

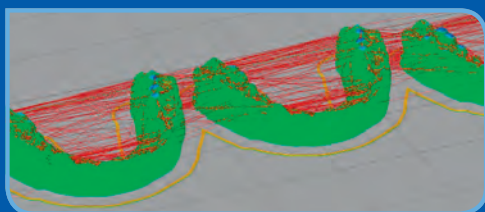
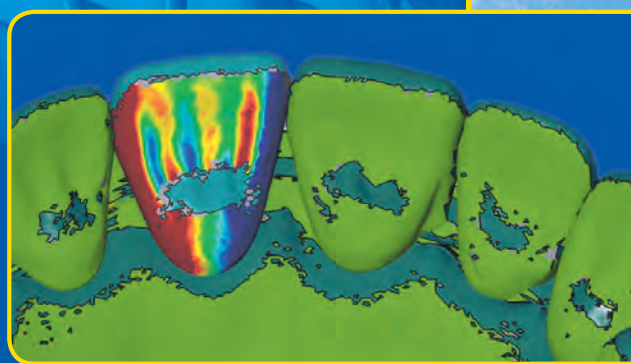
SPITZENFORSCHUNG

IN DER KIEFERORTHOPÄDIE

2017/18



WISSEN
Lebendige
SCHAFT



Biologische Realität computergeplanter Zahnbewegungen mit Alignern – eine multizentrische, prospektive Untersuchung

PROF. DR. KARL-FRIEDRICH KREY M.M.E.¹, DR. PETER SCHICKER²,
DR. CHRISTIAN SCHWAHN³, DR. PHILIPP EIGENWILLIG⁴

- 1 Poliklinik für Kieferorthopädie, Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, Universitätsmedizin Greifswald
- 2 Kieferorthopädische Praxis, Bergisch Gladbach
- 3 Poliklinik für zahnärztliche Prothetik, Alterszahnheilkunde und medizinische Werkstoffkunde, Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, Universitätsmedizin Greifswald
- 4 Kieferorthopädische Praxis, Brandenburg an der Havel

ZUSAMMENFASSUNG

Die Therapie mit transparenten Schienen zur Zahnstellungskorrektur hat in den vergangenen Jahren erhebliche Fortschritte gemacht und ist mittlerweile fester Bestandteil des kieferorthopädischen Behandlungsspektrums. Aufgrund der Entwicklung intraoraler Scansysteme und der additiven Fertigungsverfahren ist es heute möglich, in der kieferorthopädischen Praxis den gesamten Prozess der Planung und Herstellung von Alignern zu realisieren.

Ausgehend von einem hier beschriebenen Workflow von intraoralem Scan, 3D-Rekonstruktion von Modellen, Planung der Behandlung und 3D-Druck der Kiefermodelle der einzelnen Behandlungsstufen wird diese Therapieform auch einer klinischen wissenschaftlicher Auswertung zugänglicher. Entscheidender Faktor war jedoch auch die Entwicklung leistungsfähiger Softwaresysteme zur Simulation und Umsetzung der Therapie.

Nach in vitro Untersuchungen zu Fragen der Genauigkeit von FDM-3D-Drucken, der Überlagerung von digitalen Modellen und der Detektion von Veränderungen mit höchster Genauigkeit wird eine klinische Studie vorgestellt.

In dieser multizentrischen, prospektiven Untersuchung wird unter den genannten Voraussetzungen eine Analyse der tatsächlichen Zahnbewegungen auf der Ebene der einzelnen Schiene erstmals möglich. Ziel ist es, anhand der gewonnenen Daten die Aligner-Therapie weiter zu optimieren und an zahn- und patientenindividuelle Spezifika besser anpassen zu können.

EINLEITUNG

Die Therapie mit Alignern hat sich in der Kieferorthopädie ergänzend zur Multibrackettherapie sowie den aktiven Platten und funktionskieferorthopädischen Geräten als viertes Behandlungssystem zur Korrektur von Zahnfehlstellungen etabliert. Herausragende Merkmale sind der hohe Patientenkomfort (Miller et al. 2007, Fujiyama et al.

2014), die Vermeidung von Demineralisation, weniger Wurzelresorptionen (Brezniak & Wassersein 2008) und die ästhetischen Vorteile. Als herausnehmbares Behandlungsmittel ist es aber in seiner Biomechanik näher an den festsitzenden Apparaturen als bei den vorwiegend über punktuelle Kraftapplikation wirkenden aktiven Platten oder den neuromuskulär aktivierten funktionskieferorthopädischen Geräten angesiedelt

Überlegungen, mittels einer Abfolge von Schienen Zähne zu bewegen, sind in der Kieferorthopädie schon seit langer Zeit bekannt (Kesling 1945, Nahoum 1964, Rinchuse & Rinchuse 1997) und klinisch umgesetzt. Erst durch die Anwendung moderner CAD/CAM Verfahren konnte diese Therapie aber einem breiten Anwenderkreis zugänglich gemacht werden. Sie versetzen den Kieferorthopäden nun in die Lage, vorhersagbar gute Ergebnisse zu erzielen. Die überwiegende Mehrzahl der Studien bezieht sich auf Invisalign® (Align Technology, Santa Clara, Calif.). Seit den Anfängen 1999 (z.B. erste Case-Reports von Miller & Derakhshan 2002) sind damit eine Vielzahl von Patienten erfolgreich behandelt worden. Nach anfangs einfacheren Malokklusionen (Boyd et al. 2000) wurden in der Folge auch komplexere Fälle vorgestellt (Giancotti & di Girolamo 2009, Torres et al. 2011).

Mit ausreichender klinischer Erfahrung und unter Berücksichtigung der kontinuierlichen Verbesserung der Alignersysteme sind auch schwierige Behandlungsaufgaben lösbar (Schupp et al. 2013). Bei allen positiven Erfahrungen sind aber auch die bisherigen Schwachstellen der Aligner-Systeme klar zu benennen (Raghunath et al. 2012). So ist die biologische Reaktion gelegentlich nicht identisch mit der computergenerierten Planung, und unbefriedigende Therapieverläufe sind nicht selten auf individuelle Differenzen zwischen Planung und Reaktion zurückzuführen. Zudem ist bei der Interpretation von in vitro-Studien zu beachten, dass okklusale Kräfte die durch die Aligner generierten Kräfte insbesondere bei Rotationen und Intrusionen modulieren (Hahn et al. 2011).

Trotz einer ganzen Anzahl von Studien sind die biomechanischen Wirkungen von Alignern noch nicht vollständig untersucht. So ist das Abheben der Aligner bei Torqueapplikation zu nennen (Hahn et al. 2010). Diese Schwierigkeiten der Torqueapplikation sind allen Aligner-Systemen inhärent (Ercoli et al. 2014).

