

Invisalign® treatment in the anterior region

Were the predicted tooth movements achieved?

Invisalign®-Behandlungen im Frontzahnbereich

Wurden die vorhergesagten Zahnbewegungen erreicht?

Elena Krieger¹, Jörg Seiferth², Ivana Marinello¹, Britta A. Jung¹, Susanne Wriedt¹, Collin Jacobs¹, Heinrich Wehrbein¹

Abstract

Objective. Based on our previous pilot study, the objective of this extended study was to compare (a) casts to their corresponding digital ClinCheck® models at baseline and (b) the tooth movement achieved at the end of aligner therapy (Invisalign®) to the predicted movement in the anterior region.

Materials and methods. Pre- and post-treatment casts as well as initial and final ClinChecks® models of 50 patients (15–63 years of age) were analyzed. All patients were treated with Invisalign® (Align Technology, Santa Clara, CA, USA). Evaluated parameters were: upper/lower anterior arch length and intercanine distance, overjet, overbite, dental midline shift, and the irregularity index according to Little. The comparison achieved/predicted tooth movement was tested for equivalence [adjusted 98.57% confidence interval (–1.00; +1.00)].

Results. Before treatment the anterior crowding, according to Little, was on average 5.39 mm (minimum 1.50 mm, maximum 14.50 mm) in the upper dentition and 5.96 mm (minimum 2.00 mm, maximum 11.50 mm) in the lower dentition. After treatment the values were reduced to 1.57 mm (minimum 0 mm, maximum 4.5 mm) in the maxilla and 0.82 mm (minimum 0 mm, maximum 2.50 mm) in the mandible. We found slight deviations between pretreatment casts and initial ClinCheck® ranging on average from –0.08 mm (SD ±0.29) for the overjet and up to –0.28 mm (SD ±0.46) for the upper anterior arch length. The difference between achieved/predicted tooth movements ranged on average from 0.01 mm (SD ±0.48) for the lower anterior arch length, up to 0.7 mm (SD ±0.87) for the overbite. All parameters were significantly equivalent except for the overbite (–1.02; –0.39).

Conclusion. Performed with aligners (Invisalign®), the resolution of the partly severe anterior crowding was successfully accomplished. Resolving lower anterior crowding by protrusion of the anterior teeth (i.e., enlargement of the anterior arch length)

Zusammenfassung

Ziel. Basierend auf unserer vorangegangenen Pilotuntersuchung war das Ziel dieser erweiterten Studie, a) Anfangsmodelle zu Behandlungsbeginn mit der korrespondierenden Anfangsposition im ClinCheck® und b) die mittels Aligner-Therapie (Invisalign®) erreichten Zahnbewegungen mit den prognostizierten Bewegungen im anterioren Bereich zu vergleichen.

Material und Methode. Anfangs- und Endmodelle sowie Anfangs- und Endpositionen des ClinChecks® von insgesamt 50 Patienten (15 bis 63 Jahre alt) wurden analysiert. Alle Patienten waren ausschließlich mit Invisalign® (Align Technology, Santa Clara, CA, USA) behandelt worden. Die evaluierten Parameter waren: anteriore Zahnbogenlänge in Maxilla und Mandibula, intercanine Distanz in Maxilla und Mandibula, Overjet, Overbite, dentale Mittellinienverschiebung (Maxilla zu Mandibula) sowie der Irregularitätsindex nach Little. Der Vergleich prognostizierte und erreichte Zahnbewegung wurde getestet auf Äquivalenz [adjustiertes 98,57%-Konfidenzintervall (–1,00; +1,00)].

Ergebnisse. Die prätherapeutisch vorliegenden frontalen Engstände (nach Little) von im Mittel 5,39 mm (minimal 1,50 mm, maximal 14,50 mm) in der Maxilla und 5,96 mm (minimal 2,00 mm, maximal 11,50 mm) in der Mandibula wurden durch die Behandlung auf 1,57 mm (minimal 0 mm, maximal 4,5 mm) in der Maxilla und 0,82 mm (minimal 0 mm, maximal 2,50 mm) in der Mandibula reduziert. Es zeigten sich lediglich geringe Abweichungen zwischen Anfangsmodell und Anfangs-ClinCheck® von im Durchschnitt –0,08 mm (SD ±0,29) für den Parameter Overjet und von bis zu –0,28 mm (SD ±0,46) für die obere anteriore Zahnbogenlänge. Die Differenz zwischen erreichter und prognostizierter Zahnbewegung betrug von durchschnittlich 0,01 mm (±0,48) für die untere anteriore Zahnbogenlänge bis 0,7 mm (±0,87) für den Overbite. Alle Parameter waren signifikant äquivalent außer dem Overbite (–1,02; –0,39).

Schlussfolgerung. Die Auflösung der teilweise sehr starken frontalen Engstände wurde durch die Aligner-Behandlung (Invisalign®) erfolgreich durchgeführt. Die Engstandsauflösung mittels Protrusion der Unterkieferfrontzähne (d. h. Vergrößerung der

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

² Private practice, Mainz, Germany

seems well predictable. The initial ClinCheck® models provided high accuracy compared to the initial casts. The achieved tooth movement was in concordance with the predicted movement for all parameters, except for the overbite.

Keywords

Aligner · Invisalign® · ClinCheck® · Anterior crowding · Anterior region · Irregularity index according to Little

Introduction

In addition to the lingual technique, Invisalign® technology has been established worldwide for nearly a decade as an esthetic alternative to the labial multibracket appliance [5, 16, 17, 19]. The application and implementation of the ClinCheck® method, such as CAD/CAM technology, stereolithography, and the three-dimensional digital representation of the clinical situation, is well-known and has been described in the literature [18].

ClinCheck® provides the basis for any interaction between the orthodontist and Invisalign® (Align Technology). It is the starting point for assessment by the orthodontist in terms of individual treatment steps to be implemented in the aligner and virtual set-up of the treatment goal. Therefore, from the orthodontist's perspective, as much concordance as possible would be ideal between the actual initial situation and the digital representation, and between tooth movements simulated digitally and the actual clinical treatment outcome. This is particularly important because the orthodontist has less influence during active orthodontic treatment.

Previous studies of the Invisalign® technique have focused on individual case reports [4, 10, 12, 22, 24, 28, 29] or technical or material-specific aspects [3, 9, 11, 23, 27, 30, 32], or they addressed oral hygiene [21, 26] and quality of life [26, 31]. There have been few previous studies examining the precision and effectiveness of individual tooth movement or the concordance between ClinCheck® and the final cast from the orthodontist's perspective [5, 6, 7, 8, 13, 16, 17, 18].

In our earlier pilot study [18], fewer subjects were descriptively examined using fewer parameters, and we analyzed the accuracy of the treatment outcome differently. The objective of this extended investigation (based on the pilot study [18]) was to test the anterior region's correlations regarding the initial cast at the start of treatment compared to the corresponding initial position in the ClinCheck® and the tooth movement attained using aligner therapy (Invisalign®) compared to the digitally predicted tooth movement. To do so, the following parameters were examined: upper and lower anterior dental arch lengths, upper and lower intercanine distances, overjet, overbite, and the dental midline deviation (maxilla to mandible). In addition, the change in frontal crowding achieved by the Invisalign® treatment was quantified using the irregularity index according to Little [20].

anterioren Zahnbogenlänge) erscheint gut voraussagbar. Der Anfangs-ClinCheck® bietet verglichen mit dem Anfangsmodell eine hohe Genauigkeit. Die erreichten Zahnbewegungen waren bei allen Parametern, außer dem Overbite, in Übereinstimmung mit den vorausgesagten Bewegungen.

Schlüsselwörter

Aligner · Invisalign® · ClinCheck® · Frontaler Engstand · Anteriore Region · Irregularitätsindex nach Little

Einleitung

Die Invisalign®-Technologie hat sich seit rund einer Dekade neben der Lingualtechnik als ästhetische Alternative zur labialen Multibracket-Apparatur weltweit etabliert [5, 16, 17, 19]. Die Anwendungs- und Verfahrensweise des Systems, wie CAD/CAM-Technologie, Stereolithographie-Verfahren sowie die dreidimensionale digitale Darstellung der klinischen Situation, der ClinCheck®, ist bekannt und in der Literatur beschrieben [18].

