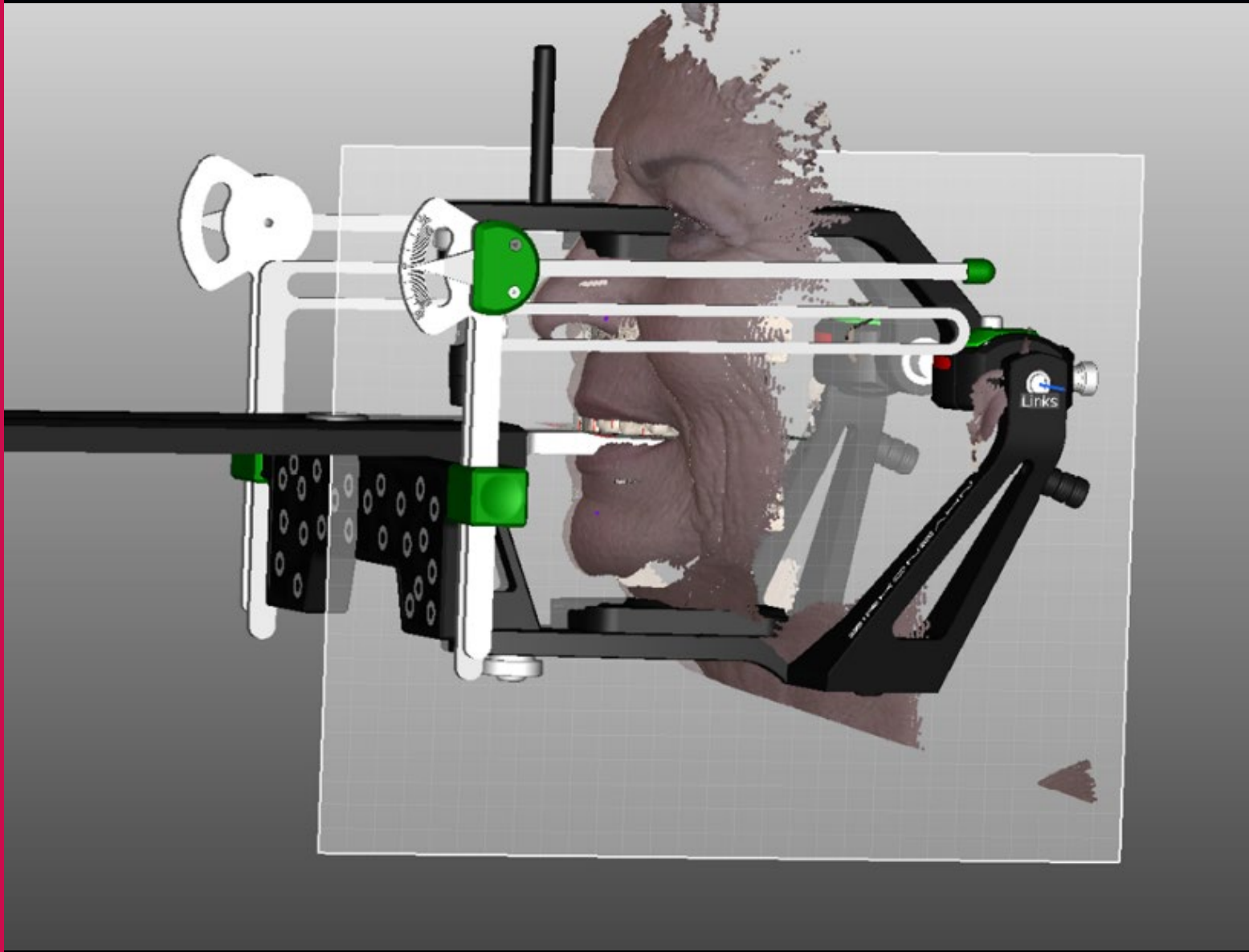
Copyright by Quintessence
Not for Publication

Diagnostik – Planung – Kommunikation

Bezugsebenen und Informationsfluss von der Praxis zum Labor

KARSTEN KAMM



Copyright by Quintessence Not for Publication

Einleitung

Der menschliche Körper kann in beliebig viele Ebenen unterteilt werden. Die Hauptebenen stehen senkrecht aufeinander und bilden drei Raumkoordinaten. Die drei Hauptebenen sind die Sagittale, die Transversale und die Frontale (Abb. 1). Im Bereich der Zahnmedizin stellen die Patienten gewöhnlich besonders hohe Erwartung an die Ästhetik ihres Zahnersatzes, deshalb kommt den Bezugsebenen eine besondere Bedeutung zu. Der interdisziplinäre Austausch zwischen Zahnarzt und Zahntechniker ist in erster Linie bestrebt, eine präzise Okklusion zu erzielen.[2] Um dies zu ermöglichen, bedarf es in der Zahntechnik einer Registrierung der natürlichen Lage des Oberkiefers in Bezug auf den Horizont.

Wichtig ist die Bestimmung der Mitte und der individuellen Okklusionsebene im richtigen Verhältnis zu dieser Lage.[7] Bisher kam zur Bestimmung der Gesichtsbogen zum Einsatz, was zu Ungenauigkeiten in der Okklusion führen kann. Der Gesichtsbogen wird bei der Lagebestimmung an den äußeren Gehörgängen angebracht. Da die Kondylenachse und die Verbindungslinie der äußeren Gehörgänge häufig nicht identisch sind, kann das bei der exzentrischen Okklusion zu unterschiedlichen Werten führen. Diese Differenzen können sich in alle Richtungen auswirken.[3]

Der prothetische Zahnersatz soll nun eine ästhetische und zugleich funktionelle Lösung darstellen. Die Zielsetzung der Gesichtsbogenübertragung von Modellen ist heute im analogen Weg genauso wie früher, man möchte das Oberkiefermodell passend zur terminalen Scharnierachse in den Artikulator übertragen. Hierzu hat man sich bisher immer bekannter Bezugslinien, wie der Camperschen Ebene (C) oder der Frankfurter Horizontalen (FH) sowie der sogenannten Patientenhorizontalen (PH) bedient.[5] Hierbei lassen sich jedoch Ungenauigkeiten und Fehler, wie sie je-

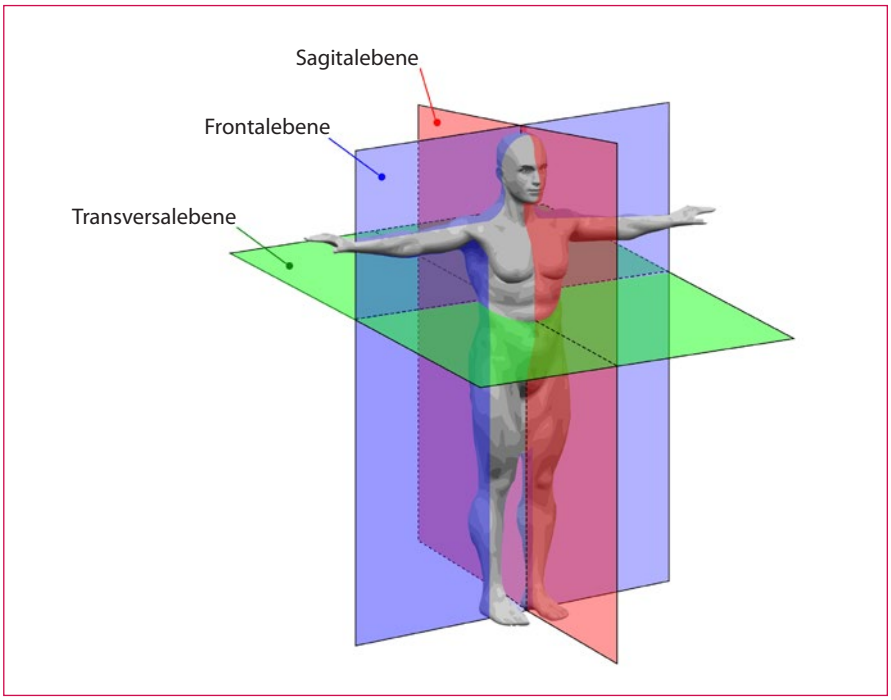


Abb. 1 3-D-Raumebenen.

Zusammenfassung
Fast alle Gesichter haben Asymmetrien, die den Verlauf der Okklusionsebene beeinflussen. Um das Oberkiefermodell in den Artikulator zu übertragen, werden bislang zumeist die Campersche Ebene, die Frankfurter Horizontale und die Patientenhorizontale verwendet. Dies führt aber zu Ungenauigkeiten, die die Funktionalität der Versorgung beeinträchtigen können. Beschrieben werden der Umgang mit dem PlaneSystem® und das Wechselspiel zwischen digitalem und analogem Workflow bei der korrekten Übertragung der Referenzebenen, um einen nicht nur ästhetischen, sondern auch funktionalen Zahnersatz zu ermöglichen.