Ein wesentlicher Faktor für den Erfolg einer Behandlung ist das Staging, also die Aufteilung der Bewegungen in biomechanisch günstige Teilschritte. Dabei muss auch an Verankerungsstrategien und eventuell ergänzende Attachments gedacht werden.

Bei Simon et al. 2014 findet sich eine detaillierte Übersicht zu den empfohlenen Zahnbewegungen. Es handelt sich dabei um gemittelte Werte der Differenz zwischen geplanter Zahnbewegung (ClinCheck®) und realer Zahnbewegung in der Gesamtübersicht der Behandlung. Dies korrespondiert mit Angaben aus der Literatur, wo angegeben wird, dass sich Rotationen von Zähnen mit bis zu 2° je Schiene korrigieren lassen (Frongia & Castroflora 2011). Nach den Herstellerempfehlungen sind metrische Bewegungen von 0,25-0,33 mm als Maximum anzusehen (ClinCheck® Guide 1.0). Die ausführlichste klinische Anleitung zur Festlegung der Bewegungen und der approximalen Schmelzreduktion ist im Rahmen der Behandlung mit CA®-Alignern (Scheu Dental, Iserlohn) dokumentiert (empfohlene Bewegungen nach Pablo Escharri).

Auch wenn in Fallberichten von einer sehr hohen Übereinstimmung der Planung mit dem Behandlungsergebnis berichtet wird (Faltin et al. 2003), trifft dies offenbar nicht für alle Patienten zu.

Einige Studien widmen sich dem Vergleich der virtuellen Planung mit der erreichten Zahnstellung im Laufe der Gesamtbehandlung. So konnten Kravitz et al. (2009) detailliert zeigen, dass Lingual-Kippung (47,1%) akkurater eintritt als Extrusion der oberen Inzisiven (18,3%). Neuere Untersuchungen zeigten eine mittlere Zielerreichung von 57% (Chisari et al. 2014) und 59,3% (Simon et al. 2014b).

Systematische Übersichtsarbeiten über die Effektivität der Aligner-Behandlung sind unter Vorbehalt zu interpretieren, da die Studienlage sehr heterogen ist, wie Rossini et al. 2015 feststellten.

Untersuchungen zu den Bewegungen auf Ebene der einzelnen Aligner finden sich bisher in der Literatur nicht.

FRAGESTELLUNG: PRÄZISIERUNG EINES EMPIRISCHEN MODELLS DER ZAHNBEWEGUNG MITTELS ALIGNERN ALS VORAUSSETZUNG FÜR EIN OPTIMALES, AN DEN INDIVIDUELLEN PATIENTEN ANGEPASSTES STAGING

KOMPLETT DIGITALER »IN-OFFICE«-WORKFLOW FÜR ALIGNER ALS VORAUSSETZUNG

Als Voraussetzung für die Untersuchung steht bei allen an der Studie beteiligten Partnern ein komplett digitaler »in-office«-Workflow für Aligner zur Verfügung. Ausgangspunkt ist ein Intraoralscan (Omniscam Ortho, Software Version 1.2, Sirona Dental Systems GmbH, Wals, Österreich). Ausgehend von diesem digitalen Modell erfolgt die weitere Prozessierung in OnyxCeph 3D Lab (Image Instruments GmbH, Chemnitz). Nach dem Import des Datensatzes von Ober- und Unterkiefer erfolgt die Scanreparatur und Ausrichtung der Modelle. Im Weiteren wird ein virtueller Sockel erstellt, und die Zähne können nach Angabe eines Startpunktes und Zuweisung der Zahn-Nummer semi-automatisch mit einem strukturerkennenden Algorithmus segmentiert werden. Mit diesen segmentierten Modellen kann unter Kontrolle der Zahnbewegung in allen Dimensionen ein virtuelles Therapieziel definiert werden. Ein entscheidender Schritt und Ausgangspunkt für die vorliegende Studienkonzeption ist die Zerlegung der Bewegungen hin zum Ziel-Setup in biologisch umsetzbare Teilschritte (Staging). Für dieses sind in der Software Grenzwerte hinterlegt, die auf verschiedenen Angaben in der Literatur beruhen. Die einzelnen Schritte werden als *.stl-Datei exportiert und dabei für den 3D-Druck durch Rekonstruktion des Gitters optimiert. Aligner werden in der Regel auf 3D-gedruckten Modellen mittels Tiefziehverfahren hergestellt. Prinzipiell scheinen CNC Verfahren besser als RP-Verfahren (Druck) geeignet zur Herstellung von Modellen für Aligner (Martorelli et al. 2012). Allerdings ist der Aufwand infolge der Programmierung von 5-Achs-Fräsen höher und der 3D-Druck letztendlich wirtschaftlicher.

Die Umsetzung in gcode zur Verarbeitung im 3D-Drucker wird mit Simplify 4.0 vorgenommen. Der 3D-Druck der Modelle erfolgt in PET-G (Glykol mo-

SCHLÜSSELWÖRTER

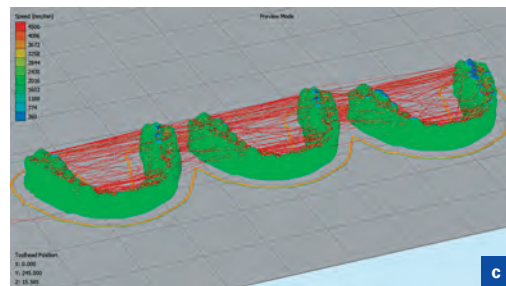
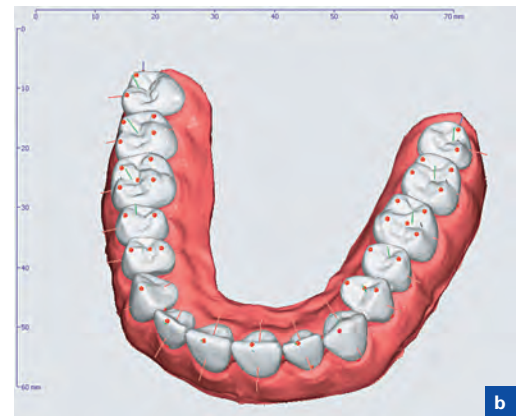
- Aligner
- CAD/CAM
- 3D-Druck

difiziertes Polyethylenterephthalat) mit einem German RepRap X350 (German RepRap GmbH, Feldkirchen). Die Aligner werden mittels Tiefzieh-technik aus 0,8mm Folien (Erkodent, Erich Kopp GmbH, Pfalzgrafenweiler) hergestellt.

Somit sind in diesem Arbeitsablauf alle Schritte unter der direkten Kontrolle des behandelnden Kieferorthopäden (**Abb. 1**).

