

Digitale KFO-Therapie auf Basis von 3D-Voxel-Datensätzen aus dem DVT

Ein Beitrag von Prof. Dr. Gerhard Polzar (KKU, Bidingen) und Dipl.-Ing. Dipl.-Inform. Frank Hornung (Chemnitz).



Abb. 1



Abb. 2

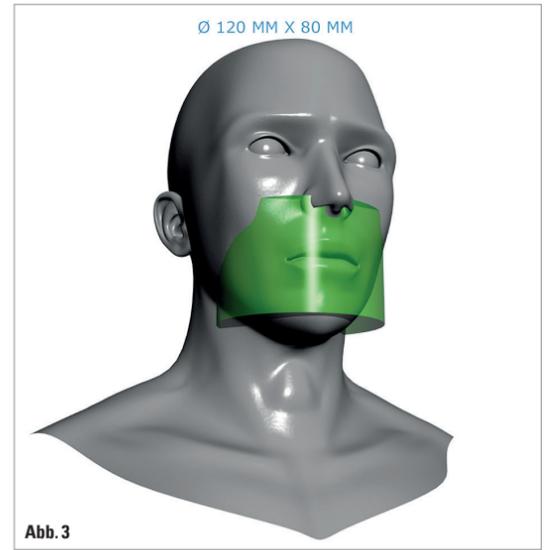


Abb. 3

Abb. 1: DVT-Gerät (WhiteFox, Fa. ACTEON) mit exzentrischer Patientenposition zur Erreichung einer besseren Bildqualität. – **Abb. 2:** Beispiel der Möglichkeiten einer DVT-Low-Dose-Aufnahme mit Darstellung der HWS, der Atemwege und der Dentition. – **Abb. 3:** Field of View von 80 x 120 mm mit Positionierung für beide Kiefer.

Fragestellung

Ist es möglich, eine kieferorthopädische Behandlungsführung allein aufgrund von 3D-Röntgen-datensätzen, sogenannten Voxel, wie sie mit einem DVT generiert werden können, aufzubauen? Kann man allein aufgrund dieser Daten entsprechende kieferorthopädische Schienen, sogenannte Aligner produzieren, die dann die Zähne in die gewünschte Richtung verschieben? Ein als Pilotstudie angelegtes Experiment sollte klären, ob dies mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten des Rapid Prototyping und der 3D-Drucktechniken unter Verwendung von DICOM-Datensätzen eines digitalen Volumentomografen (WhiteFox, Fa. ACTEON, Abb. 1) durchführbar ist.

Zur Strahlenexposition

Addiert man die Strahlenbelastung eines erwachsenen Patienten bei Verwendung moderner digitaler 2D-Aufnahmen (PA-Status ca. 40 μ Sv, FRS ca. 5 μ Sv, PA-Aufnahme ca. 5 μ Sv, OPT ca. 24 μ Sv), so erhält man eine Gesamtbelastung von über 80 μ Sv, bei analogem Röntgen liegt die Strahlenexposition nochmals um ca. 70 Prozent höher. Nach einer hierzu veröffentlichten Studie (Ludlow & Ivanovic, Jada 2008) beträgt die Summe von Zahnstatus, OPT, PA und FRS-Aufnahme mindestens 184,4 μ Sv, wobei die Kiefergelenke noch nicht hinreichend erfasst sind. Bei einer großformatigen DVT-Aufnahme im Low-Dose-Modus oder einer normalen, hochauflösenden Aufnahme mit FOV von

80 x 120 mm werden die Patienten jedoch nur einer Strahlenbelastung von 40 bis 50 μ Sv ausgesetzt. Selbst die höchste Qualitätsstufe heutiger moderner DVT-Geräte (ab 2012) ergibt bei dem größten FOV eine Strahlenexposition von unter 250 μ Sv. Es gibt standardisierte Testbedingungen zu Dosismessungen (ICRP-Richtlinien von 2007). Leider wird sich jedoch nicht (immer) an die von der ICRP vorgegebenen Testbedingungen gehalten, was zu Diskussionen in diesem Zusammenhang führt. Auch wenn die Autoindustrie mögeln mag, so will doch jeder Käufer eines Autos wissen, wie viel Benzin ein Auto auf 100 Kilometern mit einer Geschwindigkeit von konstant 100 km/h verbraucht. Jeder weiß, dass man so nicht Auto fährt, sondern dynamisch

