten Operationen noch geändert werden.
2. Durch die Berechnung eines sogenannten biogeneri- schen Zahns. Die von Mehl und Blanz¹⁻³ entwickelte Methode der Biogenerik verwendet die Informatio- nen aus einer großen Menge natürlicher Zahnformen und ihre Unterscheidungsmerkmale im Vergleich zu den Zähnen, die als Input eingegeben wurden, um ein mathematisches Modell des generischen, durch- schnittlichen Zahns zu berechnen. Das biogenerische Modell funktioniert wie ein Zahnsynthesizer, der aus der Summe aller Zahnformen, die ursprünglich in das System eingespeist wurden lernt und dann die Berech- nung von allen möglichen Zahnformen erlaubt, die in diesem virtuellen multidimensionalen Formraum ent- halten sind. Durch die Analyse der verbliebenen Zahn- hartschubstanz präparierter Zähne oder der übrigen, im selben Kiefer vorhandenen Zähne ist das Verfahren in der Lage, die Formvariante statistisch zu bestimmen, die mit höchster Wahrscheinlichkeit zur vorhandenen Bezahnung des Quadranten passt⁴. Zur Rekonstruk- tion von teilweise fehlender Zahnhartschubstanz hat sich diese Methode als gleichwertig oder überlegen im Ver- gleich zum humanen CAD und zum manuellen Design erwiesen⁵⁻⁷. Bei der computergestützten Konstruktion von Zähnen ist es möglich, die gewünschten Ergebnis- se durch die Kombination eines ursprünglichen Zahn- formvorschlags mit generellen Veränderungen und regional begrenzten interaktiven Deformationen zu

proficient the user is in using such freeform tools, the better the actual results will be.

Prior to utilizing these 3D functions, there are two processes through which the initial tooth shape can be generated:

1. By selecting a reference tooth shape from a database. These master shapes may be stored in a library or import- ed from a different 3D scan – for instance, a wax-up or a mirrored contralateral tooth. In some software packages, the choice of library tooth forms can be changed even after subsequent operations.
2. Through the calculation of a biogeneric tooth. The bio- generic method, developed by Mehl and Blanz,¹⁻³ uti- lizes the information from a large number of natural tooth shapes and the differentiating features in respect to the teeth that had been input to calculate a mathe- matical model of the generic, average tooth. The bio- generic model works like a tooth synthesizer that learns from the sum of all tooth shapes originally fed into the system and then enables the calculation of all possible shapes fitting that virtual multidimensional shape-space. By analyzing the remaining tooth structures on prepared teeth and the other existing teeth on the same arch, the method is also able to statistically determine the par- ticular form which is most likely to integrate with the existing quadrant dentition.⁴ For the reconstruction of partially missing tooth structure, this method has been shown to be equal or even superior to the human CAD and manual design.⁵⁻⁷ In computer-aided dental design, it is possible to achieve the desired results by combining an initial tooth shape proposal with general variations and regionally confined interactive deformations. The sculpting tools mentioned above can also subsequently modify a biogeneric proposal.

Limitations of the current methods

The current concepts present some weaknesses which, in our opinion, can be compensated by more advanced modeling tools, such as the ones available in commercial modeling software for computer graphics.

To achieve a shape of high complexity, free-form tools necessitate more operating time due to the multiple steps involved. This is the case with highly sophisticated organic forms such as teeth and is especially true for anterior teeth where different aspects of esthetics and patient preferences come into play.

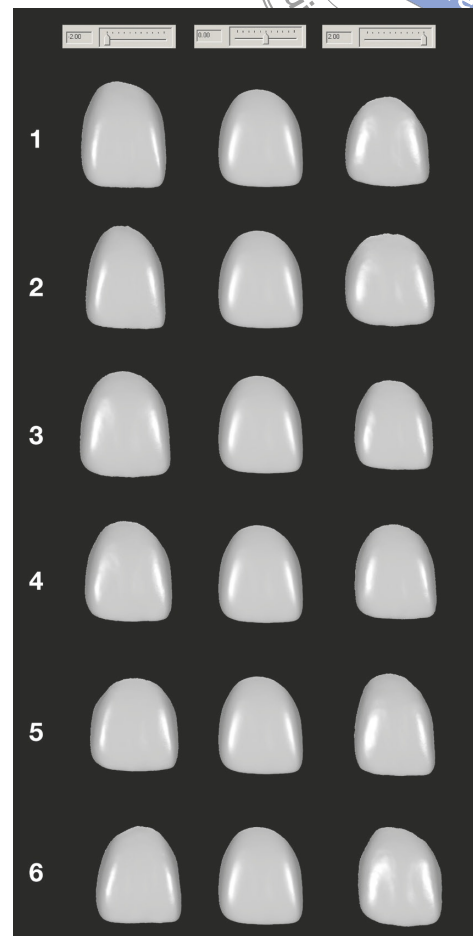


Fig 1 An average tooth calculated from 3D scans of the clinical crown of 128 natural right central incisors. The mathematical Principal Component Analysis (biogeneric model) calculates the main differences in shape and displays sliders that allow their alteration.

Abb. 1 Ein durchschnittlicher Zahn, berechnet aus 3-D-Scans der klinischen Kronen von 128 natürlichen rechten mittleren Schneidezähnen. Die mathematische Hauptkomponentenanalyse (biogenerisches Modell) berechnet die Hauptunterschiede bei der Form und stellt Schieberegler dar, die ihre Änderung ermöglichen.

Fig 2 The shape alterations of the first six principal component sliders. The single sliders do not correspond to specific or discernable shape features except 1) size, 2) length:width ratio. After that, the changes are organic.

Abb. 2 Die Formveränderungen der ersten sechs Hauptkomponentenregler. Die einzelnen Regler entsprechen nicht bestimmten oder unterscheidbaren Formmerkmalen außer 1.) der Größe und 2.) dem Längen-/Breitenverhältnis. Danach sind die Veränderungen organisch.



Since every patient is highly individual with respect to anatomical, functional and esthetic requirements, especially in the anterior region, the number of necessary shapes must keep increasing in order to be able to generate a case with minimum additional corrections. The biogeneric model's main disadvantage in the present development stage is that the calculated variations are a composite of different discernable features. In some cases, a predominant tendency can be recognized, such as scale or number of cusps or taper. In general, a certain biogeneric variation comprises a combination of feature changes which cannot be interpreted by a human viewer as a single specific design feature (Figs 1 to 3).

At this point, it is important to mention that biologically developed forms do not follow any design criteria, such as "round", "triangular", "square" or "hard/masculine", "soft/female" or similar. Thus, from the evolutionary standpoint, the biogeneric model is correct. However, it is a fact of human perception that we unconsciously place all natural

erzielen. Die oben erwähnten Formwerkzeuge können auch dazu eingesetzt werden, um einen biogenerischen Zahnvorschlag nachträglich zu modifizieren.