Abbildung 1

■ **Wesentliche Schritte des Aligner-Workflows vom Intraoralscan (a), dem segmentierten virtuellen Modell (b), der Druckvorbereitung der einzelnen Modelle (c) bis zur Herstellung der Modelle im 3D-Drucker (d).**



MATERIAL UND METHODE – IN VITRO VERSUCHE

VERGLEICH FDM-DRUCK GEGENÜBER DLP-DRUCK ZUR HERSTELLUNG VON ARBEITSMODELLEN

Zur Überprüfung der Genauigkeit von FDM (Fused Deposition Molding)-gedruckten Modellen wurde ein Frasco Modellpaar mit einem 3D-Modellscanner (ZirkonZahn S600 Arti, Zirkonzahn GmbH, Gais, It, Auflösung 10µm) gescannt, in OnyxCeph 3D Lab nachbearbeitet und jeweils 10-mal mit einem FDM-Drucker (Geetech i3, Geetech Co. Ltd., ShenZen, VR China) und einem DLP (Digital Light Processing, SHERAeco Print D30 mit SHERA model fast, Werkstoff-Technologie GmbH & Co. KG, Lemförde, Deutschland) gedruckt. Alle Modelle wurden mit einem computergestützten digitalen Messschieber (PeWe Tools Ltd, Trochtelfingen) vermessen. Es wurden sowohl dentale (Zahnbreiten, Kronenhöhe) als auch den Zahnbogen beschreibende Parameter (VZB, HZB, overbite, overjet) erfasst. Wesentliche kieferorthopädische diagnostische Kennzahlen wurden aus diesen Werten berechnet (SI, si, Tonn, Bolton anterior, Bolton overall).

EINFLUSS DER AUSRICHTUNG AUF GENAUIGKEIT EINES GLOBALEN BEST-FIT-MODELLS

Für den späteren Vergleich von virtuellem Setup und den durch intraorale Scans gewonnenen Daten der klinischen Wirkung der Aligner wurde der Einfluss der Vororientierung untersucht. Dafür wurden unterschiedlich räumlich orientierte virtuelle Modelle mittels einer Vororientierung anein-

ander angepasst und mit einem globalen best-fit-Algorithmus (GOM Inspect 2017, GOM GmbH, Braunschweig) zur Deckung gebracht. Nun erfolgte der Vergleich der Modelle und die Visualisierung und Vermessung der räumlichen Abstände korrespondierender Punkte. Jeweils 20 Messpunkte in unterschiedlicher räumlicher Orientierung wurden je Modell ausgewählt.

DETEKTIERBARKEIT VON VERÄNDERUNGEN IM VIRTUELLEN SETUP

Zur Überprüfung der Möglichkeit der Erfassung von Zahnstellungsänderungen wurden am virtuellen Setup-Modell nach Zahnsegmentierung Bewegungen in allen Achsen des Raumes simuliert. In 0,05 mm Schritten erfolgte eine Veränderung der Zahnstellung bis $\pm 0,5$ mm in Onyx Ceph 3D Lab vorgenommen und die Modelle als *.stl-File exportiert. Es erfolgte in diesem Falle keine weitere druckvorbereitende Optimierung der Datensätze. Pro Achse wurden somit zehn Modellpaare verglichen. Um den Einfluss des Alignments zu eliminieren, wurden die Modelle alle in einem kongruenten Koordinatensystem angepasst.

MATERIAL UND METHODE – KLINISCHE UNTERSUCHUNGEN

Für die laufende prospektive klinische Studie (Ethikkommission Nr. BB 021/16) werden Patienten nach dem oben beschriebenen Workflow mittels Alignern behandelt. Ein- und Ausschlusskriterien wurden definiert, und eine Fallzahlsschätzung diente als Basis. Die Besonderheit ist, dass erstmals auf der Ebene der einzelnen Aligner Verände-

ERGEBNISSE IN VITRO

VERGLEICH FDM-DRUCK GEGENÜBER DLP-DRUCK ZUR HERSTELLUNG VON ARBEITSMODELLEN

Der Vergleich wesentlicher dentaler und den Zahnbogen beschreibender Parameter der Modelle zeigte nur geringe Unterschiede zwischen Original (Frasaco) und den Kopien. Für die Vermessung