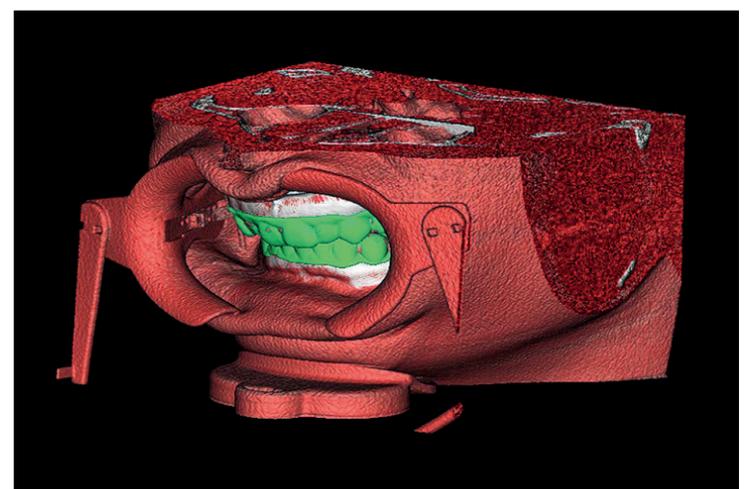


Abb. 8: Superposition von DVT-Datensatz (rot), STL-Oberflächendatensatz (weiß) und einer ersten möglichen Schiene mit individueller Wandstärke als Rapid-Prototyping hergestellte Bio-Aligner™ nach Prof. Polzar (KKU).

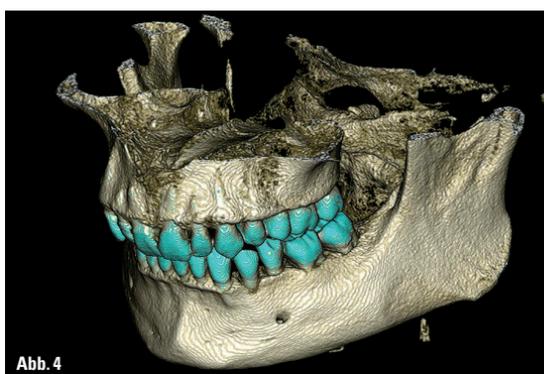


Abb. 4

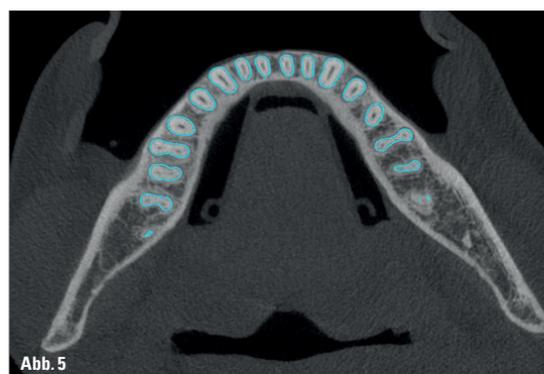


Abb. 5

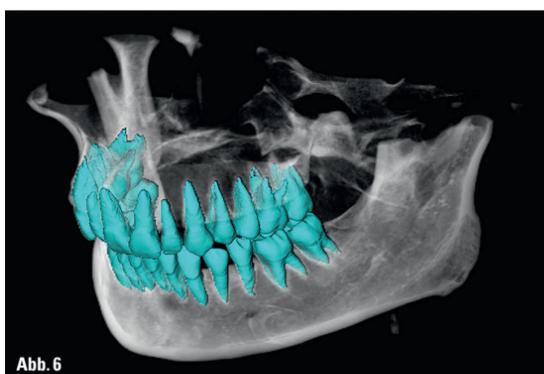


Abb. 6

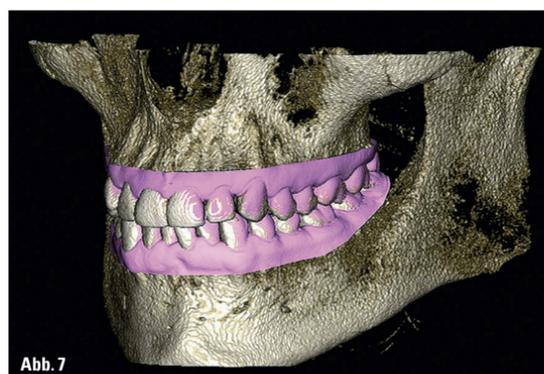


Abb. 7

Abb. 4: Darstellen der Schmelzgrenze durch Generieren und Überlagerung des STL-Datensatzes (türkis). – **Abb. 5:** Horizontalschnitt im DVT mit Einblendung des STL-Datensatzes zur separaten Darstellung der Zähne. – **Abb. 6:** Die mit STL-Datensatz separierten Zähne (türkis) sind hier in der 3D-DVT-Ansicht wiedergegeben. Nach dem Separieren der Zähne und der Weichteiloberfläche zur Luft werden diese beiden Datensätze zusammengeführt und bilden dann die Grundeinheit zur Weiterverarbeitung (als Ersatz für den Abdruck) für die Herstellung von kieferorthopädischen Alignern. – **Abb. 7:** Im DVT reimportierter und separat dargestellter, schon getrimmter Oberflächendatensatz der Zähne und der marginalen Gingiva. Der hier rosa dargestellte STL-Datensatz ist die ermittelte Arbeitsgrundlage und Ausgangsposition für die Herstellung der kieferorthopädischen Aligner.