Grenzen der aktuellen Methoden

Die aktuellen Konzepte weisen einige Schwächen auf, die sich unserer Meinung nach durch fortschrittlichere Modellierungswerkzeuge kompensieren ließen, wie sie in kommerzieller Modelliersoftware für Computergrafiken zur Verfügung stehen.

Um eine Form mit hoher Komplexität zu erzielen, benötigen die Freiform-Werkzeuge aufgrund der hier anfallenden Vielzahl an Einzelschritten mehr Zeit in der Anwendung. Dies gilt für hochkomplexe organische Formen wie Zähne und insbesondere für Frontzähne, wo unterschiedliche ästhetische Aspekte und die Vorlieben des Patienten ebenfalls eine Rolle spielen.

Da jeder Patient im Hinblick auf die anatomischen, funktionellen und ästhetischen Bedürfnisse – insbesondere im Frontzahnbereich – sehr individuell ist, wächst die Zahl der Formen, die notwendig sind, um einen Fall mit minimalen zusätzlichen Korrekturen zu generieren, immer mehr. Der Hauptnachteil biogenerischer Modelle zum jetzigen Entwicklungsstadium liegt darin, dass die berechneten Variationen sich aus verschiedenen, unterscheidbaren Merkmalen zusammensetzen. In manchen Fällen lässt sich eine vorherrschende Tendenz erkennen, wie Größe, Höckeranzahl oder Konizität. Im Allgemeinen umfasst eine bestimmte biogenerische Variation jedoch eine Kombination von Merkmalsveränderungen, die sich von einem menschlichen Betrachter nicht als einzelnes, spezifisches Konstruktionsmerkmal interpretieren lassen (Abb. 1 bis 3).

An diesem Punkt ist es wichtig zu erwähnen, dass biologisch entwickelte Formen keinen Designkriterien wie „rund“, „dreieckig“, „quadratisch“ oder „hart-maskulin“, „weich-feminin“ oder dergleichen folgen. Daher ist das biogenerische Modell vom evolutionären Standpunkt her korrekt. Dennoch ist es eine Tatsache, dass wir Menschen alle natürlichen und künstlichen Formen in einigen Kategorien wahrnehmen und diese Kategorien anwenden, wenn wir neue Formen entwickeln oder rekonstruieren. Wir brechen die endlose Komplexität herunter in Aspekte, damit sie mit unserer Art des Erkennens und des Denkens erfasst werden kann. Williams⁷, der 1914 feststellte, dass die wissenschaftliche Analyse von Frontzahnformen sich auf die morphologischen Eigenschaften der Zähne selbst und nicht auf den Charakter, das Geschlecht oder die Gesichtsform des Patienten stützen sollte, schlug eine Klassifikation der mittleren Schneidezähne in drei Grundformen vor: parallel, konisch und gerundet.

Obwohl die ursprünglichen Konturformen, die Williams als typische Vertreter der drei Gruppen veröffentlichte, sich tatsächlich nicht signifikant genug unterscheiden, um eine solche Kategorisierung zu rechtfertigen, finden diese drei Grundformen, „quadratisch“, „dreieckig“ und „oval“ für künstliche Zähne, in der Zahntechnik und selbst in der Anthropologie breite Anwendung. Offensichtlich stimmt eine solche Beschreibung sehr gut mit der menschlichen Wahrnehmung und Vorstellung überein.

Darüber hinaus lassen sich manche gut erkennbaren Merkmale vom menschlichen Beobachter identifizieren, beispielsweise Grate, Grübchen, Leisten, Cingulum oder Oberflächentexturen. Das Ausmaß der Abrasion ist ein weiteres Merkmal, welches das Erscheinungsbild eines Zahns in klar definierter Weise verändert und das sich möglicherweise weiter in Subtypen einteilen ließe.

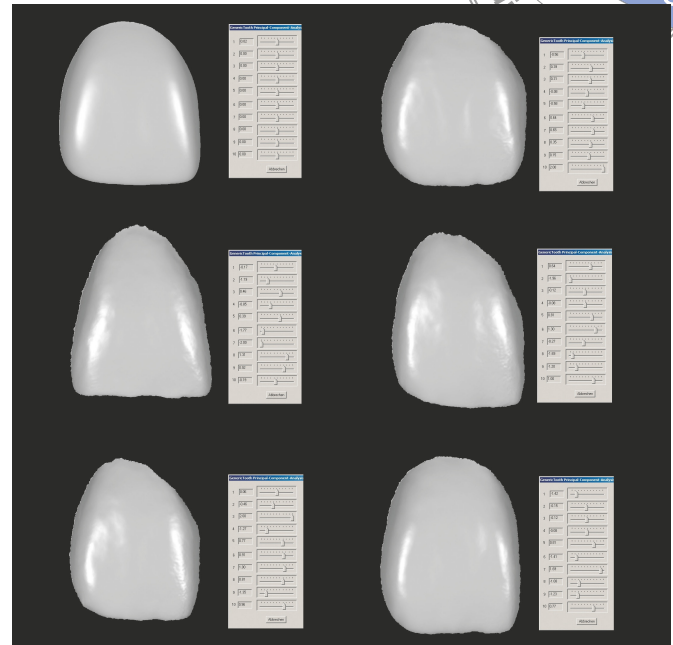


Fig 3 Biogeneric variations of the tooth from Fig 1 generated by changing different parameters based on visual feedback.

Abb. 3 Biogenerische Varianten des Zahns aus Abb. 1, die durch die Veränderung unterschiedlicher Parameter auf der Grundlage des visuellen Feedbacks generiert wurden.

and artificial forms into categories and use these categories when we develop or reconstruct new forms; we break down the boundless complexity into facets so it can be handled by our ways of recognition and thinking. Williams, who stated in 1914 that a scientific analysis of anterior tooth shape should be based on morphological characteristics of the teeth themselves and not on the character, patient's gender, or the shape of the face, proposed a classification of central incisors into three basic shapes: parallel, tapered, and rounded.⁷

Although the original contour shapes that Williams published as typical representatives of the three groups are actually not different enough to justify such a categorization, these basic shapes “square”, “triangular” and “oval” are widely in use for artificial teeth, dental engineering, and even in anthropology. Obviously, such a description conforms very well to human perception and imagination.

Furthermore, certain easily detectable features can be recognized by the human observer, such as ridges, grooves, lobes, cingulum, or surface texture. The amount of abrasion also alters the appearance of a tooth in a clearly defined way, which could possibly be further categorized into subtypes.



This implies that digitally adjusting the shape of a tooth model through selectively comprehensible and designable feature modifications may work faster and more precisely than purely freeform tools or pre-set complete shapes. The necessary algorithms for such tools do exist today, and nothing is hindering their implementation in dental software. This paper presents the morphogenic design method (MGD) as the potentially most efficient and easiest technique to digitally design esthetic and functional tooth forms.