Der ClinCheck® stellt die Basis für jegliche Interaktion zwischen dem Behandler und Invisalign® (Align Technology) dar. Er ist Ausgangspunkt für die Bewertung seitens des Behandlers hinsichtlich der einzelnen Behandlungsschritte, die im jeweiligen Aligner umgesetzt werden sollen, und des virtuellen Set-ups, dem gewünschten Behandlungsziel. Daher ist aus Sicht des Behandlers eine möglichst hohe Übereinstimmung zwischen der realen Ausgangssituation und der digitalen Darstellung sowie zwischen den in der digitalen Darstellung simulierten Zahnbewegungen und dem tatsächlich erreichten klinischen Behandlungsergebnisses wünschenswert. Dies ist von besonderer Bedeutung, da dem Behandler weniger Einflussmöglichkeiten während der aktiven kieferorthopädischen Behandlung zur Verfügung stehen.

Bisherige Untersuchungen zur Invisalign®-Technologie konzentrierten sich beispielsweise auf einzelne Falldarstellungen [4, 10, 12, 22, 24, 28, 29], auf technische oder materialspezifische Aspekte [3, 9, 11, 23, 27, 30, 32] oder beschäftigten sich mit Mundhygiene [21, 26] und Lebensqualität [26, 31]. Bisher sind nur wenige Untersuchungen zur Genauigkeit und Effektivität von einzelnen Zahnbewegungen oder zur Übereinstimmung von ClinCheck® und Endmodell aus Behandlersicht verfügbar [5, 6, 7, 8, 13, 16, 17, 18].

In unserer Pilotstudie [18] wurden ein kleineres Probandenkollektiv anhand einer geringeren Anzahl an Parametern deskriptiv untersucht und eine andere Form der Evaluierung zur Genauigkeit des Behandlungsergebnisses durchgeführt. Das Ziel dieser erweiterten Untersuchung war es, basierend auf der Pilotstudie [18] die Übereinstimmung für den anterioren Bereich a) von dem Anfangsmodell zu Behandlungsbeginn und der korrespondierenden Anfangsposition im ClinCheck® und b) von der durch die Therapie mittels Alignern (Invisalign®) erreichten und der digital prognostizierten Zahnbewegung zu

Materials and methods

Study design and patients

The subjects consisted of 50 patients without systemic diseases (n = 16 male, n = 34 female; age 15–63, average age 33 ± 11.19), who received orthodontic treatment exclusively using Invisalign® (Align Technology, Santa Clara, CA, USA) in the period between January 2005 and March 2010. Their initial and final casts, as well as the initial and final positions of the corresponding ClinCheck® representations, were used for this study.

The main inclusion criterion for patient recruitment was frontal crowding in the maxilla and/or mandible as measured quantitatively according to Little's index of irregularity [20]. Exclusion criteria were patients in whom previous treatment with other orthodontic systems (e.g., multibracket appliance or retention methods) or a combined orthodontic–surgical orthodontic treatment was required. Other exclusion criteria were the presence of a cleft lip or palate, or any other syndromic orofacial malformations.

The main treatment objective of orthodontic treatment was to improve the individual esthetic situation in the frontal area by correcting frontal crowding. This was accomplished by the following therapeutic steps: (a) IPR (interproximal reduction), (b) incisor protrusion, (c) a combination of IPR and protrusion, (d) distalization, (e) a combination of IR and distalization, and (f) extraction of a front tooth. Based on the individual patient, the measures to be taken were determined by the orthodontist and depended on the initial overjet (potential protrusion) or tooth shape (IPR potential). To increase aligner retentions, patients were fitted with additional attachments as recommended by the manufacturer. These attachments consisted of tooth-colored composite material and depended on the way or the number of teeth to be moved in the ClinCheck® method.

Measurement of the initial and final casts

After completion of orthodontic treatment, the initial and final casts were measured. These measurements were taken using an electronic digital caliper (Studenroth GmbH Präzisionstechnik, Schöneck, Germany) calibrated according to VDI/DE/DGQ m2618 Sheet 9.1 with an accuracy of 0.01 mm. The measurement points were identical for all casts. The following five variables were tested:

- anterior dental arch length according to Korkhaus [15] (in mm): creation of a line from the front labial surface of the central perpendicular incisors to the line connecting the measuring points of the anterior dental arch width (maxilla: the transverse line connecting the central groove of the first upper premolar; mandible: transverse line connecting the approximate contact points of the lower premolars).
- intercanine distance (in mm): line in the transverse plane connecting the corresponding canines in each jaw.
- overjet (in mm): distance between the incisal edge of the greatest width of the ventrally projecting maxillary incisor and its antagonist (sagittal incisor relationship).

prüfen. Dazu wurden folgende Parameter untersucht: obere und untere anteriore Zahnbogenlänge, obere und untere intercanine Distanz, Overjet, Overbite sowie dentale Mittellinienabweichung [Oberkiefer (OK) zu Unterkiefer (UK)]. Des Weiteren wurde die durch die Behandlung mittels Invisalign® erreichte Veränderung des frontalen Engstands anhand des Irregularitätsindex nach Little [20] quantitativ erfasst.

Material and Methode

Studiendesign und Patienten

Das Probandenkollektiv bestand aus 50 Patienten ohne Allgemeinerkrankungen (n = 16 männlich, n = 34 weiblich; im Alter von 15 bis 63 Jahren, Durchschnittsalter $33 \pm 11,19$ Jahre), die ausschließlich kieferorthopädisch mittels Invisalign® (Align Technology, S.C, Calif., USA) im Zeitraum zwischen 01/2005 und 03/2010 behandelt wurden. Ihre Anfangs- und Endmodelle sowie die Anfangs- und Endpositionen der korrespondierenden ClinCheck®-Darstellungen wurden für diese Untersuchung verwendet.

Haupteinschlusskriterium war ein frontaler Engstand im Ober- und/oder Unterkiefer, der mittels des Irregularitätsindex nach Little [20] quantitativ erfasst wurde. Ausgeschlossen waren Patienten, bei denen eine Vorbehandlung mit anderen orthodontischen Systemen (z. B. Multibracket-Apparatur oder Retentionsfälle) oder eine kombinierte kieferchirurgisch-kieferorthopädische Behandlung erforderlich war. Weitere Ausschlusskriterien waren das Vorliegen von Lippen-Kiefer-Gaumenspalten oder anderen syndromassozierten orofazialen Fehlbildungen.

Das Hauptbehandlungsziel der orthodontischen Behandlung bestand in der Verbesserung der individuellen ästhetischen Situation im frontalen Bereich durch Auflösen der frontalen Engstände. Dies erfolgte durch folgende Therapiemaßnahmen: a) approximale Schmelzreduktion (ASR), b) Protrusion der Frontzähne, c) Kombination aus ASR und Protrusion, d) Distalisation, e) Kombination aus ASR und Distalisation und f) Extraktion eines Frontzahns. Die patientenabhängigen, individuell festgelegten Maßnahmen wurden durch den Behandler bestimmt und richteten sich u. a. nach dem anfänglich vorliegendem Overjet (Möglichkeit zur Protrusion) oder der Zahnform (Möglichkeiten zur ASR). Um die Retention der Aligner zu erhöhen, wurden zusätzlich entsprechend den Empfehlungen des Herstellers, Attachments (Befestigungselemente aus zahnfarbenen Kompositmaterial) in Abhängigkeit von Art und Anzahl der zu bewegenden Zähne im ClinCheck® geplant und später beim Patienten appliziert.