Indizes
Okklusion, Artikulator, Referenzebene, Funktion, Ästhetik

Copyright © Not for Publication Quintessenz

der kennt, nicht vermeiden. Diese Fehler können in allen drei Raumebenen auftreten. Insbesondere dann, wenn, wie in den meisten Fällen, Asymmetrien im Gesicht des Patienten (Abb. 2) diagnostiziert werden, die den Verlauf der Okklusionsebene beeinflussen.

Wie diese Asymmetrien anhand der Ala-Tragus-Ebene und der Natural Head Position (NHP) patientenindividuell abgegriffen und in einem virtuellen Artikulator wiedergegeben werden können, beschreibt Plaster sehr gut: Man nimmt eine dieser Bezugslinien und verbindet sie mit dem Oberkiefer des Patienten mithilfe eines Übertragungsbogens. Hierbei kann es jedoch trotz standardisierten Vorgehens zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Das PlaneSystem® bietet die Möglichkeit einer weiteren Annäherung an dieses Ideal. Darin geht es um die Gleichschaltung zwischen dem Patienten und dem physischen, aber auch virtuellen Artikulator. Das PlaneSystem® (Abb. 3) dient zur individuellen Patientenanalyse, die es uns ermöglicht, die Ist-Situation der Zähne bzw. des Oberkiefers, die Neigung der Okklusionsebene und die Bissposition absolut genau in den Artikulator zu übertragen. Der nächste Schritt ist der digitale Weg der Übertragung der Funktionsebenen, hierzu ist unbedingt eine 3-D-Erfassung des Gesichts notwendig.

Die heutigen Artikulatoren basieren auf den Formulierungen von McCollum und Stuart in dem Buch Gnathology, A Research Report.[4] So waren sie der Auffassung, dass allen Gelenken im Körper eine Bewegungsachse zugeordnet werden kann und dies auch bei den Kiefergelenken möglich ist. Auch die Biomechanik der Kiefergelenke gibt den Muskeln die Bewegung vor. McCollum und Stuart[4] gehen auch davon aus, dass für jeden Menschen individuelle Bewegungsbahnen vorkommen und diese sich über das gesamte Leben nicht verändern. Es ist doch sehr ärgerlich, wenn eine große, aufwendige, detailgetreue Keramikarbeit im Mund komplett eingeschliffen werden muss, um eine funktionelle Okklusion zu erreichen, nur weil vorher nicht klar war, wie die vertikale und horizontale Position des Kiefers ist. Auch hier gilt wieder: Ästhetik ist ein Zusammenspiel zwischen Form und Funktion.

Natural Head Position (NHP)

Mit dem PlaneFinder® wird die Natural Head Position (NHP) gefunden, die auch in anderen medizinischen Bereichen eine feste Größe ist. Das Zusammenspiel der Kieferknochen, der Gelenke und der Muskulatur, auch die Nacken- und Rückenmuskulatur betreffend, ist nicht immer leicht durchschaubar. Dadurch kann es zu unerklärlichen Problemen bei der Eingliederung kommen. Hier dient der PlaneFinder® zur Positio-

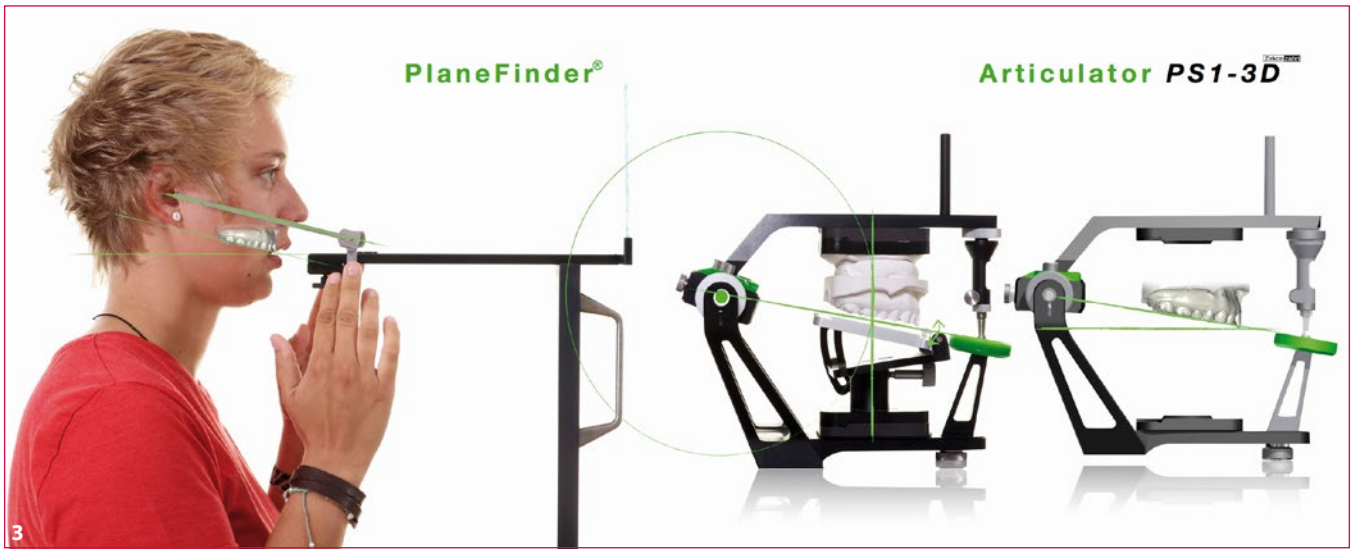
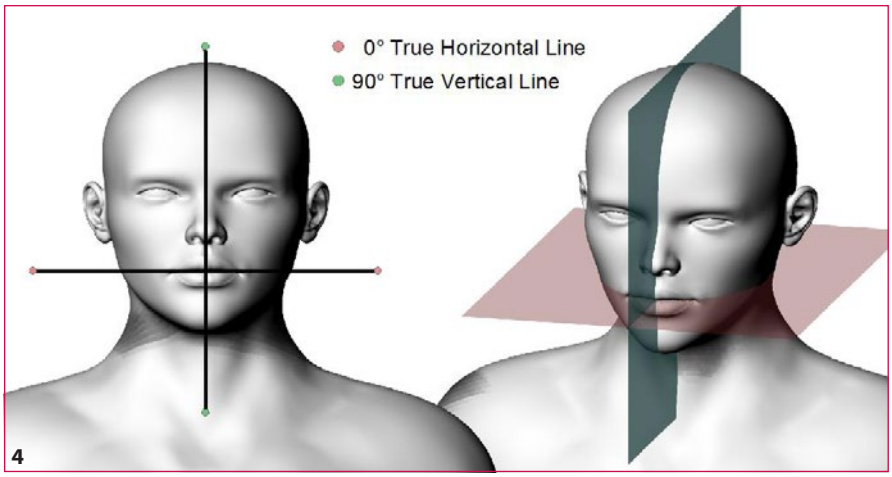


Abb. 2 Gesichtsasymmetrie. **Abb. 3** Das Planesystem von Udo Plaster.

Copyright by Quintessence Not for Publication



4

5

Abb. 4 Horizontal- (True Horizontal) und Vertikalebene (True Vertical). **Abb. 5** Gesichtsscan (OBJ-Datei).

nierung des Oberkiefers im Artikulator. Bei Einnahme der NHP kann immer wieder auf dieselbe Weise eine horizontale Referenzlinie lokalisiert werden. Die NHP ist eine standardisierte und reproduzierbare Position des Kopfes in aufrechter Lage, und ist gegeben, wenn die Augen einen etwas weiter entfernten Punkt auf Augenhöhe fokussieren. In diesem Fall ist die Sichtachse parallel zum Horizont. Bei der Datenerfassung positioniert der Patient intuitiv auch seine Mitte senkrecht und mittig am Gerät, wodurch sich rechts und links von dieser vertikalen Referenzebene die Asymmetrien des Gesichtsschädels abbilden (Abb. 4).

Ala-Tragus-Linie

Mit dem PlaneFinder® wird die Ala-Tragus-Linie (Abb.3) festgelegt, die wiederum parallel zur Kauebene verläuft und somit eine aussagekräftige Hilfslinie ist. Auch der Neigungswinkel lässt sich unkompliziert ermitteln und bietet somit ohne Gesichtsbogen und ohne Verschraubung eine optimale Ausgangsposition für eine funktionelle und schöne Arbeit. Diese wird nun ästhetisch in den Restzahnbestand eingegliedert, ohne weiteres Einschleifen im Mund. Ein guter Nebeneffekt ist die Zeit- und Arbeitsersparnis für den Behandler.