Method and Results

Proof of concept – Central Incisor

A tooth shape for a maxillary central incisor subjectively assessed as “average” was selected from a collection of digitalized natural teeth. The model in the form of an STL file was filtered, cleaned, idealized, and re-meshed to conform to the specifics of the software package used. The tooth was then imported as a wavefront “.obj” model into Modo 701 software (The Foundry; London, UK), which is a powerful professional package for various computer graphic purposes, such as modeling, texturing, visualization, and animation. Several other software packages on the market contain identical, similar, or even additional functionality. Thus, the described process is not exclusive to the program used. In the next step, the model was manually modified with localized deformation tools in order to create the extreme manifestations of previously defined specific feature changes. Modo software allows activation of a “morph map” feature during each of these processes, which saves the changes internally and can interpolate all intermediate deformations between the two states. The deformations can even be under- or overdriven so that the opposite is calculated or the changes are extrapolated even further. Additionally, several different types of deformations can be executed and saved to separate morph maps on the same geometry. Finally, different morph maps can be combined to synthesize a new shape.

The following features were defined and designed additionally to the normal shape in the presented prototype (Table 1).

Das impliziert, dass die digitale Anpassung der Form eines Zahnmodells durch verständliche und selektiv konstruierbare Merkmalsmodifikationen schneller und präziser funktionieren könnte, als die reinen Freiform-Werkzeuge oder voreingestellte vollständige Formen. Die für solche Werkzeuge notwendigen Algorithmen sind heute vorhanden und es gibt keine Gründe gegen ihre Umsetzung in zahnmedizinischer Software. Dieser Artikel stellt die morphogenerische Konstruktionsmethode (MGD) als die möglicherweise effizienteste und einfachste Technik zur digitalen Konstruktion von ästhetischen und funktionellen Zahnformen vor.

Methode und Ergebnisse

Proof of concept – mittlere Schneidezähne

Eine Zahnform für einen oberen mittleren Schneidezahn, die subjektiv als „durchschnittlich“ beurteilt wurde, wurde aus einer Sammlung digitalisierter natürlicher Zähne ausgewählt. Das Modell in Form einer STL-Datei wurde gefiltert, bereinigt, idealisiert und wieder als Gitternetz dargestellt, um den Spezifikationen des verwendeten Softwarepakets zu entsprechen. Der Zahn wurde dann als Wavefront-“.obj“-Datei in die Software Modo 701 (The Foundry, London, UK) importiert, ein leistungsfähiges professionelles Softwarepaket für verschiedene Computergrafikaufgaben, beispielsweise Modellerstellung, Texturing, Visualisierung und Animation. Mehrere andere Softwarepakete auf dem Markt enthalten identische, ähnliche oder sogar zusätzliche Funktionalitäten. Daher lässt sich das beschriebene Verfahren auch mit anderen Programmen realisieren. Im nächsten Schritt wurde das Modell mit Werkzeugen für lokalisierte Deformationen manuell modifiziert, um die extremen Manifestationen der zuvor definierten spezifischen Merkmalsveränderungen zu schaffen. Die Modo-Software ermöglicht die Aktivierung einer „Morph-Map“ während dieser Verfahrensschritte, welche die Änderungen intern speichert und dann alle dazwischenliegenden Deformierungen zwischen den beiden Zuständen interpolieren kann. Die Deformierungen können sogar unter- bzw. übersteuert werden, sodass das Gegenteil berechnet wird bzw. die Veränderungen noch weiter extrapoliert werden. Es lassen sich auch verschiedene Arten von Deformierungen an derselben Geometrie durchführen und auf getrennten Morph-Maps speichern. Schließlich können verschiedene Morph-Maps kombiniert werden, um eine neue Form zu synthetisieren.

Die folgenden Merkmale wurden im vorgestellten Prototypen zusätzlich zur Normalform definiert und konstruiert (Tab. 1).

Table 1 Several different types of deformations can be executed and saved to separate morph maps on the same geometry. Note that different morph maps can be combined in order to synthesize a new shape.

Tab. 1 Es lassen sich an derselben Geometrie unterschiedliche Arten von Deformierungen durchführen und auf separate Morph-Karten speichern. Es ist hervorzuheben, dass verschiedene Morph-Karten kombiniert werden können, um eine neue Form zu synthetisieren.

Parameter/ Parameter	Negative value/negativer Wert	Positive value/positiver Wert
Abrasion/ Abrasion	Emergence of three distinct mamelons on the incisal edge/ Erscheinen dreier deutlich abgegrenzter Mamelons auf der Inzisalkante 	Abrasive reduction and flattening of the incisal edge/ Abschleifung durch Abrasion und Abflachen der Inzisalkante 
Cingulum/ Cingulum	— 	The labial cingulum becomes more prominent/ labiales Cingulum tritt deutlicher hervor 
Distal edge roundness/ distale Schneidekanten- rundung	Distal incisal edge becomes more pointed, incisal embrasure becomes smaller/distale Inzisalkante wird spitzer, Approximalraum kleiner 	Distal incisal edge becomes more round, incisal embrasure widens/distale Inzisalkante wird runder, Approximalraum verbreitert sich 
Distal roundness/ distale Rundung	Distal contour becomes more straight/ distale Kontur wird gerader 	Distal contour becomes more convex/ distale Kontur wölbt sich stärker konvex 

Table 1 (cont.) Several different types of deformations can be executed and saved to separate morph maps on the same geometry. Note that different morph maps can be combined in order to synthesize a new shape.

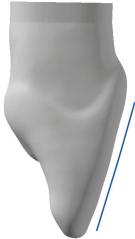
Tab. 1 Es lassen sich an derselben Geometrie unterschiedliche Arten von Deformierungen durchführen und auf separate Morph-Karten speichern. Es ist hervorzuheben, dass verschiedene Morph-Karten kombiniert werden können, um eine neue Form zu synthetisieren (Fortsetzung).

Parameter/ Parameter	Negative value/negativer Wert	Positive value/positiver Wert
Length/ Länge 	Anatomical crown shortens/ anatomische Krone wird kürzer 	Anatomical crown lengthens/ anatomische Krone wird länger 
Mesial edge roundness/ mesiale Schneidekantenrundung 	Mesial incisal edge becomes more pointed, incisal embrasure becomes smaller/mesiale Inzisalkante wird spitzer, Approximalraum kleiner 	Mesial incisal edge becomes more rounded, incisal embra- sure widens/mesiale Inzisalkante wird runder, Approximal- raum verbreitert sich 
Mesial roundness/ mesiale Rundung 	Mesial contour becomes straighter/ mesiale Kontur wird gerader 	Mesial contour becomes more convex/ mesiale Kontur wölbt sich stärker konvex 
Mesial length/ mesiale Länge 	Sloping of incisal edge, mesial becomes shorter/ Kippung der Inzisalkante, Mesialseite wird kürzer 	Sloping of incisal edge, mesial becomes longer/ Kippung der Inzisalkante, Mesialseite wird länger 

Parameter/ Parameter	Negative value/negativer Wert	Positive value/positiver Wert
Microstructure/ Mikrostruktur 	–	Irregular microdents emerge/ unregelmäßige Mikrovertiefungen treten auf 
Perikymata/ Perikymatien 	–	Perikymata develop/ Perikymatien entstehen 
Ridge center/ zentrale Wölbung 	–	Central ridge becomes more prominent/ zentrale Wölbung tritt deutlicher hervor 
Lateral ridges average/ laterale Wölbungen durchschnittlich 	–	Normally placed lateral vestibular ridges become more prominent/normal platzierte, laterale, vestibuläre Wölbungen treten deutlicher hervor 

Table 1 (cont.) Several different types of deformations can be executed and saved to separate morph maps on the same geometry. Note that different morph maps can be combined in order to synthesize a new shape.

