Streifenlicht oder Laser - Dentale 3D-Laborscanner – Wie sie funktionieren und was funktioniert am besten

Dr. Karl Hollenbeck, Dr. Thomas Allin, Dr. Mike van der Poel
3Shape Technology Research, Copenhagen

Januar 2012

Die Kunden des Marktes von 3D-Dentalscannern werden mit einem Hagel von verschiedenen und verwirrenden Behauptungen bombardiert. Viel zu oft bleiben den Information suchenden Fachleuten schwierige Schlüsselfragen offen, wie z.B. „Wo liegt der Unterschied zwischen den Laser- und Weißlichtscannern?" und „Kann ich die versprochene Genauigkeit von verschiedenen Scannern vergleichen?" Dieser Artikel hat zum Ziel den Lesern grundlegendes Verständnis von 3D-Scantechnologie zu vermitteln und Ihnen zu ermöglichen, die Herstellungsprozesse von 3D-Scannern besser kennen zu lernen und sich bewusst mit dem Kauf eines neuen Scanners auseinanderzusetzen. Dieser Artikel ist hauptsächlich der Scantechnologie gewidmet und behandelt nur kurz die Aspekte der CAD-Software, die oft mit dem Scanner enthalten ist.

Das Grundprinzip des 3D-Scanners

Mit einer Ausnahme liegt allen 3D-Dentalscannern dasselbe Grundprinzip zugrunde. Im Wesentlichen besteht ein 3D-Scanner aus einer Lichtquelle, einer oder mehreren Kameras und einem Bewegungssystem, das mehrere Achsen für Positionierung des gescannten Objekts gegenüber der Lichtquelle und Kamera(s) unterstützen. Die Lichtquelle vermittelt klare Linien auf die Oberfläche des Objekts, und die Kamera(s) nehmen die Bilder von diesen Linien auf. Anhand des bekannten Winkels und Abstands zwischen der Kamera und der Lichtquelle (zusammen als Scankopf bezeichnet) können die 3D-Positionen, wo das projizierte Licht reflektiert, durch Trigonometrie berechnet werden. Scanabdeckung. Jede Linie von projiziertem Licht erzeugt eine 3D-Konturlinie. Deshalb erzeugt die Relativbewegung von dem Scankopf und dem Objekt mehrere Linien, und daher mehrere 3D-Konturen. Laserscanner generieren mehrere Linien durch Führung des Scannerkopfs entlang der präzisen Linearachse (Abb. 1, links), während Weißlichtscanner einen feststehenden Scankopf haben. Die letzteren projizieren verschobene Linienmuster von der zentralen Position hintereinander (Abb. 1, rechts). Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, sind die in Laser- und Weißlichtscannern verwendeten Grundprinzipien gleich. Ausschließend anhand des allgemeinen Scannerprinzips kann nicht behauptet werden, dass Weißlichttechnologie besser als Lasertechnologie ist, oder umgekehrt.

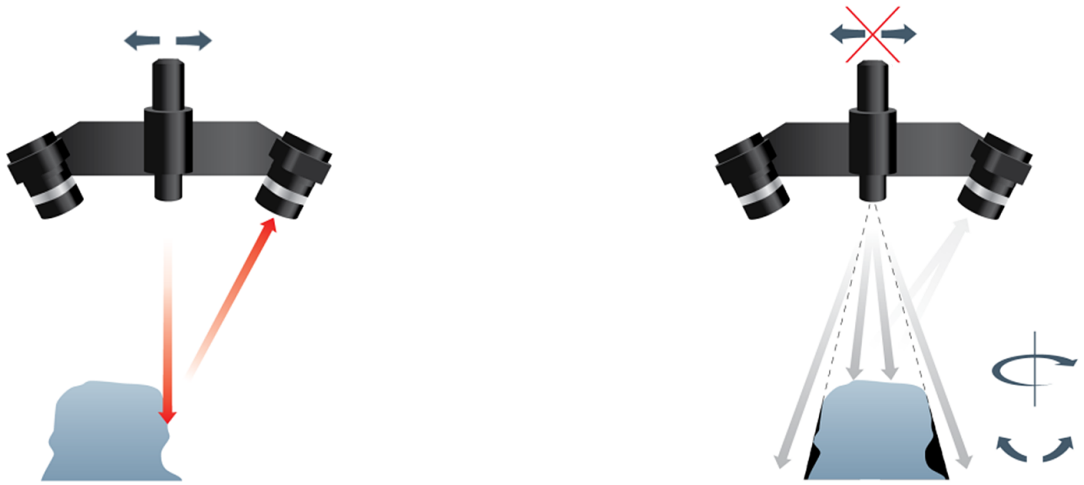
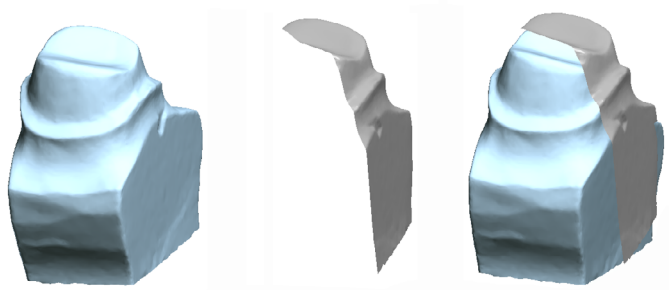