Referenzebene

Bei jeder Modellmontage wird sie eingesetzt und doch wird sie kaum verstanden: die Referenzebene. Oft fallen Entscheidungen zur Referenzebene unbewusst, wenn man z. B. einen Gesichtsbogen anlegt oder ein System verwendet, dessen Bezugsebene man nicht kennt. Oder sie bleibt dem Zufall überlassen, wenn sich Fehler einschleichen und die Modellübertragung nicht kontrolliert wird. Die Entscheidung bezüglich der Referenzebene fällt mit der Montage des ersten Modells. Die Zahntechnik arbeitet danach im Artikulator immer in der True Horizontal Line (Abb. 4), dies entspricht dann auch der Tischebene.

Erstellen eines 3-D-Modells

Die Entwicklung in Richtung CAD/CAM ist für die Zahnmedizin und Zahntechnik unausweichlich. Wesentlichen Aspekte sind die Rationalisierung, aber auch das Qualitätsmanagement, die diese Entwicklung vorantreiben. Dabei geht es keineswegs um eine zwangsläufige Zentralisierung und Industrialisierung der Fertigung: CAD/CAM kann nach wie vor in den zahntechnischen Laboren vor Ort eingesetzt werden. Aber auch die Zahnarztpraxis selbst kann diese digitalen Technologien direkt nutzen und bestimmte restaurative Aufgaben, wie beispielsweise Provisorien oder Einzelrestaurationen, direkt im Praxislabor angehen.[11]

Die 3-D-Gesichtsscandaten (Abb. 5) bringen sowohl Zahntechniker, Zahnarzt als auch Patient eine Reihe von Vorteilen. Während der Techniker die Restauration gesichtsbezogen erstellen und dadurch mit wesentlich höherer Planungssicherheit arbeiten kann, bekommt der Zahnarzt eine nahezu fotorealistische Vorschau des finalen Resultats. Dies dient nicht nur als Marketinginstrument, sondern auch zur Patientenberatung, um diesen eine konkrete Vorstellung der definitiven Arbeit zu bieten.

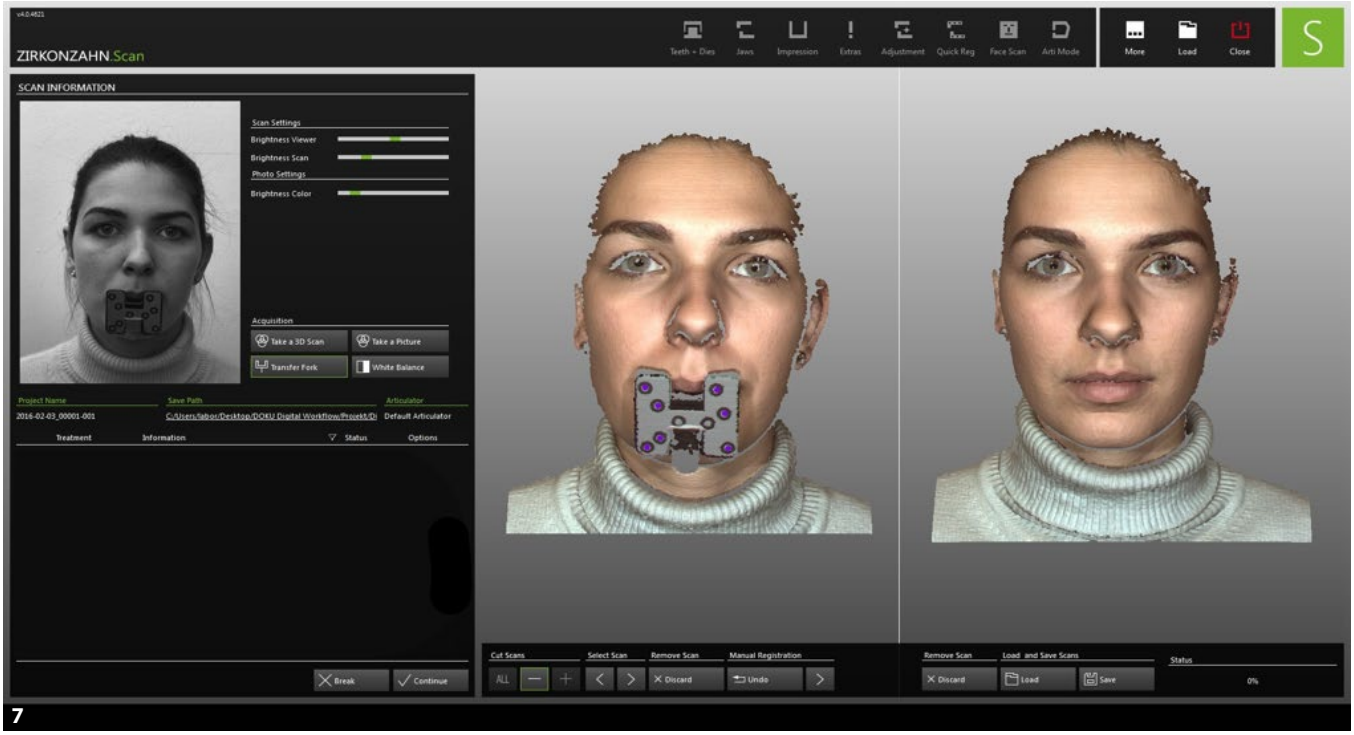
Im ersten Schritt wird das Gesicht mit einem 3-D-Scanner erfasst. Der dentale Gesichtsscanner wurde ursprünglich von der Firma Polymetric (Darmstadt) entwickelt und diente zur biometrischen Gesichtserkennung. Darüber hinaus entwickelte das Unternehmen die dazu passende Messsoftware ZZ.Scan. Die Funktionsweise des Gesichtsscanners ähnelt der eines Fotoapparates: In 0,3 Sekunden

Copyright by Quintessence Not for Publication

wird ein Bild erfasst und daraus eine fotorealistische 3-D-Digitalisierung erstellt. Das Gesicht wird kontaktfrei mithilfe von Streifenlicht in verschiedenen Mimiken erfasst (Abb. 6).

Die zentrale Indikation liegt in der Möglichkeit, physiognomische Daten virtuell in das richtige Verhältnis zueinander zu setzen, um auf dieser Basis die Zahnrestauration zu erstellen.[10] Darüber hinaus wird die Maxilla über eine TransferFork referenziert, die während der Messung an der Maxilla fixiert ist. Diese dient dazu, die Messungen in allen Dimensionen lagerichtig schädelbezogen zueinander zu setzen.[10]

Die Zuordnung der TransferFork funktioniert über eine photogrammetrische Markererkennung. Anhand des Übertragungssystems TransferFork (Abb. 7) werden die Gesichtsscans in Verbindung mit den Modellscans in der Modelliersoftware hinterlegt und gematcht. Dazu wird die Transferfork in einem Desktop-Scanner (Abb. 8) gescannt. Über die Impressionen kann nun der Oberkiefer eingefügt



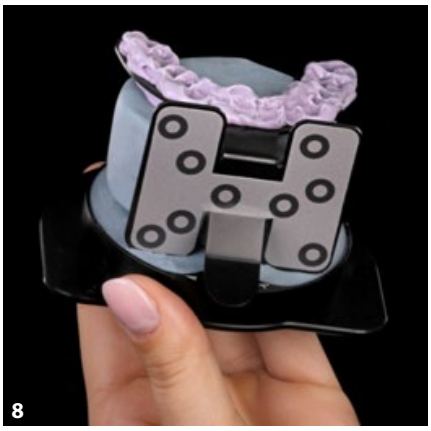


Abb. 6 Gesichtsscan mit Mimik. **Abb. 7** TransferFork. **Abb. 8** Matching der TransferFork im Desktopscanner.

Copyright © Quintessenz Not for Publication

werden. In der Software werden Gesichtsabbild und Situation in Beziehung gesetzt, um auf Grundlage der Gesichtszüge modellieren zu können. Das Silicon-Valley-Startup Bellus3D (Campbell, USA) hat mit der Bellus3D Face Camera-Kamera (Abb. 9) eine Kameraerweiterung für mobile Geräte vorgestellt, mit der innerhalb von 20 Sekunden das eigene Gesicht in ein realistisches digitales 3-D-Modell umgewandelt werden soll. Der neue 3-D-Gesichts-Scanner der Firma Bellus3D wird an der Oberseite des Smartphones oder Tablets befestigt und im Anschluss mit dem Mobilgerät verbunden. Der Kopf wird nun eingescannt, indem der Anwender ihn einmal nach links und dann nach rechts dreht (Abb. 10).

