

Accuracy of Invisalign® treatments in the anterior tooth region

First results

Genauigkeit von Invisalign®-Behandlungen im Frontzahnbereich

Erste Ergebnisse

Elena Krieger¹, Jörg Seiferth², Ivana Saric¹, Britta A. Jung¹, Heinrich Wehrbein¹

Abstract

Aim. To analyze (a) to what extent the pre-treatment model at the beginning of the treatment corresponds to the initial position in the ClinCheck® and (b) to what extent the predicted treatment result corresponds to the actual result of the therapy at the end of treatment.

Material and methods. Pre- and posttreatment models as well as the initial and final position of the ClinCheck® with a total of 35 patients aged between 15 and 59 were measured, all of whom were treated by using the Invisalign® technology (Invisalign®, Align Technology, Santa Clara, CA, USA). The measurement of the initial and final models was conducted by using an electronic digital caliper rule, i.e. that of ClinCheck® using the measurement tool ToothMeasure® of Invisalign® Software. The following parameters in the anterior region were measured: Overjet, overbite, dental midline shift (upper arch compared to lower arch).

Results. Pre-treatment models and the initial ClinChecks® revealed slight deviations in the parameters overjet 0.08 mm (SD±0.3), overbite 0.3 mm (SD±0.4) and dental midline deviation 0.1mm (SD±0.4). The final model and the final ClinCheck® revealed larger deviations: the differences for the Overjet were on average 0.4 mm (SD±0.7), Overbite 0.9 mm (SD±0.9) and dental midline shift 0.4 mm (SD±0.5).

Conclusions. The IT-based transmission of malaligned teeth into the ClinCheck® presentation provides sufficiently good accuracy. Tooth corrections in the vertical plane were more difficult to realize. A vertical overcorrection in the final ClinCheck®, a case refinement at the end of the treatment or additional measures (e.g. horizontal beveled attachments or vertical elastics) seems useful to achieve the individually intended therapeutic goal.

Zusammenfassung

Ziel. Ziel dieser Pilotstudie war es zu prüfen, (a) inwieweit das Anfangsmodell zu Behandlungsbeginn mit der Anfangsposition im ClinCheck® und (b) das prognostizierte Behandlungsergebnis mit dem tatsächlichen Therapieergebnis zu Behandlungsende übereinstimmte.

Material und Methodik. Es wurden die Anfangs- und Endmodelle sowie die Anfangs- und Endposition des ClinChecks® von insgesamt 35 Patienten im Alter von 15 bis 59 Jahren vermessen, die ausschließlich mit Invisalign® (Align Technology, Santa Clara, CA, USA) behandelt wurden. Die Vermessung der Anfangs- und Endmodelle erfolgte mittels einer elektronischen Digital-Schiebelehre, die des ClinChecks® mittels des Vermessungs-Tool ToothMeasure® der Invisalign® Software. Folgende Parameter im Frontbereich wurden vermessen: Overjet, Overbite, dentale Mittellinienverschiebung (Ober- zu Unterkiefer).

Ergebnisse. Anfangsmodell und Anfangs-ClinCheck® zeigten geringe Abweichungen bezüglich der Parameter; beim Overjet im Mittel 0,08 mm (SD ±0,3 mm), Overbite 0,3 mm (SD ± 0,4 mm), dentale Mittellinienabweichung 0,1 mm (SD ±0,4 mm). End-ClinCheck® und Endmodell zeigten größere Abweichungen: die Differenz betrug für den Overjet durchschnittlich 0,4 mm (SD ±0,7 mm), Overbite 0,9 mm (SD ±0,9 mm) und Mittellinienverschiebung 0,4 mm (SD ±0,5 mm).

Schlussfolgerung. Die EDV-basierte Übertragung der klinischen Zahnfehlstellung in die ClinCheck®-Darstellung lieferte lediglich minimale Abweichungen. Zahnkorrekturen in der vertikalen Ebene erschienen schwieriger zu realisieren. Daher erscheinen eine vertikale Überkorrektur im End-ClinCheck®, ein Case refinement gegen Ende der Behandlung oder unterstützende Maßnahmen (z.B. die Verwendung von horizontal abgeschrägten Attachments oder vertikalen Gummizügen) sinnvoll, um das individuell angestrebte Therapieziel zu erreichen.

¹Department of Orthodontics, University Medical Center of the Johannes Gutenberg University, Mainz, Germany

²Private Orthodontic Practice, Mainz, Germany

Received: September 29, 2010 ; accepted: February 2, 2011

J Orofac Orthop 2011; 72:141-149
DOI 10.1007/s00056-011-0017-4

Keywords

Invisalign® · ClinCheck® · Anterior crowding

Introduction

Since its development in 1997, the Invisalign® technology has become established worldwide in orthodontic therapy as an esthetic alternative to fixed labial braces [6, 14, 15, 16]. The system consists of transparent, semi-elastic polyurethane splints (aligners) that can correct tooth movements up to 0.3 mm per aligner within a 2-week period. Therefore, in a computer-aided processing, the clinical tooth malalignments are converted into a three-dimensional digital image, the ClinCheck® [1, 14, 15, 16] is provided.

Based on an individual treatment plan, the ClinCheck® displays the planned tooth movements up to and including the final desired results and this data is used to produce individual aligners [1]. In this process, treatment providers have several different tools at their disposal for monitoring and correcting the therapeutic treatment goal, e.g. additional attachments, small abutments made from composite materials can be included in the treatment plan which provide additional support to tooth rotations or extrusive or intrusive tooth movements. The final ClinCheck® (the last graphic representation) displays a virtual image of the predicted treatment outcome. The final therapy result should correspond to the virtual final position. Considering that the treatment provider has few means with which to influence therapy during active orthodontic movement, the aim was to evaluate the extent to which the final ClinCheck® (predicted treatment result) would correspond to the actual treatment results.

Previous studies about Invisalign® have predominantly concentrated on technical aspects [15, 17, 21, 23], case reports [4, 11, 18, 20] or material studies [3, 9, 10, 23]. However, investigations on the accuracy and efficiency of individual tooth movements or on the concordance between ClinCheck® models and post-treatment models are few and far between [13, 14, 19]. It was therefore the aim of this investigation (a) to analyze how closely the pre-treatment model at baseline (T1) corresponds to the initial ClinCheck® and (b) how closely the final ClinCheck® position corresponds to the actual therapeutic outcome (post-treatment model) after treatment (T2) (Figure 1). For the purposes of this study three parameters in the anterior region, overjet, overbite and dental midline shift (maxilla compared with mandible) were examined.