Abbildung 1: *Das Prinzip vom 3D-Scanner. Links: Ein 3D-Scanner mit zwei Rotationsachsen und einer Linearachse. Der Laserscanner generiert eine Lichtlinie, die über das Objekt geführt wird, indem die Linearachsen verwendet werden. Rechts: Ein Weißlichscanner mit zwei Rotationsachsen. Die Lichtquelle generiert mehrere Lichtlinien und verschafft damit einen kompletten Blick von dem einzigen Standort aus.*

Jede Relativposition von Scankopf oder Objekt, d.h. jeder Konturensatz erzeugt eine einzige 3D-Ansicht. Alle Scanner führen einen vordefinierten Bewegungsscript aus, indem der Scankopf relativ in einige Positionen/ Ansichten geführt wird, die zum Erfassen der Oberfläche von allen Seiten benötigt werden (Abb. 2). Einige 3D-Scanner unterstützen ein hochwertiges mechanisches Bewegungssystem, wo alle 3D-Ansichten direkt in das allgemeine Koordinatensystem transformiert und dann einfach aneinander gehängt werden können. Andere 3D-Scanner mit weniger präziser Mechanik begnügen sich nicht mit der Qualität des Bewegungssystems sondern ordnen stattdessen die 3D-Ansichten praktisch durch die Erkennung ähnlicher 3D-Strukturen



Ansicht 1 *Ansicht 2* *Kombinierte Ansichtview*

Abbildung 2: In hochpräzisen mechanischen Bewegungssystemen werden verschiedene Ansichten hinzugefügt. Weniger präzise Systeme gebrauchen Softwareausrichtung von verschiedenen Ansichten. *Softwareausrichtung basiert auf Übereinstimmungen in der Oberflächenstruktur in überlappenden Bereichen. Das macht Softwareausrichtung fehleranfällig in den Bereichen, die klein sind oder eine glatte und weniger definierte Struktur haben.*

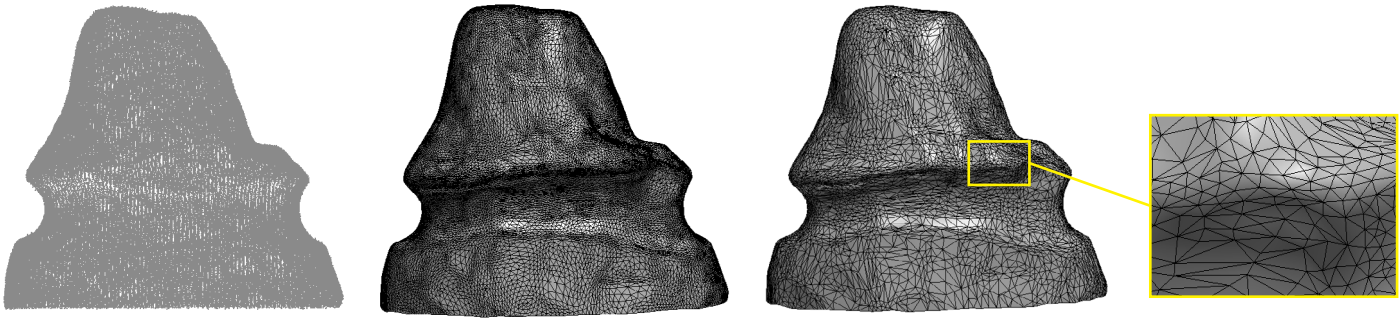
in überlappenden Bereichen wenigstens von einem Ansichtenpaar. Softwareausrichtung funktioniert also am besten bei Objekten mit ausgeprägten Strukturen, wie z.B. Molaren.