mal schneller oder mal langsamer, aber man hat damit so etwas wie einen Richtwert für das jeweilige Auto. Solche getesteten Richtwerte an vorgeschriebenen menschenähnlichen Kopfdummies und die Pflicht, diese jedem Käufer zu präsentieren, gibt es leider bis heute nicht. Dies erhöht nicht gerade die Transparenz auf diesem heiklen Feld und erleichtert nicht den Umgang und die Aufklärungspflicht des Behandlers gegenüber seinem Patienten. Jeder einwöchige Schwarzwaldurlaub (+329 μ Sv) hat eine höhere zusätzliche Strahlenbelastung zur Folge als die Summation aller strahlenbelastenden Aufnahmen während einer kieferorthopädischen Therapie, jedoch warnt kein Reiseveranstalter vor diesen „Gefahren“ der erhöhten ionisierenden Strahlenbelastung in dem schönen Urlaubsgebiet. Bei gleichzeitig geringerer Strahlenexposition als mit den herkömmlichen Aufnahmetechniken habe ich eine wesentlich höhere diagnostische Aussagekraft im DVT. Während auf einem Zahnfilm nur etwa 30 Prozent aller Furkationen sichtbar werden, sind im DVT über 90 Prozent dieser PA-Läsionen im DVT eindeutig befundbar.

Material und Methode

Die in der Kieferorthopädie bei erwachsenen Patienten üblicherweise verwendeten Röntgenaufnahmen geben leider keinen hinreichenden Aufschluss auf das alveoläre Knochenangebot. Auch ist eine Symmetriebeurteilung nur durch eine zusätzliche Posterior-anterior-Aufnahme möglich. Ebenfalls können weder die Kiefergelenke noch die Atemwege hinreichend beurteilt werden. Eine dreidimensionale Beurteilung ist mit 2D-Röntgenaufnahmen nur in ganz beschränktem Maße möglich. Dahingegen eröffnen die diagnostischen Möglichkeiten der digitalen Volumentomografie völlig neue Horizonte (Abb. 2). Die vorliegende Studie soll klären, ob diese in das allgemein anerkannte DICOM-Format gewandelten Voxel-Datensätze aus dem DVT auch dazu ausreichen, eine komplette kieferorthopädische Behandlung ohne jegliche Abdrucknahme durchzuführen. Aufgabe ist es, mithilfe einer DVT-Aufnahme mit FOV von 80 x 120 mm (Abb. 3) ein geeignetes virtuelles Modell herzustellen (Abb. 4 bis 8), welches dann als Grundlage für eine

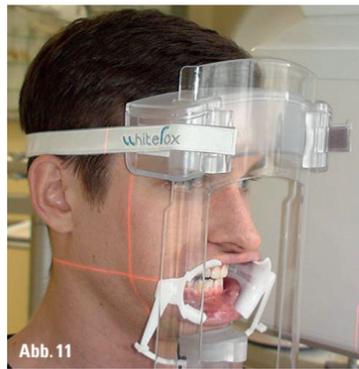


Abb. 9–11: Vorbereiten und Positionieren des Patienten für die wangenextendierte DVT-Aufnahme.

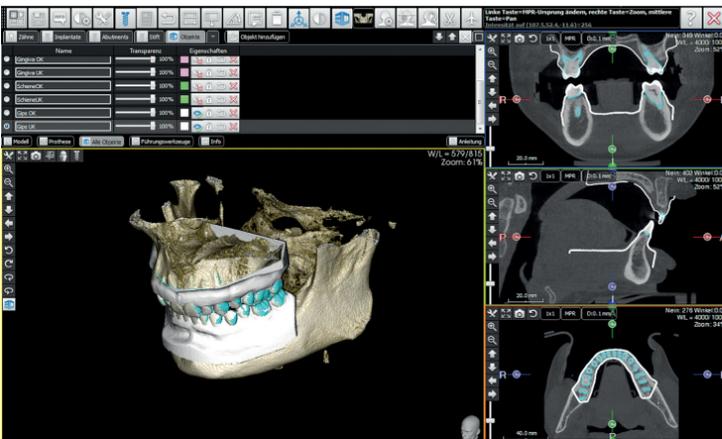


Abb. 12: Vergleich und Superposition von DVT-Aufnahme, STL-Datensatz und geröntgtem Gipsmodell einer Patientin zur Kontrolle der Darstellung der einzelnen Strukturen und zum Vergleich des Workflows der digitalen Datenerhebung. Die STL-Daten aus dem DVT sind hier türkis und die Oberflächendaten aus dem Gipsmodell weiß dargestellt.

kieferorthopädische Alignertherapie herangezogen wird. Um die Abgrenzung des Zahnschmelzes zu den anliegenden Weichgeweben besser darzustellen, werden die Aufnahmen mit einem für das Bracketkleben zu verwendenden DryField System (Abb. 9 bis 11) durchgeführt. Dabei wird die Zunge durch ein Zungenkörnchen von den unteren Schneidezähnen ferngehalten. Um die bestmögliche Ausgangssituation zu erhalten, werden die Aufnahmen in der höchsten Qualitätsstufe angefertigt.