Tab. 1 Es lassen sich an derselben Geometrie unterschiedliche Arten von Deformierungen durchführen und auf separate Morph-Karten speichern. Es ist hervorzuheben, dass verschiedene Morph-Karten kombiniert werden können, um eine neue Form zu synthetisieren (Fortsetzung).

Parameter/ Parameter	Negative value/negativer Wert	Positive value/positiver Wert
Lateral ridges wider/ laterale Wölbungen breiter 	–	Lateral vestibular ridges placed wider apart become more prominent/laterale, vestibuläre Wölbungen mit größerem Abstand zueinander treten deutlicher hervor 
Sagittal roundness/ sagittale Rundung 	In sagittal plane the tooth becomes more flat/ Zahn wird in der Sagittalebene flacher 	In sagittal plane the tooth becomes more curved/ Zahn wird in der Sagittalebene stärker gekrümmt 
Scale/ Maßstab 	Tooth shrinks/ Zahn wird kleiner geschrumpft 	Tooth enlarges/ Zahn wird größer gezogen 
Taper/ Konizität 	More square shape, lateral contours converge to parallel or incisal/eher quadratische Form, laterale Konturen konvergieren nach inzisal oder sind parallel 	More triangular shape, lateral contours converge to apical/eher dreieckige Form, laterale Konturen konvergieren nach apikal 

Parameter/ Parameter	Negative value/negativer Wert	Positive value/positiver Wert
Thickness/roundness/ Dicke/Rundung	Tooth becomes thinner and thus also more flat in oro-vestibular direction/ Zahn wird dünner und daher in oro-vestibulärer Richtung flacher 	Tooth becomes thicker and thus also more round in oro-vestibular direction/ Zahn wird dicker und daher in oro-vestibulärer Richtung runder 
Width/ Breite	Tooth narrows/ Zahn wird schmaler 	Tooth widens/ Zahn wird breiter 
Zenith/ Zenit	– 	Apical zenith moves more distal/ apikaler Zenit verschiebt sich nach distal 

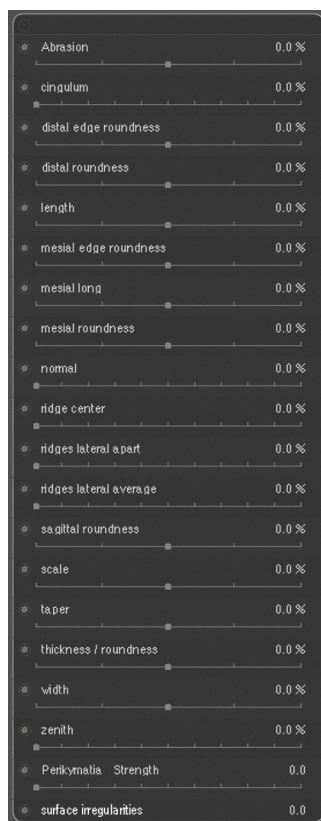


Fig 4 Sliders that allow changing specified features of the tooth shape.

Abb. 4 Schieberegler, welche die Veränderung bestimmter Merkmale der Zahnform ermöglichen.

All these morph maps are then defined as “custom channels” and output to the user interface in the form of sliders (Fig 4). The result is a tooth shape synthesizer that enables the operator to alter any of the features in a continuous way and combine any changes simultaneously, with real-time visual feedback. In essence, this is achieved through involving human artistry and design intent. The proposed name “morphogenic” seems appropriate for this technique since the method uses shape transmutations (“morphs”) to create (genesis) morphology. Figures 5 to 8 show four teeth designed by different combinations of the feature sliders with varying amounts.

Application on all front-tooth forms – canine to canine

To demonstrate the general adaptability of the proposed modeling method, some of the discrete parameters described for the single central incisor can be applied to 3D models of scanned maxillary left central incisors, lateral incisors and canines, otherwise subjectively assessed as fairly average shaped.

Alle diese Morph-Maps werden dann als sogenannte „benutzerdefinierte Kanäle“ definiert und in Form von Schieberegler an die Benutzeroberfläche ausgegeben (Abb. 4). Das Ergebnis ist ein Zahnformsynthesizer, der es dem Anwender ermöglicht, sämtliche Eigenschaften stufenlos anzupassen, und der diese Änderungen simultan kombiniert und ein visuelles Feedback in Echtzeit ausgibt. Im Wesentlichen wird dies durch das Einbeziehen der menschlichen Kunstfertigkeit und der Gestaltungsabsichten erreicht. Die vorgeschlagene Bezeichnung „morphogenerisch“ scheint angemessen für diese Technik, da die Methode Formtransmutationen (Morphing) einsetzt, um eine Morphologie zu schaffen. Die Abbildungen 5 bis 8 zeigen vier Zähne, die durch unterschiedliche Kombinationen der Eigenschaftenregler mit unterschiedlichen Beträgen konstruiert wurden.

Anwendung auf alle Frontzahnformen von Eckzahn zu Eckzahn

Um die allgemeine Anpassungsfähigkeit des vorgeschlagenen Modellierungsverfahrens zu demonstrieren, wurden einige der Einzelparameter, die für den mittleren Schneidezahn als Einzelzahn beschrieben wurden, auch auf 3-D-Modelle je eines eingescannten linken zentralen und lateralen Oberkieferschneidezahns sowie Eckzahns durchschnittlicher Form angewendet.

Natürlich lassen sich alle zuvor beschriebenen Parameter, wenn sie für geeignet befunden und als Morph-Karten hinterlegt wurden, zum System hinzufügen. Die drei Zähne wurden gespiegelt, um einen vollständigen Frontzahnbogen zu schaffen. Die Parameter wurden als Kontrollschieberegler für jeden Einzelzahn separat und gruppiert implementiert, sodass jeder Parameter simultan und mit identischer Intensität auf alle Zähne angewendet werden konnte. Abbildung 9 zeigt den Satz an gruppierten Schieberegler für alle sechs Zähne mit allen Parametern beim Nullwert, was einer durchschnittlichen Form entspricht. Wenn die Gruppenfunktion deaktiviert wird, gilt das gleiche Bedienfeld mit den Schieberegler für die jeweiligen Einzelzähne.