Vermessung der Anfangs- und Endmodelle

Nach Abschluss der orthodontischen Behandlung wurden die Anfangs- und Endmodelle vermessen. Die Vermessung erfolgte unter Zuhilfenahme einer elektronischen Digital-Schiebelehre (Studenroth GmbH Präzisionstechnik, Deutschland), kalibriert nach VDI/DE/DGQ m2618 Blatt 9,1 mit einer Mess-

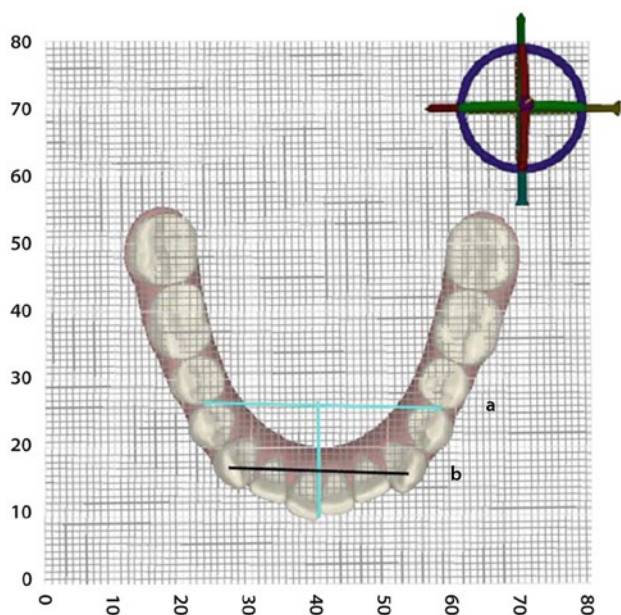


Figure 1. Presentation of the measurement in the ClinCheck®. **a** lower anterior arch length (light blue line): grid plane orientation “occlusal”, followed by removal of the not measured jaw; **b** lower intercanine distance (black line): setting like in **a**

Abbildung 1. Darstellung der Vermessungen des ClinChecks®. **a** untere anteriore Zahnbogenlänge (hellblaue Linie): Rasterebeneneinstellung “okklusale”, nach Entfernung des nicht gemessenen Kiefers; **b** untere intercanine Distanz (schwarze Linie): Einstellung wie **a**

- overbite (in mm): distance between the incisal edge of the lower incisor and the point at which the upper incisor overlaps the lower one to the greatest degree (vertical incisor relationship).
- dental midline deviation (in mm): relation of the upper dental midline to the lower one.
- irregularity index according to Little [20]: sum of the mesiodistal contact point deviations (anatomical contact point of a tooth to that of the adjacent tooth), mesial 13 to mesial 23 and 33–43 (five values each in [mm]). Classification: 0=perfect alignment, 1–3=minimal, 4–6=moderate, 7–9=severe, 10=very severe irregularity.

Measurement of the ClinCheck®

The ClinCheck® was measured using the ToothMeasure® tool of the Invisalign® software (ClinCheck® Version 2.6, Align Technology). The virtual measurement grid can be set to different orientations and positioned over the individual ClinCheck® images on a scale of 1–50 mm.

The smallest possible scale setting of 1 mm was selected for the measurements. They were taken visually to the nearest 0.5 mm by the examiner. This was verified by the high concordance between the initial cast and initial ClinCheck® in our pilot study [18].

genauigkeit von 0,01 mm. Die Messpunkte waren für alle Modelle identisch. Es wurden folgende fünf Variablen überprüft:

- anteriore Zahnbogenlänge nach Korkhaus ([15]; in mm): Erstellung des Lots von der vordersten Labialfläche der mittleren Inzisivi auf die Verbindungslinie der Messpunkte der anterioren Zahnbogenbreite (OK: transversale Verbindungslinie der Zentralfissur der ersten oberen Prämolaren; UK: transversale Verbindungslinie der approximalen Kontaktpunkte der unteren Prämolaren);
- intercanine Distanz (in mm): Verbindungslinie in der Transversalebene zwischen den korrespondierenden Eckzahnspitzen im jeweiligen Kiefer;
- Overjet (in mm): Distanz zwischen Inzisalkante des am weitesten ventral stehenden OK-Inzisivus und seinem Antagonisten (sagittale Frontzahnbeziehung);
- Overbite (in mm): Distanz zwischen der Inzisalkante des unteren Schneidezahns und dem Punkt, an dem der obere den unteren Inzisivus am weitesten überlappt (vertikale Frontzahnbeziehung);
- dentale Mittellinienabweichung (in mm): Relation der oberen dentalen Mittellinie zur unteren;
- Irregularitätsindex nach Little [20]: Summe der mesiodistalen Kontaktpunktabweichungen (anatomischer Kontaktpunkt eines Zahns zu dem des benachbarten Zahns), mesial 13 bis mesial 23, sowie 33 bis 43 (jeweils 5 Werte in [mm]). Einteilung 0=perfektes Alignment, 1–3=minimale, 4–6=moderate, 7–9=starke, 10=sehr starke Abweichung.

Vermessung des ClinChecks®

Die Vermessung des ClinChecks® erfolgte mit dem Vermessungs-Tool ToothMeasure® der Invisalign®-Software (ClinCheck® Version 2,6, Align Technology, S.C., Kalifornien, USA). Das virtuelle Vermessungsraster kann in verschiedene Ausrichtungen eingestellt und über die einzelnen Abbildungen des ClinChecks® gelegt werden, bei einer Skalierung von 1–50 mm.

Für die Vermessungen wurde die kleinstmögliche Einstellung von 1-mm-Skalierung gewählt. Die Messungen wurden durch den Untersucher visuell auf 0,5 mm bestimmt. Die hohe Übereinstimmung zwischen Anfangsmodell und Anfangs-ClinCheck® der Pilotstudie verifiziert dies [18].

Die Anfangs- und Endposition des jeweiligen ClinChecks® wurden vermessen. Die Messpunkte waren den Messpunkten der korrespondierenden prä- und posttherapeutischen Modelle (Anfangs- und Endmodell) gleich.

Die Einstellung des ClinCheck® bzw. des Rasters wurde wie folgt vorgenommen: Die Vermessung der oberen und unteren anterioren Zahnbogenlänge erfolgte nach Entfernung des nicht zu messenden Kiefers durch Positionierung der Rasterebene auf „okklusale“ (Abbildung 1).

Die obere und untere intercanine Distanz (Abbildung 1) sowie die Vermessung des Irregularitätsindex nach Little [20] wurden analog zur anterioren Zahnbogenlänge in der Rasterebene „okklusale“ eingestellt und abgelesen.

The initial and final positions of the corresponding ClinCheck® were measured. The measurement points were identical to those of the corresponding pre- and post-therapeutic casts (initial and final casts).

The ClinCheck® and grid were set as follows: the upper and lower anterior dental arch lengths were measured after removing the jaw that was not to be measured by positioning the grid level to “occlusal” (Figure 1).

The upper and lower intercanine distances (Figure 1) and the measurements of the index of irregularity value according to Little [20] were set and read off in the “occlusal” grid level, in the same manner as for the anterior dental arch length.

We used our pilot study settings [18] to determine the parameters overjet, overbite, and dental midline [18].

Null hypothesis

With respect to the null hypothesis, we assumed that there was a difference between (a) the initial cast and initial ClinCheck® at the start of treatment and (b) between the final ClinCheck position® and therapeutic outcome (final cast) at the end of treatment. Therefore, we calculated (a) the difference in measurements between the initial cast and initial ClinCheck®. We also noted (b) the discrepancy in the difference between the initial and final casts, as well as between the initial and final position in the ClinCheck®.

Statistical analyses

The collection and descriptive analysis of these data were carried out using SPSS software (Statistical Package for Social Science) for Windows, version 18.0 (SPSS Software Corp., Chicago, IL, USA). The evaluation was performed as a descriptive analysis of continuous variables by specifying the statistical parameters of mean, minimum, maximum, and standard deviation (SD), and on the basis of relative frequencies. In addition, p values were adjusted for multiple testing (Bonferroni method, global level of 5%). All parameters of the achieved vs. predicted tooth movements were tested for equivalence, with an adjusted (98.57%) confidence interval (-1.00, +1.00). A deviation between -1 mm and +1 mm was assumed to be clinically irrelevant. The results were graphed using box plots.

Method errors

In addition, an independent second series of measurements was taken for all parameters to test the reliability of the measurement method. For error analysis, the Dahlberg formula was used:

$$s = \sqrt{\sum d^2/2n}$$

(d = difference of duplicate measurements in mm; n = number of duplicate measurements). According to Dahlberg, there is sufficient precision if the method error is below a value of 1.

In the measurement of the plaster casts for the upper/lower anterior dental arch length parameters, the Dahlberg error was 0.3 mm. For the intercanine distance in the maxilla and mandi-

Zur Bestimmung der Parameter Overjet, Overbite und dentale Mittellinie wurden die Einstellungen der Pilotstudie verwendet [18].