Materials and methods

Study design and patients

The initial ClinCheck® and final ClinCheck® images were compared to the pre-treatment and post-treatment models of 35 healthy patients (11 males and 24 females, aged between 15 and 59 years, mean age 33 years) who had undergone orthodontic treatment exclusively with Invisalign® (Align Technology, Santa Clara, CA, USA) between January 2005 and December 2009.

The patients were selected retrospectively by referring to consecutive post-treatment models and patient documentation. The

Schlüsselwörter

Invisalign® · ClinCheck® · Frontaler Engstand

Einleitung

Die Invisalign®-Technologie hat sich seit 1997 in kieferorthopädische Behandlungskonzepte weltweit als ästhetische Alternative zur labialen Multibracket-Apparatur etabliert [6, 14, 15, 16]. Das System besteht aus transparenten, semi-elastischen Polyurethanschienen (Aligner), mit denen Zahnbewegungen bis zu 0,3 mm pro Schiene innerhalb von zwei Wochen korrigiert werden können. Voraussetzung hierfür ist die EDV-basierte Übertragung und Konvertierung der klinischen Zahnfehlstellung in eine dreidimensionale digitale Darstellung, den ClinCheck® [1, 14, 15, 16].

Der ClinCheck® spiegelt auf der Basis eines individuellen Behandlungsplanes die geplanten Zahnbewegungen bis zum gewünschten Endergebnis wider, anhand dessen die einzelnen Aligner produziert werden [1]. Dafür stehen dem Behandler verschiedene Tools zur Überprüfung bzw. Korrektur des individuellen Behandlungszieles zur Verfügung: Beispielsweise können zusätzliche Attachments, kleine Abutments aus Komposit, eingeplant werden, mit denen Rotationen oder extrusive bzw. intrusive Zahnbewegungen zusätzlich unterstützt werden können. Die Endposition (letzte Bilddarstellung) im ClinCheck® stellt ein virtuelles Set-up des gewünschten Behandlungsziels dar. Nach Beendigung der Behandlung sollte die reale Situation dieser Endposition entsprechen. Angesichts der Tatsache, dass aus Behandlersicht im Rahmen der aktiven orthodontischen Behandlung wenige Einflussmöglichkeiten bestehen, stellt sich die Frage inwieweit die ClinCheck®-Endposition (prognostiziertes Behandlungsergebnis) mit dem tatsächlichen erreichten Behandlungsergebnis übereinstimmt.

Bisherige Studien zu Invisalign® beschäftigen sich überwiegend mit technischen Aspekten [15, 17, 21, 23], Fallberichten [4, 11, 18, 20] oder Materialstudien [3, 9, 10, 23]. Untersuchungen zur Genauigkeit und Effizienz von einzelnen Zahnbewegungen oder der Genauigkeit zwischen ClinCheck® und Endmodell sind bislang nur wenig verfügbar [13, 14, 19]. Daher war das Ziel dieser Untersuchung zu prüfen, (a) inwieweit das Situationsmodell (Anfangsmodell) zu Behandlungsbeginn (T1) mit der Anfangsposition im ClinCheck® und (b) die Endposition im ClinCheck® mit dem tatsächlichen Therapieergebnis (Endmodell) zu Behandlungsende (T2) übereinstimmte (Abbildung 1). Dazu wurden drei Parameter im Frontbereich untersucht: Overjet, Overbite und dentale Mittellinienabweichung (Oberkiefer zu Unterkiefer).

Material und Methodik

Studiendesign und Patienten

Es wurden die Ausgangs- und End-ClinChecks® mit den Anfangs- und Endmodellen von 35 gesunden Patienten (n = 11 männlich und n = 24 weiblich, im Alter von 15 bis 59 Jahren, Durchschnittsalter: 33 Jahre) untersucht, die im Zeitraum zwischen 01/2005 und 12/2009 eine kieferorthopädische Behandlung ausschließlich

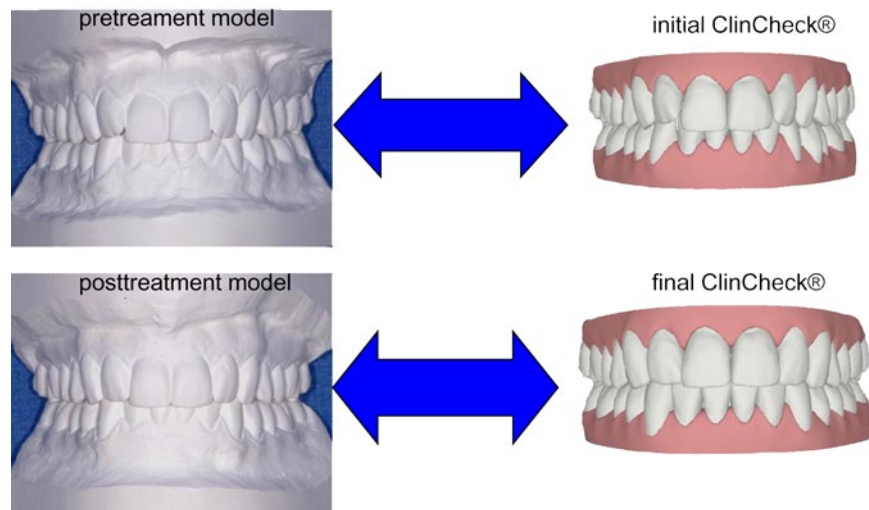


Figure 1. Comparison scheme: pre-treatment model vs. initial ClinCheck® and final ClinCheck® vs. post-treatment model

Abbildung 1. Systematik der Vergleiche: Anfangsmodell versus Anfangs-ClinCheck® und End-ClinCheck® versus Endmodell

main inclusion criterion was the presence of low to moderate maxillary and/or mandibular crowding. Patients requiring treatment with other orthodontic systems (e.g. multibracket appliances or retention cases) and those needing combined surgical and orthodontic treatment were excluded. Further exclusion criteria were cleft lip and palate or any other syndrome-associated orofacial malformation.

The main treatment goal was not to achieve a therapeutic optimum, that is a physiological overjet and overbite or complete correction of dental midline shift but to improve each patient's appearance in the anterior region by resolving anterior crowding. This was achieved using the following therapeutic procedures depending on the indication: a) IPR (interproximal enamel reduction), b) protrusion of the anterior teeth, c) a combination of IPR and protrusion, d) distalization and e) a combination of IPR and distalization.

To improve the aligners' retention additional attachments were used, fixation elements made from tooth-colored composite material depending on the number of teeth to be moved in ClinCheck® and according to the manufacturer's recommendations. Three parameters in the anterior region were examined: overjet, overbite and dental midline shift (maxilla in comparison to the mandible).

