Von den Maya inspiriert – Schädel- und Gebiss-rekonstruktion mit 3D-Druck

Seit jeher hat der Mensch versucht, sein Wissen zu transkribieren. Ob auf Stein, Papier oder Holz – die verschiedenen Zivilisationen unserer Welt haben unterschiedliche Medien benutzt, um ihre Kultur zu teilen. Die Maya-Zivilisation ist keine Ausnahme. Ein Maya-Kodex ist eine Enzyklopädie, die das Wissen und Können dieser alten Kultur enthält: darunter zählt sogar die Zahnmedizin. Der folgende Fachartikel zeigt die Restauration eines reproduzierten Maya-Gebisses mithilfe von 3D-Druck und verschiedener Composites.

Dr. Yassine Harichane, DDS, M.Sc., PhD

Ein Maya-Kodex wird in Form eines Ziehharmonika-Faltbuchs präsentiert und enthält Glyphen und Darstellungen, die zusammen eine Erzählung bilden. Diese weltweit einzigartige Geschichte handelt von ihren Überzeugungen, ihren Praktiken, ihren Riten, aber auch ihren Wissenschaften. In der Tat beherrschte die Maya-Zivilisation Architektur, Astronomie, Medizin, Pharmakologie und sogar Zahnmedizin. Leider ist dieses Wissen mit der Ankunft der Eroberer in Flammen aufgegangen. Die Maya-Kodizes galten als Sakrilegien, für die das einzige Mittel zur Reinigung das Feuer war. Deshalb verbrannten die Priester die Maya-Schriften. Heutzutage sind nur drei Maya-Kodizes dem Feuer entkommen, jedoch sind zwei von ihnen in einem so schlechten Zustand, dass sie nicht manipuliert werden können. Der dritte Maya-Kodex, der als der schönste und am besten erhaltene gilt, wird in Deutschland an der Universität Dresden aufbewahrt.

Chichen Itza ist eine Maya-Stadt, die heute für ihre archäologische Stätte bekannt ist, einschließlich der Pyramide von Kukulcan (Abb. 1). Was viele Touristen nicht wissen, ist, dass der Dresdner Kodex auch aus dieser Maya-Stadt stammt. Das Problem liegt in der Tatsache, dass dieser Kodex nur Informationen enthält, die sich nur auf den Maya-Kalender beziehen. Wissenschaften wie die Zahnmedizin werden nicht erwähnt. Wir haben jedoch Artefakte, die belegen, dass die Mayas Zahnbehandlungen nicht nur zu therapeutischen, sondern auch zu ästhetischen Zwecken durchgeführt haben.[1-21] Heutzutage gibt es keine Möglichkeit, einen vor fünf Jahrhunderten verbrannten Maya-Kodex aus der Asche zurückzubringen. Trotzdem verfügen wir über die Technologie, um 1.500 Jahre alte Artefakte nachzubilden. In diesem Artikel werden wir zeigen, wie wir es geschafft haben, Maya-Stücke mit digitalen Werkzeugen zu reproduzieren.

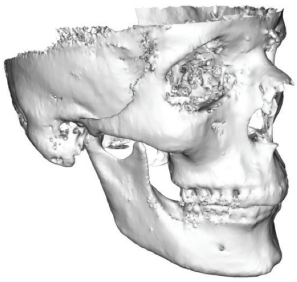
Maya-Schädel

Überraschenderweise praktizierten die Mayas bereits zu ihrer Zeit die kraniofaziale Orthopädie. Wenn wir uns die Skelette ansehen, können wir feststellen, dass dieses Volk ein bestimmtes Profil hatte. Der Schädel war gestreckt und hochgezogen, die Stirn floh und der Nasenrücken war durchgehend mit der Stirn, bis er die Schädelspitze erreichte. Diese kraniofazialen Kriterien waren das Ergebnis einer rituellen Praxis: Frauen brachten starre Platten auf dem Kopf ihrer Kinder an, die zusammengebunden waren, um

