

Therapeutic Accuracy of Individualized Brackets in Lingual Orthodontics*

Behandlungsgenauigkeit mittels individualisierter Brackets in der Lingualtechnik*

Alexander Harry Pauls¹

Abstract

Objective: Verification of the therapeutic accuracy of the Incognito® bracket system.

Material and Methods: The therapeutic set-up casts and final treatment casts were digitalized using a 3D scanner, and the scans were subsequently superimposed. The deviations in rotation and translation of each tooth in the three spatial dimensions were calculated.

Results: The front teeth showed deviations in rotations of less than 4,6° and in translations under 0.5 mm. In addition, influences such as upper or lower jaw, growth, type of tooth, anterior tooth position, bracket generation, 3D scanner hardware and finishing archwires were analyzed.

Conclusion: The clinical impression was confirmed by the measurements taken in this study. The final results following lingual orthodontic treatment using individualized brackets correlate satisfactorily with the therapeutic set-ups.

Key Words: Lingual orthodontics · Brackets · 3D scanner · Therapeutic accuracy · Incognito®

Introduction

Lingual orthodontics encompass the correction of tooth malpositions and intermaxillary jaw discrepancies through fixed therapeutic appliances using cemented bands and/or brackets attached to the lingual tooth surfaces.

Thus we can treat the patient with a fixed orthodontic appliance without its being visible on the facial exterior.

¹Present affiliation: Department of Orthodontics, Heinrich Heine University Düsseldorf, Germany.

*The study was performed as part of the author's dissertation at Julius-Maximilian University Würzburg, 2009.

Received: July 16, 2010; accepted: August 27, 2010

Zusammenfassung

Ziel: Verifizierung der Behandlungsgenauigkeit des Incognito®-Bracketsystems.

Material und Methodik: Die therapeutischen Set-up- und Abschlussmodelle wurden mittels 3D-Scanner digitalisiert, virtuell überlagert und von jedem einzelnen Zahn die Abweichungen der Rotationen und Translationen in den drei Raumdimensionen berechnet.

Ergebnisse: Die Frontzähne zeigten Abweichungen der Rotationen von weniger als 4,6° und der Translationen von unter 0,5 mm. Außerdem wurden besondere Einflüsse wie Kiefer, Wachstum, Zahn-Typ, Frontzahnstellung, Bracketgeneration, Hardware des 3D-Scanners und verwendete Finishing-Bögen analysiert.

Schlussfolgerung: Der klinisch gewonnene Eindruck konnte durch die Messergebnisse der Studie bestätigt werden. Eine zufriedenstellende Übereinstimmung des Endergebnisses mit dem therapeutischen Set-up ist in der Lingualtechnik mittels individualisierter Brackets realisierbar.

Schlüsselwörter: Lingualtechnik · Brackets · 3D-Scanner · Behandlungsgenauigkeit · Incognito®

Einleitung

Die Lingualtechnik beinhaltet die Korrektur von Zahn- und Kieferfehlstellungen durch festsitzende Behandlungsapparaturen mittels zementierter Bänder und/oder an der lingualen Zahnfläche befestigter Brackets.

Somit ist es möglich, den Patienten kieferorthopädisch festsitzend zu therapieren, ohne dass die Apparatur von extraoral sichtbar ist.

J Orofac Orthop 2010;71:348–61

DOI 10.1007/s00056-010-1027-3

Smith et al. [23] and other orthodontists around the world, including Fujita [7, 8], Kelly [18] and Paige [19] attempted to develop their own lingual appliances in response to increasing interest on the part of patients in the latter 20th century [23].

Publications by Smith et al. [23] and Creekmore [2] described the key elements of lingual orthodontics. In 1999, Rummel et al. [21] published new methods in lingual orthodontics. They described the potential of the computer-aided design and/or computer-aided manufacturing technology (CAD/CAM) which among other things emerged as a result of the automatic individual bending of the archwires through the Orthomate® system (Syrinx Medical Technologies GmbH, Berlin, Germany).

This system made it possible to shape the archwires by means of a bending robot according to a 3D scan of the bracket positions with the 3D Orthomate® camera or after eliciting the diagnostic set-up values using Transfer Optimized Positioning (TOP). In so doing, first-, second- and third-order bends could be programmed. These archwires were referred to as preprogrammed target archwires.

In 2002, Wiechmann [26] reported on the new, 100% individualized lingual Incognito® bracket system for the first time (TOP-Service für Lingualtechnik; 3M Unitek, Bad Essen, Germany). Both their manufacture and design differed from previous alternatives.

Three-dimensional (3D) scanning of the therapeutic set-up models with a high-resolution optical 3D scanner (GOM, Braunschweig, Germany) allowed the greatest possible individualization of the brackets via a precise image of each tooth's lingual surface. Several other studies had demanded such a method, since the lingual surfaces of teeth vary much more widely than do the labial surfaces [1, 3, 5, 11, 16].

This method also allows us to place the bracket slots in all three order positions and reduce bracket thickness to a minimum. Furthermore, since the brackets are made of an alloy with a high gold content, they are much harder than conventionally-manufactured lingual brackets.

Wiechmann also described the manufacture of individualized archwires by means of a refinement of the aforementioned Orthomate® system (Orametrix®, Dallas, TX, USA), which re-programmes superelastic archwires through heat, even during the bending procedure [30, 31].

Since then, the Incognito® bracket system has undergone constant modification and improvement in terms of the brackets' design and manufacturing process. The Rapid Prototyping method also allows ongoing modification of all workflows together with the possibility of immediate implementation [26].

As a result, improved patient comfort [12, 13, 26, 27], simplified – even direct – rebonding of the brackets [25, 26], more accurate finishing [26], a lower bracket loss rate [27], less impact on speech [13] and in turn, a shorter adjustment period for the patient [27] were achieved.

Nicht nur Smith et al. [23], sondern auch andere Kieferorthopäden weltweit versuchten sich Ende des 20. Jahrhunderts an der Entwicklung eigener lingualer Apparaturen, so Fujita [7, 8], Kelly [18] und Paige [19], da das Interesse seitens der Patientenschaft stieg [23].

Die Veröffentlichungen von Smith et al. [23] und Creekmore [2] beschrieben die Schlüsselemente der Lingualtechnik. Im Jahre 1999 veröffentlichten Rummel et al. [21] neue Methoden in der Lingualtechnik. In dieser Publikation beschrieben sie die neuen Möglichkeiten der CAD/CAM-Technologie (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing), welche sich unter anderem durch das automatische individuelle Biegen der Bögen durch das Orthomate®-System (Syrinx Medical Technologies GmbH, Berlin, Deutschland) ergaben.

Mit diesem System war es möglich, entweder nach einem 3D-Scan der Bracketpositionen mit der 3D Orthomate Kamera oder nach Ermitteln der Werte des diagnostischen Set-ups mittels Transfer Optimized Positioning (TOP) die gewünschten Bögen durch einen Biegeroboter formen zu lassen. Hierbei konnten sowohl Biegungen der ersten als auch der zweiten und dritten Ordnung einprogrammiert werden. Diese Bögen wurden „Preprogrammed Target Archwires“ genannt.

Im Jahre 2002 schließlich publizierte Wiechmann [26] erstmals das neue vollkommen individualisierte linguale Incognito®-Bracketsystem (TOP-Service für Lingualtechnik; 3M Unitek, Bad Essen, Deutschland). Sowohl Herstellung als auch Konzeption unterschieden sich zu den bisher existierenden Alternativen.

Durch das dreidimensionale Scannen der therapeutischen Set-up-Modelle mit einem hochauflösenden optischen 3D-Scanner (GOM, Braunschweig, Deutschland) war es nun möglich, eine größtmögliche Individualisierung der Brackets durch ein exaktes Abbild der lingualen Zahnfläche zu erreichen. Dies wird auch von diversen anderen Studien gefordert, da die Variabilität der lingualen Zahnflächen weitaus größer ist als die der labialen [1, 3, 5, 11, 16].

Außerdem konnte so die Ausrichtung der Bracketslots in allen drei Ordnungen realisiert und die Bracketdicke auf ein Mindestmaß reduziert werden. Des Weiteren weisen die Brackets aus einer hochgoldhaltigen Legierung eine höhere Härte auf als herkömmliche konfektionierte Lingualbrackets.

Ebenso wurde die Herstellung individueller Bögen mittels einer Weiterentwicklung des bereits beschriebenen Orthomate®-Systems (Orametrix®, Dallas, TX, USA) vorgestellt, welches in der Lage ist, superelastische Bögen bereits während des Biegevorganges durch Wärme umzuprogrammieren [30, 31].

Das Incognito®-Bracketsystem hat seitdem im Hinblick auf das Design der Brackets und den Fertigungsprozess eine konstante Veränderung und Verbesserung durchlaufen. Das Rapid-Prototyping-Verfahren erlaubt zudem eine konstante Veränderung aller Abläufe mit Möglichkeit zur sofortigen Umsetzung [26].

When comparing prefabricated brackets to Incognito® brackets, Stamm et al. [24], observed significantly less restriction of the lingual space, fewer speech impediments and less biting and chewing impairments with the Incognito® appliance, as well as fewer pressure sores and lesions on the tongue.

With the wide array of further developments in lingual orthodontics, the Incognito® bracket system's results are at least the same or even better than those associated with labial systems [2, 22, 26, 28, 29]. The indications for the use of both types of appliances are nearly identical [6, 9, 14, 17, 20].

The objective of this study was to test the therapeutic accuracy of the Incognito® bracket system by precisely studying the initial set-up models with the final treatment models in terms of seven different null hypotheses.

The difference between the upper and lower jaw, impacts of the various finishing archwires, and the effect of the bracket generation were studied, as were the effect of the original front tooth axial position and change in the front tooth inclination during treatment on the therapeutic set-up's feasibility. We also aimed to determine whether any significant differences would appear between adolescents and adults, whether the type of tooth had an impact on the feasibility of the desired end results, and whether the type of scanner would significantly influence the accuracy of the virtual bracket attachment on the 3D model.