Aus den so gewonnenen Voxel werden dann die einzelnen interessanten Gewebegrenzen (Zahnschmelz-Dentin [Abb. 6], Knochen, Weichgewebe [Abb. 7], Luft) durch Herstellen von zweidimensionalen Oberflächendatensätzen im dreidimensionalen Raum, sogenannte STL-Datensätze, dargestellt (Abb. 5 und 8) und zur weiteren Verarbeitung und Simulation von Behandlungsplanungen dem entsprechenden Labor zugeführt.

Die bis dato gewonnenen und eingescannten anatomischen Strukturen sollen einer Simulation eines auf herkömmlicher Weise durch Silikonabdrucknahme entstandenen Kiefermodells gleichwertig sein. Zur Überprüfung der Genauigkeit der gewonnenen Werte werden parallel Gipsmodelle aus Alginateabformungen hergestellt, in 3D geröntgt und mit dem nativen Ergebnis verglichen (Abb. 12).

Fortsetzung auf Seite 16 KN



Abb. 13



Abb. 14

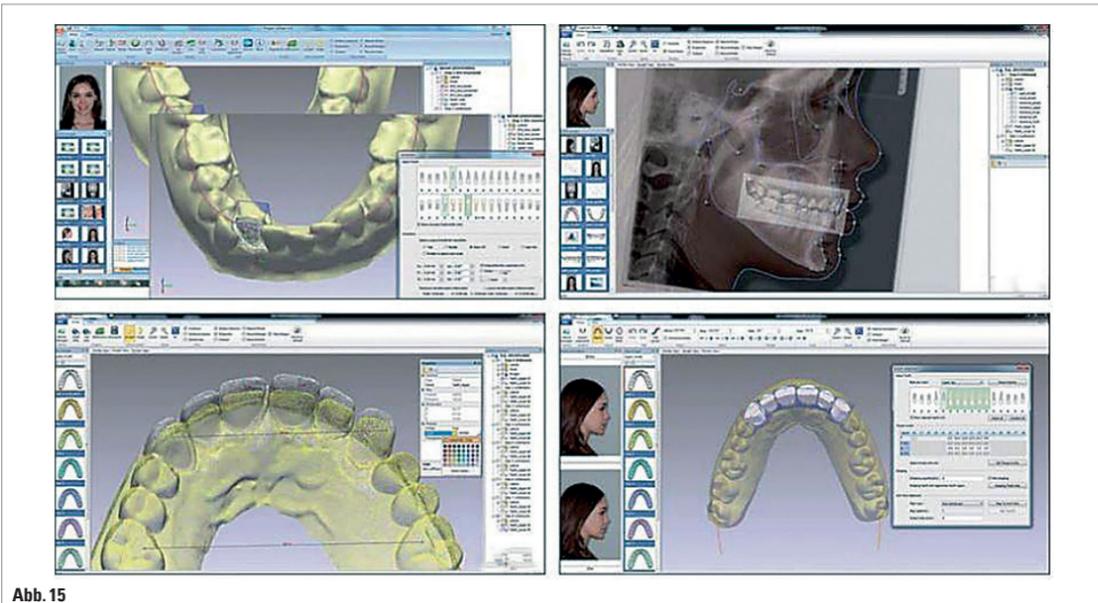


Abb. 15

Abb. 13: Herstellungsprozess zum Tiefziehen der Tu-PAN-Folien (eClinger®). – Abb. 14: Drei verschiedene Alignerstärken nach Tiefziehen am Labormodell. Für zukünftige Alignerherstellungen sollten die Laborprozesse auch voll digital ablaufen können, ähnlich der Herstellung von Invisalign®-Schielen. – Abb. 15: Monitoring bei der Laborfertigung von eClinger®-Schielen.

3M™ Transbond™ XT Lichthärtender Kleber.



Einfach.
Stark.
Zuverlässig.

Interesse?
Rufen Sie uns an unter
08191/9474-5000



Abb. 16: Beispiel zum Einsetzen der Aligner.



Abb. 17: DVT-Frontalansicht vor der Korrektur der Zahnfehlstellung, insbesondere der UK-Front. – Abb. 18: DVT-Frontalansicht nach Korrektur des unteren Frontengstands mit dem Schienensystem. – Abb. 19 und 20: UK-Aufsicht der DVT-Aufnahme vor und nach der Zahnfehlstellungskorrektur.