Measurement of the pre-treatment and post-treatment models

The pre-treatment and post-treatment models were measured to the nearest 0.01 mm using an electronic dental caliper rule (Studenroth GmbH Präzisionstechnik, Schöneck-Kilianstädten, Germany), calibrated in accordance with VDI/VDE/DGQ (Association of German Engineers/Association for Electrical, Electronic & Information Technologies/German Society for Quality) guideline m2618, sheet 9.1. The following variables were examined:

1. Overjet: Determines the sagittal anterior tooth relationship as the distance (in mm) between the incisal edge of the maxillary incisor in the furthest ventral position and its antagonist.
2. Overbite: Determines the vertical anterior tooth relationship as the distance (in mm) at the point where the incisal edge of the maxillary incisors overlaps the mandibular incisors the furthest.

mittels Invisalign® (Align Technology, Santa Clara, CA, USA) erhielten.

Die Patientenauswahl erfolgte retrospektiv anhand aufeinanderfolgender Abschlussmodelle sowie anhand der Patientenunterlagen. Haupteinschlusskriterium für die Patienten war ein leichter bis mittelschwerer frontaler Engstand im Ober- und/oder Unterkiefer. Patienten, bei denen indikationsbedingt eine Vorbehandlung mit anderen orthodontischen Systemen (z. B. Multibracket-Apparatur oder Retentionsfälle) oder eine kombinierte kieferchirurgisch-kieferorthopädische Behandlung erforderlich war, wurden ausgeschlossen. Weitere Ausschlusskriterien waren Lippen-Kiefer-Gaumenspalten oder andere syndromassoziierte orofaziale Fehlbildungen.

Das Hauptbehandlungsziel war nicht das Erreichen eines absoluten therapeutischen Optimums, also das Erreichen eines physiologischen Overjets und Overbites oder einer vollständigen Korrektur der dentalen Mittellinienabweichung, sondern bestand in einer Verbesserung der individuellen ästhetischen Situation im frontalen Bereich durch Auflösen frontaler Engstände. Dies erfolgte indikationsabhängig durch folgende Therapiemaßnahmen: a) ASR (approximale Schmelzreduktion), b) Protrusion der Frontzähne, c) eine Kombination aus ASR und Protrusion, d) Distalisation und e) eine Kombination aus ASR und Distalisation.

Um die Retention der Aligner zu erhöhen, wurden zusätzlich entsprechend den Empfehlungen des Herstellers Attachments, Befestigungselemente aus zahnfarbenen Kompositmaterial, in Abhängigkeit vom Ausmaß der zu bewegenden Zähne im ClinCheck® geplant. Folgende drei Parameter aus dem frontalen Bereich wurden untersucht: Overjet, Overbite und dentale Mittellinienabweichung (Ober- zu Unterkiefer).

Vermessung der Anfangs- und Endmodelle

Die Vermessung der Anfangs- und Endmodelle erfolgte unter Zuhilfenahme einer elektronischen Digitaltrieblehre (Studenroth Präzisionstechnik, Schöneck-Kilianstädten, Deutschland), kalibriert nach VDI/DE/DGQ m2618 Blatt 9.1 mit einer Messgenauigkeit von 0,01 mm. Es wurden folgende Variablen überprüft:

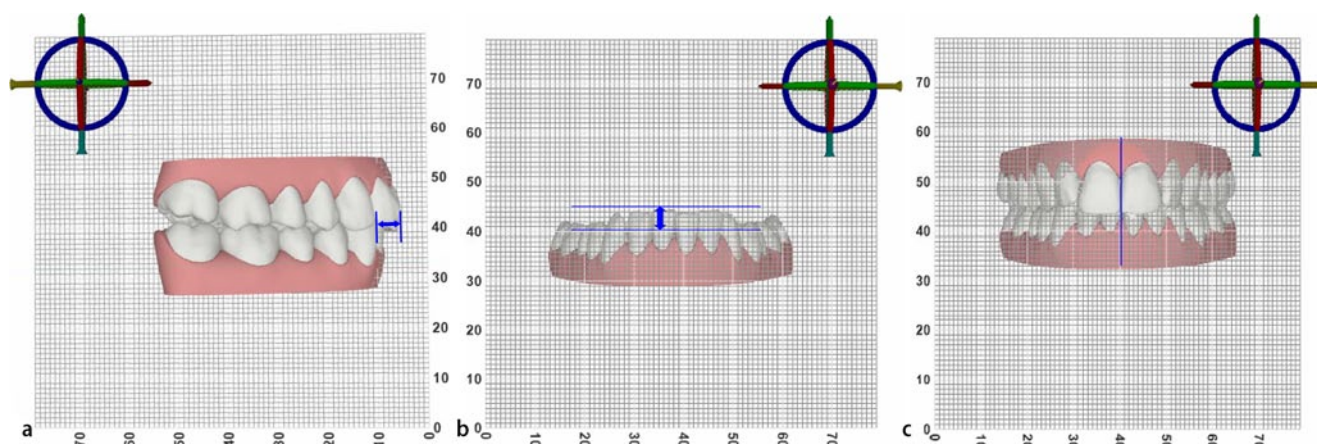


Figure 2. Parameter measurements in the ClinCheck®. (a) overjet: "Grid tool setting" in a "sagittal" direction, positioning at the farthest possible sagittal distance between maxillary and mandibular incisors (see line); (b) overbite: "facial" grid plane (=frontal plane), set to the incisal edge of the maxillary incisor with the largest vertical overlap to the corresponding mandibular anterior tooth. The value became legible following removal of the virtual image of the maxilla; (c) dental midline shift: "facial" grid plane (=frontal plane), set on the dental midline of the virtual maxilla. Deviation of the mandibular dental midline at the corresponding grid line of the maxillary midline.

Abbildung 2. Darstellung der Vermessung der Parameter im ClinCheck®. (a) Overjet: „Raster-Werkzeug-Einstellung“ auf die Ausrichtung „sagittal“, Einstellung auf den größtmöglichen sagittalen Abstand zwischen Ober- und Unterkiefer-Inzisivi (s. Linie); (b) Overbite: Rasterebene „fazial“ (= frontale Ebene), eingestellt auf die Inzisalkante des Oberkiefer-Inzisivus mit der größten vertikalen Überlappung zum korrespondierenden Unterkieferfrontzahn. Nach Entfernung der virtuellen Abbildung des Oberkiefers war der Wert ablesbar; (c) dentale Mittellinienverschiebung: Rasterebene „fazial“ (= frontale Ebene), auf die dentale Mitte des virtuellen Oberkiefers eingestellt. Abweichung der dentalen Mittellinie des Unterkiefers an der entsprechenden Rasterlinie des oberen Mittellinie ablesbar

3. Dental midline shift: Deviation (in mm) of the dental midline between the maxillary anterior teeth and mandibular anterior teeth.