01
Kukulcan-Tempel.

02

03



04

05

02
Maya-Kinder mit Wachstums-platten.

03
Gesichts-rekonstruktion.

04
Rekonstruktion des Schädels.

05
Virtueller Maya-Schädel.

das kraniofaziale Wachstum zu steuern (Abb. 2). Die Mayas nutzten die Existenz von Fontanellen, Gewebebereichen zwischen den Schädelknochen, um den Kopf des kleinen Kindes zu formen. Das Ergebnis war ein abgeflachter Schädel im Stirn- und Hinterhauptbein sowie eine eiförmige Gesamtform. Diese willkürliche Verformung wurde nicht zu therapeutischen, sondern zu plastischen Zwecken durchgeführt. Es war kulturell und erlaubte, die ethnische und soziale Gruppe des Individuums zu identifizieren.

„Überraschenderweise praktizierten die Mayas bereits zu ihrer Zeit die kraniofaziale Orthopädie."

Maya-Schädel in 3D gedruckt

Wir haben versucht, einen Maya-Schädel mit moderner Technologie zu synthetisieren. Dazu haben wir drei wesentliche Schritte befolgt: Datenakquise mithilfe einer Cone Beam-Computertomografie, Design und Druck. Der Erfassungsschritt bestand in der Verwendung der Daten, die von einem DVT (iCat) erfasst wurden. Wir haben an einem Scan aus unserer Datenbank gearbeitet, für den der Patient seine Zustimmung gegeben hat. Das Ergebnis ist eine DICOM-Datei, die alle Informationen zur Gewebedichte enthält (Abb. 3). Somit ist es möglich, Weichgewebe praktisch zu entfernen, um nur mineralisierte Gewebe wie Knochen und Zähne zu erhalten (Abb. 4). Wir haben den Schädel des Patienten isoliert und in eine STL-Datei exportiert. Der Entwurfsschritt beinhaltete den Import der STL-Datei in eine 3D-Modellierungssoftware, um den Schädel virtuell zu verzerren. Der Stirnknochen ist abgeflacht, sodass die Nasenspitze mit der Schädelspitze in Kontakt steht.

Der Hinterhauptknochen wird weniger gewölbt, um die Wirkung einer starren Platte hinter dem Kopf zu simulieren. Schließlich wird der Schädelkasten so modifiziert, dass er eine ovale Gesamtform aufweist. Das Ergebnis ist ein Schädel, der den Kanonen der Maya-Schönheit entspricht (Abb. 5). Die digitale Datei wurde an einen 3D-Drucker gesendet (SolFlex 650, VOCO), der mit einem transparenten Harz beladen war (V-Print splint, Abb. 6), um die inneren Knochenstrukturen besser widerzuspiegeln. Das Ergebnis ist ein transparenter Schädel (Abb. 7) mit feinen Details und einer globalen Form, die den in Museen sichtbaren Maya-Skeletten ähnelt.

Maya lächelt

Maya-Skelette wurden von multidisziplinären Teams von Anthropologen, aber auch Zahnärzten genau untersucht. In der Tat zeigten die Zähne besondere Modifikationen: Sie

06
V-Print splint.

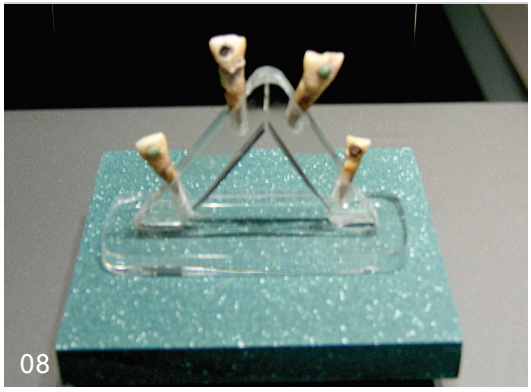
07
Maya-Schädel in 3D gedruckt.