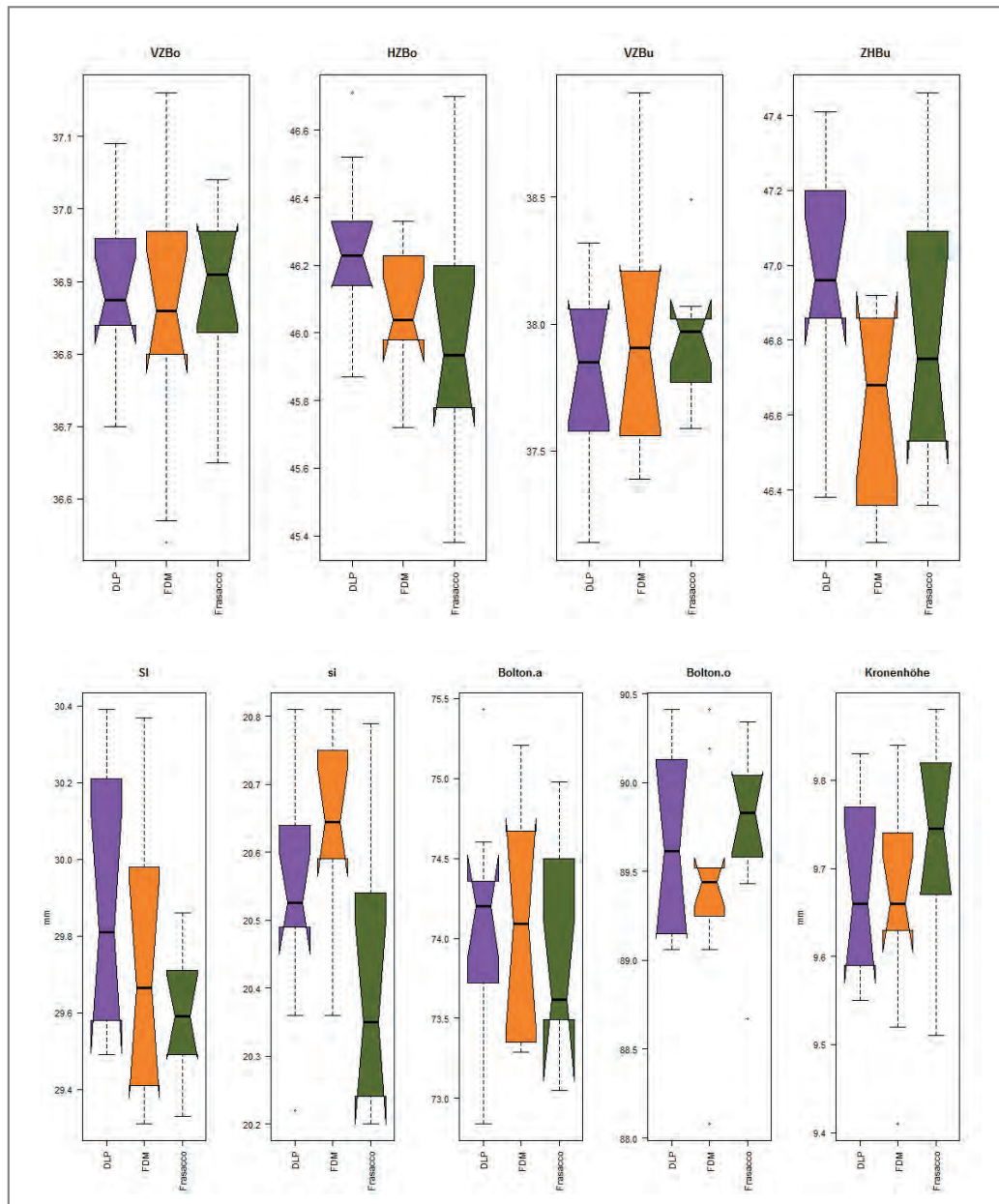


Abbildung 2

■ Boxplots zum Vergleich der Messwerte zwischen Original (Frasaco) und den 3D-gedruckten Kopien mittels DLP- und FDM-Verfahren.

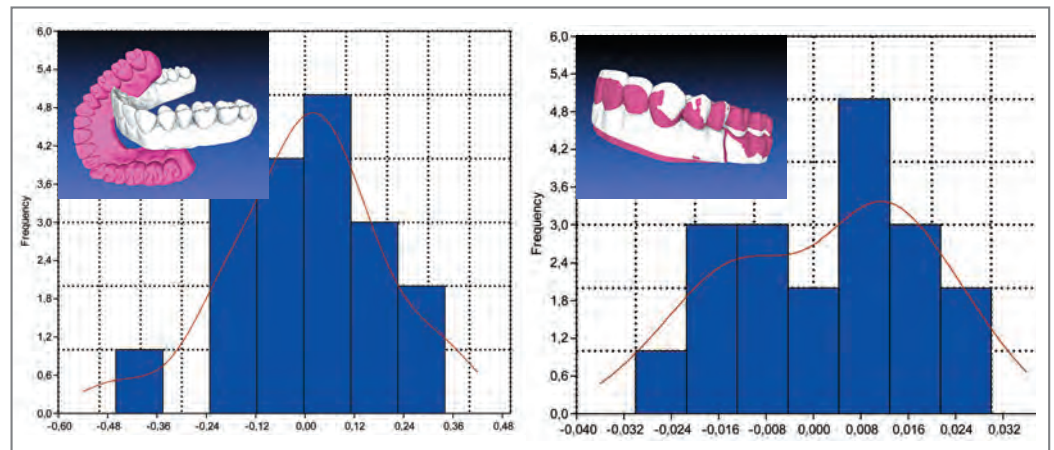
rungen und Reaktion auf das geplante Setup hinsichtlich der Realisierbarkeit der Schritte des Stagings untersucht werden können.

Für die Therapie hat sich ein zweiwöchiger Wechsel der Aligner als besonders günstig erwiesen (Clements et al. 2003, Bollen et al. 2003) und wird auch in dieser Untersuchung verwendet.

des Frasaco-Modells ergaben sich 0,05% Konfidenzintervalle von $\pm 0,05$ - $0,1$ mm und eine mittlere Standardabweichung von $0,12$ mm. In der statistischen Analyse der Messwerte (**Abb. 2**) mittels ANOVA bei paarweisem Mann-Whitney-Test fanden sich signifikante Unterschiede im si mit $0,3$ mm Vergrößerung bei FDM-Modellen gegenüber dem Original. Eine signifikante Abweichung

Abbildung 3

■ Verteilung der Messwerte der Gitterabstände an definierten Messpunkten zwischen CAD-Modell und Netz bei starker Abweichung der Vorausrichtung (links) und genauerer Vorausrichtung (rechts).



von $<0,4$ mm verkleinert gemessenem Overbite bei FDM-Modellen ($p=0,0059$) war zudem feststellbar. Die 5%-Konfidenzintervalle für direkte Messungen liegen bei Vermessung des Originals zwischen $\pm 0,02$ und $\pm 0,09$ mm, für FDM-Modelle zwischen $\pm 0,02$ und $\pm 0,3$ mm sowie für DLP-Modelle zwischen $\pm 0,03$ und $\pm 0,14$ mm.

EINFLUSS DER AUSRICHTUNG AUF GENAUIGKEIT EINES BEST-FIT-MODELLS

Der Vergleich zeigte geringere Abweichungen in der Gruppe mit weitestgehender Vororientierung der Modelle. Bei räumlich stark differierender Abweichung initial zeigten sich nach Berechnung Unterschiede von bis zu $0,4$ mm in einzelnen Bereichen der Modelle. Bei guter initialer Vorausrichtung verringerten sich diese auf $<0,03$ mm (Abb. 3). Die Messwerte zeigten sich jeweils annähernd normalverteilt und ließen keine Systematik der Abweichung erkennen.

DETEKTIERBARKEIT VON VERÄNDERUNGEN IM VIRTUELLEN SETUP

Die Auswertung zeigte, dass es möglich ist, auch Einzelzahnbewegungen hochgenau zu visualisieren und zu vermessen (Abb. 4). Im Vergleich der geplanten zur gemessenen Bewegung zeigten sich nur sehr geringe Unterschiede im Verhalten in den drei Raumachsen: Für mesio-distale Zahnbewegungen im Mittel $0,02$ mm (SD $0,024$ mm), für

anterior-posteriore Bewegungen von $0,019$ mm (SD $0,019$ mm) und für vertikale Bewegungen, also Intrusion und Extrusion $0,017$ mm (SD $0,024$ mm).

Systematische Abweichungen waren nur in geringem Maße in der vertikalen Dimension erkennbar (Abb. 5). In der Relation geplanter zu gemessener Zahnbewegung zeigte sich eine hohe Übereinstimmung.