Triangulation benötigt scharf projizierte Lichtmuster. Das kann im Prinzip sowohl mit den Laser- als auch mit den Weißlichtscannern verschafft werden. Die Laser können minimale Linienstärke von jeder Beleuchtungsquelle erreichen (sie sind deshalb perfekt für den Gebrauch bei Zeigern), aber wenn es nicht sorgfältig kontrolliert wird, werden Sprenkel angezeigt – leichte Zufälligkeit in der Lichtintensität. Weißlichtscannern fehlt dagegen an Schärfe, weil verschiedene Farbenkomponenten, die in Weißlicht bestehen, zu leicht unterschiedlichen Blickwinkeln (chromatische Aberration, ein „Regenbogeneffekt") gebrochen werden.

Die 3D-Scanner-Aufnahme von scharf projizierten Lichtmustern kann keine bessere Qualität haben, als die von den Kameras. Hochqualität sowohl in Optiken als auch in Bildsensoren ist also ein Muss bei den 3D-Scannern für den professionellen Einsatz. Heutzutage entsteht die Tendenz zur Entwicklung von Scannern mit hochauflösenden Sensoren – einige bis zu 5 Megapixel.

Im letzten Verarbeitungsschritt wird die von allen Ansichten verschaffte Punktwolke in eine 3D-Oberfläche in Form von feinen Dreiecken umgewandelt (Abb. 3). Das ist ein Approximationsverfahren, das auch in der Computergrafik angewandt wird. Intelligente Algorithmen für die Flächenerstellung sind vorzuziehen, d.h. diejenigen, die relevante Merkmale wie Kanten bewahren. Die Anwendung von intelligenten Algorithmen könnte die Anzahl der Dreiecke wesentlich reduzieren ohne Genauigkeit zu beeinträchtigen. Im Allgemeinen ist die Anzahlreduzierung von Dreiecken wünschenswert, weil die Zeit, die CAD-Designsoftware zur Bildverarbeitung benötigt, in hohem Maß von der Zahl der erstellten Dreiecke abhängt. Zum Beispiel, durch Verdoppelung der Zahl von Dreiecken könnte die Softwarebearbeitungszeit leicht um den Faktor vier steigen oder in manchen Fällen kann die Verarbeitung sogar endgültig fehlschlagen.

Die Technologien des 3D-Weißlich- und 3D-Laserscans werden auch in industriellen Anwendungen und Messtechnik weit eingesetzt. Laserscansysteme beherrschen jedoch das Segment für Koordinatenmessmaschinen und andere hochpräzise Anwendungen.



Grobe Punktwolke *Hochdichte Oberfläche* *Mitteldichte Oberfläche* *Kantenerhaltende Reduktion*

Abbildung 3: Punktwolke (links, 164,475 Punkte) wird zum Erstellen von Dreieckoberfläche gebraucht (Mitte; 55.380 Dreiecke). *Intelligente Algorithmen der Anzahlreduktion von Dreiecken können zum Zahlreduzieren der Dreiecke benutzt werden, dabei werden aber ausgezeichnete Bewältigung and Passung der Präparationsgrenze bewahrt.*

Genauigkeit

Zurzeit gibt es keinen einheitlichen Standard für die Messung und Validierung von Genauigkeit der Dentalscanner. Die meisten Scannerhersteller geben sogar nicht bekannt, wie sie die Genauigkeitsansprüche messen. Behauptete Genauigkeitsraten – normalerweise im Bereich von 20 Mikrometer - können also weder verglichen noch bestätigt werden.