Mit dieser Funktion ist es sowohl möglich, bestimmte Änderungen schnell auf eine bestimmte Gruppe von Zähnen anzuwenden als auch Änderungen zur Feineinstellung an einzelnen Zähnen vorzunehmen. Die Abbildungen 10 bis 13 zeigen unterschiedliche Kronenkonstruktionen für die sechs Frontzähne. All diese Formen wurden durch



Fig 5 A tapered shape composed of prominent features: mainly lateral and central ridges, slightly rounded contours, sagittal curvature, mamelons.

Abb. 5 Eine dreieckige Form, zusammengesetzt aus prominenten Merkmalen: hauptsächlich laterale und zentrale Erhöhungen, leicht abgerundete Konturen, sagittale Kurvature, Mamelons.



Fig 6 An ovoid shape generated by adjusting the mesial and distal roundness, rounding the incisal edges and changing other parameters.

Abb. 6 Eine durch die Anpassung der mesialen und distalen Rundung, Abrundung der Inzisalkanten und die Veränderung weiterer Parameter generierte, ovoide Form.



Fig 7 A square shape with sharp edges and parallel mesial/distal contours, flat labial surface and an abraded incisal edge.

Abb. 7 Eine quadratische Form mit scharfen Kanten und parallelen mesialen und distalen Konturen, flacher Labialfläche und einer abradierten Inzisalkante.



Fig 8 An intermediate shape with some asymmetry in the curvature of the mesial and distal contours.

Abb. 8 Eine Zwischenform mit leichter Asymmetrie in der Kurvature der mesialen und distalen Konturen.

das Anpassen der Einzelparameter mit bekannten lokalen Effekten erzielt.

Die Verwendung vordefinierter Zahnformen als Morph-Ziele

Ähnlich wie bei biogenerischen Varianzverfahren (z. B. Cerec 4.2 Software, Sirona, Bensheim) ist es möglich, natürliche Zahnformen als Morph-Ziele zu verwenden. Hierzu wurden 3-D-Scans natürlicher Zähne in die Modo-Software importiert. Ihre Geometrie wurde im Hintergrund als Grenzfläche für die Deformationen der

Of course, if all parameters described before are deemed useful and defined as morph maps, they can be added to the system. The three teeth were mirrored in order to create a full anterior arch. The parameters were implemented separately as control sliders for each single tooth and grouped, so that each parameter could be applied simultaneously and with identical intensity to all teeth. Figure 9 shows the group slider set for all six teeth with all parameters set to zero, thus showing the average shape. When group function is deactivated, the slider panel is identical for the separate teeth.

With this function, it is possible to quickly apply certain changes to a specified set of teeth and to also fine-tune



Fig 9 Group sliders with all parameters set to zero. The teeth are set at average shape.

Abb. 9 Gruppenregler mit allen Parametern in Nullstellung. Die Zähne sind auf eine Durchschnittsform eingestellt.

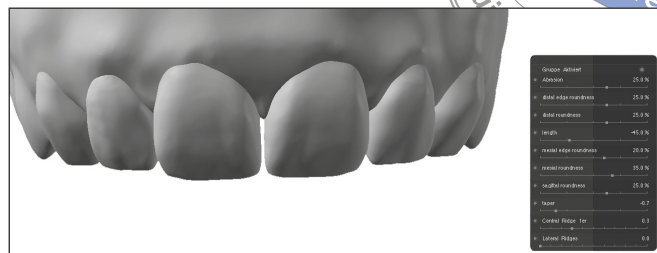


Fig 10 All teeth changed to short round shape with stronger sagittal curvature.

Abb. 10 Alle Zähne sind auf eine kurze, runde Form mit stärkerer sagittaler Kurvature verändert.



Fig 11 All teeth changed to square shapes with slightly abraded incisal edges, sharp incisal corners and flat labial surface.

Abb. 11 Alle Zähne sind auf Quadratform mit leicht abraderten Inziskanten, scharfen inzisalen Ecken und flachen Labialflächen geändert.



Fig 12 Longer triangular teeth with prominent lateral ridges and slight mamelons.

Abb. 12 Längere dreieckige Zähne mit prominenten lateralen Erhebungen und leichten Mamelons.

changes on single teeth. Figures 10 to 13 show different crown designs on the anterior six teeth. All these shapes were achieved by adjusting the single parameters with known topical effects.

The use of predefined tooth shapes as morph targets

Similar to the biogeneric variation method (eg, Cerec 4.2 software), it is possible to utilize natural tooth shapes as morph targets. For that purpose, 3D scans of natural teeth were imported into Modo software. Their geometry was used as background constraints for the mesh deformation of the average teeth into a shape that closely conforms that of the target. These morphs were again defined as control sliders, which means that the software automatically interpolates all intermediate shapes, enabling the adjustment of gradual transition from one geometry to another. Again, this can be applied to a single tooth or a group of teeth. In this specific case, it was chosen to create a group slider for all six teeth, from canine to canine. Figures 14 to 16 show the

Durchschnittszähne in einer Form verwendet, die dem Ziel genau entspricht. Diese Morphs wurden wiederum als Kontrollregler definiert, das heißt, dass die Software automatisch alle dazwischenliegenden Formen interpoliert, und so einen graduellen Übergang von einer Geometrie zu einer anderen ermöglicht. Auch diese Methode lässt sich auf Einzelzähne oder auf Zahngruppen anwenden. In diesem konkreten Fall wurde ein Gruppenregler für alle sechs Zähne von Eckzahn zu Eckzahn gewählt. Die Abbildungen 14 bis 16 zeigen den Übergang von der Durchschnittsform zu einem natürlichen Satz aus sechs Frontzähnen. Die natürliche Vorlage wurde aus der Anteriores-Sammlung des Autors ausgewählt (www.ateriores.de).

Darüber hinaus ist es möglich, manuell gestaltete Zähne, Prothesenzähne oder Datensätze aus Zahndatenbanken als Morph-Ziele zu verwenden. Mehrere Schieberegler können bei jedem Zahn kombiniert werden und es lassen sich zusammengesetzte Zahnformen generieren. Dies kann jedoch zu unerwünschten Ergebnissen führen, je nachdem, wie stark sich die ursprünglichen Zahnformen voneinander unterscheiden. Die einzelnen Kontrollregler

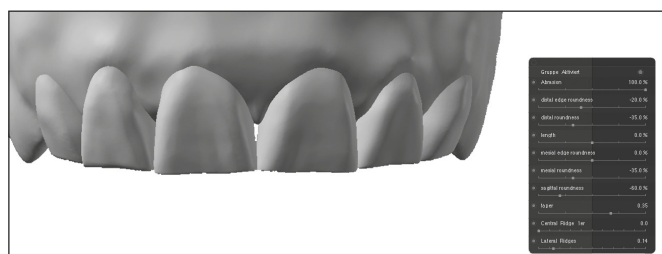


Fig 13 Advanced abrasion.

Abb. 13 Fortgeschrittene Abrasion.



Fig 14 Average tooth shapes as starting point. The group control slider is activated.

Abb. 14 Durchschnittliche Zahnformen als Ausgangspunkt. Der Gruppenkontrollregler ist aktiviert.