Materials and Methods

Patient Group

The patient group in this retrospective study included 50 jaws (25 upper and 25 lower jaws) of 25 patients – 15 female and ten male – between the ages of 15 and 56. Each jaw was bonded with the Incognito® bracket system attached to the lingual surfaces. A total of 659 teeth were fitted with a bracket in this study.

For 38 of these jaws, lateral cephalograms of the baseline situation and final outcome were available. Those assessments were also considered.

Only patients treated in the practice of Dr. Dirk Wiechmann in Bad Essen, Germany were examined whose treatment had not ended prematurely at the patient's request or for other reasons, whose entire treatment plan could be implemented, and who could be treated with the lingual Incognito® bracket system developed by D. Wiechmann. The lingual appliances were put in place between 2003 and 2006. During that period, modifications were carried out in the bracket design and manufacturing process. Each year can be thought of as an independent bracket generation. This was taken into account in the evaluations.

A further precondition called for the impression made after band/bracket removal to be taken prior to the potential attachment of a lingual retainer, since that would complicate the matching process (see below) or possibly even render matching impossible.

Somit konnten ein verbesserter Patientenkomfort [12, 13, 26, 27], ein erleichtertes – sogar direktes – Nachkleben der Brackets [26, 25], ein präziseres Finishing [26], eine geringere Bracketverlustrate [27], eine geringere Beeinflussung der Sprache [13] und somit eine kürzere Eingewöhnungszeit für den Patienten [27] realisiert werden.

Stamm et al. [24] konnten im Vergleich zwischen vorgefertigten lingualen Brackets und der Incognito®-Apparatur bei Letzterer eine signifikant geringere Einengung des Zungenraumes, weniger Sprachstörungen und Behinderungen des Abbeiß- und Kauvorganges sowie eine kleinere Anzahl Druckstellen und Läsionen auf der Zunge feststellen.

Durch die vielfältigen Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der Lingualtechnik konnte im Vergleich zu labialen Systemen eine mindestens gleichwertige oder sogar bessere Leistungsfähigkeit erreicht werden [2, 22, 26, 28, 29]. Auch die Indikationsbereiche beider Apparaturen stellen sich als annähernd gleich dar [6, 9, 14, 17, 20].

Ziel dieser Studie war es, die Behandlungsgenauigkeit des Incognito®-Bracketsystems zu überprüfen, indem die Set-up- mit den Abschlussmodellen auf sieben verschiedene Null-Hypothesen genau untersucht wurden.

Die Unterscheidung zwischen Ober- und Unterkiefer, die Auswirkungen der unterschiedlichen Finishing-Bögen und der Einfluss der Bracketgeneration wurden ebenso untersucht wie der Effekt der ursprünglichen Frontzahnachsenstellung sowie der Stellungsänderung der Frontzähne im Verlauf der Behandlung auf die Verwirklichbarkeit des therapeutischen Set-ups. Des Weiteren wurde überprüft, ob signifikante Unterschiede zwischen Jugendlichen und Erwachsenen bestehen, ob der Zahn-Typ eine Auswirkung auf die Realisierbarkeit des gewünschten Endergebnisses hat und ob der Scanner-Typ einen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit der virtuellen Bracket-Anlagerung am 3D-Modell zeigt.

Material und Methodik

Patientengut

Das Patientengut dieser retrospektiv angelegten Studie umfasste 50 Kiefer (25 Ober- und 25 Unterkiefer) von 25 Patienten – 15 weiblich und zehn männlich – im Alter zwischen 15 und 56 Jahren. Jeder Kiefer wurde mit dem Incognito®-Bracketsystem lingual beklebt, insgesamt in dieser Studie 659 mit einem Bracket versehene Zähne.

Zu 38 dieser Kiefer lagen sowohl Fernröntgenseitenbilder der Ausgangssituation als auch des Endzustandes vor. Diese Auswertungen wurden ebenfalls berücksichtigt.

Es wurden ausschließlich Fälle der Praxis Dr. Dirk Wiechmann aus Bad Essen, Deutschland verwendet, die nicht vorzeitig durch Patientenwunsch oder sonstige Zwischenfälle abgebrochen wurden, bei denen der Therapieplan komplett verwirklicht werden konnte und die mit dem von D. Wiechmann entwickelten lingualen Incognito®-Bracket-system behandelt wurden. Das Einsetzen der jeweiligen lingualen Apparaturen erfolgte in den Jahren 2003 bis 2006. In

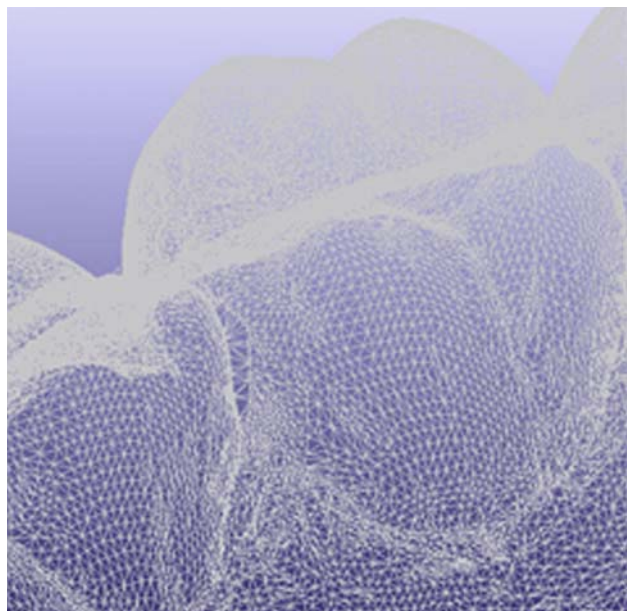


Figure 1. 3D surface of the teeth composed of thousands of minute triangles (Standard Triangulation Language, STL Language).

Abbildung 1. 3D-Oberfläche der Zähne aus vielen tausend kleinen Dreiecken zusammengesetzt (Standard Triangulation Language, STL Language).

Methods

For this study, two high-resolution optical 3D scanners (GOM, Braunschweig, Germany) were used to scan the tooth surfaces of the plaster casts.

They were used to make 3D scans without contact between the therapeutic set-up model or the model produced after appliance removal.

The high detail resolution, and high performance capacity and measurement accuracy meant that the GOM ATOS SO-model (SO = small objects, optimized for measuring small objects) was well suited for our needs. The ATOS HR/SO scanner manufactured in 2001 with a camera resolution of 1280×1024 pixels and a measurement volume of $100 \times 100 \times 80 \text{ mm}^3$ was compared to an ATOS I/SO built in 2007 with a camera resolution of 1032×776 pixels and measurement field of $100 \times 80 \text{ mm}^2$.

After meticulously removing the surplus plaster, etc. from the models, the therapeutic set-ups and models produced after the appliances' removal were scanned and displayed on the computer as models composed of many thousands of minute triangles (Standard Triangulation Language, STL Language) (Figure 1). The more homogeneous a section of the surface is, the larger the corresponding triangles. More uneven areas are represented by several smaller triangles. Following the scanning process, the ATOS software was used to detach superfluous components of the base and palate or of the floor of the mouth on the 3D model, so that only the dental arch remained.

dieser Zeitspanne wurden sowohl am Bracketdesign, als auch am Fertigungsprozess Veränderungen vorgenommen, wodurch man jedes einzelne Jahr als eigenständige Bracketgeneration ansehen kann. Dem wurde bei den Auswertungen Rechnung getragen.

Eine weitere Voraussetzung war, dass der Abdruck nach Entbänderung vor dem möglichen Kleben eines lingu- alen Retainers genommen wurde, da durch diesen der „Mat- ching“-Prozess (siehe unten) erschwert oder sogar unmög- lich gemacht worden wäre.

Methodik

Für diese Studie wurden zur Erfassung der Zahnoberflä- chen der Gipsmodelle zwei hochauflösende optische 3D- Scanner (GOM, Braunschweig, Deutschland) verwendet.

Mit diesen Geräten wurde sowohl das therapeutische Set-up-Modell als auch das nach Entfernen der Apparatur angefertigte Modell berührungslos dreidimensional ein- gescannt.

Durch die große Detailauflösung, die hohe Leistungsfä- higkeit und Messgenauigkeit war das ATOS SO-Modell (SO = Small Objects, für die Vermessung kleiner Objekte opti- miert) der Firma GOM für unsere Zwecke geeignet. Der Scanner ATOS HR/SO aus dem Jahr 2001 mit einer Kame- raauflösung von 1280×1024 Pixeln und einem Messvolumen von $100 \times 100 \times 80 \text{ mm}^3$ stand einem ATOS I/SO von 2007 mit einer Kameraauflösung von 1032×776 Pixeln und einem Messfeld von $100 \times 80 \text{ mm}^2$ entgegen.

Nach sorgfältigster Befreiung der Modelle von Gipsper- len u.Ä. wurden sowohl die Modelle des therapeutischen Set-ups als auch die Modelle, welche nach der Entbänderung hergestellt wurden, eingescannt und erschienen auf dem PC als aus vielen tausend kleinen Dreiecken zusammengesetzte Modelle (Standard Triangulation Language, STL Lan- guage) (Abbildung 1). Je homogener ein Teil der Oberfläche ist, desto größer sind die entsprechenden Dreiecke, ungleich- mäßigere Areale werden durch mehrere kleinere Dreiecke repräsentiert. Im Anschluss an den Scansvorgang wurden mit Hilfe der ATOS-Software überschüssige Anteile des Sockels und des Gaumens beziehungsweise des Mundbodens am 3D-Modell abgetrennt, so dass lediglich der Zahnkranz üb- rig blieb.