Die Wissenschaft von hochpräzisen Messen – Metrologie – verwendet Referenzobjekte mit höherer Genauigkeit, als die Scanner. Diese Objekte können nur von spezialisierten akkreditierten Unternehmen oder von Metrologielaboren hergestellt werden. Bei der Festlegung und Einführung von solchen echten gemeinsamen Referenzobjekten wird es klar, dass verschiedene Scannermarken ganz anders funktionieren, und es ist zu vielen besorgniserregenden Ergebnissen gekommen – zum Beispiel, manche Scanner können die Kanten mit einer Fehlerspanne von über 20 Mikrometern abrunden (Abb. 4).

Bei den Referenzobjekten der Implantatstege ergeben Tests einen Fehler von weniger als 3 Mikrometern entlang der Einschubrichtung - d.h. auf der Ebene von der Implantatachse (Abb. 5). Dieser Scanfehler ist der erste in der CAD-Toleranzkette, die insgesamt vertikale Fehlpassung von weniger als 10 Mikrometern zwischen dem Gerüst und dem Abutment erreichen soll (die ideale "passive Passung"). Während es darüber diskutiert wird, ob 10 Mikrometer ein realistisch erreichbarer Wert ist, gibt es mindestens einige Scanner, die scheinen, dieses Ideal erreichen zu können.

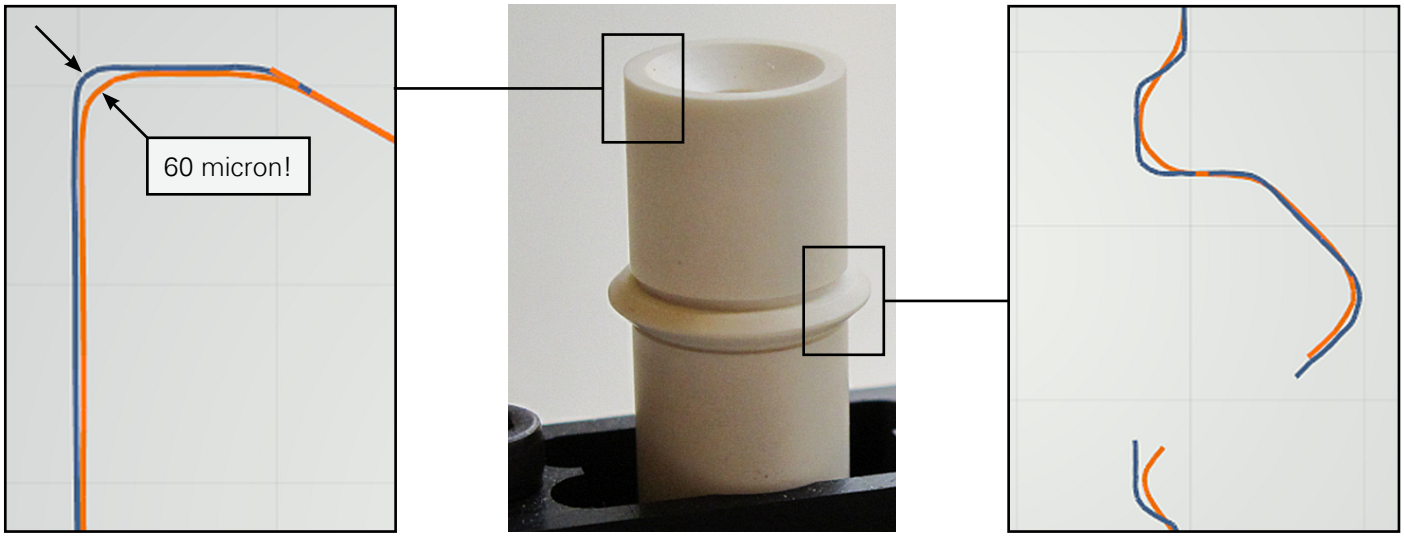


Abbildung 4: Messungen von zwei Scannermarken (blau Linie, orange Linie) von einer gewöhnlichen scharfen Kante in einem individuell gefertigten keramischen Referenzzahn (Mitte). Beachten Sie relativ große Genauigkeitsdifferenz an scharfen Kanten.