Fig 15 Intermediate shape. 50% of morph target is applied. The transition can be adjusted in percentage.

Abb. 15 Zwischenform. 50 % des Morph-Ziels wurden angewendet. Der Übergang ist in Prozent justierbar.



Fig 16 Target shape. 100% of the morph target applied.

Abb. 16 Zielform. 100 % des Morph-Ziels wurden angewendet.

ermöglichen die Auswahl unterschiedlicher Vorlagen für jeden Zahn. Diese „anatomischen“ Morph-Ziele lassen sich mit allen erdenklichen Morph-Parametern oder mit den zuvor beschriebenen kombinieren. Im hier vorgestellten Fall wurde ein neuer Parameter geschaffen, um schwarze Dreiecke zu schließen, wie sie bei einer ausgeprägten Dreiecksform der Zähne auftreten (Abb. 17 und 18). Parallel dazu kann die Methode mit generalisierten oder lokalen Formwerkzeugen kombiniert werden.

Beispiele für Morph-Ziele bei Molaren

Morph-Ziele können für Prämolaren und Molaren in derselben Weise angelegt werden wie für Frontzähne. Einige mögliche Deformationen für einen ersten Oberkiefermolaren sind in Tabelle 2 aufgelistet. Alle Formveränderungen können als Morph-Ziel definiert werden; bei Seitenzähnen müssen noch geeignete Werkzeugsets bestimmt werden. Abbildung 19 stellt drei unterschiedliche Kombinationen der in Tabelle 2 beschriebenen Merkmale dar.

transition from average shape to a natural set of six anteriors. The natural template was chosen from the authors' Anteriores collection (www.anteriores.de).

It is equally possible to use manually sculpted teeth, denture teeth or datasets from tooth libraries as morph targets. Multiple sliders can be combined on each tooth and composite tooth shapes can be generated. However, this might lead to undesired results depending on how strongly the original teeth shapes differ from each other. The single-control sliders make it possible to choose different templates for each tooth. These “anatomical” morph targets can be combined with any conceivable morph parameters or with the ones described before. In the case shown here, a new parameter was created to close black triangles that occur with markedly triangular teeth (Figs 17 and 18). Concurrently, the method can be combined with general or localized sculpting tools.

Morph target examples for molars

Morph targets can be created for premolars and molars in the same way as for anterior teeth. Some possible deformations

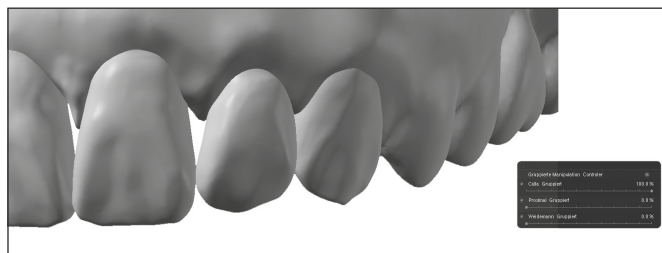


Fig 17 The morph target shape is the scanned shape H1 from the Calla Plus Collection. That triangular shape is very narrow at its neck and interdental spaces above the papillae are open.

Abb. 17 Das Morph-Ziel ist die eingescannte Form H1 der Sammlung „Calla Plus“. Die dreieckige Form ist am Hals sehr schmal und die Approximalräume über den Papillen sind offen.

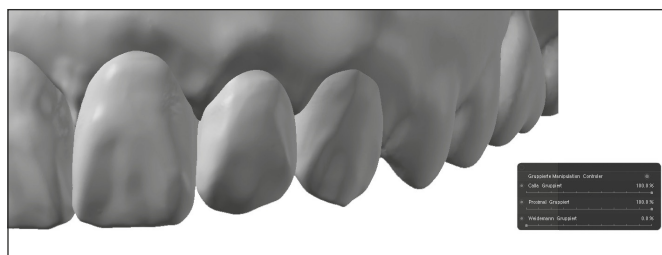


Fig 18 A separate slider generates interdental closures on all teeth.

Abb. 18 Ein separater Regler generiert den Schluss der Approximalräume an allen Zähnen.

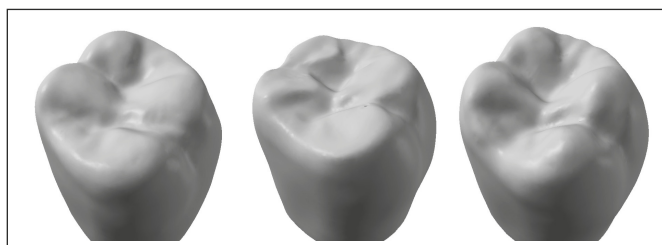


Fig 19 Variations produced by combinations of the 5 parameters shown in Table 1 with different intensity.

Abb. 19 Varianten, die durch die Kombination der fünf in Tabelle 1 dargestellten Parameter mit unterschiedlicher Intensität herbeigeführt wurden

for a first maxillary molar are listed in Table 2. Any change in shape can be defined as a morph target; for posterior teeth, suitable tool sets are yet to be defined. Figure 19 depicts three different combinations of the features described in Table 2.

Diskussion

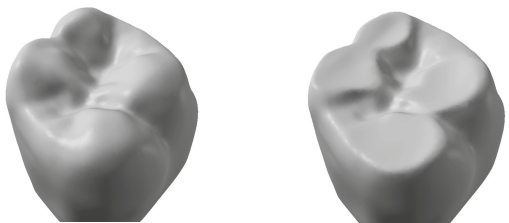
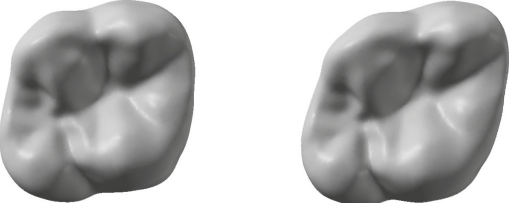
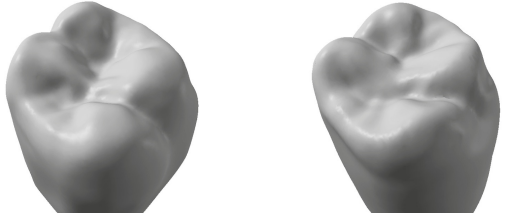
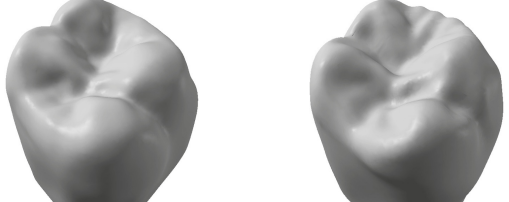
Zum Zweck der ästhetischen digitalen Kronenkonstruktion ist das vorgeschlagene System besonders vielseitig. Die Hauptvorteile der digitalen Werkzeuge im Vergleich zu konventioneller manueller Arbeit sind das Echtzeit-Feedback und die universelle Flexibilität. Die digitale Gestaltung ist ein interaktives Handwerk in Echtzeit, ohne dass man auf das Aushärten von Wachs oder das Ausgießen von Modellen warten müsste. Ganze Zahngruppen können viel schneller konstruiert und angepasst werden als mit physischen Laborverfahren. Daher wird sich die digitale Zahnkonstruktion im Bereich der Zahnheilkunde und Zahntechnik immer weiter verbreiten.