Die 3-D-Software startet nach dem Scanvorgang ein Rendering, bei dem innerhalb von 20 Sekunden aus dem Scanbild des Kopfes ein fotorealistisches Modell erstellt wird. Gespeichert werden die Modelle im OBJ-Format (object files). Dieses Datenformat definiert Geometrien mit zusätzlichen Informationen. Es kann sowohl polygonale Geometrien als auch Freiform-Objekte grafisch darstellen. Polygonale Geometrien werden als Linien, Punkte oder Flächen dargestellt. Die Freiform-Objekte benutzen in ihrer Darstellung jedoch Kurven und Oberflächen.[8] Die mobile 3-D-Scanner-Kamera, die unter dem Namen Bellus3D Face Camera auf der CES 2017 erstmals vorgestellt wurde, verfügt über Infrarot- und Farbsensoren, die mit einer Auflösung von 1,2 Megapixeln arbeiten. Die zwei Infrarot-Projektoren dienen der 3-D-Abtastung. Von der normalen Kamera des Smartphones bzw. Tablets werden zusätzliche Farbinformationen geliefert. Das 3-D-Modell zeigt eine realistische Darstellung und bietet viele Details.

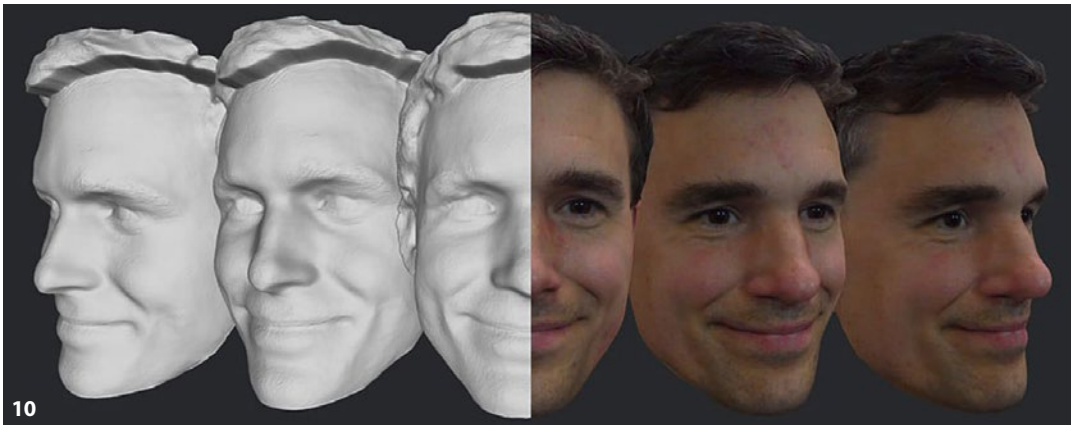
Digitaler Workflow der Referenzebenenübertragung

Stellen wir uns den Artikulator als dreidimensionales Koordinatensystem vor, mit einer x-, y- und einer z-Achse. Dieses Koordinatensystem bestimmt, was im Artikulator vorn und hinten, was oben und unten und links und rechts ist. Genauso läuft es in der CAD-Software ab. Sobald das erste Modell in dieses Koordinatensystem hineingehalten bzw. in einer bestimmten Lage fixiert wird, ist die Referenzebene festgelegt und damit die genannten Richtungen. Aufgabe der Referenzebene ist es daher, das Koordinatensystem der Richtungen zwischen Patienten und Artikulator gleichzuschalten. Weiterhin soll diese Referenzebene der True Horizontal und True Vertical Line entsprechen.

Startpunkt ist immer die Natural Head Position. Die natürliche Kopfposition ist eine reproduzierbare Position eines Kopfes, wenn er sich in einer aufrechten Position befindet und die Augen direkt auf eine Markierung schauen. Das Konzept wurde Ende der fünfziger Jahre von Moorrees und Kean in die Kieferorthopädie eingeführt. Eine horizontale Linie in Bezug auf die natürliche Kopfposition wurde als zuverlässigste Ebene für die Untersuchung der kephalometrischen Analyse empfohlen. Mit dem PlaneFinder® wird die Natural Head Position (NHP) gefunden, die nun mit dem Gesichtsscanner aufgenommen wird. Damit ist das Gesicht im Koordinatensystem perfekt fixiert (Abb. 11). Die Feststellung der verlorenen natürlichen Okklusalebene ist ein Muss für die Entwicklung einer Okklusion, insbesondere bei einem zahnlosen Kiefer.

Weiterhin kann jetzt die Ala-Tragus-Linie für beide Gesichtsseiten bestimmt werden. Die Ala-Tragus-Linie ist die gedachte Verbindungslinie von den Tragi, also den Ohrknorpeln, zu den Alae nasi (lateralen Nasenflügeln oder Spina nasalis anterior) und verläuft etwa parallel zur Okklusionsebene. Alternativ kann

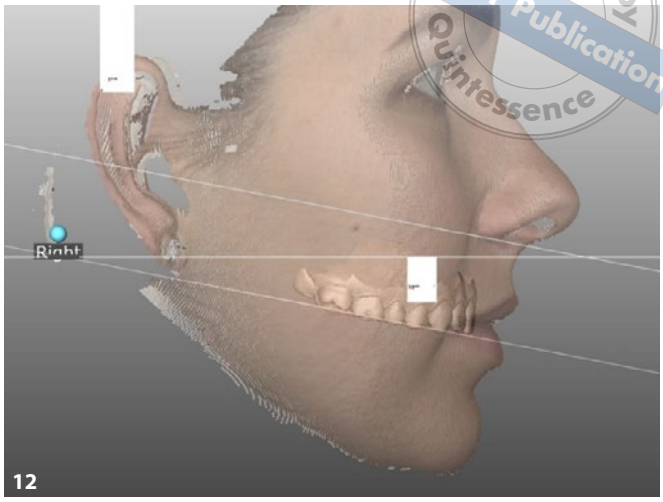
9

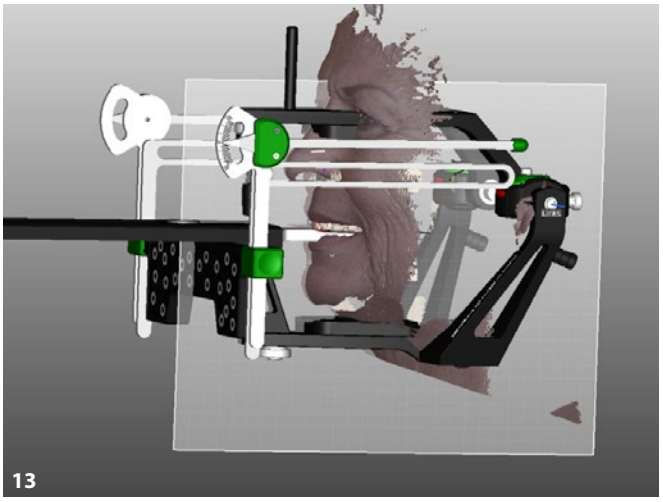


10

Abb. 9 Gesichtsscanner von Bellus3D (Foto: Bellus3D). **Abb. 10** Gesichtsscan mit Kopfdrehung (Foto: Bellus3D).

Copyright by Quintessence Not for Publication





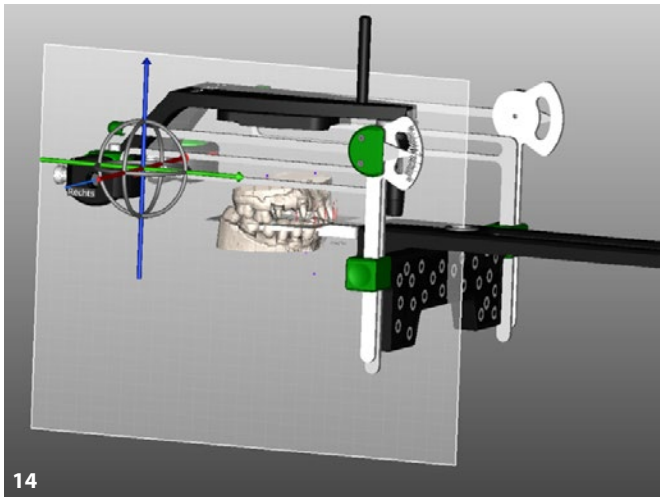


Abb. 11 Patientin im PlaneFinder®. **Abb. 12** Die Ala-Tragus-Linie verläuft parallel zur Okklusionsebene. **Abb. 13** Matching von PlaneSystem® und STL-Daten. **Abb. 14** Matching von Gesichtsscan und PlaneSystem®.