Nullhypothese

Bezüglich der Nullhypothese wurde angenommen, dass a) zwischen Anfangsmodell und Anfangs-ClinCheck® zu Behandlungsbeginn und b) zwischen der Endposition im ClinCheck® und dem therapeutischen Therapieergebnis (Endmodell) zu Behandlungsende ein Unterschied besteht. Dazu wurden a) die Differenz aus den Messungen zwischen Anfangsmodell und Anfangs-ClinCheck® gebildet und b) die Diskrepanz der Differenz zwischen Anfangs- und Endmodell und zwischen Anfangs- und Endposition im ClinCheck® ermittelt.

Statistische Analyse

Die Erfassung und deskriptive Analyse der ermittelten Daten wurde mittels des Softwareprogramms SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) für die Windows Version 18.0 (SPSS Software, Chicago, IL, USA) durchgeführt. Die Auswertung erfolgte als deskriptive Beschreibung der stetigen Variablen durch Angabe der statistischen Kennzahlen Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung (SD) sowie auf der Basis relativer Häufigkeiten. Darüber hinaus wurden p-Werte auf multiples Testen adjustiert (Bonferroni-Methode, globales Niveau von 5%). Alle Parameter der erreichten vs. prognostizierten Zahnbewegung wurden auf Äquivalenz getestet, mit einem adjustierten (98,57%) Konfidenzintervall (-1 bis +1). Eine Abweichung zwischen -1 und +1 mm wurde als klinisch nicht relevant angenommen. Die grafische Darstellung der Ergebnisse erfolgte mittels Boxplot-Diagrammen.

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 obere bzw. untere anteriore Zahnbogenlänge bei 0,3 mm. Für die intercanine Distanz im Ober- und Unterkiefer lag der Dahlberg-Fehler bei jeweils 0,1 mm. Für den Overjet betrug der Messfehler 0,2 mm, für den Overbite 0,4 mm und für die dentale Mittellinienabweichung 0,1 mm.

Der Methodenfehler hinsichtlich der Vermessung des ClinChecks® ergab für die obere anteriore Zahnbogenlänge 0,3 mm und für die untere 0,4 mm. Für die intercanine Distanz lag er im Ober- und im Unterkiefer bei 0,2 mm. Für den Overjet ergab sich ein Methodenfehler von 0,2 mm, für den Overbite 0,5 mm

Table 1. Irregularity index according to Little [20]: pre- and post-therapeutical (pre- and post-treatment casts, initial and final ClinChecks®)

	Pre-treatment casts				Post-treatment casts				Initial ClinChecks®				Final ClinChecks®			
	Mean	SD	Min.	Max.	Mean	SD	Min.	Max.	Mean	SD	Min.	Max.	Mean	SD	Min.	Max.
	(mm)		(mm)		(mm)		(mm)		(mm)		(mm)		(mm)		(mm)	
Upper dentition	5.39	2.23	1.50	14.50	1.57	0.98	0	4.50	5.66	1.98	3.00	14.00	1.27	1.01	0	6.50
Lower dentition	5.96	2.39	2.00	11.50	0.82	0.50	0	2.50	5.91	1.99	2.50	11.00	0.57	0.45	0	1.50

Table 2. Irregularity index according to Little [20]: distribution of the scale**Tabelle 2.** Irregularitätsindex nach Little [20]: Häufigkeit der Einteilung

	Pre-treatment casts					Post-treatment casts				
	0	1–3	4–6	7–9	≥ 10	0	1–3	4–6	7–9	≥ 10
Upper dentition	0% (n=0)	24% (n=12)	52% (n=26)	22% (n=11)	2% (n=1)	16% (n=8)	80% (n=40)	4% (n=2)	0% (n=0)	0% (n=0)
Lower dentition	0% (n=0)	26% (n=13)	34% (n=17)	34% (n=17)	6% (n=3)	54% (n=27)	46% (n=23)	0% (n=0)	0% (n=0)	0% (n=0)

0: perfect alignment, 1–3: minimal, 4–6: moderate, 7–9: severe, ≥ 10: very severe irregularity (n = 50).

ble, it was 0.1 mm in each case. The measurement error was 0.2 mm for overjet, 0.4 mm for overbite, and 0.1 mm for dental midline deviation.

The method error in terms of the ClinCheck® measurements was 0.3 mm for the upper anterior dental arch length and 0.4 mm for the lower one. For the intercanine distance, it was 0.2 mm in both the maxilla and mandible. There was a method error of 0.2 mm for overjet, 0.5 mm for overbite, and 0.2 mm for the dental midline deviation.

Thus, the measurement methods were sufficiently reliable.

Results

Treatment

Quantification of frontal crowding according to Little's index of irregularity [20] revealed that there was a mean irregularity of 5.39 mm at the start of treatment (min. 1.50 mm, max. 14.50 mm) in the maxilla and of 5.96 mm (min. 2.00 mm, max. 11.50 mm) in the mandible (Table 1). According to Little's classification [20], moderate irregularity was most frequent in the maxilla (52%) and moderate to severe irregularity was most frequent in the mandible (34%; Table 1). After the end of treatment, all patients—with the exception of two subjects (in the maxilla)—demonstrated perfect alignment or minimum irregularity (Table 2). The mean irregularity in the maxilla was 1.57 mm (min. 0 mm, max. 4.5 mm) and 0.82 mm in the mandible (min. 0 mm, max. 2.50 mm; Table 1).

Crowding in the maxilla was eliminated most often by IPR of the incisors (48% of subjects; Figure 2a); in the mandible, it was corrected by combining IPR with anterior teeth protrusion

und für die dentale Mittellinienabweichung 0,2 mm. Somit bestand eine ausreichende Zuverlässigkeit der Messmethoden.

Ergebnisse

Behandlung

Die Quantifizierung des frontalen Engstands anhand des Irregularitätsindex nach Little [20] ergab, dass vor Behandlungsbeginn eine durchschnittliche Irregularität von 5,39 mm (minimal 1,50 mm, maximal 14,50 mm) im OK und von 5,96 mm (minimal 2,00 mm, maximal 11,50 mm) im UK vorlag (Tabelle 1). Nach der Einteilung von Little [20] lag am häufigsten im OK mit 52% eine moderate und im UK mit 34% eine moderate bzw. starke Abweichung vor (Tabelle 2). Nach Behandlungsende wiesen bis auf zwei Probanden (im OK) alle Patienten ein perfektes Alignment bzw. eine minimale Abweichung auf (Tabelle 2). Die durchschnittliche Irregularität lag im OK bei 1,57 mm (min. 0 mm, max. 4,5 mm) und im UK bei 0,82 mm (min. 0 mm, max. 2,50 mm; Tabelle 1).

Der Engstand wurde im OK am häufigsten durch eine ASR der Frontzähne (48% der Probanden) (Abbildung 2a) und im UK durch eine Kombination aus ASR mit Protrusion der Frontzähne (40% der Probanden; Abbildung 2b) aufgelöst. Des Weiteren erfolgten im UK ausschließlich eine ASR der Frontzähne bei 30%, eine ASR mit Protrusion der Frontzähne bei 40% und eine ausschließliche Protrusion bei 18% der analysierten Fälle. Dies ergibt, dass bei 58% der Probanden eine Protrusion mit oder ohne ASR der Frontzähne durchgeführt wurde. Die durchschnittliche Aligneranzahl lag im Oberkiefer bei n = 25 und im