The measurement points were individually determined on each pre-treatment model, were noted and referred to in the subjects for the future measurements on the post-treatment model and initial and final ClinChecks®.

Measurement of the ClinChecks®

The ClinCheck® was measured with the "ToothMeasure™" measurement tool from the Invisalign® software (ClinCheck® version 2.6; Align Technology, Santa Clara, CA, USA). This software allows virtual images to be measured by applying a virtual measurement grid over different planes in each ClinCheck® model. The adjustable scale ranges from 1 mm to 50 mm.

The lowest possible scale of 1 mm was chosen for the measurements in this investigation, which the investigator defined visually to the nearest 0.5 mm.

The ClinChecks® initial positions (at T1) and final positions (at T2) were measured.

For the parameter overjet the grid in the grid-tool setting was set in the sagittal plane. The grid was moved to each individually located measurement point (see model measurement) as in the model measurement procedure and was defined in millimetres (Figure 2a).

The "facial" grid plane (=frontal plane) was positioned to determine the overbite. The grid was moved in a sagittal direction as far as the incisal edges of the maxillary incisors and positioned on the

1. Overjet: die sagittale Frontzahnbeziehung als Distanz (in mm) zwischen der Inzisalkante des am weitesten ventral stehenden Oberkieferschneidezahnes und seinem Antagonisten;
2. Overbite: die vertikale Frontzahnbeziehung als Distanz (in mm) an der Stelle, an der die Inzisalkanten der oberen Inzisivi die unteren Schneidezähne am weitesten überlappen;
3. dentale Mittellinienabweichung: Abweichung (in mm) der dentalen Mittellinie zwischen Oberkiefer- und Unterkieferfrontzähnen.

Die bei dem Anfangsmodell individuell festgelegten Messpunkte wurden notiert und für den jeweiligen Patienten für die weiteren Vermessungen am Endmodell bzw. dem Anfangs- sowie End-ClinCheck® beibehalten.

Vermessung des ClinChecks®

Der ClinCheck® wurde mit dem Vermessungs-Tool „ToothMeasure™“ der Invisalign®-Software (ClinCheck®-Version 2.6; Align Technology, Santa Clara, CA, USA) vermessen. Die Software ermöglicht die Vermessung der virtuellen Abbildung durch Einlegen eines virtuellen Vermessungsrasters in verschiedenen Ausrichtungen über das jeweilige ClinCheck®-Modell. Die einstellbare Skalierung liegt zwischen 1 und 50 mm.

Für die Vermessungen in unserer Untersuchung wurde die kleinstmögliche Einstellung von 1 mm Skalierung gewählt. Die Messungen wurden durch den Untersucher visuell auf 0,5 mm bestimmt.

Es wurden jeweils die Anfangs- (Zeitpunkt T1) und die Endposition (Zeitpunkt T2) des ClinCheck® vermessen.

measurement points (see model measurement). To define the overbite measurement, the maxilla's virtual image was removed and measured millimetres from the corresponding grid line (Figure 2b).

The "facial" grid plane (=frontal plane) was positioned as with the overbite measurement to measure dental midline deviation and was then sagittally moved to the incisal edges of the mandibular anterior teeth (Figure 2c). The grid was positioned on the dental midline of the virtual maxilla. The maxilla's virtual image was then removed and the dental midline deviation between the maxillary and mandibular anterior teeth was defined in millimetres from the corresponding grid line to the mandibular dental arch.

Statistical analysis

The data collection and descriptive analyses were carried out in conjunction with the Institute for Medical Biostatistics, Epidemiology and Informatics of the University Medical Center of the Johannes Gutenberg University Mainz using SPSS® software (Statistical Package for Social Science) for Windows version 18.0 (SPSS, Chicago, IL, USA). This involved descriptive data only and was evaluated as a descriptive representation of the continuous variables referring to the mean, minimum, maximum and standard deviation (SD) as well as relative frequencies. Each parameter was measured twice. Mean values were included in the analysis. The results are represented in graphic terms using box plots.

Method error

An additional independent second series of measurements was taken for all parameters to check the reliability of the measurement methods. Dahlberg's formula $s = \sqrt{\sum d^2 / 2n}$, where d =difference between repeated measurements (mm) and n =number of repeated measurements, was used to analyze errors. In accordance with Dahlberg's formula, the accuracy is sufficient when the method error value is less than 1.

With measurements on the plaster casts, the Dahlberg error value was 0.1 mm for the overjet, 0.4 mm for the overbite and 0.2 mm for the dental midline shift. The ClinCheck® measurements revealed error values of 0.1 mm for the overjet, 0.5 mm for the overbite and 0.3 mm for the dental midline shift. The measurement methods thus demonstrate a sufficient level of reliability.

Results

The crowding was satisfactorily resolved in all subjects, with crowding in the maxilla resolved most frequently via IPR (49% of the subjects) and mandibular crowding resolved most frequently by a combination of IPR and protrusion (47% of the subjects). The mean number of aligners in the maxilla was $n=21$ and $n=20$ in the mandible, the mean duration of treatment was 10 months.

The results from the comparison of the pre-treatment model to the initial ClinCheck® and of the final ClinCheck® to the post-treatment model are described below.

Overjet

At T1 the overjet's mean on the pre-treatment model measured 4.5 mm (minimum 1.5 mm, maximum 9 mm, SD ± 4 mm). On the initial ClinCheck®, it measured 4.6 mm (minimum 1.5 mm,

Für den Parameter Overjet wurde das Raster in der Raster-Werkzeug-Einstellung auf die Ausrichtung „sagittal“ eingestellt. Das Raster wurde analog zu der Modellvermessung auf die individuell festgelegten Messpunkten (s. Modellvermessung) verschoben und in mm abgelesen (Abbildung 2a).

Zur Bestimmung des Overbites wurde die Rasterebene „fazial“ (= frontale Ebene) eingestellt. Das Raster wurde in Sagittalrichtung bis zu den Inzisalkanten der oberen Schneidezähnen verschoben und auf den individuellen Messpunkt eingestellt (s. Modellvermessung). Um den Messwert für den Overbite ablesen zu können, wurde das virtuelle Bild des Oberkiefers entfernt und der Messwert in mm an der entsprechenden Rasterlinie abgelesen (Abbildung 2b).

Zur Vermessung der dentalen Mittellinienverschiebung wurde analog zur Vermessung des Overbites die Rasterebene „fazial“ (= frontale Ebene) positioniert und sagittal bis zu den Inzisalkanten der Unterkieferfrontzähnen verschoben (Abbildung 2c). Das Raster wurde auf die dentale Mitte des virtuellen Oberkiefers eingestellt. Anschließend wurde das virtuelle Bild des Oberkiefers entfernt und die Abweichung der dentalen Mittellinie zwischen Oberkiefer- und Unterkieferfrontzähnen an der entsprechenden Rasterlinie des unteren Zahnbogens in mm abgelesen.