Das dreidimensionale Modell des Set-ups inklusive der fertigen darauf adaptierten virtuellen Brackets wurde zu- sammen mit dem Abschlussmodell in das Programm Pro- Lingual (TOP-Service für Lingualtechnik, 3M Unitek, Bad Essen, Deutschland) geladen (Abbildung 2). Im Anschluss daran wurde das Abschlussmodell automatisch durch das Programm an eine Position im Raum gelegt, an der es mit dem Set-up-Modell möglichst deckend war und wenn not- wendig noch manuell feinjustiert.

Danach wurde jedes einzelne Bracket mittels einer auf dem Iterative-Closest-Point-Algorithmus [10] beruhenden Registrierung aus seiner ursprünglichen Position auf dem

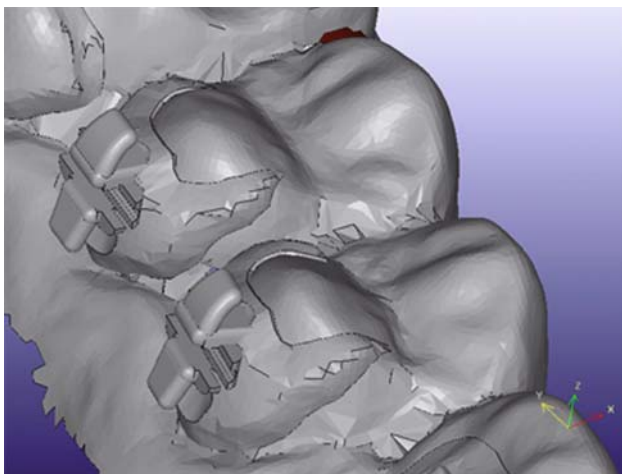


Figure 2. Image of teeth 14 and 15 with Incognito® lingual brackets in the virtual 3D model.

Abbildung 2. Darstellung der Zähne 14 und 15 mit Incognito®-Lingualbrackets im virtuellen 3D-Modell.

The 3D model of the set-up including the finished virtual brackets adapted to it, together with the final treatment model, were entered in the program ProLingual (TOP-Service für Lingualtechnik, 3M Unitek, Bad Essen, Germany) (Figure 2). The final model was then automatically placed in a spatial position in which it covered the set-up model to the greatest possible extent. If needed, it was fine-tuned manually.

Then each individual bracket was matched from its original position on the set-up to the corresponding tooth in the final treatment model using a registration based on the iterative closest point algorithm [10], that is, on the correct position on the lingual surface.

This matching procedure compares each tooth on the set-up with the same tooth in the final model using data from the entire surface as the program analyzes the axial cross-sections of the teeth.

This guarantees the best possible positioning of the bracket on the tooth in the final model with a tolerated deviation of at most 0.07 mm.

Each bracket was superimposed twice according to the final model's situation, and the deviations recorded in a database in each case to also analyze the procedure's reproducibility and measurement accuracy of the experimental set-up relying on double measurements.

Precise adaptation of the brackets to the lingual tooth surfaces allowed comparison of each individual tooth in the therapeutic set-up situation with the tooth after completed treatment, and a precise evaluation regarding the differences in translations, tip, torque and rotation in all three axes of the 3D coordinate system.

The coordinate information, which contained information concerning each bracket in 21 variables on its exact positioning in space and its degree of rotation in comparison to

Set-up-Modell auf den entsprechenden Zahn des Abschlussmodells gematched, also an die korrekte Position auf der Lingualfläche angelegt.

Dieser sogenannte Match-Vorgang vergleicht den jeweiligen Zahn auf dem Set-up mit dem gleichen Zahn des Abschlussmodells an Hand der Daten der gesamten Oberfläche, indem das Programm die axialen Schnitte der Zähne analysiert.

Hierdurch kann eine bestmögliche Positionierung des Brackets auf dem Zahn des Abschlussmodells mit einer tolerierten Abweichung von maximal 0,07 mm gewährleistet werden.

Jedes Bracket wurde zwei Mal an die Situation des Abschlussmodells angelagert und die Abweichungen jeweils in einer Datenbank protokolliert, um mit Hilfe der Doppelmessungen auch die Reproduzierbarkeit des Vorganges und die Messgenauigkeit des Versuchsaufbaus analysieren zu können.

Durch die genaue Adaptation der Brackets auf den lingualen Zahnflächen war es somit möglich, jeden einzelnen Zahn der Situation des therapeutischen Set-ups mit demjenigen nach erfolgter Behandlung zu vergleichen und eine genaue Aussage über Unterschiede der Translationen, Tip, Torque und Rotation in allen drei Achsen des dreidimensionalen Koordinatensystems zu treffen.

Die Koordinateninformationen, welche zu jedem einzelnen Bracket in 21 Variablen Informationen über dessen genaue Positionierung im Raum und seine Rotationsgrade im Vergleich zum globalen Koordinatensystem enthalten, wurden sowohl für die gematchte Version als auch für die Anfangssituation erstellt.

Die Auswertung wurde mit Hilfe einer vom Autor selbst programmierten Software vollzogen, die sowohl die Koordinateninformationen der einzelnen Zähne über komplexe Formeln in verwertbare Winkel- und Lageinformationen umwandelt, als auch die korrespondierenden Zähne des Set-up- und des Abschlussmodells auf Unterschiede der Translationen (Mesial-/Distalstand, In/Out, Supra-/Infraposition), Tip, Torque und Rotation in allen drei Achsen des dreidimensionalen Koordinatensystems miteinander vergleicht. Somit sind jegliche möglichen Zahnbewegungen in der sagittalen, transversalen und vertikalen Dimension berücksichtigt.

Des Weiteren wurden die Fernröntgenseitenbilder der Ausgangssituation und des Zustandes nach erfolgter Behandlung manuell durchgezeichnet und nach der an der Universität Würzburg gebräuchlichen Fernröntgenseitenanalyse ausgewertet. So war es möglich, eine Aussage über die Auswirkungen unterschiedlicher Frontzahnstellungen auf die Realisierbarkeit des therapeutischen Set-ups zu treffen.

Ergebnisse

Die Doppelmessungen zeigten in keinem Fall Abweichungen der Match-Genauigkeit von mehr als 0,005 mm. Die Mittelwerte der Doppelmessungsabweichungen er-

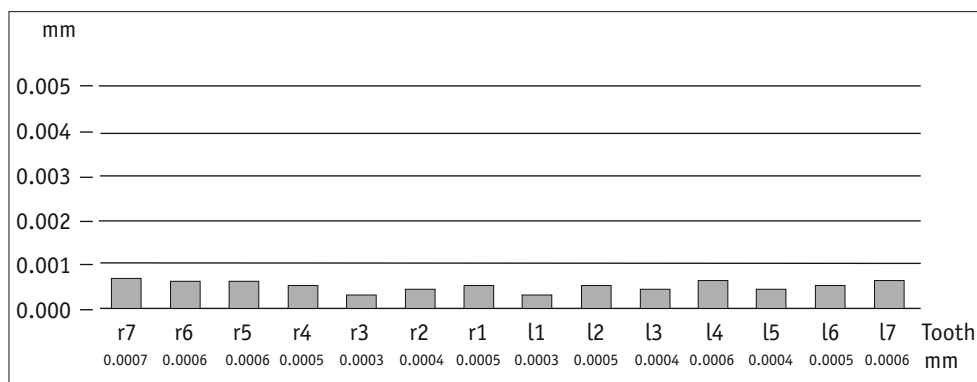


Figure 3. Results of the double measurements; mean values of the deviations in mm; „r“ refers to values of the right halves of the jaw, „l“ refers to the left halves; tooth identification according to the international numbering system.

Abbildung 3. Ergebnisse der Doppelmessungen; Mittelwerte der Abweichungen in mm; „r“ bezeichnet Werte der rechten, „l“ Werte der linken Kieferhälften; Nummerierung der Zähne gemäß internationalem Zahnschema.

the global coordinate system, was generated for both the matched and initial situations.

The evaluation was made using software programmed by the author himself. This software used complex formulas to convert the coordinate information on each tooth into usable information on angle and position, and compared the corresponding tooth in the set-up and final treatment model with regard to differences in translations (anterior/posterior position, in/out, supra/infraposition), tip, torque and rotation in all three axes of the 3D coordinate system. Thus all the possible sagittal, transverse and vertical tooth movements are accounted for.

In addition, the lateral cephalograms of the starting position and status after completed treatment were traced manually and evaluated on the basis of the lateral cephalometric analysis generally used by the University of Würzburg, Germany. This allows us to describe the impacts of different front tooth positions on the feasibility of the therapeutic set-up.

Results

In no case did the double measurements reveal deviations in matching accuracy of more than 0.005 mm. The mean values of the double-measurement deviations ranged from 0.0003 mm for the canine of the right side of the face and the central incisors of the left side up to 0.0007 mm of the right second molars (Figure 3).

To determine the experimental set-up's measurement accuracy, measurement error was calculated according to Dahlberg [4]. This error was 0.0005.

The reliability coefficient according to Houston [15] was 0.99907678.

This demonstrates the high level of accuracy of the measurement methods used in this study.

The values of each null hypothesis were tested as part of the evaluation of normal distribution, whereby the largest number of observations led to additional sensitization of the normal distribution tests. In addition, more in-depth multivariate tests, tests of between-subject effects and post-hoc tests were performed as needed.

streckten sich von 0,0003 mm der Eckzähne der rechten Gesichtshälfte und der mittleren Inzisivi der linken bis 0,0007 mm der rechten zweiten Molaren (Abbildung 3).

Zur Bestimmung der Messgenauigkeit des Versuchsaufbaus wurde der methodische Fehler nach Dahlberg [4] berechnet. Dieser betrug 0,0005.

Der Zuverlässigkeitskoeffizient nach Houston [15] ergab einen Wert von 0,99907678.