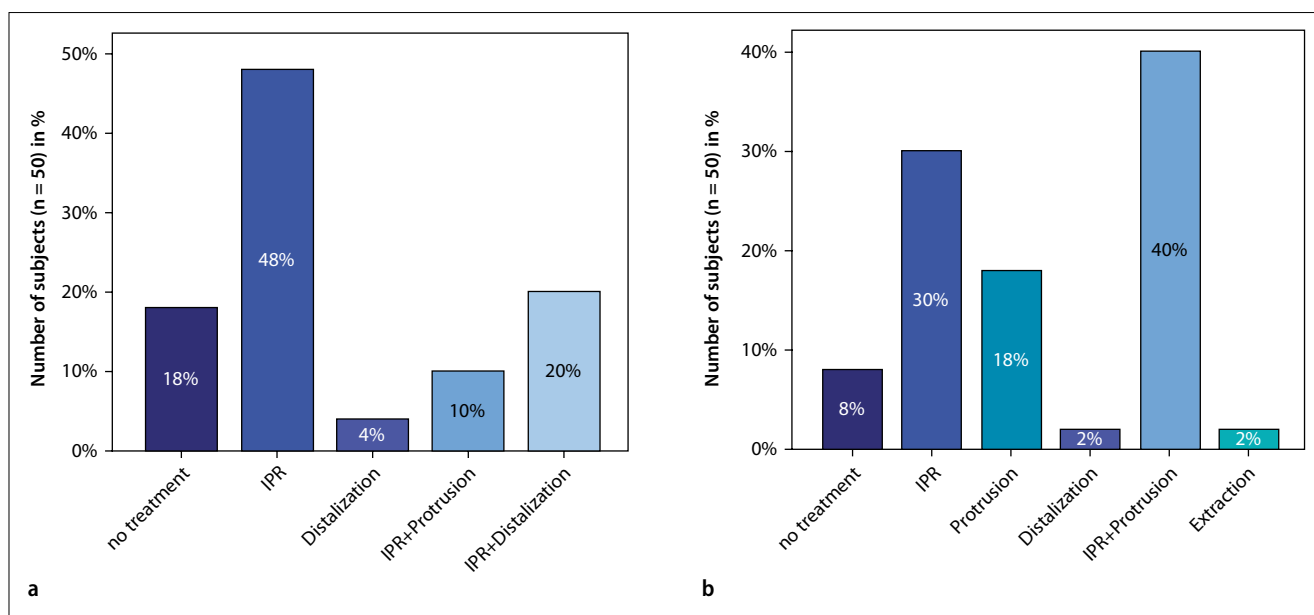


Figure 2. Distribution of the percentage frequency of resolving the anterior crowding (using ClinCheck®). **a** Maxilla, **b** Mandibula

Abbildung 2. Darstellung der Verteilung der prozentualen Häufigkeit der Auflösung des frontalen Engstands (anhand des ClinChecks®). **a** Oberkiefer, **b** Unterkiefer

(40% of subjects; Figure 2b). In the mandible, furthermore, sole IPR of the front teeth occurred in 30% of the analyzed cases, IPR with protrusion of the incisors in 40%, and sole protrusion in 18%. This shows that 58% of the subjects underwent protrusion with or without front teeth IPR. The mean number of aligners was $n = 25$ in the maxilla and $n = 24$ in the mandible. The average duration of treatment was 13 months.

Measurements of the initial and final casts and of the initial and final ClinChecks® are illustrated in Table 3. The extent of tooth movements generated by orthodontic treatment is shown in Figure 3, specifically the difference between pre- and post-therapeutic casts, i.e., the initial cast minus the final cast. Movements of up to +4.5 mm for the parameter “overjet” were found in terms of a reduction.

Comparison of initial casts and initial ClinCheck®

The mean difference between the initial cast and initial ClinCheck® (Table 4) was -0.28 ± 0.46 mm for the anterior dental arch length in the maxilla, 0.14 ± 0.36 mm in the mandible, 0.23 ± 0.37 mm for the upper intercanine distance, and 0.12 ± 0.35 mm for the lower one, -0.08 ± 0.29 mm for the overjet, 0.17 ± 0.38 mm for the overbite, and 0.09 ± 0.29 mm for the dental midline deviation.

Comparison of achieved vs. predicted outcome of treatment

The mean difference between (initial cast/final cast) – (initial ClinCheck®/final ClinCheck®) was 0.04 ± 0.65 mm for the upper anterior dental arch length, 0.01 ± 0.48 mm for the lower

Unterkiefer bei $n = 24$. Die durchschnittliche Behandlungsdauer betrug 13 Monate.

Die Ergebnisse der Vermessung der Anfangs- und Endmodelle sowie der Anfangs- und End-ClinChecks® sind in Tabelle 3 dargestellt. Das Ausmaß der durch die kieferorthopädische Behandlung erfolgten Zahnbewegungen ist in Abbildung 3 dargestellt und zwar die Differenz zwischen prä- und posttherapeutischen Modellen, d. h. Anfangs- minus Endmodell. Es wurden Bewegungen von bis zu +4,5 mm bei dem Parameter Overjet im Sinne einer Reduktion gefunden.

Vergleich Anfangsmodell und Anfangs-ClinCheck®

Die Differenz zwischen Anfangsmodell und Anfangs-ClinCheck® (Tabelle 4) betrug im Mittel für die anteriore Zahnbogenlänge im OK $-0,28 \pm 0,46$ mm, im UK $0,14 \pm 0,36$ mm, für die obere intercanine Distanz $0,23 \pm 0,37$ mm und die untere $0,12 \pm 0,35$ mm, für den Overjet $-0,08 \pm 0,29$ mm, für den Overbite $0,17 \pm 0,38$ mm und für die dentale Mittellinienabweichung $0,09 \pm 0,29$ mm.

Vergleich erreichtes vs. prognostiziertes Behandlungsergebnis

Die Differenz aus (Anfangsmodell/Endmodell) – (Anfangs-ClinCheck®/End-ClinCheck®; Abbildung 3) betrug im Durchschnitt für die obere anteriore Zahnbogenlänge $0,04 \pm 0,65$ mm, die untere $0,01 \pm 0,48$ mm, für die obere intercanine Distanz $-0,13 \pm 0,59$ mm, die untere $-0,13 \pm 0,59$ mm, für den Overjet $-0,34 \pm 0,54$ mm, für den Overbite $-0,71 \pm 0,87$ mm und für dentale Mittellinienabweichung $-0,24 \pm 0,46$ mm.

Table 3. Distribution of the parameters: pre- and post-therapeutical (pre- and post-treatment casts, as well as initial and final ClinChecks®) (n = 50)**Tabelle 3.** Verteilung der Parameter: prä- und post-therapeutisch (Anfangs-, Endmodelle, sowie Anfangs-, End-ClinChecks®; n = 50)

Parameter	Pre-treatment casts				Post-treatment casts				Initial ClinChecks®				Final ClinChecks®			
	Mean (mm)	SD	Min. (mm)	Max. (mm)	Mean (mm)	SD	Min. (mm)	Max. (mm)	Mean (mm)	SD	Min. (mm)	Max. (mm)	Mean (mm)	SD	Min. (mm)	Max. (mm)
Upper anterior arch length	17.10	1.62	13.00	20.50	16.20	1.33	13.75	19.25	16.81	1.64	13.00	20.00	15.93	1.30	13.00	18.75
Upper intercanine distance	33.51	2.05	28.50	38.25	33.67	2.00	26.75	38.00	33.29	2.08	29.25	38.25	33.33	2.06	25.75	38.25
Lower anterior arch length	14.60	1.71	10.00	18.25	14.39	1.42	11.25	18.00	14.47	1.70	10.00	18.50	14.29	1.26	11.25	17.25
Lower intercanine distance	24.57	1.69	20.50	29.75	25.27	1.52	21.50	28.75	24.45	1.76	20.25	30.25	25.28	1.50	21.50	28.75
Overjet	4.31	1.43	1.50	9.00	2.94	0.94	1.25	5.75	4.38	1.41	1.75	8.75	2.65	0.81	1.25	5.25
Overbite	4.05	1.50	0.00	8.75	3.49	1.19	0.00	5.75	3.88	1.51	0.00	8.75	2.61	0.78	0.75	4.75
Dental midline shift	1.38	0.99	0.00	5.25	0.99	0.89	0.00	3.75	1.29	0.93	0.00	4.75	0.65	0.83	0.00	3.75

one, -0.13 ± 0.59 mm for the upper intercanine distance, -0.13 ± 0.59 mm for the lower one, -0.34 ± 0.54 mm for the overjet, -0.71 ± 0.87 mm for the overbite, and -0.24 ± 0.46 mm for the dental midline deviation (Figure 3).

The test for equivalence revealed (Table 5) that values for the parameters upper/lower anterior dental arch length, intercanine distance, overjet, and dental midline deviation were all within the adjusted 98.57% confidence interval (-1 to $+1$). Thus, there were no significant or clinically relevant differences; equivalence was demonstrated.