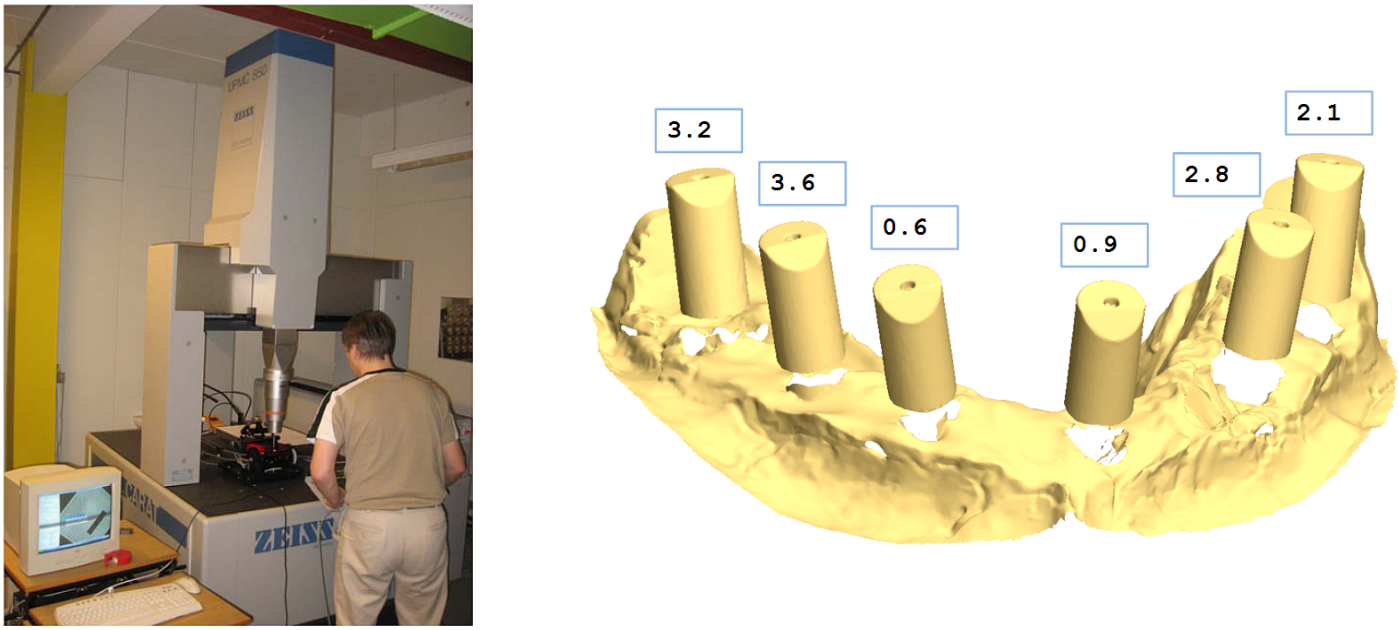


Abbildung 5: Links: Referenzmessungen mit einer hochwertigen Koordinatenmessmaschine (Genauigkeit 3 Mikrometer). Rechts: Scanning von dem Referenzobjekt des Implantatstegs mit Fehlern in Einschubrichtung [in Mikrometern].

Das ist ein unbestreitbares physikalisches Gesetz, dass alle Stoffe – und damit auch Scannerhardware – sich bei Temperaturenänderung ausdehnen und zusammenziehen. Scannerhardware kann auch grobe Handhabung wie beispielsweise beim Transport schaden. Für anspruchsvolle Arbeit, wie weitspannige Brücken und Implantatstege, ist es besonders wichtig, dass ein Scanner nach Umpositionierung oder bei Temperaturänderung im Labor neu kalibriert wird. Hochmoderne Scanner werden mit speziellen Kaliblierobjekten mit einem bekannten Genauigkeitsfaktor geliefert, der viel höher als Scannergenauigkeit ist. Softwarealgorithmen können Temperatureinflüsse nicht ausgleichen, weil die Scannerhardware selbst Schweißen, Verschlüsse, geleimte Teile, unterschiedliche Ladungen usw. enthalten, und sind daher anfällig für äußerst komplizierte Ausdehnung und Zusammenziehung.