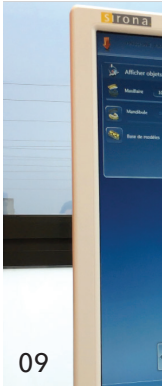
„In der Tat zeigten die Zähne besondere Modifikationen: sie wurden gefeilt, gestreift und/oder mit Edelsteinen besetzt."

wurden gefeilt, gestreift und/oder mit Edelsteinen besetzt (Abb. 8). Die Formänderungen können die freie Zahnkante, die vestibuläre Oberfläche sowie den mesialen und distalen Winkel der Zähne umfassen. Die Inlays bestanden aus verschiedenen Steinen: Jade, Obsidian, Serpentin, Hämatit etc. Beachten Sie jedoch, dass sich diese Veränderungen auf das Lächeln beschränkten, d. h. hauptsächlich auf die Frontzähne und in der Regel auf die bukkalen Oberflächen der Zähne. Auch diese Eingriffe erfolgten zu ästhetischen Zwecken, die Zähne waren sowohl ein Zeichen sozialer Identität als auch ein Schmuckstück. Das überraschendste ist, dass diese Eingriffe mit einer Beherrschung durchgeführt wurden, wie z. B. 1.500 Jahre später – Zähne und sogar Inlays sind noch vorhanden. Diese Artefakte sind daher der ultimative Beweis dafür, dass ein zahnärztlicher Eingriff sowohl kosmetisch als auch dauerhaft sein kann.

Maya Wax-up

Mit den in unserer Zeit verfügbaren technologischen Werkzeugen konnten wir drei Artefakte des Maya-Lächelns reproduzieren. Die vorherigen Schritte, Erfassung, Design und 3D-Druck, wurden verwendet, um ein Wax-up und zwei Mock-ups digital zu erstellen. Der erste Schritt erforderte die Verwendung eines Intraoralscanners (Omnicam CEREC, Dentsply Sirona; Abb. 9). Der Oberkieferbogen eines Patienten wurde bis ins kleinste Detail gescannt, um möglichst realistische Artefakte zu erzielen. Der Scan wurde als STL-Datei exportiert, um eine einfache Bearbeitung durch die Software zu ermöglichen. Im zweiten Schritt wurde mithilfe einer Modellierungssoftware eine planbare Grundlage für den 3D-Druck eines Dentalmodells geschaffen (Abb. 10). Dieses wird direkt in 3D gedruckt (SolFlex 170, V-Print model; Abb. 11), um den Zahnbogen des Patienten zu erhalten (Abb. 12). Um die Lichthärtung zu optimieren, wird das Modell in ein UV-Blitzlichtgerät gegeben (OtoFlash, VOCO; Abb. 13). Ein Wax-up wurde von Maya-Lächeln inspiriert. Für das Wax-up wurde die Form der Frontzähne modifiziert, um die ästhetischen Kriterien der Maya zu erfüllen. Die freie Schneidekante wurde gefeilt und an den mittleren Schneidezähnen eine Stufe angelegt. Die Zähne wurden mit fließfähigem Composite (Admira Fusion Flow,





VOCO) in den Farben A3,5 für die Backenzähne, A3 für die Prämolaren, A2 für die Eckzähne und schließlich A1 für die Schneidezähne bedeckt. Effekt-Composite (FinalTouch, VOCO) wurde verwendet, um eine realistische Wiedergabe zu erzielen. Das braune Composite wurde in die Rillen eingebracht, das orange in die Embrasuren. Einlegearbeiten wurden mit grünem und blauem Composite (Twinky Star®, VOCO) an den bukkalen Oberflächen der Zähne vorgenommen, um Edelsteine zu simulieren. Und schließlich wurde das Zahnfleisch mit rosa Composite simuliert (AMARIS® Gingiva, VOCO). Das Endergebnis ist ein realistischer Maya-Zahnbogen, der zu 50 Prozent digital und zu 50 Prozent manuell hergestellt wurde (Abb. 14).