Statistische Analyse

Die Erfassung und deskriptive Analyse der ermittelten Daten erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik der Universitätsmedizin der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz mittels des Softwareprogramms SPSS® (Statistical Package for Social Science) für die Windows-Version 18.0 (SPSS, Chicago, IL, USA). Es handelte sich um eine rein deskriptive Datenbeschreibung, deren Auswertung als deskriptive Beschreibung der stetigen Variablen durch Angabe der statistischen Kennzahlen Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung (SD) sowie auf der Basis relativer Häufigkeiten erfolgte. Jeder Parameter wurde zweifach vermessen. Die Mittelwerte gingen in die Analyse ein. Die graphische Darstellung der Ergebnisse erfolgte mittels Boxplots.

Methodenfehler

Zusätzlich wurde eine unabhängige zweite Messreihe für alle Parameter durchgeführt, um die Zuverlässigkeit der Messmethode zu überprüfen. Zur Fehleranalyse wurde die Dahlberg-Formel $s = \sqrt{\sum d^2 / 2n}$ [d = Differenz der Doppelmessungen (mm); n = Anzahl der Doppelmessungen] verwendet. Nach Dahlberg liegt eine ausreichende Genauigkeit vor, wenn der Methodenfehler unterhalb des Wertes 1 liegt.

Der Dahlberg-Fehler lag bei der Vermessung der Gipsmodelle für den Parameter Overjet bei 0,1 mm, für den Overbite bei 0,4 mm und für die dentale Mittellinienabweichung bei 0,2 mm. Die Vermessung des ClinCheck® ergab für den Overjet 0,1 mm, für den Overbite 0,5 mm und die dentale Mittellinienabweichung 0,3 mm. Somit bestand eine ausreichende Zuverlässigkeit der Messmethoden.

Ergebnisse

Bei allen Probanden wurde der Engstand zufriedenstellend aufgelöst, im Oberkiefer am häufigsten durch ASR (49% der Proban-

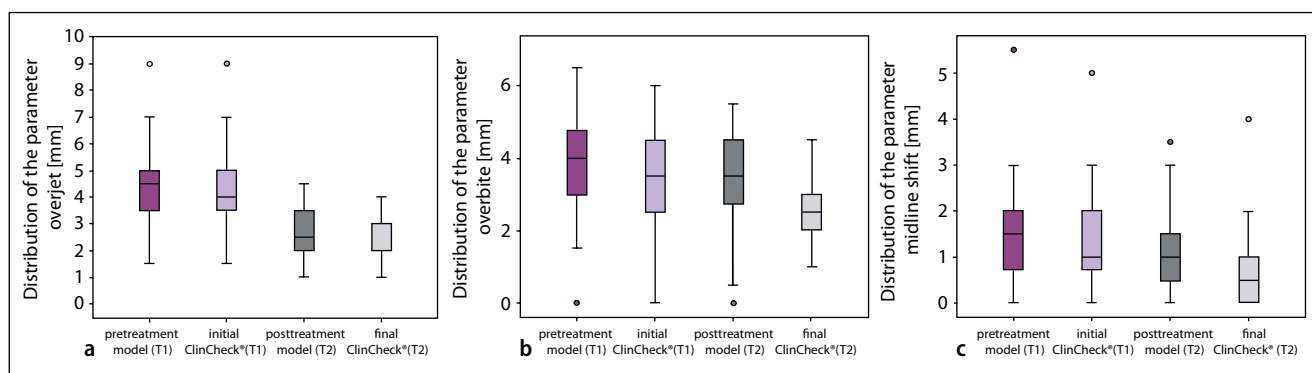


Figure 3. Distribution of parameters (in mm) on the pre-treatment model, initial ClinCheck®, post-treatment model and final ClinCheck® (n=35): (a) overjet, (b) overbite, (c) dental midline shift

Abbildung 3. Darstellung der Verteilung der Parameter (in mm) auf dem Anfangsmodell, Anfangs-ClinCheck®, Endmodell und End-ClinCheck® (n = 35): (a) Overjet, (b) Overbite, (c) dentale Mittellinierverschiebung

maximum 9 mm, SD ± 1.5 mm). The mean difference between the pre-treatment model and initial ClinCheck® was 0.08 mm (minimum -1 mm, maximum 0.5 mm, SD ± 0.3 mm).

At T2 the final ClinCheck®'s measurements were on average 2.4 mm (minimum 1 mm, maximum 4 mm, SD ± 0.7 mm). On the post-treatment model the mean overjet was 2.8 mm (minimum 1 mm, maximum 4.5 mm, SD ± 0.9 mm). The mean difference between the final ClinCheck® and the post-treatment model was 0.4 mm (minimum -1 mm, maximum 1.5 mm, SD ± 0.7 mm). Figure 3 illustrates these results.

Overbite

At T1 (Figure 3b) mean overbite on the pre-treatment model was 3.8 mm (minimum 0 mm, maximum 6.5 mm, SD ± 1.4 mm). On the initial ClinCheck® it measured 3.5 mm (minimum 0 mm, maximum 6 mm, SD ± 1.4 mm). The difference between the pre-treatment model and initial ClinCheck® was on average 0.3 mm (minimum -0.5 mm, maximum 1 mm, SD ± 0.4 mm).

At T2 (Figure 3b) mean overbite in the final ClinCheck® was 2.4 mm (minimum 1 mm, maximum 4 mm, SD ± 0.8 mm) and 3.3 mm in the post-treatment model (minimum 0.5 mm, maximum 5.5 mm, SD ± 1.3 mm). The mean difference between the final ClinCheck® and post-treatment model measured 0.9 mm (minimum -1 mm, maximum 3 mm, SD ± 0.9 mm).

Dental midline shift

The mean dental midline shift at T1 (Figure 3c) was 1.4 mm on the pre-treatment model (minimum 0 mm, maximum 5.5 mm, SD ± 1.1 mm) and 1.3 mm on the initial ClinCheck® (minimum 0 mm, maximum 5 mm, SD ± 1.0 mm). The mean difference between the pre-treatment model and initial ClinCheck® measured 1 mm (minimum -1 mm, maximum 1 mm, SD ± 0.4 mm).

At T2 (Figure 3c) mean midline shift was in the final ClinCheck® 0.7 mm (minimum 0 mm, maximum 4 mm, SD ± 0.9 mm) and 1.1 mm in the post-treatment model (minimum 0 mm, maximum 3.5 mm, SD ± 1 mm). The mean difference between the final Clin-

den) und im Unterkiefer durch eine Kombination aus ASR und Protrusion (47% der Probanden). Die durchschnittliche Aligneranzahl lag im Oberkiefer bei $n = 21$ und im Unterkiefer bei $n = 20$. Die durchschnittliche Behandlungsdauer betrug 10 Monate.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Vergleichs Anfangsmodell zu Anfangs-ClinCheck® und End-ClinCheck® zu Endmodell in Bezug auf die untersuchten Parameter beschrieben.