Genauigkeit hängt auch davon ab, wie gut der Scanner hergestellt wurde. Größere 3D-Scanner-Hersteller haben normalerweise bessere Produktionsanlagen und Werkzeuge und können einige Arbeitsschritte einschließlich Qualitätskontrolle automatisieren. Sie können also Produktvariabilität mehr reduzieren als nur durch manuell ausgeführte Operationen. Größere Hersteller sind gewöhnlich auch finanziell stabil und bleiben höchstwahrscheinlich wettbewerbsfähig und leisten langfristige Unterstützung.

Scangeschwindigkeit und Produktivität

Scangeschwindigkeit ist ein wichtiger Parameter bei der Scannerauswahl, weil Scanzeit Gesamtproduktivität wesentlich beeinflusst. Genauso wie bei Genauigkeit gibt es hier auch keine Normen, die den Vergleich von Marketingunterlagen und Ansprüchen erleichtern. Da es keine einheitlichen Bezugsrahmen gibt, zeigt der empirische Vergleich, dass behauptete Scanzeit von 30 Sekunden bis zu einigen Minuten für denselben Basic-Die schwanken kann. Seriösere Hersteller geben die Scanzeit für ausgewählte große Indikationsgebiete bekannt. Im Allgemeinen wird allein durch Untersuchung des Scanzeitwertes die Scannerkapazität im Hinblick auf Produktivität nicht ergeben.

Labore müssen den ganzen Workflow berücksichtigen, angefangen bei der Auftragerstellung und bis zu einem völlig für CAD-Design fertigen 3D-Scan. Das betrifft selbstverständlich sowohl die Scannerhardware als auch das System, das sie antreibt. Der Vergleich von Produktivität verschiedener Scannermarken unter diesem Gesichtspunkt wird sogar noch größere Leistungsschwankungen aufweisen.

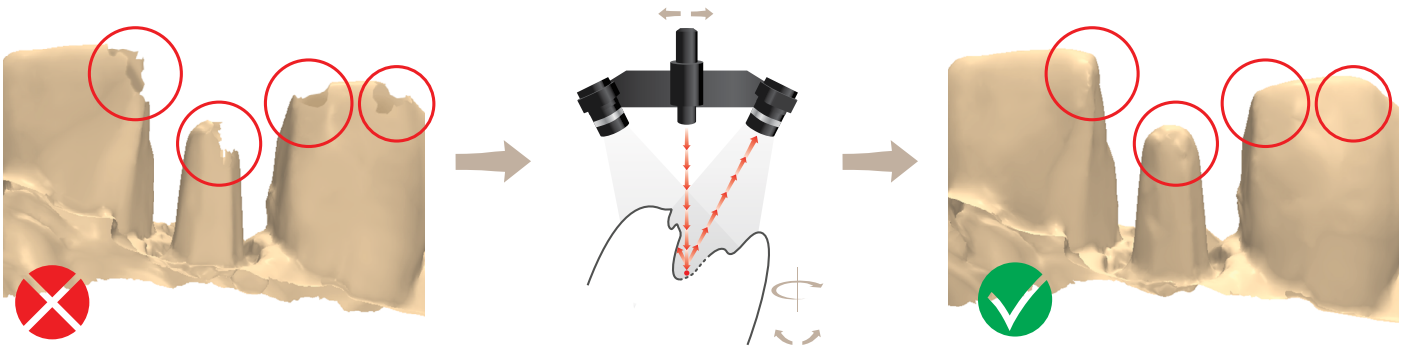
Ein hoher Automatisierungsgrad erspart den Benutzern Zeit bei dem gesamten Scanprozess. Automatisierung reduziert auch die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler und hilft dadurch die Veränderungen vermeiden – den zeitaufwendigsten unter allen Fehlern. Manuell gesteuerte Heiligkeitseinstellungen von der Kamera können beispielsweise zu überbelichteten Bildern führen, wo projizierte Lichtlinien nicht mehr zu erkennen sind.