On the other hand, the test for equivalence for the parameter overbite showed that the values of -1.02 and -0.39 were not within the adjusted 98.57% confidence interval (-1 to $+1$; Table 5). Thus, there was no equivalence.

Discussion

The three-dimensional digital representation and transfer of clinical tooth positions (first images in the ClinCheck®) demonstrated minimum deviations within a small range in the 50 patients studied compared to the initial casts for the parameters (minimum overjet: -0.08 mm, maximum upper anterior dental arch length: -0.28 mm); the higher number of subjects and additional parameters investigated have reinforced our

Die Testung auf Äquivalenz zeigte Folgendes (Tabelle 5): Die Werte für die Parameter obere und untere anteriore Zahnbogenlänge sowie intercanine Distanz, Overjet und dentale Mittellinienverschiebung, lagen alle innerhalb des adjustierten 98,57%-Konfidenzintervalls [-1 bis $+1$]. Es zeigten sich somit keine signifikanten oder klinisch relevanten Unterschiede; Äquivalenz wurde bewiesen.

Der Parameter Overbite dagegen zeigte bei der Testung auf Äquivalenz, dass die ermittelten Werte von $-1,02$ und $-0,39$ nicht innerhalb des adjustierten 98,57%-Konfidenzintervalls [-1 bis $+1$] lagen (Tabelle 5). Damit ergab sich keine Äquivalenz.

Diskussion

Die dreidimensionale digitale Darstellung und Übertragung der klinischen Zahnstellung (erste Abbildung im ClinCheck®) zeigte für die 50 untersuchten Patienten im Vergleich zum Anfangsmodell für die untersuchten Parameter minimale Abweichungen mit geringer Spannweite (Minimum Overjet: $-0,08$ mm; Maximum obere anteriore Zahnbogenlänge: $-0,28$ mm) und bestätigte durch die höhere Anzahl an Probanden und den zusätzlich untersuchten Parametern die Ergebnisse unserer Pilotstudie [18]. Die vorliegenden Abweichungen wurden

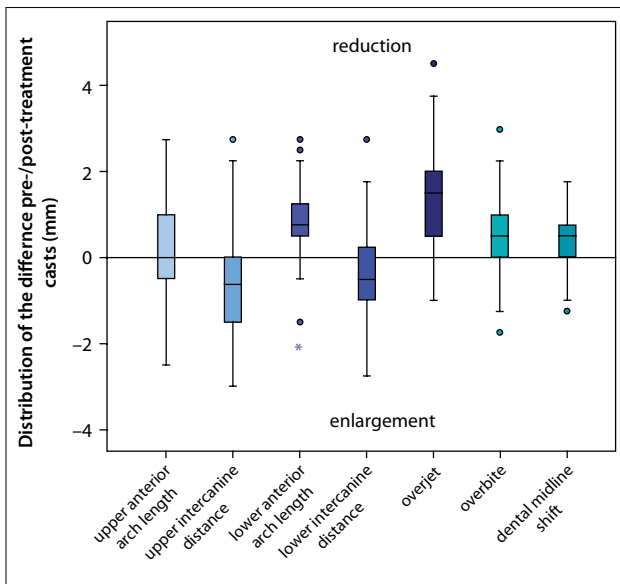


Figure 3. Distribution of the achieved tooth movements (pre-treatment minus post-treatment casts; in mm; n=50). 0-line no change, above 0-line reduction, below 0-line enlargement of the actual parameter

Abbildung 3. Darstellung der Verteilung der therapeutisch erreichten Zahnbewegungen (Anfangsmodell minus Endmodell) [mm] (n=50). 0-Linie keine Veränderung, oberhalb 0-Linie Reduktion, unterhalb 0-Linie Vergrößerung des jeweiligen Parameters

pilot study's results [18]. The differences that do exist were considered clinically irrelevant due to their small amount.

Therefore, a relatively realistic virtual cast (ClinCheck®) is available to the orthodontist for further treatment planning of various orthodontic tooth movements in the anterior area. The working group of Zilberman et al. [33] confirmed this: they used electronic calipers to examine several parameters using a plaster cast compared to the corresponding digital 3D scan representation and concluded that the accuracy is clinically acceptable; however, measurements using electronic calipers on plaster casts delivered the highest accuracy and reproducibility. Keating et al. [14] also reported a mean difference between measurements on plaster casts and corresponding 3D scans of 0.14 mm, similar to our study results.

The results of our investigation reveal that the difference between the achieved and the predicted tooth movement was mostly minimal (for example, an average of 0.01 mm for the parameter lower anterior dental arch length), but it did reach 0.71 mm for the parameter overbite. Thus, there was a high degree of agreement between the planned and the tooth movements in the sagittal and transverse planes actually achieved, even if tooth movements of up to ± 4.5 mm (overjet reduction) were made. This is also confirmed by the test for equivalence,

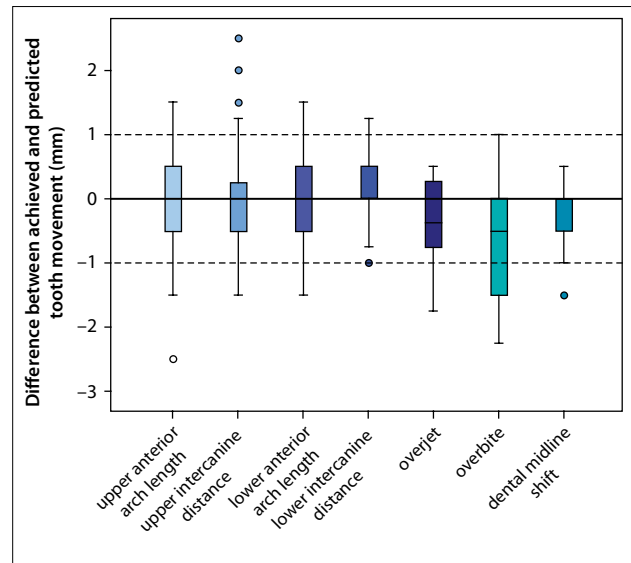


Figure 4. Distribution of the difference between achieved (pre-treatment minus post-treatment casts) and predicted tooth movement (initial minus final ClinChecks®, in mm; n=50). Above 0-line (solid line) predicted but not achieved tooth movement. Below 0-line more tooth movement achieved than predicted, for example overcorrection or side effect. Clinical relevance = deviation by ± 1 mm (dashed line)

Abbildung 4. Darstellung der Verteilung der Differenz zwischen erreichter (Anfangs- minus Endmodell) und prognostizierter Zahnbewegung (Anfangs- minus End-ClinCheck®) (mm) (n=50). Oberhalb 0-Linie (schwarze Linie) prognostizierte, aber nicht erreichte Zahnbewegung; unterhalb 0-Linie mehr erreichte Bewegung als geplant, beispielsweise eine Überkorrektur oder Nebeneffekt. Klinische Relevanz Abweichung ab ± 1 mm (gestrichelte Linie)

aufgrund ihres geringen Ausmaßes als klinisch nicht relevant erachtet.

Insofern steht dem Anwender ein relativ realitätsnahes virtuelles Modell (ClinCheck®) für die weitere Behandlungsplanung der verschiedenen orthodontischen Zahnbewegungen im anterioren Bereich zur Verfügung. Die Arbeitsgruppe Zilberman et al. [33] bestätigt dies. Sie untersuchte mittels einer elektronischen Schieblehre mehrere Parameter anhand eines Gipsmodells im Vergleich zur korrespondierenden digitalen 3D-Scandarstellung. Sie gab an, dass die Genauigkeit klinisch akzeptabel sei, die Vermessung mittels elektronischer Schieblehre am Gipsmodell aber die höchste Genauigkeit und Reproduzierbarkeit liefere. Auch Keating et al. [14] berichteten von einer Abweichung zwischen Messungen an Gipsmodellen und deren 3D-Scanning von durchschnittlich 0,14 mm, was den Ergebnissen unserer Studie ähnelt.