Overjet

Zum Zeitpunkt T1 ergab sich für den Parameter Overjet auf dem Anfangsmodell ein durchschnittlicher Wert von 4,5 mm (Minimum: 1,5 mm; Maximum: 9 mm; SD: $\pm 1,4$ mm). Auf dem Anfangs-ClinCheck® lag der Overjet im Durchschnitt bei 4,6 mm (Minimum: 1,5 mm; Maximum: 9 mm; SD: $\pm 1,5$ mm). Die Differenz zwischen Anfangsmodell und Anfangs-ClinCheck® betrug im Mittel 0,08 mm (Minimum: -1 mm; Maximum: 0,5 mm; SD: $\pm 0,3$ mm).

Zum Zeitpunkt T2 lagen die Messungen im End-ClinCheck® durchschnittlich bei 2,4 mm (Minimum: 1 mm; Maximum: 4 mm; SD: $\pm 0,7$ mm). Auf dem Endmodell betrug der Overjet im Mittel 2,8 mm (Minimum: 1 mm; Maximum: 4,5 mm; SD: $\pm 0,9$ mm). Die Differenz zwischen End-ClinCheck® und Endmodell lag im Mittel bei 0,4 mm (Minimum: -1 mm; Maximum: 1,5 mm; SD: $\pm 0,7$ mm). Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung.

Overbite

Zum Zeitpunkt T1 (Abbildung 3b) lag der Overbite auf dem Anfangsmodell durchschnittlich bei 3,8 mm (Minimum: 0 mm; Maximum: 6,5 mm, SD: $\pm 1,4$ mm). Auf dem Anfangs-ClinCheck® ergab sich ein Overbite von durchschnittlich 3,5 mm (Minimum: 0 mm; Maximum: 6 mm; SD: $\pm 1,4$ mm). Die Differenz zwischen Anfangsmodell und Anfangs-ClinCheck® lag im Mittel bei 0,3 mm (Minimum: -0,5 mm; Maximum: 1 mm; SD: $\pm 0,4$ mm).

Zum Zeitpunkt T2 (Abbildung 3b) betrug der Overbite im End-ClinCheck® durchschnittlich 2,4 mm (Minimum: 1 mm; Maximum: 4 mm; SD: $\pm 0,8$ mm) und im Endmodell 3,3 mm (Minimum:

Check® and post-treatment model was 0.4 mm (minimum -0.5 mm, maximum 1.5 mm, SD ± 0.5 mm).

Discussion

The computer-aided transfer and conversion of clinical tooth malalignments into a three-dimensional digital ClinCheck® image showed a mean deviation of 0.08 mm for the overjet on the pre-treatment model, 0.1 mm for the overbite and 0.3 mm for the dental midline shift. Minimal deviations were observed which were not clinically relevant in our parameters. Thus the treatment provider has access to a realistic virtual model (ClinCheck®) for further treatment planning.

What was striking about the results is that despite the fact that the transfer to a virtual image was relatively accurate and affected by only minimal deviations, larger differences between the virtual and actual treatment results were found. The final ClinCheck® showed more corrections and thus better treatment results than those actually present on the post-treatment model (real situation). Here, the mean difference was 0.4 mm (minimum to maximum range -1 mm to +1.5 mm for overjet and -0.5 mm to 1.5 mm dental midline shift) for the overjet and dental midline shift. The question arising here is whether these deviations are clinically relevant. An additional correction of the mean 0.4 mm difference between the predicted and actual treatment results to correct the overjet or rather the dental midline deviation, would mean the treatment duration would have to be extended through additional aligners, for example and there is not necessarily any clinical benefit in relation to the effort involved.

The largest deviations in this investigation, however, appeared in the parameter overbite (minimum to maximum range -1 mm to 3 mm). The amount of concordance between the predicted and actual treatment results was 14.3%. On one hand this may be due to the ClinCheck® measurement of the overbite using the ToothMeasure® grid, which was much more difficult than measuring the other overjet and midline shift parameters. On the other hand the cause of the deviation could in fact be due to the principle that teeth are harder to move in the vertical plane using Invisalign® (i.e. intrusion or extrusion of the anterior teeth) [12, 14] than they are in the sagittal plane, for instance [12, 14].

Kravitz et al. [14] examined tooth movements in the anterior region in 37 patients by scanning an impression of the actual final situation and superimposing it with the final ClinCheck®. The teeth that were not actively moved, i.e. the premolars and the molars, were selected as reference points for the superimpositions. This is how they took the intramaxillary measurements (i.e. the extent of the intrusion or extrusion). Nevertheless, relative movements of the reference teeth cannot be ruled out completely due to periodontal anchorage. That is why this study concentrated on intermaxillary measurement of the parameters overjet, overbite and dental midline shift.

One of the things demonstrated by the findings of the Kravitz working group [14] is a mean accuracy of intrusion movements in the anterior region of 41.3%. They aimed for a mean intrusion of 0.72 mm in their study. Other working groups, e.g. Nguyen and Cheng [19] and Clements et al. [7], were unable to achieve 100% intrusion either. Their results were however, significantly better in

0,5 mm; Maximum: 5,5 mm; SD $\pm 1,3$ mm). Die Differenz zwischen End-ClinCheck® und Endmodell lag im Mittel bei 0,9 mm (Minimum: -1 mm; Maximum: 3 mm; SD: $\pm 0,9$ mm).

Dentale Mittellinienabweichung

Die dentale Mittellinienabweichung betrug zum Zeitpunkt T1 (Abbildung 3c) auf dem Anfangsmodell durchschnittlich 1,4 mm (Minimum: 0 mm; Maximum: 5,5 mm; SD: $\pm 1,1$ mm) und auf dem Anfangs-ClinCheck® im Durchschnitt 1,3 mm (Minimum: 0 mm; Maximum: 5 mm; SD: $\pm 1,0$ mm). Die Differenz zwischen Anfangsmodell und Anfangs-ClinCheck® lag im Durchschnitt bei 1 mm (Minimum: -1 mm; Maximum: 1 mm; SD: $\pm 0,4$ mm).