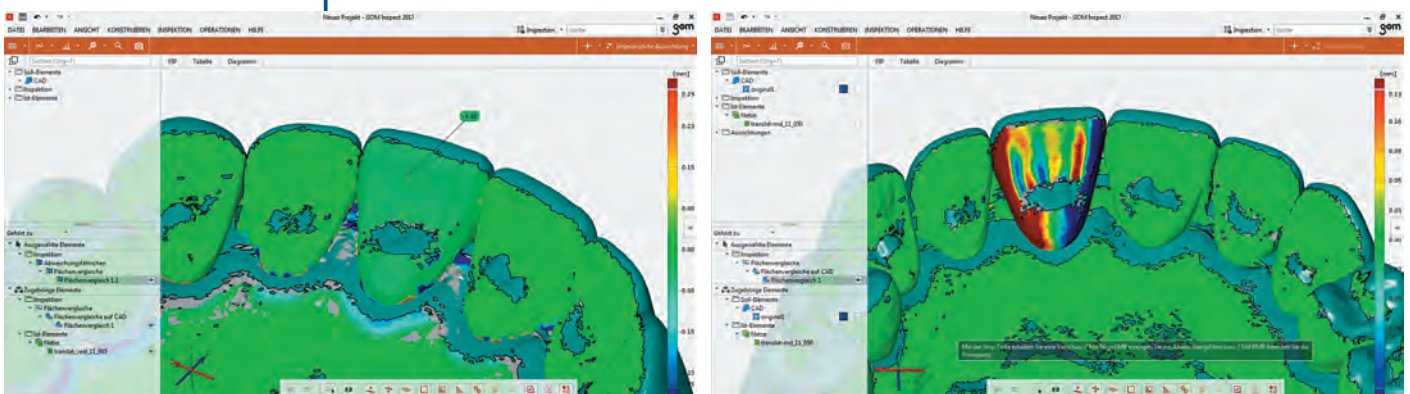
KLINISCHE ERGEBNISSE

Die ersten klinischen Ergebnisse konnten zeigen, dass der vorgestellte digitale Workflow in der täglichen Praxis einsetzbar ist (Krey et al. 2016, Chen et al. 2017). Auch der FDM-Druck erzielt die für eine Aligner-Therapie notwendige Genauigkeit und die verwendeten Druckmaterialien (PET-G) sind in mechanischer Hinsicht dem Tiefziehprozess gewachsen. Alle Aligner zeigten eine außerordentlich gute klinische Passung.

Das erste Beispiel (Abb. 6) zeigt eine Derotation und Palatinalbewegung von 24 im Zuge einer geplanten Überstellung einer bukkalen Nonokklusion. An 24 wurde zusätzlich ein Attachment angebracht. Es trat wie gewünscht eine Palatinalbewegung auf. Die Derotation führte allerdings zu einer minimalen Lückenbildung zwischen 24 und 25.

Abbildung 4

■ Beispiel der Messung einer anterior-posterioren Bewegung. Auch Abweichungen der beiden Modelle von $0,05$ mm wie hier lassen sich sicher feststellen (links). Größere mesio-distale Zahnbewegungen als weiteres Beispiel (rechts).



Simulation von Zahnbewegungen – Differenz CAD-Model- und Messung am Vergleichsnetz

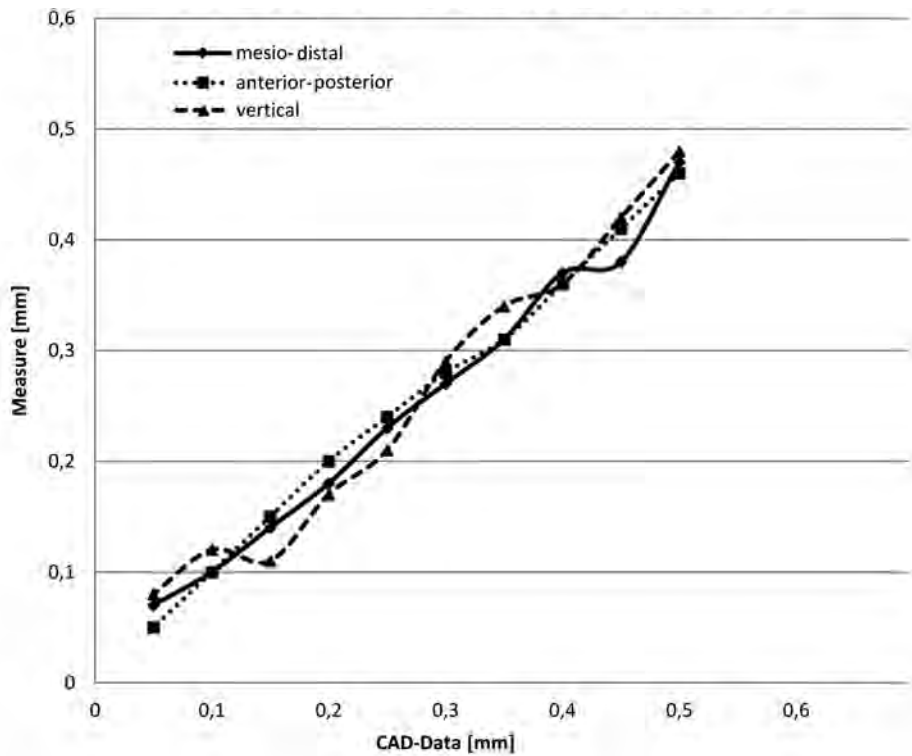


Abbildung 5

■ Vergleich der geplanten Zahnbewegung im CAD-Modell gegenüber der Messung in GOM Inspect 2017.

Im zweiten klinischen Beispiel (**Abb. 7**) war eine Ausformung der Front geplant. Insbesondere in der Approximalregion 11 und 21 fällt eine nicht der Planung folgende Bewegung auf. Die mesiale Fläche des Zahnes hat sich bei geplanter Retrusion

kaum bewegt. Ursache war eine unzureichende approximale Schmelzreduktion im Interdentalbereich. Die Rotation und Retrusion von 22 hingegen wurde fast vollständig wie geplant umgesetzt.