Dies zeigt die hohe Genauigkeit der in dieser Studie angewandten Messverfahren.

Die Werte jeder Null-Hypothese wurden im Zuge der Auswertung auf Normalverteilung überprüft, wobei die große Anzahl an Beobachtungen zu einer zusätzlichen Sensibilisierung der Normalverteilungstests führte. Außerdem wurden falls benötigt weiterführende multivariate Tests, Tests der Zwischensubjekteffekte und Post-hoc-Tests durchgeführt.

Die verwendeten Variablen werden in den einzelnen Tabellen wie folgt benannt: „rot_x“ beschreibt als Rotation um die x-Achse des globalen Koordinatensystems den Tip der Zähne, „rot_y“ zeigt den Torque und „rot_z“ die Rotation der Zähne auf. Die Translationen in den drei Achsen des Koordinatensystems sind als „trans_x“ (In/Out), „trans_y“ (Mesial-/Distalstand) und „trans_z“ (Supra-/Infraposition) in Tabelle 1 gekennzeichnet.

Die Auswertung der Pillai-Spur des multivariaten Tests ergab, dass signifikante Unterschiede ($p < ,000$) zwischen den Ober- und Unterkiefern vorlagen, die sich jedoch bei den Tests der Zwischensubjekteffekte lediglich auf signifikante Abweichungen ($p < ,000$) der Translation auf der y-Achse (Mesial-/Distalstand) reduzierten.

Bei den Durchschnittsabweichungen der therapeutischen Set-up-Modelle im Vergleich zu den Modellen nach Behandlungsende zeigten die Oberkiefer niedrigere Werte für die Parameter Tip (OK 5,53°; UK 5,72°), Torque (OK 5,16°; UK 5,23°) und Supra-/Infraposition (OK 0,89 mm; UK 0,97 mm). Die Unterkiefer wiesen bezüglich Rotation (OK 5,82°; UK 5,40°), In/Out (OK 1,19 mm; UK 1,07 mm) und Mesial-/Distalstand (OK 1,04 mm; UK 1,00 mm) die geringeren Durchschnittsabweichungen auf.

Table 1. Tests of between-subject effects for null hypothesis “The finishing archwire has no impact on achievement of the treatment aim as represented by the therapeutic set-up”; red_x \triangleq tip, red_y \triangleq torque, red_z \triangleq rotation, trans_x \triangleq in/out, trans_y \triangleq anterior/posterior position, trans_z \triangleq supra/infraposition; significant values in bold type.

Tabelle 1. Tests der Zwischensubjekteffekte für Null-Hypothese „Der Finishing-Bogen hat keine Auswirkung auf das Erreichen des gewünschten Ergebnisses repräsentiert durch das therapeutische Set-up“; rot_x \triangleq Tip, rot_y \triangleq Torque, rot_z \triangleq Rotation, trans_x \triangleq In/Out, trans_y \triangleq Mesial-/Distalstand, trans_z \triangleq Supra-/Infraposition; signifikante Werte hervorgehoben.

Source	Dependent variable	Sum of squares of type III	df	Mean of squares	F	Significance
Archwire	rot_x	12.61	2	6.30	.546	.580
	rot_y	5.31	2	2.65	.299	.742
	rot_z	19.60	2	9.80	.840	.432
	trans_x	41437278.97	2	20718639.48	.049	.952
	trans_y	5407955001.28	2	2703977500.64	10.744	.000
	trans_z	5912255821.94	2	2956127910.97	14.031	.000

The variables used are listed in the individual tables as follows: “red_x” describes the tip of the teeth as a rotation around the x-axis of the global coordinate system. „red_y“ shows the torque and „red_z“ shows the rotation of the teeth. The translations in the coordinate system’s three axes are designated as „trans_x” (in/out), “trans_y” (anterior/posterior position) and “trans_z” (supra/infraposition) in Table 1.

Pillai’s trace of the multivariate test revealed significant differences ($p < .000$) between the upper and lower jaws that, however, decreased to significant deviations ($p < .000$) in the translation to the y-axis (anterior/posterior position) when evaluating the between-subject effects.

Regarding the mean deviations in the therapeutic set-up models compared to the post-treatment models: the upper jaws yielded lower values for the following parameters: tip (UJ 5.53°; LJ 5.72°), torque (UJ 5.16°; LJ 5.23°) and supra/infraposition (UJ 0.89 mm; LJ 0.97 mm). The lower jaws deviated less on average with regard to rotation (UJ 5.82°; LJ 5.40°), in/out (UJ 1.19 mm; LJ 1.07 mm) and anterior/posterior position (UJ 1.04 mm; LJ 1.00 mm).

Regarding the impact of the finishing archwires used, a group of statistically-evaluated tooth samples were only available for three wires. 108 teeth were treated with 16 × 22 SS (archwire 1) as finishing archwires, while 73 teeth were assigned to 17.5 × 17.5 TMA (archwire 2) and 434 teeth to 18.2 × 18.2 TMA (archwire 3). All archwire values are reported in milli-inches.

ANOVA (analysis of variance) revealed a significant difference ($p = .001$) in Pillai’s trace between the three finishing archwires – defined precisely below in the evaluation of between-subject effects. The archwires showed significant differences at follow-up in the anterior/posterior position and supra/infraposition variables only, which did not apply to any of the three rotations (Table 1).

The variable “trans_y” differed significantly between archwires 1 and 2 ($p = .001$) and archwires 2 and 3 ($p < .000$). The post-hoc test of the variables „trans_z” also demonstrat-

Bezüglich der Auswirkung der verwendeten Finishing-Bögen konnten lediglich bei drei eine statistisch auswertbare Probengruppe an Zähnen erhoben werden. 108 Zähne wurden mit 16 × 22 SS (Bogen 1) als Finishing-Bogen behandelt, während 73 Zähne dem 17,5 × 17,5 TMA (Bogen 2) und 434 Zähne dem 18,2 × 18,2 TMA (Bogen 3) zugeordnet werden konnten. Alle Bogenwerte werden in Milliinch angegeben.

Das Ergebnis der ANOVA (Analysis of variance) zeigt in der Pillai-Spur einen signifikanten Unterschied ($p = .001$) zwischen den drei Finishing-Bögen, welcher im Folgenden durch Tests der Zwischensubjekteffekte näher definiert wird. Die weiterführenden Tests ergaben, dass sich die Bögen lediglich in den Variablen für Mesial-/Distalstand und Supra-/Infraposition signifikant unterscheiden, was für keine der drei Rotationen zutrifft (Tabelle 1).

Für die Variable „trans_y“ konnten weiterhin signifikante Unterschiede zwischen Bogen 1 und 2 ($p = .001$) und zwischen Bogen 2 und 3 ($p < .000$) festgestellt werden, der Post-hoc-Test der Variablen „trans_z“ ergab ebenfalls signifikante Unterschiede zwischen Bogen 1 und 2 ($p < .000$) und zwischen Bogen 2 und 3 ($p < .000$).

Bei den Durchschnittsabweichungen der therapeutischen Set-up-Modelle im Vergleich zu den Modellen nach Behandlungsende konnten mit dem Finishing-Bogen 18,2 × 18,2 TMA für die Oberkieferfront die geringsten Abweichungen hinsichtlich der Rotationen sowie des Parameters In/Out gemessen werden (Tip 3,92°; Torque 4,30°; Rotation 4,45°; In/Out 0,30 mm), wohingegen der Finishing-Bogen 16 × 22 SS die geringsten Durchschnittsabweichungen bezüglich Mesial-/Distalstand (0,29 mm) und Supra-/Infraposition (0,30 mm) aufwies (Tabellen 2 bis 4).

Für den Einfluss der Bracketgeneration auf die Verwirklichbarkeit des therapeutischen Set-ups ergab die Pillai-Spur der multivariaten Tests, dass signifikante Unterschiede ($p = .002$) zwischen den verschiedenen Generationen der Jahre 2004, 2005 und 2006 vorherrschen, dies führt zur Verwerfung der Null-Hypothese. Die Tests der Zwischensub-

Table 2. Mean deviations of the entire jaw for finishing archwire "16 × 22 SS"; standard deviations in parentheses.**Tabelle 2.** Durchschnittsabweichungen der gesamten Kiefer für Finishing-Bogen „16 × 22 SS“; Standardabweichungen in Klammern.

Tip	5.87° (±4.00)	In/out	1.26 mm (±2.45)
Torque	5.06° (±3.47)	Anterior/posterior	0.96 mm (±1.69)
Rotation	5.79° (±3.74)	Supra/infra	0.72 mm (±1.25)

Table 3. Mean deviations of the entire jaw for finishing archwire "17.5 × 17.5 TMA"; standard deviations in parentheses.**Tabelle 3.** Durchschnittsabweichungen der gesamten Kiefer für Finishing-Bogen „17,5 × 17,5 TMA“; Standardabweichungen in Klammern.

Tip	5.83° (±4.71)	In/out	1.06 mm (±1.77)
Torque	5.27° (±4.24)	Anterior/posterior	1.28 mm (±2.86)
Rotation	5.20° (±4.29)	Supra/infra	1.39 mm (±3.14)

Table 4. Mean deviations of the entire jaw for finishing archwire "18.2 × 18.2 TMA"; standard deviations in parentheses.**Tabelle 4.** Durchschnittsabweichungen der gesamten Kiefer für Finishing-Bogen „18,2 × 18,2 TMA“; Standardabweichungen in Klammern.

Tip	5.60° (±4.23)	In/out	1.14 mm (±2.24)
Torque	5.24° (±3.68)	Anterior/posterior	0.99 mm (±1.75)
Rotation	5.79° (±4.31)	Supra/infra	0.88 mm (±1.51)

ed significant differences between archwire1 and 2 ($p < .000$) and between archwires 2 and 3 ($p < .000$).