Fortsetzung von Seite 15

Patientenauswahl

Es waren insgesamt vier Patienten für dieses neue Projekt vorgesehen, von denen leider gleich zu Beginn zwei wegen Umzugs und mangelnder Mitarbeit ausgefallen sind. Die Auswahlkriterien für diese Pilotpatienten waren wie folgt definiert:

- Es sollten keine zu schweren Fälle sein.
- Die Patienten sollten einen motivierten Eindruck machen.

- Sie sollten mindestens als adult (hier Erwachsene ab dem 21. Lebensjahr) gelten und
- sich möglichst keiner kieferorthopädischen Vorbehandlung unterzogen haben.

Verlauf der Fälle eins und zwei und Ergebnis des ersten Falls

Der erste Fall ist ein junger Mann von 26 Jahren (Abb. 21). Es wurden zunächst die diagnostisch-therapeutischen Vorbereitungen

einschließlich DVT-Aufnahmen (Abb. 22) getroffen (Abb. 17 und 19 und 23 bis 29).

Nach Herstellung der erforderlichen STL-Datensätze (Abb. 7 und 30) und Korrespondenz des hierfür neuen Workflows konnten fünf Monate später die ersten Aligner (Abb. 31) geliefert und eingesetzt werden (Abb. 32 bis 35). Die eClinger® werden von den Patienten jeweils nur nachts getragen. Pro Behandlungsschritt gibt es je drei in der Form identische Aligner je Kiefer, jedoch mit unterschiedlicher Materialdicke. Der erste Aligner weist eine Stärke von 0,5mm auf, der zweite von 0,62mm und der dritte ist 0,75mm stark. Die verwendeten Folien sind Tu-PAN-Folien (Fa. SCHEU-DENTAL) (Abb. 14). Nachdem die drei unterschiedlich dicken Aligner hintereinander getragen wurden, konnte zur nächsten Behandlungsstufe gewechselt werden (Abb. 36 bis 39). Es gab insgesamt acht Behandlungsstufen im OK und neun im UK (Abb. 40). Jede Stufe erforderte demnach drei Wochen nächtliche Tragezeit.

In der letzten Stufe wurden Korrekturdruckpunkte zur Verbesserung der Eckzahnrotation an Zahn 13 vorgenommen. Es zeigte sich jedoch, dass die Probleme der Eckzahnrotation mit eClinger®-Schienen ziemlich genau denen entsprachen, die bei Invisalign®-Schienen auftreten (Abb. 41 bis 44). Nur mit dem Unterschied, dass ohne die Verwendung von Attachments eine Rotation der zuckerhutförmig verlaufenden Kegelkronen eine Derotation der Eckzähne kaum möglich war. Nur etwa 30 Prozent der gewünschten Bewegung konnten bei den Eckzähnen realisiert werden (Abb. 45 bis 48). Aufgrund terminlicher Schwierigkeiten und zu früher Zufriedenheit des Patienten kam es in der letzten Phase leider noch zu einem leichten Rezidiv in der UK-Front. Nach Abschluss der

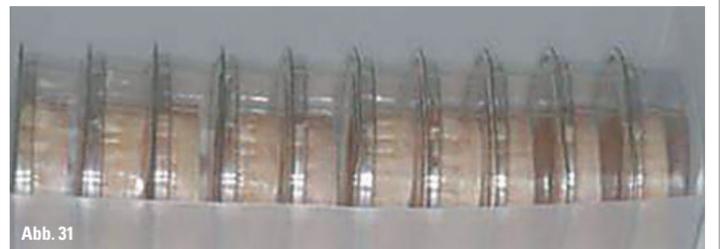
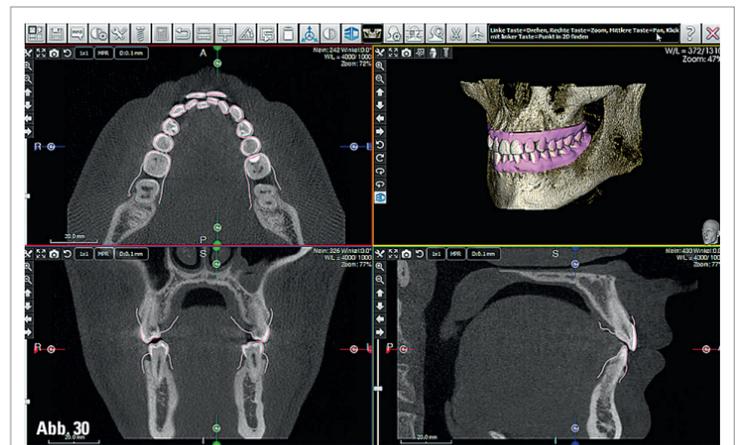


Abb. 30: Überlagerung des Arbeits-STL-Datensatzes zurück in die ursprüngliche DVT-Aufnahme. – Abb. 31: Die gelieferten Korrekturschienen nach Herstellung in Korea.