Die hier gezeigten Anwendungen sind noch nicht vollständig in etablierter Software verfügbar. Dennoch steht die 3-D-Modellierungstechnik im allgemeinen Bereich der digitalen Gestaltung bereits seit einigen Jahren zur Verfügung. Die Umsetzung in brauchbare dentale Konstruktionssysteme erfordert noch mehr Tests und Verbesserungen. Für Gruppen von Ober- und Unterkieferfrontzähnen oder sogar für ganze Kiefer ist die Entwicklung eines geeigneten Gesamtsystems notwendig, das es möglich macht, dass die Veränderungen der Zahnform im Einklang mit allgemeinen Werkzeugen wie Größe, Position und Rotation funktionieren. Zum Beispiel kann die Kronenbreite in einem Morphing nicht verändert werden, ohne die Nachbarzähne zu beeinflussen, es sei denn, es soll eine Lücke geschlossen werden. Damit ein Zahn breiter sein kann, als die im Zahnbogen verfügbare Lücke, muss entweder eine Überlappung toleriert werden, oder die Breite des Nachbarzahns muss angepasst, er muss rotiert oder verschoben werden. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um festzustellen, welche Werkzeuge für Merkmalsveränderungen in einem System für den ganzen Zahnbogen am sinnvollsten sind.

In den vorliegenden Beispielen wurden anatomische Zahnformen manuell als Morph-Ziele so platziert, dass sie in etwa ihrer ursprünglichen Position und Rotation im ursprünglichen Zahnbogen entsprechen. Dies könnte zu einigen Ungenauigkeiten geführt haben. Während das Modell aus natürlichen Zähnen besteht, wurden die individuellen Positionsvarianten der Zielzähne im ursprünglichen Zahnbogen nicht verändert; deshalb werden in den Beispielen, die in den Abbildungen 14 bis 16 dargestellt sind, die Zähne 13 und 12 kürzer als der Durchschnittszahn. Es könnte von Vorteil sein, solche

Table 2 Possible morph targets using the first maxillary molar as an example of a posterior tooth

Tab. 2 Mögliche Morph-Ziele mit dem ersten Oberkiefermolaren als Beispiel für einen Seitenzahn.

Abrasion/Abrasion	Abrasive reduction and flattening of the cusp tips/ Abschleifung durch Abrasion und Abflachen der Höckerspitzen 
Steepness/Steilheit	The inner slopes of the cusps become steeper/ Die inneren Höckerabhänge werden steiler. 
Skew/Schräge	The whole crown is distorted like a parallelogram seen from occlusal view/ Die gesamte Krone wird wie ein Parallelogramm verzerrt, Ansicht von okklusal. 
Alternate/Alternative	A different natural variation/ eine andere natürliche Variation 
Juvenile/juvenil	Again another natural template with juvenile features/ eine weitere natürliche Vorlage mit jugendlichen Merkmalen 



Discussion

For the purpose of esthetic digital crown design, the proposed system is particularly versatile. The main advantage of the digital tools over conventional manual work is the real-time visual feedback and its universal flexibility. Digital design is a real-time interactive craft, without having to wait for wax to harden or casts to be poured. Full sets of teeth can be designed and adjusted much quicker than with physical lab procedures. Thus, digital dental design will become much more common in the field of dentistry and dental engineering.

The applications shown here have not yet been fully developed into the mainstream software. Nevertheless, the 3D modeling technology has already been available for some years in the general field of digital art. The implementation as a workable dental designer system needs more testing and refinement. For sets of anterior maxillary and mandibular teeth or even full arches, the development of a powerful correlational system that allows the changes in tooth shape to work in accordance with general tools – such as scale, position, and rotation – is necessary. For example, unless gaps are to be closed, the crown width cannot be changed in a morph without affecting the neighboring teeth. For a tooth wider than the space available on the arch, either an overlap is tolerated or the adjacent teeth will have to be adjusted in width, rotated, or moved. Further tests are necessary to identify which feature change tool makes most sense in a full arch system.

In these demonstrations, anatomical tooth shapes were manually placed as morph targets in a way that fairly well matched their genuine position and rotation in the original arch. This might have led to some inaccuracies. While the model is of natural teeth, the individual position variations of the target teeth in the original arch were not changed. Consequently, in the example depicted in Figs 14 to 16, teeth 13 and 12 become shorter than the average tooth. It might be advantageous to correct such discrepancies and align the teeth ideally, so the only necessary changes in position are limited to “move/rotate/scale”.

The individual features integrated in these demonstrations were chosen given the authors' clinical experience with sculpting anterior fillings, provisionals, mock-ups and correcting bisque-baked try-ins. Other professionals might prefer other approaches or distinct features which could work better for them. For example, it might be appropriate to define a feature that changes the pathway and the characteristics of labial lateral ridges or one that torques or

Diskrepanzen zu korrigieren, und die Zähne ideal auszurichten, sodass die einzigen notwendigen Positionsveränderungen sich auf verschieben/rotieren/skalieren beschränken.

Die einzelnen Merkmale, die in diese Beispiele integriert sind, wurden anhand der klinischen Erfahrung des Autors beim Formen von Frontzahnfüllungen, Provisorien, Wachsaufstellungen und bei der Korrektur von Rohbrandeinproben ausgewählt. Andere Prothetiker bevorzugen vielleicht ein anderes Vorgehen oder unterschiedliche Merkmale, die für sie besser funktionieren könnten. Zum Beispiel könnte es zweckmäßig sein, ein Merkmal zu definieren, das den Verlauf und die Eigenschaften der Randleisten verändert oder eines, das die Krone in bestimmter Weise verwindet oder verzerrt. Der Betrag einer zervikalen Einbuchtung oder die mesiodistale Asymmetrie des Kronenmerkmals können ebenfalls als individuelle Werkzeuge definiert werden. Dieses Konzept ermöglicht die Entwicklung von so vielen Morph-Karten wie gewünscht werden, und ihre Gruppierung in Sets, Voreinstellungen oder individuelle Pakete.

Das Grundprinzip der Methode beruht auf der Annahme, dass ein bestimmter lokalisierter Formungsschritt normalerweise nicht das Ziel an sich ist, sondern nur ein Zwischenschritt z. B. zum Abrunden einer Kante, zum Umformen einer Wölbung oder zur Modifikation einer Kontur. Deshalb sollte, wenn der gewünschte Gesamteffekt in der Verformung enthalten ist und der einzige verbleibende Input das Ausmaß des Effekts ist, hierfür eine Verknüpfung definiert werden, um Zeit zu sparen.