We observed the lowest deviations in rotations and the in/out parameter (tip 3.92°; torque 4.30°, rotation 4.45°; in/out 0.30 mm) when comparing the mean deviations in the therapeutic set-ups to the post-treatment models, in terms of the 18.2 × 18.2 TMA finishing archwire in the upper front. The finishing archwire 16 × 22 SS showed the lowest mean deviations in the anterior/posterior (0.29 mm) and supra/infraposition (0.30 mm) (Tables 2 to 4).

Testing the bracket generation's impact on the therapeutic set-up's feasibility, Pillai's trace of the multivariate tests showed significant differences ($p = .002$) among the different generations of years 2004, 2005 and 2006, which led to a rejection of the null hypothesis. Tests of the between-subject effects yielded significant differences between bracket generations in only the following variables: tip ($p = .028$), rotation ($p = .003$) and anterior/posterior position ($p = .022$). The tip parameter differed significantly in the follow-up post-hoc tests ($p = .043$) between the years 2005 and 2006. Rotation differed significantly in between 2004 and 2006 ($p = .011$) and between 2005 and 2006 ($p = .010$). Post-hoc testing of the anterior/posterior position variables showed significant differences ($p = .033$) between 2005 and 2006.

To test whether front-tooth inclinations affected the therapeutic set-up's feasibility, we conducted two different tests. First, we compared changes in front-tooth axes using

jekteneffekte ergaben, dass lediglich bei den Variablen für Tip ($p = .028$), Rotation ($p = .003$) und Mesial-/Distalstand ($p = .022$) signifikante Unterschiede zwischen den Bracketgenerationen aufzufinden waren. Bei den weiterführenden Post-Hoc-Tests konnten beim Tip signifikante Unterschiede ($p = .043$) zwischen den Jahren 2005 und 2006 festgestellt werden. Die Rotation wies signifikante Unterschiede zwischen den Jahren 2004 und 2006 ($p = .011$) und zwischen 2005 und 2006 ($p = .010$) auf. Der Post-Hoc-Test der Variablen für Mesial-/Distalstand zeigte signifikante Unterschiede ($p = .033$) zwischen den Jahren 2005 und 2006 auf.

Zur Überprüfung, ob die Frontzahnachsenstellung eine Auswirkung auf die Verwirklichbarkeit des therapeutischen Set-ups zeigt, wurden zwei verschiedene Tests durchgeführt. Zuerst wurden die Veränderungen der Frontzahnachsen anhand der an den Fernröntgenseitenbildern gemessenen Werte $\bar{1}$ -SN für die Oberkiefer beziehungsweise $\bar{1}$ -GoMe für die Unterkiefer vor und nach abgeschlossener Behandlung verglichen (Tabelle 5).

Gruppe 1 beschrieb Fälle mit einer Differenz kleiner/gleich 3°, der Gruppe 2 gehörten alle Fälle an, deren Differenz der Frontzahnachsen größer 3° und kleiner/gleich 6° betrug. Die Gruppe 3 schließlich bildeten die Fälle mit einer Differenz größer 6°. Zusätzlich wurden negative von positiven Abweichungen zum klinischen Richtwert getrennt beobachtet.

Die multivariaten Tests ergaben für das Kriterium „plus-minus“ (Labial- oder Lingualstellung der Front im Verlauf der Behandlung) in der Pillai-Spur keine signifikanten Unterschiede ($p = .148$). Innerhalb der drei Gruppen konnten signifikante Unterschiede ($p = .037$) festgestellt werden sowie ebenfalls beim Interaktionseffekt „plus-minus“-Gruppe ($p = .023$) (Tabelle 5).

Bezüglich des Faktors „plus-minus“ kann die Null-Hypothese nicht verworfen werden, da keine signifikanten Unterschiede ($p = .148$) zwischen einer positiven oder negativen Differenz der Frontzahnachsenwinkel vor und nach der Behandlung festgestellt werden konnten. Jedoch konnten bei der Zugehörigkeit zu einer der drei Gruppen signifikante Unterschiede dargelegt werden, was bedeutet, dass die Gruppenzugehörigkeit einen signifikanten Einfluss auf die Erreichbarkeit des therapeutischen Set-ups hat und die Null-Hypothese somit hierfür verworfen werden kann.

Bei dem zweiten Frontzahnachsen-Test sollte die Auswirkung der Ursprungsachsenstellung auf die Verwirklichbarkeit des therapeutischen Set-ups näher untersucht werden.

Hierzu wurden die Werte in drei Gruppen eingeteilt. Die Gruppe „-1“ (10 Werte) entsprach einem Frontzahnachsenwinkel kleiner als die jeweilige Standardabweichung, der Gruppe „0“ (42 Werte) gehörten alle mittleren Inzisivi an, deren Frontzahnachsenwinkel innerhalb der Standardabweichung anzusiedeln war. Die Gruppe „1“ (24 Werte) beschrieb diejenigen, deren Achsenwinkel im Fernröntgenseitenbild größer als die zugehörige Standardabweichung waren. Bei diesem Test kam eine einfaktorielle Varianzanalyse

the \bar{I} -SN values in the upper arch as measured on lateral cephalograms and in the lower arch \bar{I} -GoMe before and after treatment (Table 5).

Group 1 consisted of cases with a difference less than or equal to 3° , while group 2 contained all cases whose difference in front-tooth inclination was greater than 3° and less than or equal to 6° . Group 3 included those with a difference greater than 6° . Negative and positive deviations from the clinical standard values were evaluated separately.

The multivariate tests did not yield significant differences ($p = .148$) in the "plus-minus" variable (labial or lingual repositioning of the front teeth during treatment) in Pillai's trace. Significant differences ($p = .037$) became apparent within the three groups, as well as in the interaction effect "plus-minus" group ($p = .023$) (Table 5).

Concerning the "plus-minus" factor: the null hypothesis cannot be rejected, since no significant differences ($p = .148$) appeared between a positive or negative difference in the front-tooth inclination before and after treatment. However, we did note significant differences in the assignment to one of the three groups, thus the group assignment has a significant impact on the feasibility of the therapeutic set-up. The null hypothesis does not apply in this case.

We carried out the second test on front-tooth axial position to more closely study the impact of the original incisor inclination on the therapeutic set-up's feasibility.

To that end, the values were divided into three groups. Group "–1" (10 values) corresponded to a front-tooth inclination less than the respective standard deviation. Group "0" (42 values) included all central incisors for which the front-tooth inclination was located within the standard deviation. Group „1" (24 values) described those cases whose inclinations in the lateral cephalogram were greater than the respective standard deviation. For this test, a one-way analysis of variance was used, whereby Pillai's trace yielded a significance of $p = .843$. Thus, the null hypothesis is confirmed that the front-tooth axial position does not significantly affect the therapeutic set-up's feasibility with regard to the impact of the original front-tooth inclination.

We also investigated any significant differences in feasibility between adolescents and adults. In age group 1 (under or 18 years), the sample number comprised 214 teeth or brackets, while age group 2 (over 18 years) comprised 445. Pillai's trace of the multivariate tests yielded a significance of $p = .203$. There are thus no significant differences in the therapeutic set-up's feasibility between the two age groups. The null hypothesis therefore applies.

Our study also aimed to investigate the impact of various types of teeth on the therapeutic set-up's feasibility. Pillai's trace of the multivariate tests yielded a significant difference ($p < .000$) among the teeth. Thus, the null hypothesis could be rejected (Table 6).

In subsequent test of the between-subject effects, only the in/out variable failed to differ significantly ($p = .939$),

Table 5. Inter-subject factors of the null hypothesis "The front-tooth axial position has no impact on the therapeutic set-up's feasibility. Correlation between the change in the central incisors' inclination and the therapeutic set-up's feasibility". "plusminus" indicates the type of difference ("+" \triangleq labial positioning of the front-tooth axes during treatment, "-" \triangleq lingual positioning of the front-tooth axes during treatment); Group 1 \triangleq difference in front-tooth axes $\leq 3^\circ$, Group 2 $\triangleq >3^\circ; \leq 6^\circ$, Group 3 $\triangleq > 6^\circ$.

Tabelle 5. Zwischensubjektfaktoren der Null-Hypothese „Die Frontzahnachsenstellung hat keine Auswirkung auf die Verwirklichbarkeit des therapeutischen Set-ups. Zusammenhang zwischen der Veränderung der Frontzahnachsenstellung der mittleren Inzisiven und der Verwirklichung des therapeutischen Set-ups". „plusminus" kennzeichnet Art der Differenz („+" \triangleq Labialstellung der Frontzahnachsen im Zuge der Behandlung, „-" \triangleq Steilstellung der Frontzahnachsen im Zuge der Behandlung); Gruppe 1 \triangleq Frontzahnachsendifferenz $\leq 3^\circ$, Gruppe 2 $\triangleq >3^\circ; \leq 6^\circ$, Gruppe 3 $\triangleq > 6^\circ$.

		N
plusminus	-	22
	+	52
Group	1	22
	2	26
	3	26

zur Anwendung, wobei die Pillai-Spur eine Signifikanz von $p = .843$ ergab; somit kann die Null-Hypothese, dass die Frontzahnachsenstellung keinen signifikanten Einfluss auf die Verwirklichbarkeit des therapeutischen Set-ups aufweist, in Bezug auf die Auswirkung der Ursprungsfrontzahnachsen beibehalten werden.

Es wurde weiterhin untersucht, ob signifikante Unterschiede in der Realisierbarkeit zwischen Jugendlichen und Erwachsenen bestehen. In der Altersgruppe 1 (kleiner/gleich 18 Jahre) umfasste die Stichprobenanzahl 214 Zähne beziehungsweise Brackets, die Altersgruppe 2 (über 18 Jahre) beinhaltete 445. Die Pillai-Spur der multivariaten Tests ergab eine Signifikanz von $p = .203$. Somit liegen zwischen den beiden Altersgruppen keine signifikanten Unterschiede in der Realisierbarkeit des therapeutischen Set-ups vor. Die Null-Hypothese kann somit beibehalten werden.