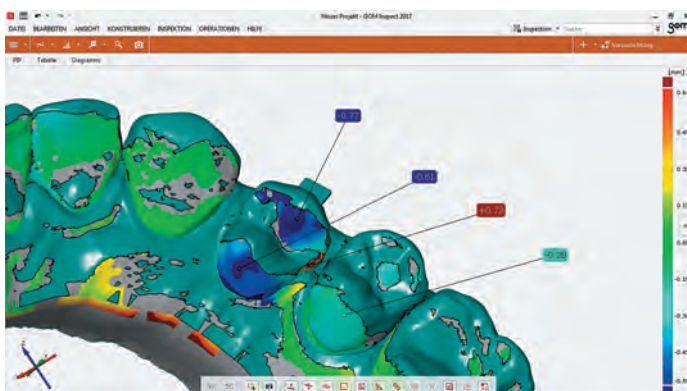
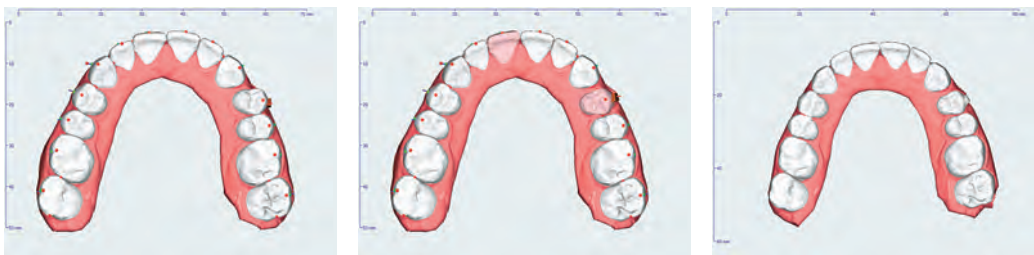
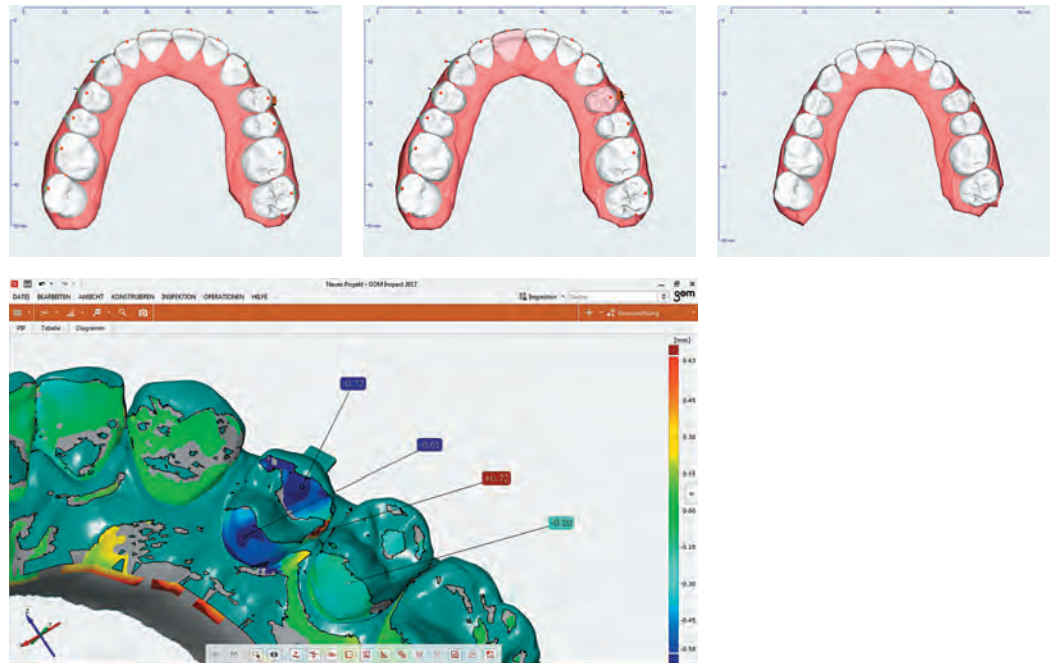


Abbildung 6

■ Vergleich der Planung zur Schiene 4 mit dem Scan der Situation am Patienten.

Abbildung 7

■ Vergleich der Planung, also dem zu erwartenden Ergebnis, im Vergleich zu der realisierten Zahnbewegung nach Schiene 3.



DISKUSSION

Mit dem vorgestellten vollständig digitalen Workflow ist es für den Kieferorthopäden erstmals möglich, den Arbeitsablauf in der Alignertherapie in allen Aspekten in-office unter der Kontrolle des Behandlers durchzuführen. Die Integration von Intraoralscan, dreidimensionaler Planung und Realisierung der Aligner-Steps durch 3D-Druck ist nun reibungslos möglich.

Es konnte gezeigt werden, dass schon mit einem relativ einfachen FDM-Drucker die hochgenaue Herstellung von Arbeitsmodellen möglich ist. Der in der klinischen Studie verwendete 3D-Drucker (German RepRap X350pro) weist noch eine erheblich höhere Genauigkeit auf. Aufgrund des größeren Bauraums und der geringeren Gesamtkosten ist das FDM-Verfahren bestens für die Herstellung von Alignern geeignet. Die Verwendung von thermostabilem PET-G beugt eventuellen Veränderungen durch die Wärmezufuhr im Tiefziehverfahren vor. Die prinzipielle Nutzung wurde schon in anderen Untersuchungen beschrieben (Hazewald et al. 2014), konnte hier aber erstmals in der klinischen Routine umgesetzt werden. Weitere Details zur Eignung der 3D-gedruckten Modelle sowie zur technischen Umsetzung im Tiefziehprozess wurden eingehend untersucht (Krey et al. 2015, Krey et al. 2016, Chen et al. 2017).

In den in vitro Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass mit der vorliegenden Systematik eine hochgenaue Erfassung von dreidimensionalen Zahnstellungsänderungen möglich ist. Eine präzise Vororientierung der Kiefer vor dem eigentlichen Alignment mittels eines globalen best-fit

Modells verbessert die Genauigkeit der Überlagerung deutlich (Cigoni et al. 1998).

Das von Align[®] Technology bereitgestellte Tool zur Überlagerung dreidimensionaler Modelle mit einem Fehler von 0,2 mm in der Translation und <1° in der Rotation steht systembedingt nicht zur Verfügung (Miller et al. 2003). Das hier vorgestellte Verfahren wies eine sogar noch darüber hinausgehende Präzision auf. Da mittels Intraoralscan jederzeit ein Vergleich von Planung zur jeweiligen Alignerstufe mit dem erreichten Ergebnis möglich wird, kann der Kieferorthopäde die Therapie jederzeit auf die individuelle biologische Reaktion abstimmen und ggf. die Planung anpassen.

Die klinischen Beispiele zeigten allerdings, dass die mit den bisher verwendeten Richtwerten geplanten Zahnbewegungen auf der Ebene einzelner weniger Schienen nicht immer vollständig umgesetzt werden. Die Abweichungen sind zu einem Teil auf den Einfluss der bisher nicht simulierbaren okklusalen Kräfte zurückzuführen (Hahn et al. 2011). Auch für andere Alignersysteme sind solche Ist-Soll-Abweichungen nachweisbar (Chisari et al. 2014, Simon et al. 2014). Auch das Design und die Platzierung von Attachments modifizieren die Kraftsysteme (Kravitz et al. 2008). Durch eine Analyse einer Vielzahl von Ist-Soll-Vergleichen auf der Ebene einzelner Aligner und Zähne wird eine bessere Anpassung der virtuellen Planung möglich werden.

Da es sich um eine auf mehrere Jahre angelegte prospektive Studie handelt, sind weitere Ergebnisse erst nach folgenden umfangreichen Analysen zu erlangen. Ziel ist es, anhand der Messungen einer größeren Kohorte auf der Ebene des

einzelnen Aligners individuell angepasste Werte für die Planung des Stagings und auch des Tragemodus zu ermitteln. Dies kann dazu beitragen, die Alignertherapie weiter zu optimieren und das Indikationsspektrum zu erweitern.