Maya Mock-up

Es ist möglich, ein Wax-up im Mund wiederzugeben – es wird Mock-up genannt. Dafür haben wir zwei verschiedene Workflows implementiert. Im ersten Arbeitsablauf erfolgt die Erfassung des Zahnbogens mit einem Intraoralscanner (TRIOS MOVE, 3Shape; Abb. 15). Die STL-Datei wird an den Zahntechniker gesendet, der ein digitales Wax-up entwirft. Dieses Wax-up wird nach den Kriterien der Maya-Ästhetik hergestellt: ein mesialer Schnitt auf den mittleren Schneidezähnen, eine Inzisalreduktion auf den lateralen Schneidezähnen und ein Zahnschmuck von Eckzahn zu Eckzahn (Abb. 16). Das digitale Wax-up wird in eine STL-Datei konvertiert, die mit einem speziellen Drucker in 3D gedruckt wird (SolFlex 170, VPrint Model; Abb. 17). Aus dem in 3D gedruckten Modell wird ein Silikonschlüssel hergestellt (V-Posil Putty Fast und X-Light Fast, VOCO; Abb. 18).

„Der Oberkieferbogen eines Patienten wurde bis ins kleinste Detail gescannt, um möglichst realistische Artefakte zu erzielen."

Es wird vor dem Einsetzen in den Mund mit farbigem Composite und temporärem Composite (Structur 3, VOCO) gefüllt. Sobald die Polymerisation abgeschlossen ist, wird der Silikonschlüssel entfernt, um das Maya-Mock-up anzuzeigen (Abb. 19). Das Ergebnis ist erstaunlich, da es gleichzeitig natürlich und übernatürlich ist. In wenigen einfachen Schritten ist es möglich, ein Jahrtausende altes Lächeln zu kreieren.