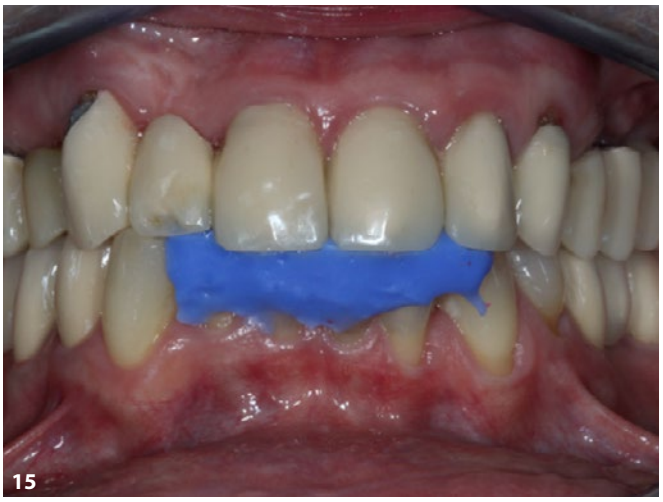
dieser Verlauf digital im CAD-Programm bestimmt werden, zuvor wurde das Gesicht mithilfe des PlaneFinder® und des Gesichtsscans in allen Raumebenen ideal platziert. Eine einfache Projektionsverschiebung zeigt im Programm die Okklusionsebene (Abb. 12) an.

Über die Länge der Frontzähne kann die mögliche Okklusionsebene bestimmt werden. Dies kann diagnostisch, aber auch direkt für dieKonstruktion benutzt werden. Somit wurden beide Bereiche, die Natural Head Position und die Ala-Tragus-Linie, in das Koordinatensystem der CAD-Software, z. B. exocad, übertragen.

Die Kombination zwischen eigener Kopfhaltung und Spiegelposition gibt dem Patienten die Möglichkeit sich zu zentrieren, mit all seinen natürlichen Werkzeugen (Augen, Nackenmuskulatur, Gleichgewichtsorgan). Diese Position ist jederzeit in gleichem Maße nachvollziehund reproduzierbar, wird mit dem Gesichtsscan fixiert und somit ins Koordinatensystem gebracht (Abb. 13 und 14). Bei Einnahme dieser Position lässt sich die Okklusionsebene und deren Verlauf sehr gut messen, da die Ala-Tragus-Linie nahezu parallel zur Okklusionsebene verläuft. Der Neigungswinkel zur registrierten Position, also der Null°-Linie, kann gemessen werden. Die Gradzahl dieser Linie und den daraus entstehenden Winkel kann der Techniker direkt im Programm abgreifen. Nicht nur die natürliche Kopfhaltung, sondern auch der dazugehörige Okklusionslinienwinkel kann somit ermittelt werden.

Zu erwähnen ist noch, dass die Ala-Tragus-Linie in beiden Gesichtshälften unterschiedlich verläuft. Hierdurch können die bei den meisten Patienten unterschiedlichen Gesichtsasymmetrien ideal ins System übernommen werden. Allein durch die Übertragung der Patien-

Copyright by Quintessence Not for Publication



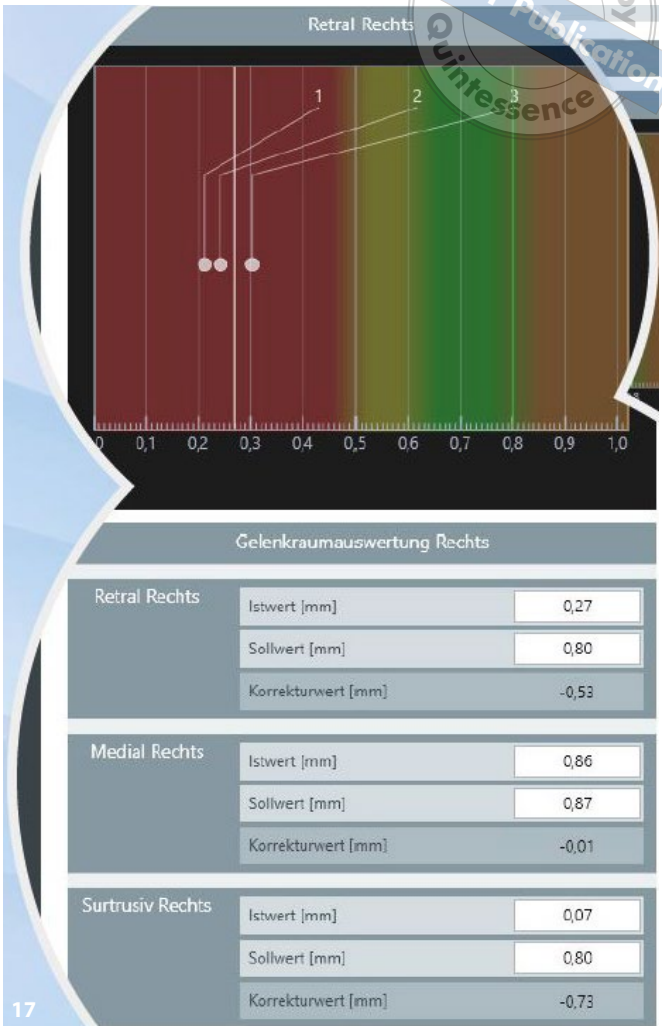


Abb. 15 Konstruktionsbiss nach Freecordervermessung. **Abb. 16** Freecorder (Foto: DDI). **Abb. 17** Kiefergelenkraumwerte.

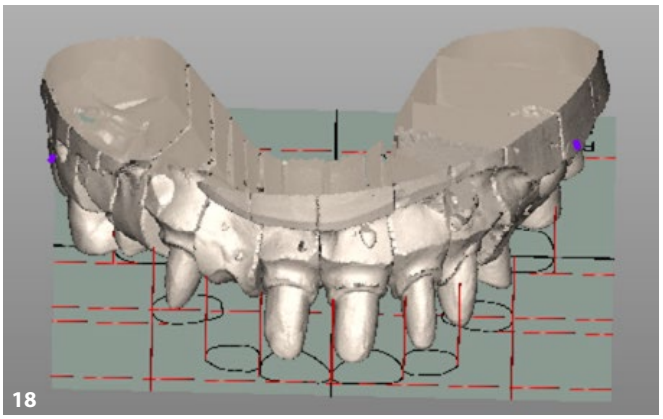
tensituation mit dem PlaneSystem® spart das zahntechnische Labor sehr viel Zeit, denn die Ebenen passen auf Anhieb. Sie müssen nachträglich nicht mehr korrigiert werden, was sonst unnötig viel Zeit und Korrekturen erfordert. Wenn alles eingespielt ist, dann dauern die Übertragung und die Bissregistrierung ähnlich lange wie bei den konventionellen Vorgehensweisen.

Patientenfall

Bei der Patientin kam es immer wieder zu Chipping (Abb. 15) an den vorhandenen Rekonstruktionen. Über eine Funktionsanalyse wurde eine CMD diagnostiziert. In solchen Fällen vermisst der Autor mit dem Freecorder. Mithilfe des Freecorder BlueFox (Orangedental, Biberach) (Abb. 16) können die patientenindividuellen Kiefergelenkbahnen computergestützt in allen drei Raumebenen exakt erfasst und aufgezeichnet werden. Es wurde eine Positionierungsscheine nach den Messwerten der Gelenkraumvermessung (Abb. 17) angefertigt und 24 Stunden täglich getragen. Mit dem System kann die genaue Position der Kondylen retral, medial und surtrusiv bestimmt, die ideale Position rekonstruiert und auf eine Positionierungsschiene übertragen werden. Nach ca. drei Monaten Tragezeit und Beschwerdefreiheit wurde die Freecordervermessung wiederholt und diese neue Position des Unterkiefers für die spätere Rekonstruktion registriert.

In Kombination mit dem Software-Modul CAD/CAM Reality Mode lässt sich nun die Arbeit äußerst realitätsnah darstellen. Die Gesichtsscans können ideal mit den Funktionsdaten, in Kombination mit dem PlaneSystem, verknüpft werden. Mit diesem Ansatz können Gesichtsebenen patientenindividuell ab-

Copyright by Quintessence Not for Publication



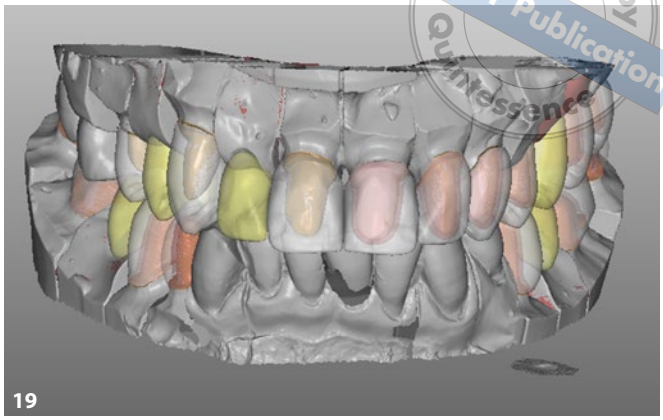


Abb. 18 und 19 Dentale Analyse der Modelle. **Abb. 20** Konstruktion in der Modelier-Software von Zirkonzahn (Gais, Italien).

gegriffen und positionsecht in die CAD/CAM-Technologie übertragen werden.