Bei Benutzern, die erst mit der Anwendung dieser Werkzeuge beginnen, und sich die finale Form noch nicht vergegenwärtigt haben, ist eine steile Lernkurve zu erwarten, bis alle Effektwerkzeuge effizient eingesetzt werden können. Manche Werkzeuge sind selbst-erklärend, während es bei anderen etwas Versuch und Irrtum braucht – der recht einfach durch das Ausprobieren der Maximalbereiche der Schieberegler zu erzielen ist.

Ähnlich wie beim biogenerischen Modellieren ist zu erwarten, dass alle interpolierten Zwischenformen innerhalb des virtuellen multidimensionalen Raums an Zahnformen liegen, wenn alle Extreme noch den natürlich vorkommenden Beispielen entsprechen. Dies muss jedoch in weiteren Studien untersucht und verifiziert werden, da die Kombination verschiedener Extreme unnatürliche Formen zur Folge haben könnte.

Außerdem ist es möglich, natürliche Zähne auszuwählen, die deutliche Variationen eines oder mehrerer Merkmale aufweisen, wie z. B. schaufelförmige Zähne mit prominenten lateralen Leisten, und diese als Referenz für die manuelle Gestaltung der Merkmale zu Beginn zu verwenden. Es ist auch möglich, einen handgefertigten oder digital geformten Zahn als Referenz zu verwenden und das Deformierungsmodell umzugestalten, sodass es sich präzise an die Referenzform adaptiert.

Perspektivisch eignet sich solche Formdesign-Software mit den entsprechenden Möglichkeiten bei Licht, Textur und Darstellung für eine fotorealistische Wiedergabe des vorgeschlagenen Behandlungsergebnisses – besonders in Fällen, in denen das Gesicht des Patienten fotografisch oder als 3-D-Scan dargestellt wird.

Das einzige entfernte ähnliche Modellierungswerkzeug, das den Autoren bekannt ist, ist das Oberflächenadditionswerkzeug in der Cerec 4.2 Software (Sirona), das es ermöglicht, ein einzelnes vordefiniertes Merkmal mit Randleisten und Texturelementen auf einen Frontzahn zu „stempeln“ und zu verschieben.

Der MGD erscheint durchdachter und besser dafür geeignet, um dezente bis ausgeprägte Veränderungen der Zahnformen, wie extreme Abrasionen, zu erzielen. Die allgemeine praktische Anwendbarkeit des beschriebenen Systems muss jedoch im Alltagsgebrauch und mit verschiedenen Anwendern getestet werden. Idealerweise erfordert ein solches System eine vollständige Integration in ein Dentalsoftwarepaket, damit eine nahtlose Datenverarbeitung und Integration in andere Werkzeuge möglich wird, wie die Adaptation an Ränder, die Konstruktion von Innenflächen oder die Korrektur von Fräsradien. Trotz der unterschiedlichen Konstruktionsaspekte, die noch geklärt werden, sind die Autoren überzeugt, dass das vorgestellte System universell einsetzbar, effektiv und eine leistungsstarke Verbesserung der vorhandenen dentalen Modellierungsmethoden ist.

Schlussfolgerung

Der MGD erwies sich als vielseitiges und effizientes Instrument zum Zweck der ästhetischen und funktionellen digitalen Konstruktion von Zahnersatz.

distorts the crown in a specific manner. The amount of a cervical indentation or the mesio-distal asymmetry of the horizontal labial curvature can also be defined as an individual tool. This concept enables developing as many morph maps as desired and groups them into sets, pre-sets, or individual packages.

The basic principle of the method is based on the assumption that a certain localized sculpting action is usually not the goal itself but just an intermediate step towards rounding an edge, reshaping a bulge or modifying a contour, for instance. Consequently, if the overall desired effect is contained within the operation itself and the only remaining input is the amount of the effect, then it should be defined as a shortcut in order to save time.

For a user who starts using these tools while not having yet envisioned the final shape, a steep learning curve is to be expected until all effect tools are efficiently used. Some tools are self-explanatory, other might need some trial and error – which is easy to do by testing the sliders' maximum range.

Similar to biogeneric modeling, if all extremes still conform to naturally occurring examples, then all interpolated intermediate shapes should be expected to fall within the virtual multidimensional range of tooth shapes. However, this needs to be tested and verified in further studies because combining several extremes might lead to unnatural shapes.

Additionally, it is possible to select natural teeth which exhibit distinct variations of one or more certain features, eg, double-shovelled teeth with prominent lateral ridges, and use them as references for the manual, initial feature designs. It is also possible to use a handmade or digitally sculpted tooth as a reference and remodel the deforming model so that it adapts precisely to the reference shape.

Looking ahead, with proper lighting, texturing, and rendering capabilities, such shape-design software will be suited for photorealistic imaging of the proposed treatment result, especially for cases where the patient's face is displayed in a photograph or 3D mask.

The only vaguely similar modeling tool known to the authors is the surface-adding tool in Cerec 4.2 software (Sirona, Bensheim), which “stamps” a single predefined surface characteristic with lobes and texture elements on an anterior tooth and moves it around.

The MGD seems to be more elaborate and suited to achieving minute to even radical overall tooth shape changes, such as extreme abrasions. However, for the described system, the general usability needs to be tested in everyday



work and with different users. Ideally, such a system requires full integration in a dental package to allow seamless processing and integration with other tools, such as adaptation to margins, construction of inner surfaces, or milling radius corrections. In spite of the various design aspects that still need to be addressed, the authors are convinced that the system described here is universal, effective, and a powerful improvement to the existing dental modeling methods.

Conclusion

The MGD proved to be a versatile and efficient tool for the purpose of esthetic and functional digital restoration designs.

Address/Adresse

Dr. med. dent. Jan Hajtó, Privatpraxis für ästhetische Zahnheilkunde,
Briennerstraße 7, 80333 München
E-Mail: hajto@smile-art.de

References

1. Mehl A, Blanz V, Hickel R. A new mathematical process for the calculation of average forms of teeth. *J Prosthet Dent* 2005;94:561-566.
2. Mehl A, Blanz V. New procedure for fully automatic occlusal surface reconstruction by means of a Biogeneric tooth model. *Int J Comput Dent* 2005;8:13-25.
3. Mehl 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.
4. Ender A, Mörmann WH, Mehl A. Efficiency of a mathematical model in generating CAD/CAM-partial crowns with natural tooth morphology. *Clin Oral Investig* 2011;15:283-289.
5. Litzenburger AP, Hickel R, Richter MJ, Mehl AC, Probst FA. Fully automatic CAD design of the occlusal morphology of partial crowns compared to dental technicians' design. *Clin Oral Investig* 2013;17:491-496.
6. Kollmuss M, Jakob FM, Kirchner HG, Ilie N, Hickel R, Huth KC. Comparison of Biogenerically reconstructed and waxed-up complete occlusal surfaces with respect to the original tooth morphology. *Clin Oral Investig* 2013;17:851-857.
7. Williams JL. A new classification of tooth forms, with special reference to a new system of artificial teeth. *IDent Cosmos* 1914;56:627-628.