Zum Zeitpunkt T2 (Abbildung 3c) betrug die Mittellinienverschiebung im End-ClinCheck® durchschnittlich 0,7 mm (Minimum: 0 mm; Maximum: 4 mm; SD: $\pm 0,9$ mm) und im Endmodell 1,1 mm (Minimum: 0 mm; Maximum: 3,5 mm; SD: ± 1 mm). Die Differenz zwischen End-ClinCheck® und Endmodell lag im Mittel bei 0,4 mm (Minimum: -0,5 mm; Maximum: 1,5 mm; SD: $\pm 0,5$ mm).

Diskussion

Die EDV-basierte Übertragung und Konvertierung der klinischen Zahnfehlstellung in eine dreidimensionale digitale Darstellung dem ClinCheck® zeigte zum Anfangsmodell für den Overjet eine durchschnittliche Abweichung von 0,08 mm, für den Overbite 0,1 mm und für die dentale Mittellinienabweichung 0,3 mm. Es ergaben sich für die untersuchten Parameter lediglich minimale Abweichungen, die klinisch sicherlich nicht relevant sind. Damit steht dem Behandler ein realitätsnahes virtuelles Modell (ClinCheck®) für die weitere Behandlungsplanung zur Verfügung.

Auffällig war die Tatsache, dass sich, obwohl die Übertragung in die virtuelle Situation relativ genau war, lediglich mit minimalen Abweichungen behaftet, größere Unterschiede zwischen dem virtuellen und dem tatsächlichen Behandlungsergebnis zeigten. Die Endposition des ClinCheck® zeigte stärkere Korrekturen und damit bessere Behandlungsergebnisse, als dies auf dem Endmodell (reale Situation) tatsächlich der Fall war. Hier lag die durchschnittliche Abweichung für die Parameter Overjet und dentale Mittellinienabweichung bei 0,4 mm [minimaler und maximaler Bereichswert: -1 mm bis +1,5 mm (Overjet) bzw. -0,5 mm bis 1,5 mm (dentale Mittellinienabweichung)]. Danach stellt sich die Frage der klinischen Relevanz hinsichtlich der Abweichungen. Eine zusätzliche Korrektur von durchschnittlich 0,4 mm Differenz zwischen prognostiziertem und tatsächlichem Behandlungsergebnis für die Korrektur des Overjets bzw. der dentalen Mittellinienabweichung würde eine Verlängerung der Behandlungszeit durch beispielsweise zusätzliche Aligner bedeuten. Der klinische Nutzen scheint in Relation zum Aufwand nicht zwingend gegeben.

Die größten Abweichungen in unserer Untersuchung ergaben sich jedoch für den Parameter Overbite (minimaler und maximaler Bereichswert: -1 mm und 3 mm). Die Übereinstimmung zwischen prognostiziertem und tatsächlichem Behandlungsergebnis lag bei 14,3%. Zum einen könnte dies an der Vermessung des Overbites im ClinCheck® mittels des ToothMeasure®-Rasters liegen, die im Vergleich zu den anderen Parametern Overjet und Mittellinienver-

terms of tooth corrections in the vertical plane (between 79% and 84%) compared to those of Kravitz et al. [14]. There are similar results in the literature regarding extrusive tooth movements with Invisalign®. Kravitz et al. [14] only achieved a low level of accuracy in this area. Their extrusion results (showing an accuracy of 29.6%) are the worst in comparison to intrusion.

Although only intermaxillary measurements were taken into account in our investigation, the results support those of Kravitz et al. [14] as far as the difficulties of planned vertical tooth movements.

Thus, when tooth movements are being planned in the vertical plane, the ClinCheck®'s final overbite must be subjected to more critical examination as it appears to be less accurate than for example, the overjet. In clinical terms this means that additional case refinements must be made when correcting the overbite or the overbite must undergo a certain degree of overcorrection at the start of treatment to achieve the desired therapeutic goals. However, this would lead to longer treatment times and more aligners.

To support planned vertical tooth movements with intrusive or extrusive anterior tooth movements Boyd [6] and the manufacturer Align Technology [2] recommend application of bilateral 1 mm thick (buccal-lingual dimension), horizontally bevelled, right-angled attachments in the premolar region to improve aligner retention. Vertical movements can also be supported by additional elastics. Additional treatment with a labial multibracket appliance may become necessary in exceptional cases to achieve the desired treatment goal [3, 8].

Conclusions

1. Invisalign® technology reveals minimal deviations with regard to the computer-aided transfer and conversion of clinical tooth malalignments into a three-dimensional digital image in ClinCheck®.
2. Tooth corrections in the vertical plane were the most difficult to achieve. The overbite parameter showed larger deviations between the final ClinCheck® and the post-treatment model (actual treatment result) than did the parameters overjet and dental midline shift parameters.
3. Therefore, vertical overcorrection in the final ClinCheck®, case refinement toward the end of treatment or supportive measures (e.g. the use of horizontally bevelled attachments or elastics) is advisable to achieve the individually intended therapeutic goal.

Conflict of interest

The corresponding author states that there is no conflict of interest.

schiebung deutlich schwieriger war. Zum anderen scheint die Ursache der Abweichungen vielmehr darin zu liegen, dass grundsätzlich Zahnbewegungen in der vertikalen Ebene (z. B. Intrusion oder Extrusion der Frontzähne; [12, 14]) mit Invisalign® schwieriger zu realisieren sind als beispielsweise Zahnbewegungen in sagittaler Richtung [12, 14].

Kravitz et al. [14] untersuchten Bewegungen im Frontzahnbereich von 37 Patienten, indem ein Abdruck der realen Endsituation eingescannt und mit dem End-ClinCheck® überlagert wurde. Als Referenzpunkte für die Überlagerungen wurden die nicht aktiv bewegten Zähne, Prämolaren und Molaren, gewählt. Damit wurden intramaxilläre Messungen (z. B. Ausmaß von Intrusion und Extrusion), durchgeführt. Allerdings können relative Bewegungen der Referenzzähne aufgrund einer rein desmodontalen Verankerung nicht völlig ausgeschlossen werden. Daher haben wir uns in der vorliegenden Untersuchung auf die intermaxilläre Vermessung der Parameter Overjet, Overbite und dentale Mittellinienabweichung konzentriert.

Die Ergebnisse von Kravitz et al. [14] zeigten unter anderem, dass die Genauigkeit von Intrusionsbewegungen im anterioren Bereich durchschnittlich bei 41,3% lag. Die Arbeitsgruppe strebte in ihrer Untersuchung eine durchschnittliche Intrusion von 0,72 mm an. Auch andere Arbeitsgruppen, beispielsweise Nguyen u. Cheng [19] sowie Clements et al. [7], konnten zwar keine hundertprozentige Intrusion erreichen, erzielten aber im Vergleich zu Kravitz et al. [14] deutlich bessere Ergebnisse bezüglich Zahnkorrekturen in der vertikalen Ebene (zwischen 79 und 84%). Ähnliche Ergebnisse liegen für extrusive Zahnbewegungen mit Invisalign® vor. Kravitz et al. [14] konnten diesbezüglich lediglich eine geringe Genauigkeit zeigen. Im Vergleich zur Intrusion waren die Ergebnisse mit einer Genauigkeit von 29,6% für die Extrusion am schlechtesten.