Im vorliegenden Patientenfall war nach dem Matching aller Daten zu erkennen, dass aufgrund der Stellung beider 1er im Oberkiefer nur ein Kompromiss bezüglich der Mittellinienästhetik erreicht werden kann. Beide Frontzähne waren bezüglich der Mittellinie zur rechten Seite gewandert (Abb. 18 und 19). Auch die Zahnachsen beider Zähne waren nach rechts geneigt. Da die Präparation limitiert war, musste eine ästhetische Lösung für die Lippen- und Gesichtsproportion gefunden werden. Dies wäre ohne den Gesichtsscan nur mit verschiedenen Anproben möglich gewesen und hätte viel Zeit und verschiedene Anproben und Änderungen bedeutet. Weiterhin hätte eine perfekten Ästhetikanalyse vor der Behandlung stattfinden müssen. In solchen Fällen sind deutlich die Vorteile des digitalen Workflows zu erkennen. In der Konstruktionssoftware kann die Zahntechnik durch Einblenden der mimischen Gesichtsstruktur die Konstruktion der Frontkronen perfekt anpassen. Verschiedene Tools können eingeblendet werden, um die optimale Breite und Länge der Frontzahnkronen in Beziehung zur Gesichtergonomie und der Lippenposition auszutesten. Das virtuelle Wax-up kann mit den Behandlern und Patienten diskutiert und nach deren Vorstellungen sofort angepasst werden.

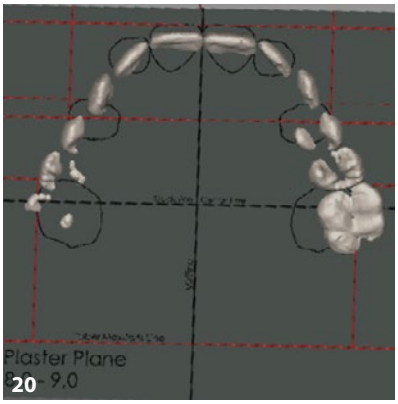
Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass die Konstruktionen direkt im System verändert werden können; eine sofortige visuelle Kontrolle der Ästhetik ist möglich. Somit kann die Konstruktion optimal den ästhetischen Anforderungen und der Lippen- und Gesichtsergonomie angepasst werden. In Abbildung 20 ist die Konstruktion der späteren Kronen zu erkennen.

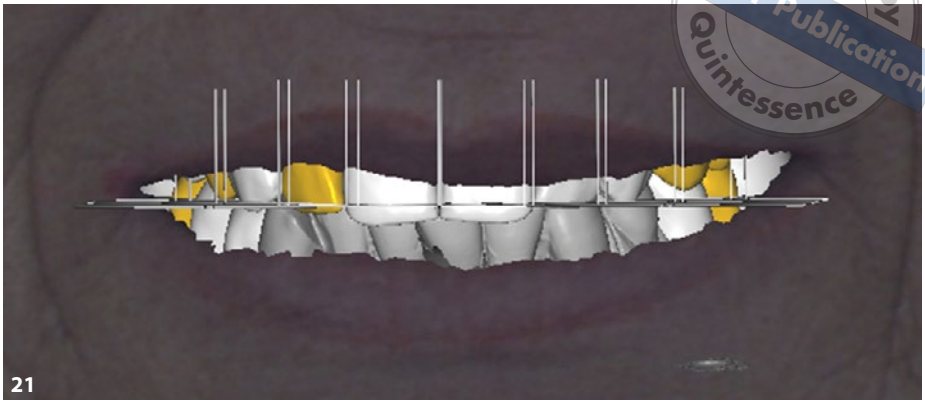
Nach Überprüfung der Konstruktionsparameter (Abb. 21 und 22) kann in schwierigen Fällen ein Mock-up im 3-D-Druckverfahren hergestellt werden. Dieses Mock-up kann nun direkt im Patientenmund eingegliedert und nach ästhetischen und funktionalen Gesichtspunkten beurteilt werden. Ziel ist aber, auf diese Schritte zu verzichten und direkt einen ästhetischen, funktionsgerechten Zahnersatz aus monolithischen Materialien herzustellen. In Abbildung 23 ist zu erkennen, dass mithilfe dieses Workflows ein ästhetischer, funktionsgerechter Zahnersatz eingegliedert werden konnten. Insgesamt fand nur eine kosmetische Anprobe statt. Bei exakter Vorgehensweise im digitalen Workflow kann bei Anwendung des Gesichtsscans und Einhaltung aller Arbeitsschritte eine ästhetische, funktionelle Rekonstruktion mit viel weniger Arbeitsschritten am Patienten eingegliedert werden als auf dem analogen Weg.

Bei der Patientin wurde aus Kostengründen auf eine vestibuläre Verblendung weitestgehend verzichtet. Über die Cut-back-Technik können die Rekonstruktionen jedoch jederzeit teilverblendet werden. In den Abbildungen 24 und 25 ist die regelgerechte Eckzahnführung zu beiden Seiten zu erkennen. Hier spielt der virtuelle Artikulator eine wichtige Rolle, auf den weiter unten noch einmal eingegangen wird. Sollte mit einer Teilverblendung gearbeitet werden, ist es wichtig möglich zu machen, dass es einen Weg aus dem digitalen zurück in den analogen physischen Artikulator gibt.

Diese Möglichkeit besteht bei dem Artikulator PS1 (Schütz Dental, Rosbach). Dazu kann in der Konstruktionssoftware ein Übertragungsblock aus Kunststoff erstellt werden, der über einen variablen Tisch direkt in den dazugehörigen Artikulator eingesetzt werden kann. Nun kann das Gipsmodell, aber auch ein 3-D-gedrucktes Modell, mithilfe die-