Es sollte zudem der Einfluss verschiedener Zahn-Typen auf die Verwirklichbarkeit des therapeutischen Set-ups untersucht werden. Die Auswertung der Pillai-Spur der multivariaten Tests ergab, dass ein signifikanter Unterschied ($p < .000$) zwischen den Zähnen besteht, folglich kann die Null-Hypothese verworfen werden (Tabelle 6).

Im nachfolgenden Test der Zwischensubjekteffekte konnte gezeigt werden, dass lediglich die Variable für In/Out keinen signifikanten Unterschied ($p = .939$) aufwies, die übrigen fünf jedoch eine Signifikanz von $p < .000$. Es zeigte sich, dass bei den Translationen „trans_y" und „trans_z" lediglich zwischen den zweiten Molaren und den restlichen Zähnen

Table 6. Sample size for null hypothesis “The type of tooth has no impact on the therapeutic set-up’s feasibility”; “tooth” refers to teeth from 1 (central incisor) to 7 (second molar); N = sample size.

Tabelle 6. Stichprobenumfang für Null-Hypothese „Der Zahn-Typ hat keine Auswirkung auf die Verwirklichbarkeit des therapeutischen Set-ups“; „Zahn“ bezeichnet Zähne von 1 (mittlerer Inzisivus) bis 7 (zweiter Molar); N = Stichprobengröße.

Tooth	N
1	100
2	99
3	100
4	91
5	94
6	91
7	82

while the other five showed a significance of $p < .000$. There were significant differences only between the second molars and other teeth in the “trans_y” and “trans_z,” translations. In the mean deviations, the upper central incisors yielded the lowest values after the lower front teeth with deviations in rotation (tip, torque, rotation) below 4.5° and deviations in translation (in/out, anterior/posterior position, supra/infra-position) below 0.40 mm. From anterior to posterior, therapeutic set-up’s feasibility with regard to rotations decreased by approx. 2° and to translations by approx. 1 mm, with the second molars showing the poorest values.

Finally, we examined the impact of the type of scanner on the accuracy of the matching procedure in greater detail. The Mann-Whitney U test yielded significant differences ($p < .000$) between the two 3D scanners, whereby the older scanner (“Gom 1”) (containing the higher-resolution cameras), provided significantly better results in the subsequent matching procedure. This null hypothesis can therefore be rejected (Figures 4 and 5).

We noted a higher mean deviation from the ideal position of 0.042 mm in the teeth scanned with the older 3D scanner.

signifikante Unterschiede gemessen werden konnten. In den Durchschnittsabweichungen wiesen die mittleren oberen Frontzähne nach der Unterkieferfront mit Rotationsabweichungen (Tip, Torque, Rotation) unter $4,5^\circ$ und Translationsabweichungen (In/Out, Mesial-/Distalstand, Supra-/Infraposition) unter 0,40 mm die niedrigsten Werte auf. Von anterior nach posterior nahm die Realisierbarkeit des therapeutischen Set-ups hinsichtlich der Rotationen um etwa 2° und hinsichtlich der Translationen um etwa 1 mm ab, mit den schlechtesten Werten bei den zweiten Molaren.

Zuletzt wurde die Auswirkung des Scanner-Typs auf die Genauigkeit des Matching-Vorganges näher beleuchtet. Der Mann-Whitney-U-Test ergab, dass signifikante Unterschiede ($p < ,000$) zwischen den beiden 3D-Scannern vorlagen, wobei der ältere Scanner („Gom 1“), welcher die Kameras mit höherer Auflösung enthielt, beim anschließenden Matching-Vorgang signifikant bessere Ergebnisse lieferte. Diese Null-Hypothese kann somit verworfen werden (Abbildungen 4 und 5).

Es ergab sich bei den durch den älteren 3D-Scanner mit höherer Auflösung (Scanner 1) gescannten Zähnen eine durchschnittliche Abweichung von der Idealposition um 0,042 mm, wohingegen die Zähne, welche mittels des Neuen (Scanner 2) digitalisiert wurden, eine durchschnittliche Abweichung von 0,043 mm aufwiesen.

Diskussion

Ziel dieser Studie war es, die Möglichkeit der Verwirklichung des therapeutischen Set-ups in der eigentlichen Behandlung aufzuzeigen. Thalheim & Schwestka-Polly [25] verglichen das Set-up und den Zustand nach Behandlungsende von 20 mit dem Incognito®-Bracketsystem behandelten Patienten bezüglich der intercaninen Breite und konnten eine mittlere Abweichung von unter 0,5 mm feststellen.

Die gemessenen Werte dieser Studie zeigen eindrucksvoll, dass die rein visuell festgestellte Ähnlichkeit zwischen Set-up und Behandlungsergebnis mit dem Incognito®-Bracketsystem auch durch Messungen belegbar ist.

Bei den Betrachtungen ist auch ein besonderes Augenmerk auf die Frontzähne (2-2) zu legen.

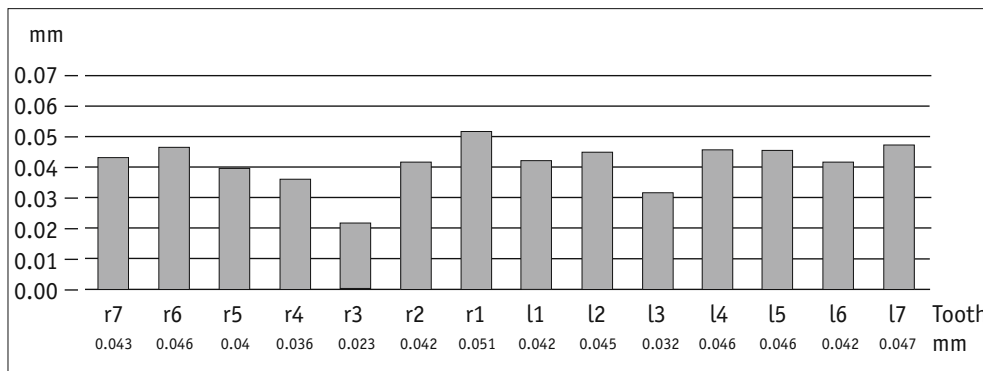


Figure 4. Matching accuracy of 3D scanner “scanner 1” in mm; “r1” to “r7” refers to the teeth of the right half of the jaw and “l1” to “l7” to the teeth of the left half from the central incisor to the second molar; all values in mm.

Abbildung 4. Match-Genauigkeit von 3D-Scanner „Scanner 1“ in mm; „r1“ bis „r7“ bezeichnet die Zähne der rechten Kieferhälfte und „l1“ bis „l7“ die der linken vom mittleren Inzisivus zum zweiten Molaren; alle Zahlenwerte in mm.

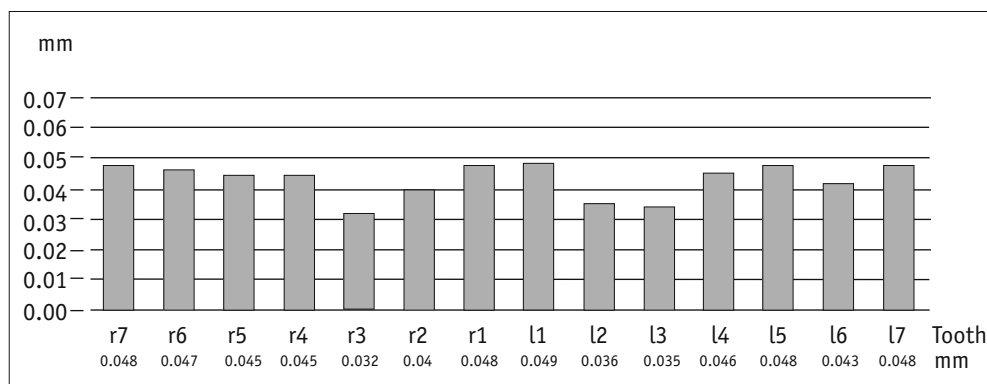


Figure 5. Matching accuracy of 3D scanner "scanner 2" in mm; "r1" to "r7" refers to the teeth of the right half of the jaw and "l1" to "l7" to the teeth of the left half of the jaw from the central incisor to the second molar; all values in mm.

Abbildung 5. Match-Genauigkeit von 3D-Scanner „Scanner 2“ in mm; „r1“ bis „r7“ bezeichnet die Zähne der rechten Kieferhälfte und „l1“ bis „l7“ die der linken vom mittleren Inzisivus zum zweiten Molaren; alle Zahlenwerte in mm.

ner with a higher resolution (scanner 1), whereby those digitalized by the newer scanner (scanner 2) showed a mean deviation of 0.043 mm.

Discussion

The objective of this study was to demonstrate the possibility of achieving the therapeutic set-up's goal in actual treatment. Thalheim & Schwestka-Polly [25] compared the set-up and status after treatment completion of 20 patients treated with the Incognito® bracket system with regard to intercanine distance; they observed a mean deviation of less than 0.5 mm.

The actual measurements taken in this study demonstrate impressively that the purely visual similarity between the set-up and results from treatment with the Incognito® bracket system can also be proven physically.

We focus on the front teeth in this discussion (2-2).

As explained in the description of our results, we noted a significant difference between the upper and even lower jaws. However, from a statistical point of view, this can only be attributed to the translation parameter in anterior-posterior direction. The lower front teeth showed better mean values in all rotations and translations, which however differ by only a maximum of 0.7° or 0.1 mm from those of the upper jaw.

The upper and lower jaws had better values when the mean deviations of the entire jaw (= all teeth) were compared.

Apparently the therapeutic set-up can be more readily realized in the lower jaw, particularly in the front-teeth area.