Einige Hardwarefunktionen können Bearbeitungszeit verkürzen. Mit Die-Feeder oder Multi-Die-Platte kann ein Scanner ohne Betreiber einige Minuten arbeiten. Jeweils ein Techniker kann mit mehreren Scannern gleichzeitig arbeiten oder die gesparte Zeit effektiv zum Konstruieren von Restaurationen in der CAD-Software nutzen. Gute Halterungen vermindert die Zahl von Fehlern, die Zeitverlust verursachen.

Die zuverlässigste Information für Scangeschwindigkeit ist wahrscheinlich in unabhängigen Benutzerberichten (besonders betreffend Fehlerrate) und in ganze Scanprozesse dargestellten Videos zu finden.

Zusätzliche Funktionen

Außer Genauigkeit und Scangeschwindigkeit gibt es andere wichtige Unterschiede unter Dentalscannern. Ein wichtiger Faktor, den Labore berücksichtigen sollen, ist die Zahl der unterstützten Indikationen, z.B. weitspannige Brücken, individualisierte Abutments, genaue Implantatstege und Modellgüsse. Zu viele einfache nicht upgradefähige Scanner werden nur einfache Indikationen unterstützen und damit



Vor dem adaptiven Scannen

Nach dem adaptiven Scannen

Abbildung 6: *Links. Beispiel von einem Scanergebnis des herkömmlichen Abdruckscans, das in Präparations-, Proximal- und Kontaktbereichen unvollständig ist, und es wird also Passung und klinischen Erfolg beeinträchtigen. Rechts: Eine vollständige und präzise Abtastung nach dem adaptiven Scanning von fehlenden Bereichen, wobei automatisch die optimale Kombination von zwei Kameras und 3-Achsen-Bewegung zum Einsatz kommt.*

das Labor begrenzen und langfristig als eine schwache Investition betrachtet werden.

Die vom Scanner unterstützten Indikationen können nicht einzeln betrachtet werden. Die im Scanner installierte CAD-Software muss sie auch unterstützen. Im Allgemeinen werden Hersteller, die sowohl Scanner als auch CAD-Software entwickeln, in der Regel bessere und optimierte Workflows mit vollständig integrierten Lösungen anbieten – insbesondere in Bezug auf Indikationenunterstützung und Benutzerfreundlichkeit.

In Zukunft wird sich das Scannen von Abdrücken in Laboren zum produktivsten Verfahren für 3D-Scanning entwickeln, indem die herkömmlichen „reinen Gips"-Scanner ein Ding der Vergangenheit werden. Abdruckscannen ist besonders für 3D-Scanner herausfordernd. Bei den tiefen Kavitäten ist es schwer mit der Kamera und Lichtquelle tiefe Oberflächenpunkte gleichzeitig zu beleuchten und zu sehen, was eine Grundvoraussetzung von dem 3D-Modell ist (Abb. 6). Mehrere Kameras erhöhen die Chance die ganze Oberfläche zu sehen. Es gibt eine eigene Technologie („Adaptives Abdruckscannen"), die Software verwendet, um die optimale Kombination von Kameras und Positionen zum Wiederscannen von ungedeckten Bereichen zu finden. Andere Hersteller verwenden zeitaufwendige und schwer vordefinierte Bewegungsscripts.

mit einem eingebauten PC ausgestattet. Obwohl das den Platzbedarf reduziert und den Transport erleichtert, bringt es einen großen Investitionsnachteil.

Scanner-PCs müssen aufgrund ständig steigender Anforderungen an Betriebssysteme und CAD-Software normalerweise alle 2-3 Jahre upgraded werden. Eingebaute PCs lassen sich aber häufig schwer upgraden.

Zusammenfassung

Da es an einheitlichen Normen sogar für die grundlegenden Funktionen in Dentalscannern fehlt, kann der 3D-Scanner-Markt für viele Labore bei der Suche nach dem richtigen Gerät sehr verwirrend wirken. Labore sollen bei Vergleich von 3D-Dentalscannern die folgende Checkliste nutzen:

- Genauigkeit –von zertifizierten Referenzobjekten dokumentiert
- Scan- und Workflowzeit – für genau definierte Indikationen
- Anzahl unterstützter Indikationen – weitspannige Brücken, Implantatstege, Modelgüsse
- Nützliche Funktionen – Scanning von Abdrücken, Scanning von Texturen, Die-Feeder, Kalibrierobjekt und 5-MP-Kameras.