Copyright by Quintessence
Not for Publication





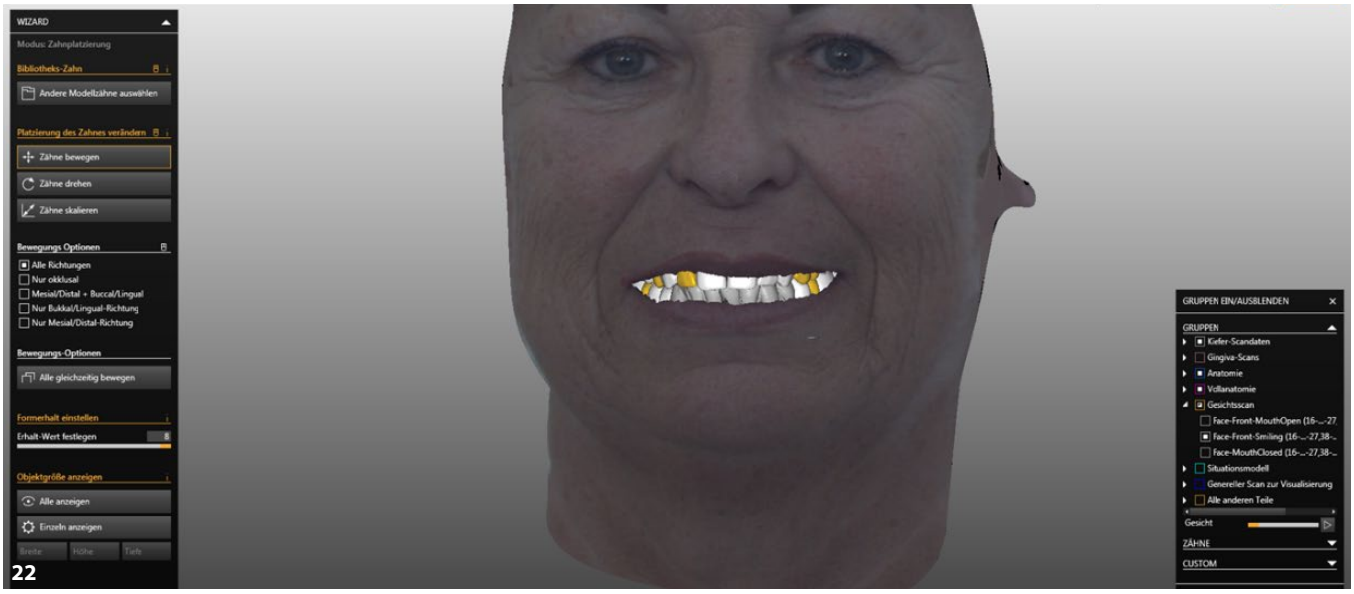


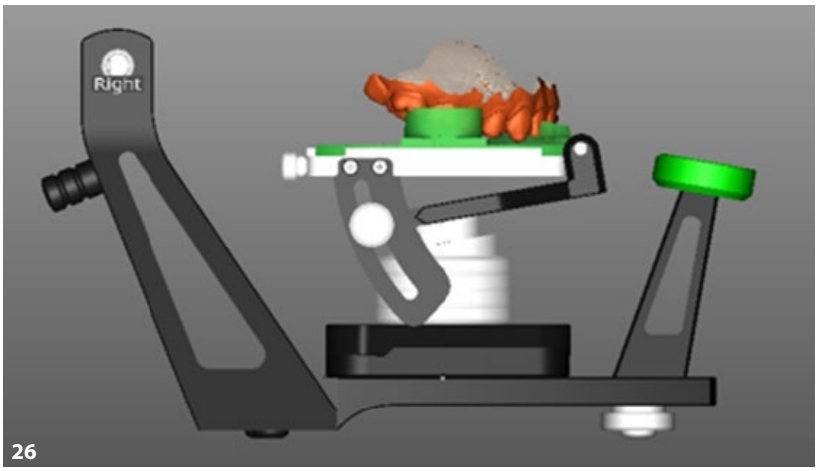
Abb. 21 und 22 Überprüfen der Konstruktion anhand der Gesichtsscandaten. **Abb. 23** Finales Endergebnis der Oberkieferversorgung.
Abb. 21 und 22 Überprüfen der Konstruktion anhand der Gesichtsscandaten. **Abb. 24 und 25** Eckzahnführung rechts und links.

Copyright © Quintessence Not for Publication

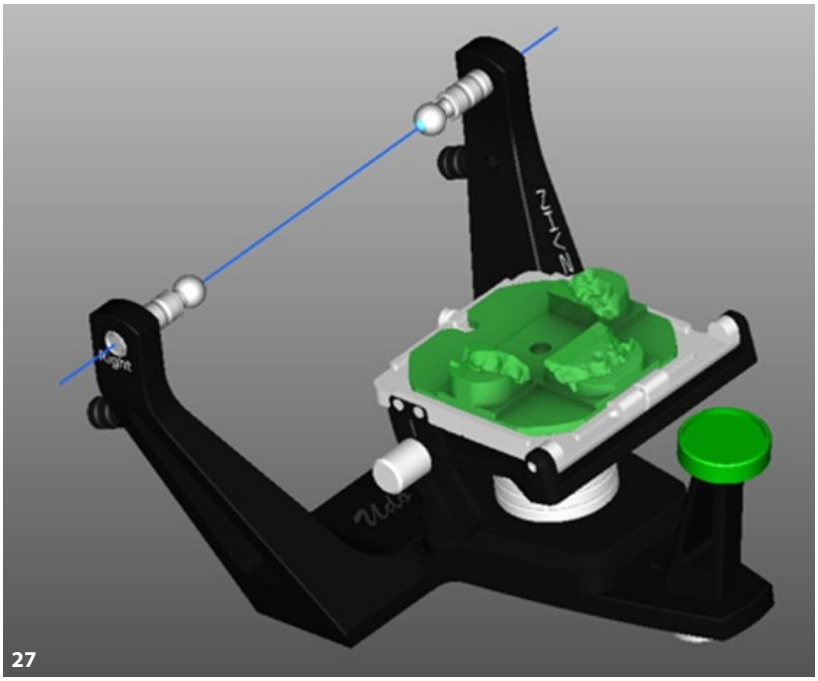
ser Übertragungseinheit exakt in der digitalen Position einartikuliert werden (Abb. 26 und 27).

Mit dieser Übertagung der Positionen aus dem digitalen System in den analogen Artikulator sind ästhetische Versorgungen möglich. In den Abbildungen 28 bis 32 ist dieses Vorgehen zu erkennen. Hier wurden im digitalen System die Rekonstruktionen als Cut-back konstruiert und dann aus einem monolithischen Zirkon subtraktiv hergestellt. Anschließend wurde im physischen Artikulator final weitergearbeitet und die Verblendungen erarbeitet.

Bei diesem Patienten wurden die monolithischen Zirkongerüste der Frontzähne verblendet. Die Zähne 14 bis 16 und 24 bis 26 wurden nur mit Maltechnik ausgeführt. Es wurden im Ober- und Unterkiefer jeweils zwei Brücken auf drei Implantaten mithilfe von Hybridabutments hergestellt. Diese prothetische Arbeit wurde voll digital durchgeführt und hergestellt.



26



27

Abb. 26 und 27 Übertragungsblock für den physischen Artikulator.

Kritischer Punkt im digitalen Workflow ist der virtuelle Artikulator. Im Augenblick gibt es zwei gegensätzliche Systeme, die der Autor miteinander verbindet. Das Planesystem, das den Oberkiefer im Raum positioniert, und den Freecorder, der nach der Gelenkraumvermessung den Unterkiefer über die Rotationsachse im Raum positioniert.

Der Freecorder®BlueFox ist ein opto-elektronisches Registriergerät zum Erfassen der patientenspezifischen Kieferbewegungen und der individuellen Bisslage. Sowohl diese Bewegungs- als auch Positionsdaten können im XML-Format in den Workflow – analog oder digital – integriert werden. Kodierte Muster (Abb. 33), die am Patienten angebracht sind, werden von mehreren Spezialkameras mit integrierten Hochleistungsrechnern abgebildet, erkannt und dekodiert. Die Position jedes Musters wird 100-mal pro Sekunde mit extrem hoher Auflösung von einem Tausendstel Millimeter in Echtzeit verfolgt.

Die Visualisierung der 3-D-Gelenkräume und deren therapeutische Korrektur unter echtzeitnavigierter Bildschirmkontrolle eröffnen neue Möglichkeiten in Diagnostik und Therapie. Bewegungs- und Positionsdaten können sowohl im analogen Arbeitsprozess als auch im digitalen Workflow genutzt werden. Eine Zusammenführung von DICOM-Daten des Patienten und Funktionsdaten im der Free-Software Blender (Abb. 34) ermöglicht eine zeitliche Darstellung der exakten Bewegungen in beiden Kiefergelenken. Als zusätzliche Daten können die STL-Daten der Modelle hinzugematcht werden.

Parameter wie Kondylenwinkel, Bennettwinkel und seitliche Verschiebung lassen sich wie in einem physischen

Copyright by Quintessence
Not for Publication

28

29

30

31

Artikulator einstellen. In Kombination mit dem Importmodul für Kieferbewegungsdaten können weitere Parameter von Kieferregistriersystemen importiert werden. Bei dem virtuellen Artikulator können Fehler nicht mehr in einem Gerät aus Metall und Plastik erkannt werden, sondern an seinem Abbild auf dem Bildschirm. Dies erfordert umzudenken.

Das PlaneSystem® ist der initiale Prozess im digitalen Workflow und dient als ein Referenzierungs- und Registrierungssystem für den virtuellen und den analogen Artikulator. Die dazugehörigen Komponenten PlaneFinder® und PlanePositioner bieten die Möglichkeit, die patientenindividuellen intra- und extraoralen Gesichtslinien in den analogen Artikulator zu übertragen, um sie folgend in den virtuellen Artikulator zu überspielen.[6]

32

Abb. 28 bis 32 Arbeitsschritte für die vestibuläre Verblendung einer monolithischen Arbeit und finales Ergebnis im Mund. **Abb. 33** Marker für den Freecorder.