Abb. 32–35: Die ersten Schienen in situ. Deutlich ist, dass die eClinger® nicht ganz so gut sitzen, da die Einzelschritte der Zahnbewegungen viel größer sind als beim Invisalign®-System. – Abb. 36–39: Nach genau der Hälfte, nach vier von 8/9 Schritten sieht man, dass sich der frontale Engstand schon komplett aufgelöst hatte und durch Intrusion der Front eine Korrektur des Tiefbisses erfolgte.

Behandlung konnten dann im OK und UK zur Langzeitstabilisation hierfür notwendigen Lingualretainer eingesetzt werden. Die gesamte Behandlungszeit dauerte sieben Monate. Insgesamt waren sieben Termine erforderlich. Während der Behandlung an sich wurden nur drei Kontrolltermine wahrgenommen.

Der Patient zeigte sich mit dem Ergebnis sehr zufrieden. Aus Sicht des Behandlers hätte bei noch konsequenterem Tragen in der UK-Front eventuell ein noch besseres Ergebnis erreicht werden können. Die nach Behandlungsabschluss noch vorzufindende leichte laterale Nonokklusion entspricht der vertikalen

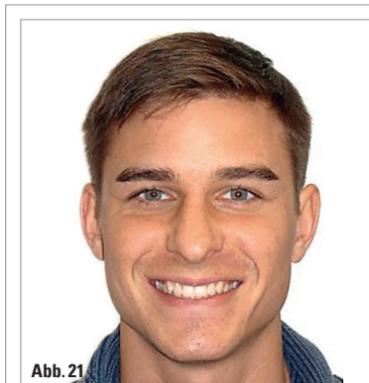


Abb. 21



Abb. 23



Abb. 27



Abb. 24



Abb. 28



Abb. 25



Abb. 29



Abb. 26

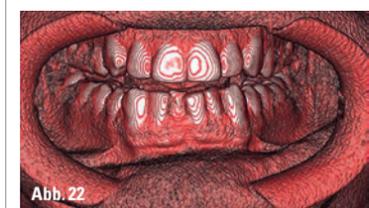


Abb. 22

Abb. 21: Patient in Frontalansicht lächelnd vor der Alignertherapie. – Abb. 22: Gerendeter Oberflächendatensatz aus dem DVT. Die gerenderten Datensätze entsprechen nicht genau der Schnittbildansicht oder dem STL-Datensatz, da sie aufgrund der hohen Datensätze aller 3D-Datenkoordinaten nicht die Genauigkeit aufweisen können, die man mit einem STL oder Schnittbild erreichen kann. Hier die Ansicht mit dem Wangenspreizer.

Abb. 23–29: Intraorale Aufnahmen vor Therapiebeginn mit sich deutlich abzeichnendem unteren Frontengstand und rotierten oberen Eckzähnen.

8/9 Schritte 3 x 9 = 27 Wochen

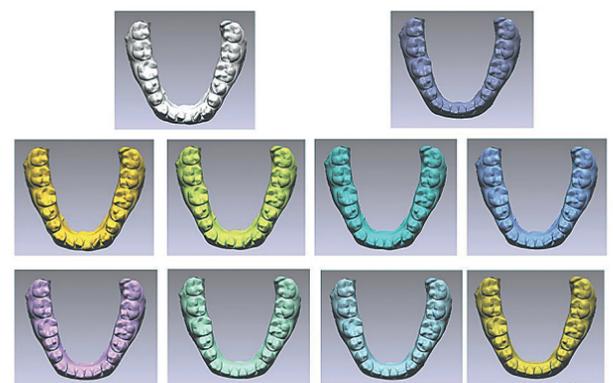


Abb. 40: Die neun Stages der UK-Korrektur in einzelnen Schritten dargestellt.



Abb. 41–44: Der Patient mit den letzten Alignern in situ. Die Passungsgenauigkeit durch mangelnde Rotation des Zahns 13 und nicht erfolgte Aufrichtung des Zahns 16 fallen durch den Luftschnitt deutlich auf. Für solche Zahnbewegungen sind derzeit noch Attachments dringend erforderlich. – Abb. 45–48: Intraorale Aufnahmen nach Abschluss der Behandlung und vor Aufbau der Schneidekanten. Die laterale Nonokklusion durch Infraposition der Seitenzähne fällt noch auf. Erfahrungsgemäß setzt sich der Biss nach sechs bis zwölf Wochen und die Seitenzähne weisen dann eine gute Okklusion auf.

Nebenwirkung bei einer Invisalign®-Therapie (Abb. 45 und 48). Nach Abschluss der aktiven Behandlung korrigiert sich diese minimale vertikale Diskrepanz durch Autoeruption der Seitenzähne ganz von selbst. Im zweiten Fall lag bei einer 23-jährigen Patientin eine moderate Klasse II mit Deckbiss und leichtem Engstand vor. Die Zähne 11 und 21 standen extrudiert im tiefen Biss. Wegen eines Umzugs in eine weiter weg gelegene Großstadt konnte die Patientin nicht mehr ausreichend überwacht und kontrolliert werden. Trotzdem war die Patientin mit ihrer leichten Verbesserung des Deckbisses und der gut sichtbaren Intrusion der oberen mittleren Schneidezähne sehr zufrieden. Für die acht Behandlungsschritte benötigte die Patientin acht Monate.