Das Design der Studie mit einer Kooperation von Universität und weiterbildungsberechtigten kieferorthopädischen Fachpraxen ist auch für die stärkere Verankerung wissenschaftlicher Aspekte in die Weiterbildung richtungweisend.

LITERATUR

- Bollen A.M., Huang G., King G., Hujuel P., Ma T. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 1: Ability to complete treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003; 124: 496-501.
- Brezniak N., Wasserstein A. Root resorption following treatment with aligners. *Angle Orthod* 2008; 78: 1119-24.
- Chen Y.J., Yao C.C.J., Chen Y.J. Clear Aligner Treatment with »In-Office« Virtual Model Set-Up and 3D Printing. *J Dent Oral Care* 2017; 3: 1-5.
- Chisari J.R., McGorray S.P., Nair M., Wheeler T.T. Variables affecting orthodontic tooth movement with clear aligners. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2014; 145: 82-91.
- Cignoni P., Rocchini C., Scopigno R. Metro: Measuring error on simplified surfaces. *Comp Graph* 1998; 17: 167-174.
- Clements K.M., Bollen A.M., Huang G., King G., Hujuel P., Ma T. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 2: Dental improvements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003; 124: 502-8.
- Ercoli F., Tepedino M., Parziale V., Luzi C. A comparative study of two different clear aligner systems. *Prog Orthod* 2014; 2: 1-5.
- Faltin R.M., de Almeida M.A.A., Kessner C.A., Faltin Jr. K. Efficiency, three-dimensional planning and prediction of the orthodontic treatment with the Invisalign® System: case report. *R Clin Ortodon Dental Press* 2003; 2: 61-71.
- Frongia G & Castroflorio T. Correction of severe tooth rotations using clear aligners: A case report. *Aust Orth J* 2012; 28: 15-19.
- Fujiyama K., Honjo T., Suzuki M., Matsuoka S., Deguchi T. Analysis of pain level in cases treated with Invisalign aligner: comparison with fixed edgewise appliance therapy. *Prog Orthod* 2014; 22: 1-7.
- Giancotti A., Di Girolamo R. Treatment of severe maxillary crowding using Invisalign and fixed appliances. *J Clin Orthod* 2009; 43: 583-9.
- Hahn W., Zapf A., Dathe H., Fialka-Fricke J., Fricke-Zech S., Gruber R., Kubein-Meesenburg D., Sadat-Khonsari R. Torquing an upper central incisor with aligners-acting forces and biomechanical principles. *Eur J Orthod* 2010; 32: 607-13.
- Hahn W., Engelke B., Jung K., Dathe H., Kramer F.J., Rödig T., Kubein-Meesenburg D., Gruber R.M. The influence of occlusal forces on force delivery properties of aligners during rotation of an upper central incisor. *Angle Orthod* 2011; 81: 1057-63.
- Hazewald A., Slater J.R.J., Ren Y. Accuracy and reproducibility of dental replica models reconstructed by different rapid prototyping techniques. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2014; 145: 108-15.
- Kesling H.D. The philosophy of the tooth positioning appliance. *Am J Orthod* 1945; 31: 297-304.
- Kravitz N.D., Kusnoto B., Agran B., Viana G. Influence of attachments and interproximal reduction on the Accuracy of canine rotation with Invisalign. *Angle Orthod* 2008; 78: 682-87.
- Kravitz N.D., Kusnoto B., BeGole E., Obrez A., Agran B. How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009; 135: 27-35.
- Krey K., Orlob F., Gorynia S., Kühnert R. Digitale Kieferorthopädie. *Zahnmedizin Up2date* 2015; 9: 537-560.
- Krey K., Rantsch A., Kühnert R. Das digitale kieferorthopädische Labor. *Quintessenz Zahntechnik*. 2016; 42: 1342-1355.
- Martorelli M., Gerbino S., Giudice M., Ausiello P. A comparison between customized clear and removable orthodontic appliances manufactured using RP and CNC techniques. *Aust Orthod J* 2012; 28: 245-9.
- Miller R.J. & Derakhshan M. The Invisalign System: Case report of a patient with deep bite, upper incisor flaring, and severe curve of spee. *Seminars in Orthodontics* 2002; 8: 43-50.
- Miller K.B., McGorray S.P., Womack R., Quintero J.C., Perelmuter M., Gibson J., Dolan T.A., Wheeler T.T. A Comparison of treatment impacts between Invisalign aligner and fixed appliance therapy during the first week of treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2007; 131: 302.e1-9.
- Nahoum H.I. The vacuum formed dental contour appliance. *N Y State Dent J* 1964; 9: 385-90.
- Raghunath N., Shivalinga B.M., Sahoo K.C. Invisalign-emperor's new cloth. *Indian Journal of Dental Sciences* 2011; 2: 50-54.
- Rinchuse D.J., Rinchuse D.J. Active tooth movement with Essix based appliances. *J Clin Orthod* 1997; 31: 109-12.
- Rossini G., Parrini S., Castroflorio T., Deregibus A, Debernardi CL. Efficacy of clear aligners in controlling orthodontic tooth movement: a systematic review. *Angle Orthod* 2015; 85: 881-9.
- Schupp W., Haubrich J., Hermens. Möglichkeiten und Grenzen der Schienentherapie in der Kieferorthopädie. *Zahnmedizin up2date* 2013; 2: 171-184.
- Simon M., Keilig L., Schwarze J., Jung B.A., Bourauel C. Forces and moments generated by removable thermo-plastic aligners: Incisor torque, premolar derotation, and molar distalization. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2014; 145: 728-36.
- Simon M., Keilig L., Schwarze J., Jung B.A., Bourauel C. Treatment outcome and efficacy of an aligner technique-regarding incisor torque, premolar derotation and molar distalization. *BMC Oral Health*. 2014; 14: 68.
- Torres F.C., Jóias R.P., Cepera F., Paranhos L.R., Sanders D. A clinical case treated with clear aligner. *Int J Orthod Milwaukee* 2011; 22: 11-15.