Another focus involved the extent to which the finishing archwire had an impact on the set-up's feasibility.

It is important to note that none of the three rotations revealed any significant differences in the three finishing archwires we tested: 16 × 22 SS, 17.5 × 17.5 TMA and 18.2 × 18.2 TMA. However, significant differences within the translations did appear between 16 × 22 SS and 17.5 × 17.5 TMA and between 17.5 × 17.5 TMA and 18.2 × 18.2 TMA.

Measured against the mean values, the three archwires showed relatively similar values with regard to rotations and translations. However, the 18.2 × 18.2 TMA archwire showed

Wie bei der Beschreibung der Ergebnisse bereits erläutert, bestand ein signifikanter Unterschied zwischen Ober- und Unterkiefer. Dieser war statistisch jedoch nur auf die Translation in mesiodistaler Richtung zurückzuführen. Bezüglich der Mittelwerte zeigten die Frontzähne der Unterkiefer in allen Rotationen und Translationen bessere Werte, welche sich jedoch lediglich um maximal 0,7° beziehungsweise 0,1 mm von denen des Oberkiefers unterschieden.

Im Vergleich der Durchschnittsabweichungen des gesamten Kiefers waren sowohl bessere Werte auf Seiten des Unter- als auch des Oberkiefers festzustellen.

Somit kann gefolgert werden, dass im Unterkiefer das therapeutische Set-up speziell im Frontzahnbereich etwas besser verwirklicht werden kann.

Des Weiteren war von Interesse, inwiefern der Finishing-Bogen Einfluss auf die Erreichbarkeit des Set-ups zeigte.

Bei den drei getesteten Finishing-Bögen 16 × 22 SS, 17,5 × 17,5 TMA und 18,2 × 18,2 TMA ist es wichtig zu erwähnen, dass in keiner der drei Rotationen signifikante Unterschiede festzustellen waren. Allerdings konnten zwischen 16 × 22 SS und 17,5 × 17,5 TMA sowie zwischen 17,5 × 17,5 TMA und 18,2 × 18,2 TMA Signifikanzen innerhalb der Translationen aufgezeigt werden.

Gemessen an den Mittelwerten zeigten die drei Bögen relativ ähnliche Werte bezüglich Rotationen und Translationen. Es kann jedoch gesagt werden, dass der 18,2 × 18,2-TMA-Bogen insgesamt die besten Rotationswerte aufwies und auch im Finishing mit einer Durchschnittsabweichung der Frontzähne von 4,30° (±2,20°) zum Set-up-Modell die besten Torque-Werte erzielte.

Außerdem wurde in dieser Studie untersucht, inwiefern die Neuerungen, welche am Incognito®-Bracketsystem in den letzten Jahren vorgenommen wurden, einen Einfluss auf die Verwirklichbarkeit des therapeutischen Set-ups hatten. Im Zuge der Studie konnte ein positiver Effekt festgestellt werden, da nicht nur signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Bracketgenerationen aufgezeigt werden konnten, sondern auch vor allem innerhalb der Mittelwerte der Rotationen eine konstante Verringerung der Abweichungen zu

the best overall rotation values, and in the finishing stage, also achieved the best torque values, showing a mean incisor deviation of $4.30^\circ (\pm 2.20^\circ)$ compared to the therapeutic set-up.

We also examined the extent to which improvements made to the Incognito® bracket system in recent years affected the therapeutic set-up's feasibility. We observed a positive effect, as significant differences appeared between the individual generations of brackets as did consistent reductions in deviations, particularly within the rotations' mean values. It is worth noting that there were no significant differences in torque. The earlier generations of the Incognito® bracket seem to have already permitted very good torque control.

Our results revealed a huge improvement in values between 2005 and 2006 in particular. Here, the mean deviation of the front teeth regarding tip dropped from 4.40° to 3.48° and the 4.75° mean deviations in torque values in 2004 dropped to 3.82° in 2006. The rotation values decreased by 0.95° from 2004 to 2006 as well.

However, in 2006 we observed higher mean deviations in the translations of up to 0.5 mm within the bracket generations.

The impact of incisor inclination on the set-up's feasibility was another focal point of this study demonstrating no statistically significant difference in feasibility between a protrusion or retrusion of the front teeth during treatment.

However, the extent of change in axial repositioning is significant.

The group with the least change in central-incisor axial inclination (group 1, $\leq 3^\circ$) revealed the lowest deviations during treatment, and then, only in the translation values around the z-axis. Group 2 ($>3^\circ, \leq 6^\circ$) showed the lowest deviations of the three groups regarding torque and rotation values, whereby astonishingly, group 3 presented the best of the other three variables (those involving an over 6° change in front-tooth axis).

Another important observation was that there was no statistically significant difference between an incisor labio- or linguoversion at the onset of treatment.

We observed no significant difference in therapeutic feasibility whether the patient was still growing or not; the Incognito® appliance is effective regardless of the patient's age.

We noted significant differences in the feasibility of the therapeutic set up among the various teeth in the dental arch. Oddly enough, the significant differences in translations were limited to comparison of the second molars with the other teeth.

The incisors' rotation values coincided better than those of the other teeth, while the second molars had the poorest agreement values.

Similar translation values were measured between the incisors, canines, premolars and first molars. Here too, the second molars' agreement values were slightly worse.

verzeichnen war. Erwähnenswert war hierbei, dass keine signifikanten Unterschiede den Torque betreffend erhoben werden konnten, was bedeutet, dass schon frühere Generationen der Incognito®-Brackets eine sehr gute Kontrolle über den Torque erlaubten.

Es zeigte sich, dass vor allem zwischen den Jahren 2005 und 2006 eine enorme Verbesserung der Werte zu verzeichnen war. So reduzierte sich die durchschnittliche Abweichung der Frontzähne den Tip betreffend von $4,40^\circ$ auf $3,48^\circ$. Ebenso konnte eine Reduktion der Durchschnittsabweichungen der Torque-Werte von $4,75^\circ$ im Jahre 2004 auf $3,82^\circ$ im Jahre 2006 ermittelt werden. Auch bei den Rotationen verringerten sich die Werte von 2004 bis 2006 um $0,95^\circ$.

Bei den Translationen jedoch konnten innerhalb der Bracket-Generationen um bis zu 0,5 mm erhöhte Durchschnittsabweichungen im Jahre 2006 festgestellt werden.

Auch der Einfluss der Frontzahnachsenstellungen auf die Realisierbarkeit des Set-ups war von großem Interesse. Hierbei konnte gezeigt werden, dass statistisch kein signifikanter Unterschied in der Verwirklichbarkeit zwischen einer Protrusion oder Retrusion der Fronten im Zuge der Behandlung festzustellen ist.

Allerdings zeigte das Ausmaß der Achsenveränderung sehr wohl eine Signifikanz.

Die Gruppe mit der geringsten Veränderung der Achsen der mittleren Inzisivi (Gruppe 1, kleiner/gleich 3°) zeigte im Laufe der Behandlung lediglich in den Translationswerten um die z-Achse die geringsten Abweichungen. Gruppe 2 (größer 3° , kleiner/gleich 6°) wies die niedrigsten Abweichungen aller Gruppen bei den Werten Torque und Rotation auf, wobei erstaunlicherweise die Bestwerte der übrigen drei Variablen der Gruppe 3, also den Fällen mit einer Veränderung der Frontzahnachsen um mehr als 6° zuzuordnen waren.

Eine weitere wichtige Beobachtung besagt, dass es statistisch keinen signifikanten Unterschied zwischen dem Vorliegen eines Labial- oder Steilstandes bei Behandlungsbeginn gab.

Es konnte zudem gezeigt werden, dass es bei der Frage der Realisierbarkeit des Set-ups keinen signifikanten Unterschied machte, ob der Patient noch im Wachstum war oder nicht und dass die Incognito®-Apparatur folglich unabhängig vom Alter des Patienten eingesetzt werden kann.

Innerhalb der verschiedenen Zähne im Zahnbogen konnten signifikante Unterschiede in der Verwirklichbarkeit nachgewiesen werden. Interessant ist hierbei die Tatsache, dass sich die Signifikanzen bei den Translationen lediglich auf den Vergleich der zweiten Molaren mit den übrigen Zähnen beschränkten.

Bezüglich der Rotationen konnten die Inzisivi bessere Werte als die übrigen Zähne aufweisen, die zweiten Molaren zeigten die schlechtesten Werte.

Bei den Translationen konnten zwischen den Inzisivi, den Canini, den Prämolaren und den ersten Molaren ver-

Another interesting question addressed by this study related to the impacts of the scanner on the matching procedure's accuracy. Here, significant differences in matching accuracy appeared between the two 3D scanners, with the older scanner achieving better results. This may be due to the cameras' higher resolution, which ensures a more accurate scan of the plaster casts due to the more numerous pixels. However, the brackets deviated only slightly (mean deviations in the matching procedure on the 3D model tooth were 0.042 mm [3D scanner „Gom1“] and 0.043 mm [3D scanner „Gom2“]).

The matching accuracy can apparently be largely determined by the morphological characteristic of each tooth's lingual crown. Here the canines had the best values, with a matching accuracy of under 0.035 mm, while the other teeth also achieved levels under 0.05 mm. This demonstrates the advantage of the Incognito® brackets' maximum individualization, which allows individual brackets that have been lost to be immediately rebonded. By using the largest possible area on the lingual crown surface, optimal bracket positioning is possible, both in the mouth and virtually on 3D models.

Therapeutic goals can be achieved with outstanding results when the Incognito® bracket system is employed, according to the results of all the jaws observed in this study. Incisor rotation can be realized with a mean deviation of less than 4.6° (tip 3.95°, torque 4.31°, rotation 4.53°). Incisor translations can also be realized with a mean deviation of less than one-half millimeter.