Die Ergebnisse unserer Untersuchung wiesen auf, dass die Differenz zwischen erreichter und prognostizierter Zahnbewegung zum Teil äußerst minimal war (beispielsweise für den Parameter untere anteriore Zahnbogenlänge durchschnittlich 0,01 mm), aber für den Parameter Overbite bis 0,71 mm reichte. Es ergab sich demnach eine hohe Übereinstimmung zwischen den geplanten und tatsächlich erreichten Zahnbewegungen in der sagittalen sowie transversalen Ebene; auch wenn Zahnbe-

Table 4. Distribution of the difference between casts and their corresponding ClinCheck® models at baseline, i.e., pre-treatment casts and the initial ClinCheck® models (n=50)**Tabelle 4.** Verteilung der Differenz zwischen Modellen und ihren korrespondierenden ClinCheck®-Abbildungen zu Behandlungsbeginn (Anfangsmodell und Anfangs-ClinCheck®; n=50)

Parameter	Mean (mm)	SD	Min. (mm)	Max. (mm)
Upper anterior arch length	-0.28	0.46	-0.75	1.00
Upper intercanine distance	0.23	0.37	-0.75	1.00
Lower anterior arch length	0.14	0.36	-0.50	1.00
Lower intercanine distance	0.12	0.35	-1.00	0.75
Overjet	-0.08	0.29	-0.75	0.50
Overbite	0.17	0.38	-0.50	1.00
Dental midline shift	0.09	0.29	-1.00	0.75

since all parameters were significantly equivalent with the exception of the overbite.

On the other hand, movements in the vertical plane (overbite parameter) resulted in larger deviations than in the other parameters, as in our pilot study [18]: they were -0.71 mm on average (minimum -2.25 mm, maximum 1.00 mm). Even after adjustment and multiple testing for equivalence, the overbite results were beyond the defined confidence interval, in contrast to all other investigated parameters. In this respect, our results show yet again that vertical tooth movements are more difficult to achieve with the Invisalign® technique than transverse or sagittal tooth movements, such as changes to the lower anterior dental arch length. Other research groups have come to similar conclusions: Kravitz et al. [17] reported a mean accuracy of 41.3% for anterior intrusion movements. Other groups, such as Nguyen and Cheng [25] and Clements et al. [7], however, achieved significantly better results (79–84%) in comparison to Kravitz et al. [17]. Other vertical tooth movements—extrusions using Invisalign®—were reported by Kravitz et al. [17] with low accuracy (29.6%).

Therefore, as already described in our pilot study [18], treating patients who have to undergo extensive vertical tooth movements, horizontal right-angled attachments in the premolar area should be applied bilaterally to increase the aligner retention (as recommended by the manufacturer [1] and other authors [6]), or vertical elastics should be used. In terms of clinical and practical applications for the orthodontist planning the Clin-

Table 5. Distribution of the difference between achieved tooth movement (difference pre-/post-treatment cast) and predicted tooth movement (difference initial/final ClinCheck®); adjusted (98.57%) confidence interval (-1; +1)**Tabelle 5.** Verteilung der Differenz zwischen erreichter Zahnbewegung (Differenz aus Anfangs-/Endmodell) und prognostizierter Zahnbewegung (Differenz Anfangs-/End-ClinCheck®); adjustiertes (98,57%) Konfidenzintervall [-1; +1]

Parameters	Mean (mm)	SD	Confidence interval
Upper anterior arch length	0.04	0.65	-0.19; -0.27
Upper intercanine distance	-0.13	0.59	-0.33; -0.09
Lower anterior arch length	0.01	0.48	-0.16; -0.18
Lower intercanine distance	0.13	0.59	-0.05; -0.31
Overjet	-0.34	0.54	-0.54; -0.15
Overbite	-0.71	0.87	-1.02; -0.39
Dental midline shift	-0.24	0.46	-0.40; -0.07

wegungen von bis zu +4,5 mm (Overjet-Reduktion) durchgeführt wurden. Dies bestätigte auch der Test auf Äquivalenz, da alle Parameter mit Ausnahme des Overbite signifikant äquivalent waren.

Bewegungen in der vertikalen Ebene (Parameter Overbite) dagegen ergaben wie in der Pilotstudie [18] größere Abweichungen im Vergleich zu den anderen Parametern. Sie betragen im Mittel -0,71 mm (minimal -2,25 mm, maximal 1,00 mm). Auch nach Adjustierung und multipler Testung auf Äquivalenz lagen im Gegensatz zu allen anderen untersuchten Parametern die Messergebnisse für den Overbite außerhalb des definierten Konfidenzintervalls. Insofern zeigen unsere Ergebnisse erneut, dass vertikale Zahnbewegungen schwieriger mit Invisalign®-Technik zu realisieren sind als transversale oder sagittale Zahnbewegungen, wie beispielsweise die Veränderung der unteren anteriore Zahnbogenlänge. Auch andere Arbeitsgruppen kommen zu ähnlichen Ergebnissen: Kravitz et al. [17] gaben unter anderem für Intrusionsbewegungen im anterioren Bereich eine durchschnittliche Genauigkeit von 41,3% an. Nguyen u. Cheng [25] sowie Clements et al. [7] erzielten jedoch im Vergleich zu Kravitz et al. [17] deutlich bessere Ergebnisse (zwischen 79 und 84%). Weitere vertikale Zahnbewegungen, Extrusionen mit Invisalign®, wurden von Kravitz et al. [17] mit nur einer geringen Genauigkeit angegeben (29,6% Genauigkeit).

Daher sollten, wie in unserer Pilotstudie beschrieben [18], in Behandlungsfällen, bei denen umfangreiche vertikale Zahnbewegungen durchgeführt werden sollen, horizontale rechtwinkelige Attachments im Bereich der Prämolaren bilateral appliziert werden, um die Retention der Aligner zu erhöhen (nach Empfehlung des Herstellers [1] und anderer Autoren [6]) oder vertikale Gummizüge genutzt werden. Dies bedeutet letztlich für den Behandler bezüglich der klinisch-praktischen Anwendung, dass möglicherweise zusätzliche „case refinements“ oder eine gewisse Überkorrektur des Overbite bei der ClinCheck®-Planung nötig sind. Damit können längere Behandlungszeiten

Check®, this ultimately means that additional case refinements or a degree of overbite over-correction may be necessary. This may involve longer treatment times or a greater number of aligners [18]. Consequently, the orthodontist must always critically evaluate tooth movements in the vertical plane because these tend to be achieved with less accuracy [18].

The primary treatment goal in this study was to correct frontal crowding in these subjects. We noticed that the treatment resolved even very severe pretherapeutical frontal irregularities in several cases (≥ 10 mm of contact point deviation according to Little [20] before therapy). Only in two subjects, slightly imperfect alignment or a minimal irregularity was achieved in the maxilla after therapy (according to Little's classification [20]). Crowding in the mandible was eliminated by protrusion with or without IPR in 58% of subjects. Protrusion of the incisors implies an extension of the lower anterior dental arch length. In our study, an increase of up to +3 mm was planned (difference between the initial and final ClinCheck®; Figure 4). Therefore, the high correlation between the predicted and achieved tooth movement for the lower anterior dental arch length parameter for the proposed crowding correction can be considered positive, indicating that the protrusion was successful and apparently well predicted. However, the fact that we did not study the sagittal incisor position using lateral cephalograms (in particular after front teeth protrusion) is a study limitation. We cannot make any claims regarding individual prognoses or long-term stability.

Conclusion

- Frontal crowding, some of which was severe, was successfully corrected by treatment using aligners (Invisalign®).
- Crowding correction using incisor protrusion (i.e., extension of the anterior dental arch length) appears to be easy to predict and implement.
- The three-dimensional digital ClinCheck® representation of the Invisalign® technology again revealed only minor differences in relation to the initial clinical situation, as regards the additional parameters investigated. Therefore, the desired maximum compliance exists, and the orthodontist is provided with a precise tool for treatment planning with regard to various tooth movements in the anterior region.
- With a larger study cohort and after statistical analysis, the parameter overbite also displayed the greatest deviations between the predicted and achieved tooth movements in comparison with the other parameters we investigated. Obviously the correction of an increased overbite requires special attention.