Vergleich

Vergleicht man die DVT-Aufnahmen des ersten Falls vom Anfang (Abb. 17 und 19) mit denen am Ende (Abb. 18 und 20), so ist die deutliche Verbesserung in der UK-Front mit Auflösung des Engstands sofort erkennbar. Durch Superposition der Anfangs-DVT und Einblendung des dazugehörigen STL-Datensatzes (hier rosa) mit dem durch die Abschluss-DVT ermittelten STL-Datensatz (hier türkis) werden die Zahnbewegungen in der Unterkieferfront und die Veränderungen zum Anfangsbefund prägnant aufgezeichnet (Abb. 49 bis 53). Damit ist der Nachweis erbracht, dass es möglich ist, alleine aufgrund eines DVT-Datensatzes unter Zuhilfenahme von Folientechniken orthodontische Zahnbewegungen durchzuführen und

damit Zahnfehlstellungen zu korrigieren.

Ergebnis

Beim ersten Patienten konnte eine deutliche Verbesserung der dentalen Ästhetik, alleine mit dem Einsatz einer 3D-DVT-Aufnahme erreicht werden. Die üblichen Probleme zur Derotation der Eckzähne, welche mit Folientechniken auftraten, zeigten sich beim ersten Fall umso mehr, da bei der eClinger®-Technik keine Attachments zum Einsatz kommen. Beim zweiten Fall kam es durch die äußeren Umstände und wegen eines Umzugs durch die dann fehlende Kontrolle nur zum Teilerfolg. Es konnte jedoch auch hier der Nachweis geführt werden, dass sich die Zähne alleine auf der Grundlage von 3D-Röntgendaten-

sätzen mit radiografischer Abformung verschieben lassen konnten.

Fazit

Mit der vorliegenden Studie konnte der Nachweis geliefert werden, dass sich alleine auf der Grundlage von 3D-Röntgendatensätzen orthodontische Bewegungen effizient realisieren lassen. Neben einer besseren Übersicht über das Behandlungsfeld, der Möglichkeit des Einbeziehens von Knochen, Zahnwurzelform und Verlauf des Alveolarkamms, kann bei weiterer Professionalisierung auf das Herstellen von Gipsmodellen oder jegliche Form der Abdruckname komplett verzichtet werden. Die erweiterte diagnostische Aussagekraft der DVT-Aufnahme mit einer vergleichsweise dazu reduzierten Strahlenbelastung ent-

spricht ganz dem geforderten ALARA-Prinzip, welches für die Anwendung von ionisierenden Strahlungen zu befolgen ist. Mit großer Spannung richtet sich hier die Aufmerksamkeit in die Zukunft. Systematisierte Behandlungsabläufe unter Einbeziehung von 3D-DVT-Scans für Diagnostik und Therapie lassen eine erhebliche Qualitätssteigerung in der zukünftigen kieferorthopädischen Behandlung erwarten. **KN**

(Literatur beim Verfasser)

KN Kurzvita



Prof. Dr. Gerhard Polzar (KKU)
[Autoreninfo]



Dipl.-Ing. Dipl.-Inform. Frank Hornung
[Autoreninfo]



KN Adresse

Prof. Dr. Gerhard Polzar (KKU)
Vogelsbergstraße 1+3
63654 Büdingen
Tel.: 06042 2221
Fax: 06042 2223
dr-polzar@gmx.de
www.zahnspange-kieferorthopaedie.de