Slightly higher deviation values were observed regarding the entire jaw than the front teeth. However, the mean deviations of the rotations in comparison to the final therapeutic result remained below 5.7° and the translations below 1.2 mm.

Concerning all the values: it is important to remember that the rotation and translation axes run through the bracket's center – thus certain rotations around a point outside the bracket's center may cause a change in the translation.

The lingual appliances in this study were fitted between 2003 and 2006. We observed a significant improvement in the achievement of the therapeutic set-ups during that period. With the Incognito® bracket system's current optimization of both the brackets and orthodontic archwires and the company's immediate implementation using CAD/CAM and Rapid Prototyping technology, we are confident that even better therapeutic results are now achievable with this individualized lingual treatment appliance.

Conclusion

To summarize: lingual orthodontics demonstrates a similar range of indications with results at least equivalent to those produced by the labial multiband technique. Yet lingual appliances also enable us to predict treatment results by means of a therapeutic set-up and to realize these results with a high degree of accuracy.

gleichbare Werte gemessen werden. Auch hier zeigten die zweiten Molaren geringfügig schlechtere Werte.

Eine weitere interessante Fragestellung dieser Studie bezog sich auf die Auswirkungen des Scanners auf die Genauigkeit des Matching-Vorganges. Es konnte gezeigt werden, dass zwischen den beiden zur Anwendung gekommenen 3D-Scannern signifikante Unterschiede in der Match-Genauigkeit zu verzeichnen waren. Hierbei schnitt der ältere Scanner besser ab. Dies könnte an der höheren Auflösung der Kameras liegen, welche durch die größere Anzahl an Pixeln eine genauere Abtastung der Gipsmodelle gewährleisten konnten. Die Durchschnittsabweichungen der Brackets beim Matching-Vorgang auf den Zahn des 3D-Modells unterschieden sich jedoch mit 0,042 mm (3D-Scanner „Gom1“) und 0,043 mm (3D-Scanner „Gom2“) nur wenig.

Die Match-Genauigkeit kann wohl zum Großteil an der charakteristischen lingualen Kronenmorphologie der einzelnen Zähne festgemacht werden. Hier zeigten die Canini mit einer Match-Genauigkeit von unter 0,035 mm die besten Werte, während die übrigen Zähne jedoch ebenfalls unter der Marke von 0,05 mm anzusiedeln waren. Dies zeigt den Vorteil der maximalen Individualisierung der Incognito®-Brackets, welche dadurch auch ein direktes Kleben einzelner zu Verlust gegangener Brackets ermöglicht. Durch das Ausnutzen eines möglichst großen Teils der lingualen Kronenfläche kann somit sowohl im Mund als auch virtuell an den 3D-Modellen eine bestmögliche Platzierung des Brackets erfolgen.

Bei der Betrachtung aller in diese Studie eingeflossenen Kiefer lässt sich sagen, dass mit dem Incognito®-Bracketsystem eine außerordentlich gute Verwirklichung des therapeutischen Set-ups zu erreichen ist. Im Frontzahnbereich ist eine Realisierung der Rotationswerte mit einer Durchschnittsabweichung von weniger als 4,6° möglich (Tip 3,95°; Torque 4,31°, Rotation 4,53°). Auch die Translationen der Frontzähne lassen sich mit einer Durchschnittsabweichung von weniger als einem halben Millimeter umsetzen.

Auf den gesamten Kiefer bezogen ließen sich leicht höhere Werte als im Frontzahnbereich feststellen, allerdings lagen hier die Durchschnittsabweichungen der Rotationen im Vergleich des Endergebnisses mit dem therapeutischen Set-up dennoch unter 5,7° Grad und die Translationen unter 1,2 mm.

Bei allen Werten ist zu beachten, dass die Rotations- und Translationsachsen durch das Zentrum des Brackets verlaufen und somit gewisse Rotationen um einen Punkt außerhalb des Bracketzentrums möglicherweise auch eine Veränderung der Translation bedingen.

Die im Rahmen der Untersuchung verwendeten individuellen lingualen Apparaturen wurden in den Jahren 2003 bis 2006 eingesetzt. Es konnte innerhalb dieses Zeitraumes eine deutliche Verbesserung der Umsetzung des therapeutischen Set-ups aufgezeigt werden. Durch die fortlaufende Optimierung sowohl der Brackets als auch der kieferortho-

Acknowledgements

Sincere thanks are extended to Dr. Dirk Wiechmann, Bad Essen, Germany and TOP -Service für Lingualtechnik, Bad Essen, Germany for their support of this study.

References

1. Altounian G. Le targ. *L'information dentaire* 1985;67:2225–34.
2. Creekmore TD. Lingual orthodontics – its renaissance. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1989;96:120–37.
3. Creekmore TD. Precision placement of lingual and labial brackets. *J Am Ling Orthod Assoc* 1988;1:6–8.
4. Dahlberg G. *Statistical methods for medical and biological students*. New York: Interscience Publications, 1940:25.
5. Fillion D. Orthodontie linguale: systèmes de positionnement des attaches au laboratoire. *Orthod Fr* 1980;60:695–704.
6. Fuck LM, Wiechmann D, Drescher D. Comparison of the initial orthodontic force systems produced by a new lingual bracket system and a straight-wire appliance. *J Orofac Orthop* 2005;66:363–76.
7. Fujita, K. Multilingual bracket and Mushroom arch wire technique: A clinical report. *Am J Orthod* 1982;82:120–40.
8. Fujita, K. New orthodontic treatment with lingual bracket and Mushroom arch wire appliance. *Am J Orthod* 1979;76:657–75.
9. Geron S, Romano R, Brosh T. Vertical forces in labial and lingual orthodontics applied on maxillary incisors – a theoretical approach. *Angle Orthod* 2004;74:195–201.
10. Gieseke F. The ICP Algorithm: Theoretical framework and practical realizations. Seminar paper, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Germany, 2004.
11. Hiro T, Takemoto K. Resin core indirect bonding system – improvement of lingual orthodontic treatment. *J Jpn Orthod Soc* 1998;57:83–91.
12. Hohoff A, Stamm T, Ehmer U. Comparison of the effect on oral discomfort of two positioning techniques with lingual brackets. *Angle Orthod* 2003;73:25–32.
13. Hohoff A, Stamm T, Goder G, et al. Comparison of three bonded lingual appliances by auditive and subjective assessment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003;124:737–45.
14. Hohoff A, Wiechmann D, Fillion D, et al. Evaluation of the parameters underlying the decision by adult patients to opt for lingual therapy: an international comparison. *J Orofac Orthop* 2003;64:135–44.
15. Houston WJ. The analysis of errors in orthodontic measurements. *Am J Orthod* 1983;83:382–90.
16. Hugel SA. The customised lingual appliance set-up service (CLASS) system. In: Romano R, ed. *Lingual orthodontics*. Hamilton-London: Decker, 1998:163–73.
17. Jost-Brinkmann PG, Müller-Hartwich R. Die Lingualtechnik. *Zahnärztl Mitt* 2003;22:54–8.
18. Kelly, VM. JCO interviews on lingual orthodontics. *J Clin Orthod* 1982;16:461–76.
19. Paige, SF. A lingual light-wire technique. *J Clin Orthod* 1982;16:534–44.
20. Pauls, HJ. Lingual orthodontics with orthognatic surgery in a severe Class II, Division 2 case. *J Orofac Orthop* 2008;69:135–45.
21. Rummel V, Wiechmann D, Sachdeva R. Precision finishing in lingual orthodontics. *J Clin Orthod* 1999;23:101–13.
22. Segner, D. Personal communication, Hamburg, Germany.
23. Smith JR, Gorman JC, Kurz C, Dunn RM. Keys to success in lingual therapy Part 1. *J Clin Orthod* 1986;89:252–61.
24. Stamm T, Hohoff A, Ehmer U. A subjective comparison of two lingual bracket systems. *Eur J Orthod* 2005;27:420–6.
25. Thalheim A, Schwestka-Polly R. Klinische Umsetzbarkeit eines Set-ups in der lingualen Orthodontie. *Inf Orthod Kieferorthop* 2008;40:277–82.
26. Wiechmann D. A new bracket system for lingual orthodontic treatment. Part 1: Theoretical background and development. *J Orofac Orthop* 2002;63:234–45.
27. Wiechmann D. A new bracket system for lingual orthodontic treatment. Part 2: First clinical experiences and further development. *J Orofac Orthop*. 2003;64:372–88.
28. Wiechmann D. Integration der Lingualtechnik in die tägliche Praxis. *Inf Orthod Kieferorthop* 1999;31:9–23.
29. Wiechmann D. La thérapeutique eco-linguale. Deuxième partie: Aspects cliniques. *J de Edge* 2001;43:9–37.
30. Wiechmann D. La thérapeutique eco-linguale. Première partie: Une théorie pour un concept moderne de traitement lingual. *J de Edge* 2000;42:53–69.
31. Wiechmann D. Lingual orthodontics. Part 2: Archwire fabrication. *J Orofac Orthop* 1999;60:416–26.

Schlussfolgerung

Zusammenfassend lässt sich somit feststellen, dass die Lingualtechnik nicht nur ein vergleichbares Indikationsspektrum mit mindestens gleichwertigen Ergebnissen wie die labiale Multibandtechnik vorweisen kann, sondern zudem eine Möglichkeit besteht, das zu erreichende Behandlungsergebnis durch ein therapeutisches Set-up vorherzusagen und mit hoher Genauigkeit auch zu verwirklichen.

Danksagung

Herzlichen Dank an Dr. Dirk Wiechmann, Bad Essen, und T.O.P.-Service für Lingualtechnik, Bad Essen, für die Unterstützung bei dieser Studie.

Correspondence Address

Dr. med. dent. Alexander Pauls
Volmerswerther Str. 57
40221 Düsseldorf
Germany
Phone: (+49/211) 15933939
e-mail: alexander.pauls@drpauls.de