Acknowledgments

We would like to thank the staff at the Institute for Medical Biometry, Epidemiology and Computer Science at the University of Medicine of Johannes Gutenberg University in Mainz for their kind assistance and advice in this investigation and for statistical analysis of the data.

bzw. eine größere Anzahl von Alignern verbunden sein [18]. Folglich muss der Behandler daher Zahnbewegungen in der vertikalen Ebene grundsätzlich kritischer bewerten, da sie scheinbar weniger präzise erreicht werden können [18].

Die vorrangige Therapie in dieser Studie bestand in der Auflösung der frontalen Engstände der Probanden. Auffallend war, dass die zum Teil sehr starken prätherapeutischen frontalen Irregularitäten (10 mm Kontaktpunktabweichung nach Little, [20]) durch die Behandlung behoben wurden. Lediglich bei zwei Probanden wurde im Oberkiefer posttherapeutisch kein perfektes Alignment bzw. eine nur geringe Abweichung erreicht (Einteilung nach Little, [20]). Der Engstand im Unterkiefer wurde bei 58% der Probanden durch eine Protrusion mit oder ohne ASR aufgelöst. Eine Protrusion der Frontzähne bedeutet eine Vergrößerung der unteren anterioren Zahnbogenlänge. In unserer Studie wurden bis zu +3 mm Vergrößerung geplant (Differenz Anfangs- und End-ClinCheck®; Abbildung 4). Daher ist die hohe Übereinstimmung zwischen erreichter und prognostizierter Zahnbewegung für den Parameter untere anteriore Zahnbogenlänge für die geplante Engstandsauflösung als positiv zu bewerten und deutet darauf hin, dass die Protrusion erfolgreich durchgeführt wurde bzw. scheinbar gut voraussagbar war. Es sollte allerdings kritisch angemerkt werden, dass die sagittale Frontzahnstellung, insbesondere nach einer Protrusion der Frontzähne, anhand von Fernröntgenseitenbildern nicht untersucht wurde. Somit ist über die individuelle Prognose und Langzeitstabilität keine Aussage möglich.

Schlussfolgerung

- Die Auflösung teilweise sehr starker frontaler Engstände konnte durch die Behandlung mit Alignern (Invisalign®) erfolgreich durchgeführt werden.
- Die Engstandsauflösung mittels Protrusion der Frontzähne (d. h. Vergrößerung der anterioren Zahnbogenlänge) erscheint gut voraussagbar und durchführbar zu sein.
- Die dreidimensionale digitale ClinCheck®-Darstellung der Invisalign®-Technologie zeigte erneut nur minimale Abweichungen in Relation zur klinischen Ausgangssituation, auch für die zusätzlich untersuchten Parameter. Daher ist die angestrebte größtmögliche Übereinstimmung gegeben und der Behandler findet ein präzises Tool für seine Behandlungsplanung bezüglich der verschiedenen Zahnbewegungen im anterioren Bereich.
- Der Parameter Overbite zeigte auch bei einem größeren Probandenkollektiv und nach statistischer Analyse im Vergleich zu den übrigen und zusätzlich untersuchten Parametern die größten Abweichungen zwischen prognostizierter und erreichter Zahnbewegung. Daher bedarf die Korrektur eines erhöhten Overbite besonderer Aufmerksamkeit.

Danksagung

Wir danken den Mitarbeitern des Instituts für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik an der Universitäts-

Conflict of interest

On behalf of all authors, the corresponding author states that there are no conflicts of interest.

medizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz für ihre freundliche Unterstützung und Beratung bei der Ermittlung und statistischen Analyse der Daten.

Interessenkonflikt

Die korrespondierende Autorin gibt für sich und ihre Koautorinnen an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

References

- Alignetech (2012) http://institute.alignetech.com/International/documents/RZ_Quick%20Start%20Guide%20-%20Generic_1250_G_final-2.pdf. Accessed 10 July 2012
- Align Technology (2012) Attachment protocol summary [<http://www.alignetechinstitute.com/GetHelp/Documents/pdf>]. Accessed 09 July 2012
- 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
- Boyd RL (2005) Surgical-orthodontic treatment of two skeletal Class III patients with Invisalign® and fixed appliances. *J Clin Orthod* 39:245–258
- Boyd RL (2007) Complex orthodontic treatment using a new protocol for the Invisalign® appliance. *J Clin Orthod* 41:525–547
- Boyd RL (2008) Esthetic orthodontic treatment using the invisalign® appliance for moderate to complex malocclusions. *J Dent Educ* 72:948–967
- 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
- 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
- Eliades T, Pratsinis H, Athanasiou AE et al (2009) Cytotoxicity and estrogenicity of Invisalign® appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 136:100–103
- Giancotti A, Farina A (2010) Treatment of collapsed arches using the invisalign system. *J Clin Orthod* 44:416–425
- Gracco A, Mazzoli A, Favoni O et al (2009) Short-term chemical and physical changes in invisalign® appliances. *Aust Orthod J* 25:34–40
- Hönn M, Göz G (2006) A premolar extraction case using the Invisalign® system. *J Orofac Orthop* 67:385–394
- Joffe L (2003) Invisalign®: early experiences. *J Orthod* 30:348–352
- Keating AP, Knox J, Bibb R, Zhurov AI (2008) A comparison of plaster, digital and reconstructed study model accuracy. *J Orthod* 35(3):191–201
- Korkhaus G (1939) Gebiss-, Kiefer- und Gesichtsorthopädie. In: Bruhn C (Hrsg) *Handbuch der Zahnheilkunde*, Bd 4. Bergmann, München
- 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
- 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
- Krieger E, Seiferth J, Saric I et al (2011) Accuracy of Invisalign® treatments in the anterior tooth region. First results. *J Orofac Orthop* 72:141–149
- Kuo E, Miller RJ (2003) Automated custom-manufacturing technology in orthodontics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 123:578–581
- Little RM (1975) The irregularity index: a quantitative score of mandibular anterior alignment. *Am J Orthod*. 68(5):554–563
- Low B, Lee W, Seneviratne CJ et al (2011) Ultrastructure and morphology of biofilms on thermoplastic orthodontic appliances in 'fast' and 'slow' plaque formers. *Eur J Orthod* 33(5):577–583
- Marcuzzi E, Galassini G, Procopio O et al (2010) Surgical-Invisalign treatment of a patient with Class III malocclusion and multiple missing teeth. *J Clin Orthod* 44:377–384
- Melkos AB (2005) Advances in digital technology and orthodontics: a reference to the Invisalign® method. *Med Sci Monit* 11:39–42
- Miller RJ, Duong TT, Derakhshan M (2002) Lower incisor extraction treatment with the Invisalign® system. *J Clin Orthod* 36:95–102
- Nguyen CV, Chen J (2006) Three-dimensional superimposition tool. In: Tuncay OC (ed) *The Invisalign® system*. Quintessence Publishing Co, New Malden, pp 12–32
- Schaefer J, Braumann B (2010) Halitosis, oral health and quality of life during treatment with Invisalign® and the effect of a low-dose chlorhexidine solution. *J Orofac Orthop* 71:430–441
- Schott TC, Göz G (2011) Color fading of the blue compliance indicator encapsulated in removable clear Invisalign Teen® aligners. *Angle Orthod* 81:185–191
- Schupp W, Haubrich J, Neumann I (2010) Treatment of anterior open bite with the Invisalign system. *J Clin Orthod* 44:501–507
- Schupp W, Haubrich J, Neumann I (2010) Invisalign® treatment of patients with craniomandibular disorders. *Int Orthod* 8:253–267
- 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
- Shalish M, Cooper-Kazaz R, Ivgi I et al (2011) Adult patients' adjustability to orthodontic appliances. Part I: a comparison between labial, lingual, and Invisalign™. *Eur J Orthod*, doi: 10.1093/ejo/cjr086
- Wheeler TT (2004) Invisalign® material studies. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 125:19A
- Zilberman O, Huggare JA, Parikakis KA (2003) Evaluation of the validity of tooth size and arch width measurements using conventional and three-dimensional virtual orthodontic models. *Angle Orthod* 73:301–306

Correspondence address

Dr. Elena Krieger
 Department of Orthodontics
 Medical Centre of the Johannes Gutenberg-University Mainz
 Augustusplatz 2
 55131 Mainz, Germany
 e-mail: elena.krieger@unimedizin-mainz.de