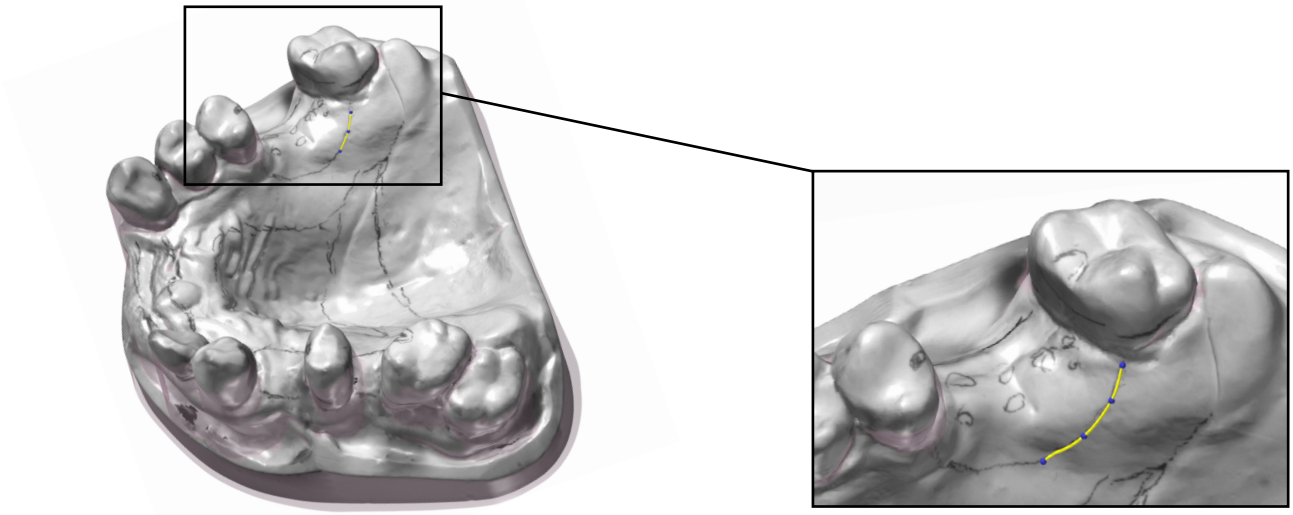


Abbildung 7: *Scanning von Texturen erfasst 2D-Bilder von der Modelloberfläche und bringt sie mit hoher Präzision auf dem 3D-Modell als Overlay auf.*

Im Unterschied zum adaptiven Scannen garantieren vordefinierte Bewegungsscripts keine komplette Abdeckung von der Oberfläche.

Basierend auf der Technologie von hochauflösenden Kameras (5 MP) werden beim Texturscannen 2D-Bilder von der Gipsmodelloberfläche erfasst und mit hoher Präzision auf dem 3D-Modell als Overlay aufgebracht. Dies optimiert die visuelle Darstellung von Oberflächendetails und ermöglicht Technikern handschriftliche Konstruktionsanmerkungen in das digitale Design mitaufzunehmen (Abb. 7). Es ist besonders hilfreich beim Erfassen von Hand gezeichneter Präparationsgrenze, die mit dem Stift direkt auf das physische Modelle aufgezeichnet wurde, oder bei der Übertragung von Positionsmarkierungen des MoGu-Gerüstes vom Modell in die CAD-Software. Scannen von Texturen ist eine bahnbrechende Dentalscanner werden Technologie, die nur in den fortschrittlichsten Dentalscannern unterstützt wird.

Schließlich ist es empfehlenswert den Scanner immer vor der endgültigen Kaufentscheidung zu testen. Die Werbung und Broschüren können alle möglichen Versprechungen gemacht haben, aber diese können nicht immer erfüllt werden, wenn es mit der Arbeit beginnt.

Bei so einer wichtigen und langfristigen Investition für das Labor ist es doch selbstverständlich, die Angebote gründlich zu prüfen und unzureichend dokumentierte Angaben vom Hersteller in Frage zu stellen.