Herr Prof. Dr. Karl-Friedrich Krey M.M.E. ist Direktor der Poliklinik für Kieferorthopädie am Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (ZZMK) der Universitätsmedizin Greifswald. Sein Weg in die zahnärztliche und wissenschaftliche Laufbahn führte über das Studium der Zahnmedizin an der Universität Leipzig. In der dortigen Abteilung für Kieferorthopädie nahm er die Tätigkeit als Weiterbildungsassistent auf und erwarb 2003 die Anerkennung als Fachzahnarzt für Kieferorthopädie. Die mit summa cum laude bewertete Promotion zum Dr. med. dent. erfolgte zum Thema »Histologische, histochemische und immunhistochemische Charakterisierung spalt-randnaher velarer Muskulatur bei Patienten mit Lippen-Kiefer-Gaumenspalten und isolierten Gaumenspalten«. 2004 wurde Karl-Friedrich Krey zum Oberarzt der Poliklinik für Kieferorthopädie und Kinderzahnheilkunde am Friedrich-Louis-Hesse-Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde und Orale Medizin am Universitätsklinikum Leipzig ernannt. 2008 schloss er, gefördert vom Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft, die dreijährige Weiterbildung zum Master of Medical Education (M.M.E.) an der Universität Heidelberg ab. Die Habilitation legte er 2010 zum Thema »Untersuchungen zur Morphologie von dentofazialen und skelettalen Strukturen Erwach-

sener mit Methoden der geometrischen Morphometrie« vor. 2011 wurde er zum Stellvertretenden Direktor der Leipziger Poliklinik für Kieferorthopädie ernannt und 2012 mit der Koordination des interdisziplinären Boards für kraniofaziale Fehlbildungen betraut. 2013 erfolgte der Ruf an die Greifswalder Poliklinik für Kieferorthopädie.

Zu seinen Hauptforschungsinteressen zählen klinische Effekte friktionsarmer Behandlungstechniken (»selbstligierende Brackets«) mittels dreidimensionaler Modellscans, Untersuchungen zur Morphologie dentofazialer Strukturen mittels Methoden der geometrischen Morphometrie und die Planung von Operationen der orthognathen Chirurgie (Modelloperationen und computergestützte 2D- und 3D-Simulationen).

Die Deutsche Gesellschaft für Aligner Orthodontie (DGAO) zeichnete Herrn Prof. Krey – gemeinsam mit Herrn Dr. Peter Schicker, Herrn Dr. Christian Schwahn und Herrn Dr. Philipp Eigenwillig – mit ihrem Wissenschaftspreis 2016 für das hier vorgestellte Projekt aus.

KONTAKT

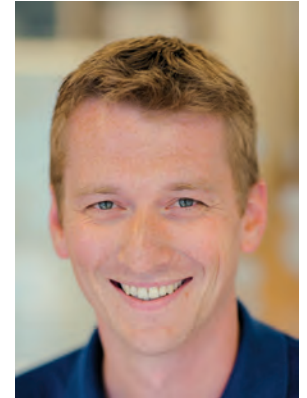


Prof. Dr. Karl-Friedrich Krey
 Poliklinik für Kieferorthopädie
 Zentrum für Zahn-, Mund- und
 Kieferheilkunde (ZZMK)
 Universitätsmedizin Greifswald
 Rotgerber Straße 8
 17475 Greifswald
 Tel. 03834/7110
 Fax 03834/7113
 E-Mail: kreyk@uni-greifswald.de

Herr Dr. med. dent. Peter Schicker führt eine Kieferorthopädische Praxis in Bergisch Gladbach und ist Inhaber des Beratungsunternehmens KFO-Wissen (www.kfo-wissen.de). Er studierte Zahnmedizin an der Universität Leipzig und absolvierte die Weiterbildung zum Fachzahnarzt für Kieferorthopädie am Leipziger Universitätsklinikum und der Kieferorthopädischen Fachpraxis Dr. Klaus Schicker in Bergisch Gladbach. Die Anerkennung als Fachzahnarzt für Kieferorthopädie erfolgte 2011. Im selben Jahr übernahm er die Kieferorthopädische Fachpraxis Dr. Klaus Schicker. 2014 wurde er zum Dr. med. dent. promoviert.

Herr Dr. Schicker ist als Referent in den Bereichen PKV, Abrechnung, sequenzielle Aligner, digitale Praxis und CMD tätig und Clinical Speaker für Invisalign®. 2016 wurde ihm die Weiterbildungsbefähigung für Kieferorthopäden zuerkannt. Er engagiert sich im Berufsverband Deutscher Kieferorthopäden (BDK) und ist 2. Vorsitzender des Landesverbandes Nordrhein.

Für seine wissenschaftlichen Leistungen wurde er 2016 – gemeinsam mit Herrn Prof. Dr. Karl-Friedrich Krey, Herrn Dr. Christian Schwahn und Herrn Dr. Philipp Eigenwillig – mit dem Wissenschaftspreis der Deutschen Gesellschaft für Aligner Orthodontie (DGAO) ausgezeichnet.



Herr Dr. Christian Schwahn ist an der Poliklinik für zahnärztliche Prothetik, Alterszahnheilkunde und medizinische Werkstoffkunde des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (ZZMK) der Universitätsmedizin Greifswald tätig. Er studierte Mathematik mit Schwerpunkt Stochastik und Statistik an der Universität Greifswald und war in Folge am Hochschulrechenzentrum der Universität Greifswald tätig. 1998 wechselte an die Greifswalder Zahnklinik. Seine Expertise bringt

er zudem als Gastdozent beim Institut für Mathematik und Informatik der Universität Greifswald und in das Koordinationszentrum für Klinische Studien (KKS) der Universitätsmedizin Greifswald ein. Gemeinsam mit Herrn Prof. Dr. Karl-Friedrich Krey, Herrn Dr. Peter Schicker und Herrn Dr. Philipp Eigenwillig wurde er 2016 mit dem Wissenschaftspreis der Deutschen Gesellschaft für Aligner Orthodontie (DGAO) ausgezeichnet.



Herr Dr. med. dent. Philipp Eigenwillig führt eine Kieferorthopädische Praxis in Brandenburg an der Havel. Zu seinen Tätigkeitsschwerpunkten zählen die Digitale Kieferorthopädie und die 3D-Behandlungsplanung, die Kortikale Verankerung und die Lingualbehandlung (www.eigenwillig.net). Er studierte Zahnmedizin an der Universität Greifswald und wurde 2008 zum Dr. med. dent. promoviert. 2012 erwarb er die Anerkennung als Fachzahnarzt für Kieferorthopädie. Seit 2015 leitet er den Landesverband Brandenburg im Bundesverband Deutscher Kieferorthopäden

(BDK). Er ist national und international als Referent tätig und arbeitet im Bildungsausschuss der Landes Zahnärztekammer Brandenburg. 2017 stellte Herr Dr. Eigenwillig das von ihm entwickelte Verfahren »TADmatch« zur digitalen Insertionsplanung von Minischrauben im anterioren Gaumen (in Kooperation mit Dr. B. Ludwig) vor.

Die Deutsche Gesellschaft für Aligner Orthodontie (DGAO) zeichnete ihn – gemeinsam mit Herrn Prof. Dr. Karl-Friedrich Krey, Herrn Dr. Christian Schwahn und Herrn Dr. Peter Schicker – 2016 mit ihrem Wissenschaftspreis aus.



WISSEN
Lebendige
SCHAFT