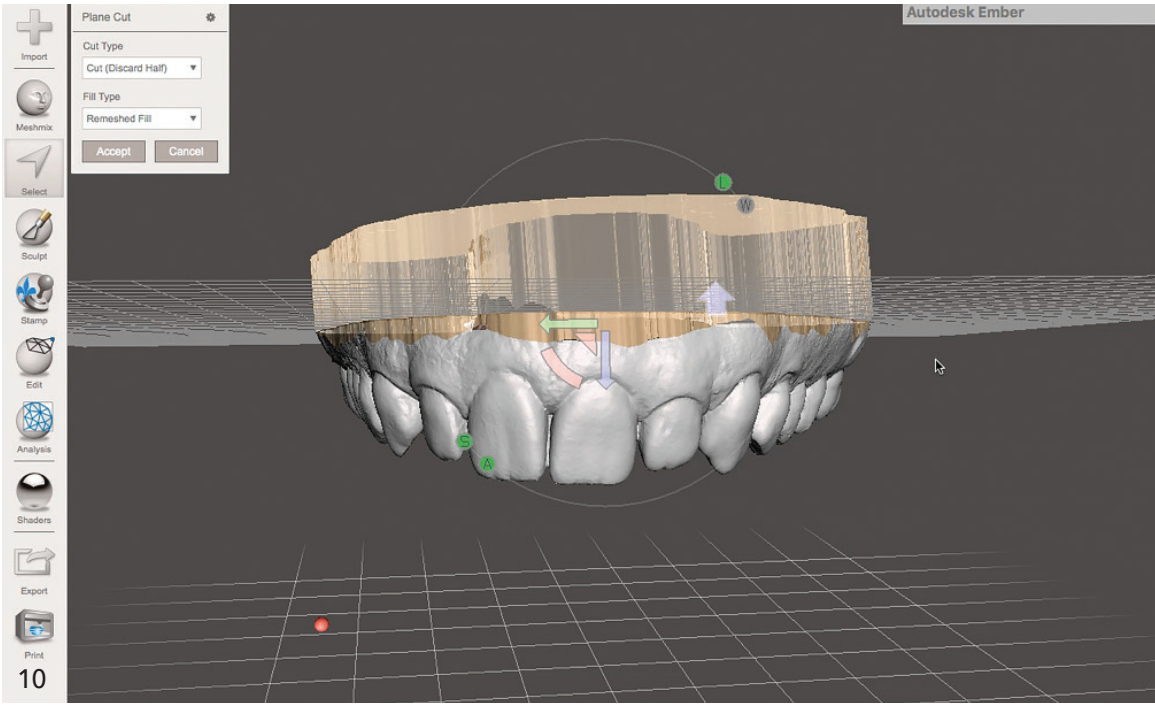
Maya Mock-up in 3D gedruckt

Das klassische Mock-up muss zerstört werden, um entfernt zu werden. In diesem Workflow verwenden wir ein in 3D gedrucktes Maya-Mock-up. Nach dem Scannen des Zahnbogens wird die STL-Datei an den Zahntechniker gesendet, der das Mock-up direkt erstellt, ohne ein Wax-up zu fertigen (Abb. 20). Die STL-Datei wird an den 3D-Drucker (SolFlex 170) gesendet, der in wenigen Minuten

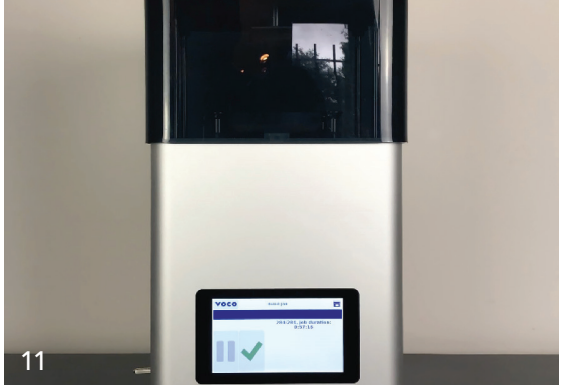
08
Maya-Zähne.

09
CEREC Intraoralscanner.

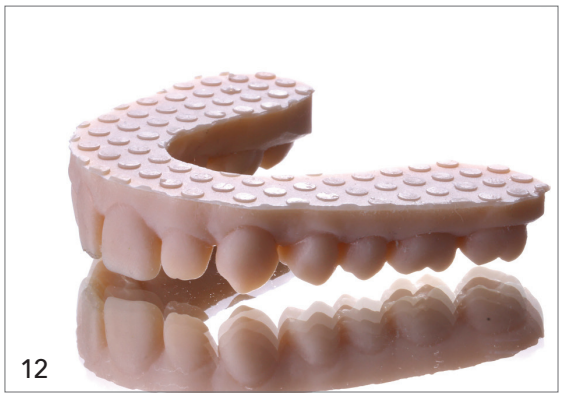
10
Virtuelle Schnittebene der Zahnmodellbasis.



10



11



12

13

14

ein Harz-Mock-up synthetisiert (V-Print model). Die Charakterisierung erfolgt mit farbigem Composite: grün, um Jade und blau, um türkis zu imitieren (Abb. 21). Für Präsentationszwecke im Rahmen dieses Artikels wurde das Mock-up in den Mund eingebracht (Hinweis: Beim Schreiben dieses Artikels war dieses Produkt noch nicht für die intraorale Anwendung angegeben). Das erzielte Ergebnis ist sowohl in ästhetischer als auch in technischer Hinsicht außergewöhnlich (Abb. 22). Nichtinvasiv war es möglich, ein von Anfang bis Ende digital gestaltetes Maya-Mock-up herzustellen.

Klinische Anwendungen

Wir haben in diesem Artikel eine unterhaltsame Anwendung neuer Zahntechnologien gesehen. Natürlich gibt es viele klinische Anwendungen. In der kraniofazialen Orthopädie oder in der Kiefer- und Gesichtschirurgie ist es möglich, eine Behandlung von Anfang bis Ende virtuell zu simulieren. Wenn der Patient eine Malokklusion der Klasse III hat oder eine Le-Fort-Osteotomie erfordert, kann der Spezialist das Therapieergebnis am Computer simulieren und nach der Behandlung sogar den Schädel des Patienten ausdrucken. Dies ist eine großartige Möglichkeit, um die Angemessenheit des Behandlungsplans zu überprüfen und die Unterstützung des Patienten zu erhalten.