Copyright by Quintessence Not for Publication

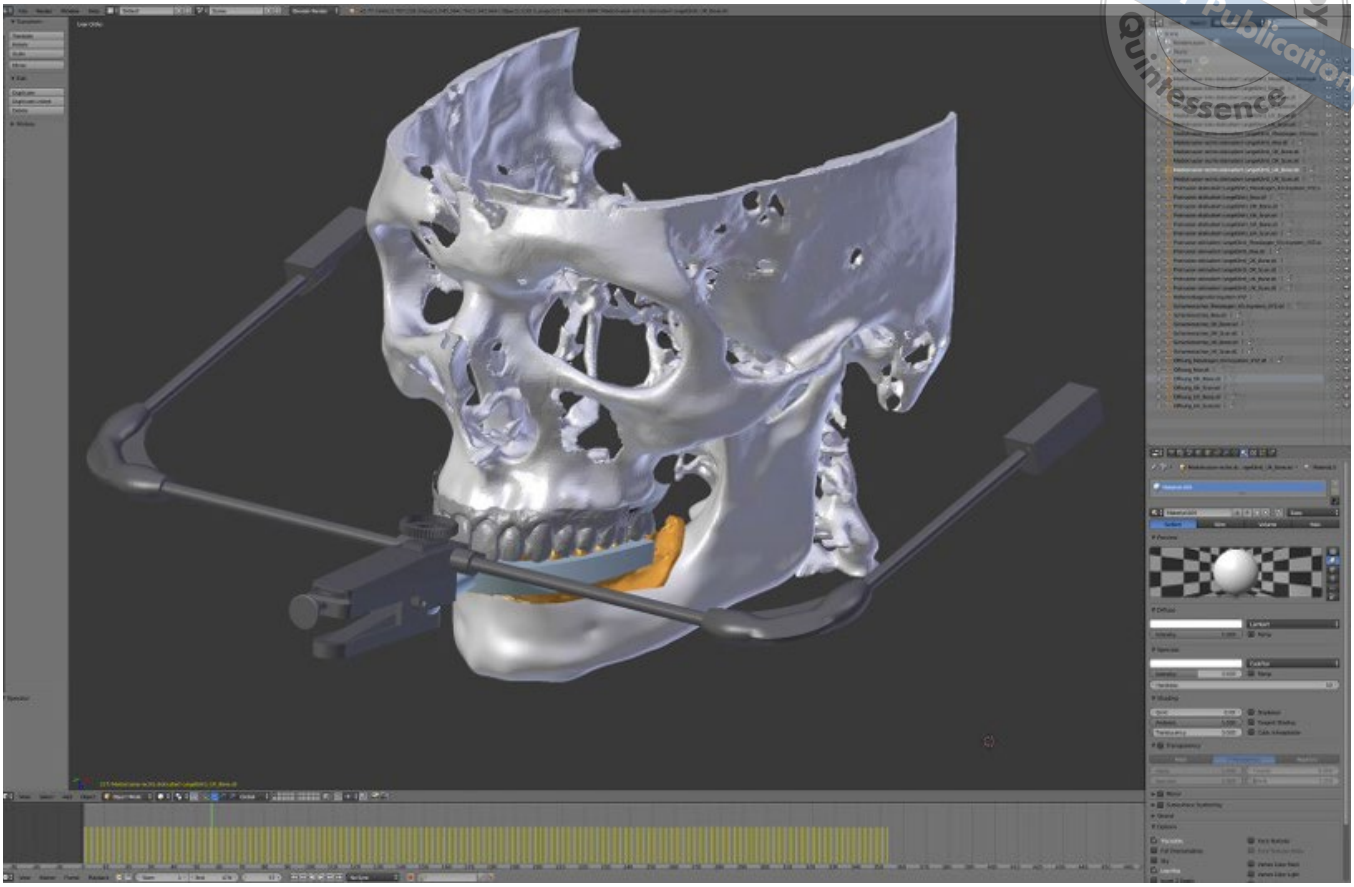


Abb. 34 Simulation der Kieferbewegung in der Software Blender.

Der Gesichtsscan ist der zweite Teil der Prozesskette im digitalen Workflow. Damit wird der Kopfbereich digital erfasst und dient als Referenz für die lagerichtige Bestimmung von Maxilla und den intra- und extraoralen Gesichtslinien. Im dritten Prozess werden die Patientenmodelle mit den dazugehörigen Transfermodellen im extraoralen Scanner vermessen. Der vierte Prozess ist die Zuordnung der Messdaten schädel- und artikulatorbezogen über das CAD PlaneTool PS1-3D. Am Ende des digitalen Workflows für die Herstellung von digitalem Zahnersatz steht die CAD-Software Modelier mit dem implementierten virtuellen Artikulator. Darin werden die möglichen Bewegungen simuliert und angewandt.[10]

Virtueller Artikulator

Der virtuelle Artikulator ist das Instrument, mit dem die möglichen Bewegungen des Patienten ausgeführt werden können. Er bereichert neben der Funktions- und der Okklusionsanalyse die Planung und Simulation komplexer zahnmedizinischer Versorgungen. Zum einen ist es möglich, parametrische Angaben von Translations- und Rotationswerten zu konfigurieren. Dabei können die Sollwerte einer Versorgung sehr genau geplant werden. Zum anderen ist jeder einzelne Arbeitsschritt kontrolliert und reversibel.[1] Um diesen Zweck zu erfüllen, wird eine mathematische Artikulation herangezogen. Alle Führungsflächen des virtuellen Artikulators werden dafür mathematisch-geometrisch-räumlich dreidimensional simuliert. Das birgt die Möglichkeit, breitgefächerte Einstellwerte einzusetzen. Die kondylaren Führungsflächen sind als Kreiszylinder mit konfigurierbarem Radius und Neigung zur horizontalen Kondylenbahnneigung enthalten, wobei die Inzisal- und die Eckzahnführung als Kugelsegment angelegt sind. Die Seitwärtsbewegungen, wie die Laterotrusion- und Bennettbewegung in Form eines Immediate Side-Shift, sind als Zwangsbewegungen hinterlegt und können in transversaler Verschiebung simuliert werden. Das Ergebnis ist eine räumliche Computersimulation, die alle Bewegungsrichtungen wie Öffnen, Schließen, Protrusion, Retrusion, Laterotrusion nach links und rechts

Copyright by Quintessence
Not for Publication

in Relation zu der Okklusion der Zähne ermöglicht.[9]

Ein anderer Ansatz könnte in Zukunft die direkte Vermessung der Kieferbewegungen gegeneinander mit Messmarkern darstellen. Hierbei werden dem Patienten Messmarker auf die Zähne und die Gingiva geklebt. Der Patient trägt einen Mundspanner, um die Messmarker für einen Scanner (Abb. 35) sichtbar zu machen.

Mit dem Streifenprojektionsverfahren werden über das Stereokamerasystem des Scanners die Messmarker in Bewegung erfasst und dann den STL-Daten der Kiefer einander zugeordnet. Der Kompaktscanner ist für Anwendungen, die eine besonders hohe Datendichte benötigen, mit 12 Megapixel Auflösung verfügbar. Dank der höheren Auflösung werden Oberflächenstrukturen und Prägungen noch detaillierter dargestellt. Ein Beispiel hierfür könnte der GOM ATOS Compact Scan 3-D-Scanner (Abb. 35) sein, mit dem Bewegungen und Abweichungen in Echtzeit mit Live-Tracking gemessen werden können. Das Fraunhofer IDG entwickelte ein neues 3-D-Scanningsystem, mit dem jedes Objekt in Echtzeit eingescannt und in 3-D digital abgebildet werden kann. Damit sind die Realbewegungen der Kiefer und Zähne gegeneinander im virtuellen Artikulator darstellbar. Bislang bestand diese Möglichkeit nur bei der Software Blender.

Abb. 35 GOM ATOS Scanner der Firma Gom.

Literatur

1. Gärtner C, Kordaß B. Der Virtuelle Artikulator: Entwicklung und Evaluation. Int J Comput Dent 2003; 6:11–24.
2. Gnan C. Arbeitsbeschreibung: Dynamische Okklusion (Artikulation). Quintessenz Zahntech 2006;32:1174–1195.
3. Marquardt S, Moser A. Funktionelle ästhetische Rehabilitation: Die Übertragung der realen anatomischen Parameter des Patienten in den Artikulator. Quintessenz Zahntech 2014;40:1406–1416.
4. McCollum BB, Stuart CE. A research report. South Pasadena, Calif.: Scientific Press, 1955.
5. Plaster, U. Natürliche Asymmetrien und die patientenindividuelle Wiedergabe der Okklusionsebene ohne traditionellen Transferbogen. Quintessenz Zahntech 2013;39:1266–1280.
6. Plaster, U. Das Plane-System- vom analogen Gips zum digitalen CAD Model. Quintessenz Zahntech 2014; 40:570–586.
7. Plaster U, Strauß M. PlaneSystem®. Quintessenz Zahntech 2015;41:282–296.
8. Reddy M. Object Files (.obj). 2017 http://www.martinreddy.net/gfx/3d/OBJ.spec (Zugriff: 08.07.2019).
9. Solaberrieta E. Design of a Virtual Articulator for the Simulation and Analysis. CIRP Design Conference 2009:323.
10. Tratter W. (39(5) 2013). Gesichtsscanner im digitalen Workflow. Quintessenz Zahntech 2013;39:678–682.
11. Wladowska P. Der digitale Workflow mit dem Zirkonzahn PlaneSystem®. Köln: Bachelorarbeit Praxishochschule Köln, 2017.

Porträtfoto bitte noch nachreichen

Prof. Dr. med. dent. Karsten Kamm
Professur für digitale Zahnmedizin
University DTMD Luxemburg
Professur für Dentale Anwendungsverfahren und digitale Fertigungsverfahren pH Köln
Praxis Zahngesundheit Baden-Baden
Hans-Bredow-Str. 24
76530 Baden-Baden
E-Mail: karsten.kamm@dtmd.eu; kk@z-b-b.de