Obwohl unsere Untersuchung lediglich intermaxilläre Messungen berücksichtigt, stützen unsere Ergebnisse bezüglich der Problematik von geplanten vertikalen Zahnbewegungen die von Kravitz et al. [14].

Demnach muss bei geplanten Zahnbewegungen in der vertikalen Ebene der im End-ClinCheck® festgelegte Overbite kritischer bewertet werden, da er scheinbar weniger präzise erreicht werden kann als zum Beispiel der eingestellte Overjet. Dies bedeutet als klinische Konsequenz, dass zusätzliche „case refinements“ zur Korrektur des Overbites eingeplant werden müssen oder aber schon zu Beginn der Behandlung eine gewisse Überkorrektur des Overbites vorgenommen werden muss, um die gewünschten Therapieziele zu erreichen. Allerdings sind damit längere Behandlungszeiten und eine größere Anzahl von Alignern verbunden.

Zur Verstärkung von vertikal geplanten Zahnbewegungen, beispielsweise bei intrusiven oder extrusiven Zahnbewegungen der Frontzähne, empfehlen Boyd [6] und der Hersteller Align Technology [2] die Applikation von bilateralen 1 mm dicken (bukkal-linguale Dimension) horizontal abgeschrägten rechtwinkligen Attachments im Bereich der Prämolaren, um die Retention der Aligner zu erhöhen. Auch kann die Vertikalbewegung zusätzlich durch Gummizüge unterstützt werden. In Ausnahmefällen kann eine zusätzliche Behandlung mit einer labialen Multibracket-Appa-

References

1. Align Technology. The Invisalign® reference guide. http://passthrough.fw-notify.net/download/620383/http://www.aligntechinstitute.com/files/pdf/foreign/RefGuide_G.pdf
2. Align Technology. Attachment protocol summary. <http://www.aligntechinstitute.com/GetHelp/Documents/pdf>
3. Bollen AM, Huang G, King G et al (2003) Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 1: Ability to complete treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 124:496–501
4. Boyd RL (2005) Surgical-orthodontic treatment of two skeletal Class III patients with Invisalign® and fixed appliances. *J Clin Orthod* 39:245–258
5. Boyd RL (2007) Complex orthodontic treatment using a new protocol for the Invisalign® appliance. *J Clin Orthod* 41:525–547
6. Boyd RL (2008) Esthetic orthodontic treatment using the invisalign® appliance for moderate to complex malocclusions. *J Dent Educ* 72:948–967
7. Clements KM, Bollen AM, Huang G et al (2003) Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 2: dental improvements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 124:502–508
8. Djeu G, Shelton C, Maganzini A (2005) Outcome assessment of Invisalign® and traditional orthodontic treatment compared with the American Board of Orthodontics objective grading system. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 128:292–298
9. Eliades T, Pratsinis H, Athanasiou AE et al (2009) Cytotoxicity and estrogenicity of Invisalign® appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 136:100–103
10. Gracco A, Mazzoli A, Favoni O et al (2009) Short-term chemical and physical changes in invisalign® appliances. *Aust Orthod J* 25:34–40
11. Hönn M, Göz G (2006) A premolar extraction case using the Invisalign® system. *J Orofac Orthop* 67:385–394
12. Joffe L (2003) Invisalign®: early experiences. *J Orthod* 30:348–352
13. Kravitz ND, Kusnoto B, Agran B, Viana G (2008) Influence of attachments and interproximal reduction on the accuracy of canine rotation with Invisalign®. A prospective clinical study. *Angle Orthod* 78:682–687
14. Kravitz ND, Kusnoto B, BeGole E et al (2009) How well does Invisalign® work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign®. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 135:27–35
15. Kuo E, Miller RJ (2003) Automated custom-manufacturing technology in orthodontics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 123:578–581
16. Meier B, Wiemer KB, Miethke RR (2003) Invisalign®-patient profiling. Analysis of a prospective survey. *J Orofac Orthop* 64:352–358
17. Melkos AB (2005) Advances in digital technology and orthodontics: a reference to the Invisalign® method. *Med Sci Monit* 11:PI 39–PI 42
18. Miller RJ, Duong TT, Derakhshan M (2002) Lower incisor extraction treatment with the Invisalign® system. *J Clin Orthod* 36:95–102
19. Nguyen CV, Chen J (2006) Three-dimensional superimposition tool. In: Tuncay OC (ed) *The Invisalign® system*. Quintessence, New Malden, p 12–32
20. Schupp W, Haubrich J, Neumann I (2010) Invisalign® (®) treatment of patients with craniomandibular disorders. *Int Orthod* 8:253–267
21. Schuster S, Eliades G, Zinelis S et al (2004) Structural conformation and leaching from in vitro aged and retrieved Invisalign® appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 126:725–728
22. Vlaskalic V, Boyd RL (2002) Clinical evolution of the Invisalign® appliance. *J Calif Dent Assoc* 30:769–776
23. Wheeler TT (2004) Invisalign® material studies. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 125:19A

ratur erforderlich sein, um das gewünschte Therapieziel zu erreichen [3, 8].

Schlussfolgerungen

1. Die Invisalign®-Technologie liefert hinsichtlich der EDV-basierenden Übertragung und Konvertierung der klinischen Zahnfehlstellung in eine dreidimensionale digitale Darstellung dem ClinCheck® lediglich minimale Abweichungen.
2. Zahnkorrekturen in der vertikalen Ebene waren am schwierigsten zu realisieren. Der Parameter Overbite zeigte im Vergleich zu den Parametern Overjet und dentale Mittellinienverschiebung größere Abweichungen zwischen der Endposition des ClinChecks® und dem Endmodell (reales Behandlungsergebnis).
3. Daher erscheint eine vertikale Überkorrektur im End-ClinCheck®, ein „case refinement“ gegen Ende der Behandlung oder unterstützende Maßnahmen (z. B. die Verwendung von horizontal abgeschrägten Attachments oder Gummizügen) sinnvoll, um das individuell angestrebte Therapieziel zu erreichen.

Interessenkonflikt

Die korrespondierende Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Correspondence address

Dr. Elena Krieger
 Poliklinik für Kieferorthopädie
 Universitätsmedizin der Johannes-Gutenberg-Universität
 Augustusplatz 2
 55131 Mainz
 Germany
 Phone (+49/6131) 17-3038, Fax -5569
 e-mail: elena.krieger@unimedizin-mainz.de