In der allgemeinen Zahnheilkunde kann der Arzt auch Behandlungspläne simulieren oder dem Patienten sogar erlauben, das Endergebnis auszuprobieren. Nach dem Scannen des Zahnbogens kann der Zahnarzt gleichzeitig mit dem Digital Smile Design (DSD) das digitale Wax-up auf dem Bildschirm anzeigen. Verwenden Sie nach der Validierung durch den Patienten einfach einen 3D-Drucker, um das Wax-up oder besser das Mock-up auszudrucken. Innerhalb von Minuten erhalten wir einen konkreten Weg für den Patienten, den therapeutischen Vorschlag zu prüfen und zu genehmigen.

Abschluss

Bis heute haben die Mayas ihre Fähigkeiten und ihr Know-how geheim gehalten. Ihre zahnästhetischen Fähigkeiten sind aufgrund der Langlebigkeit ihrer Eingriffe und ihres technischen Einfallsreichtums atemberaubend. Die aktuelle Zahntechnologie hat es ermöglicht, ein Lächeln mit äußerst anspruchsvollen ästhetischen Kriterien zu entwerfen.

Heutzutage suchen viele Zahnärzte nach Lösungen, um die Anforderungen ihrer Patienten zu erfüllen. Die Digitale Zahnheilkunde bietet Werkzeuge, die erschwinglich und für alle zugänglich sind, damit alle Anforderungen erfüllt werden können. Ob Zahnarzt, Implantologe oder Kieferortho-

15

11
SolFlex 170.

12
Zahnmodell vor dem Charakterisieren.

13
UV-Blitzlichtgerät zur Lichthärtung.

14
Zahnmodell nach dem Charakterisieren.

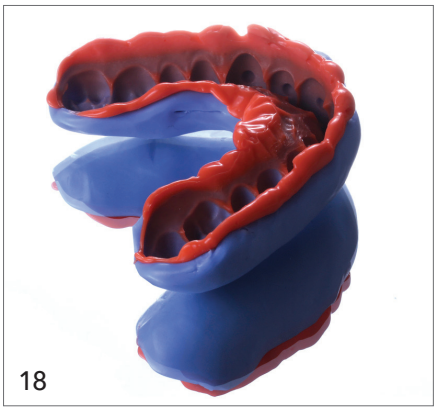
15
3Shape Intraoralscanner.

16

17

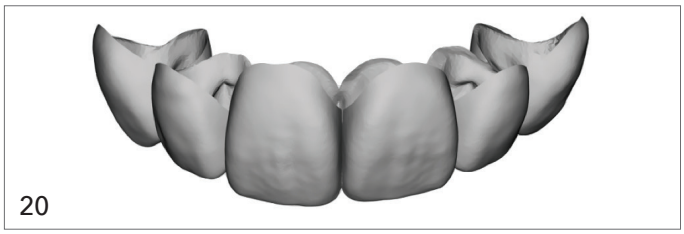
16
Virtueller Wax-up Maya.

17
Maya-Wax-up in 3D gedruckt.



18
Silikonschlüssel.

19
Probieren des Maya-Mock-ups.



20
Virtueller Mock-up.

21
Maya-Mock-up in 3D gedruckt nach dem Charakterisieren.

22
Einprobe des Maya-Mock-ups nach dem 3D-Druck.

päde – digital hat seinen Platz im Alltag. Es ist Sache des Praktikers, die richtige Zahntechnologie zu finden, um sich mit den Maya-Zahnkünstlern messen zu können.

Fotos: © Dr. Yassine Harichane, DDS, M.Sc., PhD

Hinweis: Der Autor bedankt sich bei Matthias Mehring und Peter Kopecky für die materielle Unterstützung und Hilfe im 3D-Druck sowie bei Reinhard Buch und Silvia Jarchow für die freundliche und intellektuelle Korrektur dieses Artikels. Er gratuliert Jonathan Pellerin zu seinen herausragenden Fähigkeiten.

Literatur

Dr. Yassine Harichane
DDS, M.Sc., PhD
Paris, Frankreich
yassine.harichane@gmail.com

Infos zum Autor