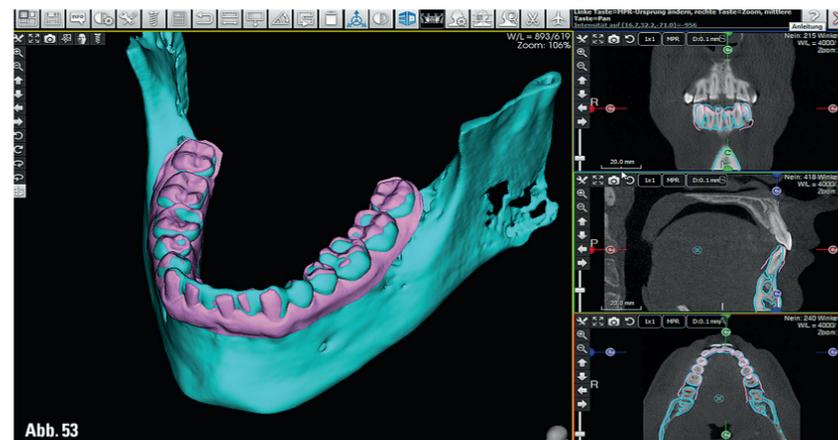
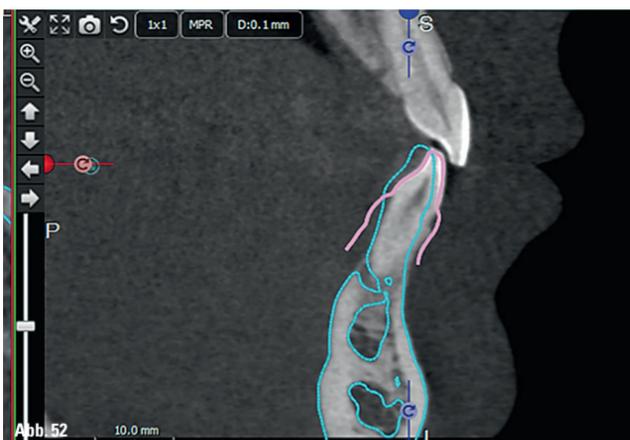
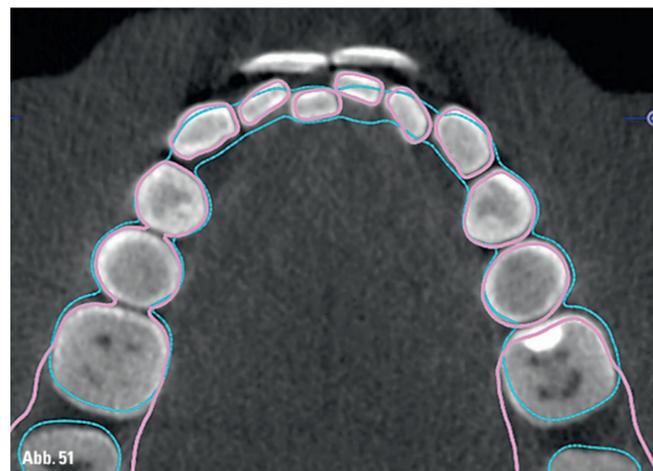
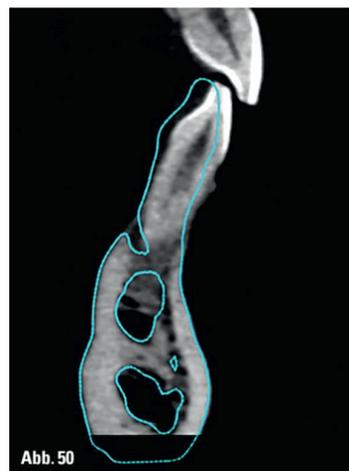
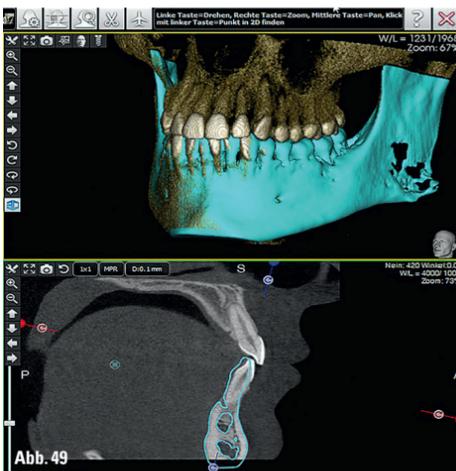


Abb. 49: DVT-Aufnahme vor Behandlungsbeginn mit STL-Datensatzüberlagerung des UK aus der abschließenden DVT-Aufnahme. Die orthodontische Zahnbewegung zeichnet sich deutlich ab. – Abb. 50: Retrusion der UK-Front am Beispiel des Zahns 31 durch Einblenden des STL-Datensatzes aus der Abschlussaufnahme in die DVT-Aufnahme zu Behandlungsbeginn. – Abb. 51: Darstellung der STL-Datensätze von Anfang und Ende der Therapie in dem DVT-Schnittbild vom Behandlungsbeginn. Die rosa Linien sind die Durchschnitte des Anfangsdatsatzes, die türkisfarbenen Linien ergeben sich aus dem STL-Datensatz, der zum Abschluss ermittelt wurde. Der Beweis, dass sich auf der Grundlage von 3D-Voxel des DVTs Zähne bewegen lassen, ist hiermit getroffen. – Abb. 52: Überlagerung der STL-Daten vor und nach der Therapie im sagittalen DVT-Schnittbild vom Anfang mit dargestellter Retrusion des Frontzahns 31. – Abb. 53: Monitoring der Überlagerung der beiden STL-Datensätze auf der WhiteFox-Software, hier rosa dargestellt der Anfangsdatsatz zur Alignerherstellung mit dem abschließend ermittelten Datensatz vom Behandlungsende, dargestellt im DVT vor Behandlungsbeginn. Die überlagerten Strukturen lassen den Beweis erkennen, dass orthodontische Bewegungen alleine aufgrund von DVT-Aufnahmen möglich sind.