

Effektivität der Invisalign-Teen-Behandlung –
Validierung einer Analyse-Methode

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Hohen Medizinischen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn

Nina Kristina Hauschopp
aus Bochum

2012

Angefertigt mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Christoph Bourauel
2. Gutachter: Prof. Dr. med. dent. Andreas Jäger

Tag der Mündlichen Prüfung: 25.10.2012

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, Propädeutik
und Werkstoffwissenschaften der Universität Bonn
Direktor: Prof. Dr. med. dent. Helmut Stark
-Stiftungsprofessur für Oralmedizinische Technologie-
Prof. Dr. rer. nat. Christoph Bourauel

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Einführung	7
1.2	Historischer Überblick über die Elastodontie.....	9
1.2.1	Einteilige Positioner	10
1.2.2	Geteilte Positioner	13
1.2.3	Konfektionierte Positioner.....	15
1.2.4	Positionerwerkstoffe	16
1.3	Das Invisalign-System.....	17
1.3.1	Invisalign-Teen.....	21
1.3.2	Literaturübersicht zur Effektivität der Invisalign-Behandlung	22
1.4	Grundlagen der kieferorthopädischen Zahnbewegung.....	25
1.4.1	Biomechanik der Zahnbewegung	26
1.4.2	Gewebereaktion auf die Zahnbewegung	28
2	Fragestellung und Ziele.....	29
3	Material und Methode	30
3.1	Auswahl der Modelle	30
3.2	Untersuchungsmethode	31
3.3	Überlagerung der Modelle.....	32
3.3.1	Ausrichtung an einer nicht bewegten, ausgeprägten Referenzstruktur	32
3.3.2	Ausrichtung mit allgemeiner Methode	34
3.4	Zahneigenes Koordinatensystem zur Darstellung der Zahnbewegung	34
3.5	Messung der Zahnbewegung	35

3.6	Auswertung und statistische Analyse	36
4	Ergebnisse	38
4.1	Ausrichtung an einer nicht bewegten, ausgeprägten Referenzstruktur	38
4.1.1	Reproduzierbarkeit der Methode	38
4.1.2	Ergebnisse bei Oberkieferausrichtung an einer nicht bewegten, ausgeprägten Referenzstruktur	39
4.2	Allgemeine Ausrichtungsmethode	45
4.2.1	Reproduzierbarkeit der Methode	45
4.2.2	Exemplarischer Vergleich der Ergebnisse bei allgemeiner Ausrichtungsmethode mit und ohne manuelle Korrektur des automatischen Matchings	45
4.2.3	Ergebnisse bei allgemeiner Ausrichtungsmethode mit manueller Korrektur.....	48
4.3	Vergleich der Ergebnisse beider Ausrichtungsmethoden.....	60
5	Diskussion.....	64
5.1	Diskussion der Methode	64
5.2	Diskussion der Ergebnisse im Vergleich zur Literatur.....	67
5.3	Diskussion der Behandlungsmethode im Hinblick auf die ermittelte Effektivität.....	73
5.4	Klinische Schlussfolgerungen	75
6	Zusammenfassung	77
7	Literaturverzeichnis	79
8	Danksagung.....	89

1 Einleitung

1.1 Einführung

Die Ästhetik nimmt in der heutigen Zahnmedizin einen immer höheren Stellenwert ein. So ist die Nachfrage jugendlicher und erwachsener Patienten nach kieferorthopädischer Behandlung in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen. Viele Patienten scheuen jedoch die ästhetische Beeinträchtigung durch festsitzende Behandlungsgeräte [Rosvall et al., 2009]. Durch die Entwicklung der Lingualtechnik konnte dieses Problem minimiert werden, dennoch lehnen viele Patienten die Apparatur wegen Einschränkung der Zungenfunktion und Sprechstörungen ab [Brachwitz, 2001; Miller und Hordt, 2001]. Die Korrektur von Zahnfehlstellungen mit „unsichtbaren“ Behandlungsmethoden hat im Laufe der letzten Jahre in der Kieferorthopädie immer mehr an Popularität gewonnen.

Mit dem Invisalign-System (Fa. Align Technology, Santa Clara, Kalifornien, USA) erfolgt die kieferorthopädische Behandlung mit einer Serie herausnehmbarer, transparenter Kunststoffschienen, sogenannten Alignern, welche einige Vorzüge gegenüber herkömmlichen kieferorthopädischen Apparaturen bieten. So stellt Invisalign nach Sander et al. [2009] eine Alternative für Patienten mit dem Wunsch nach einer unkomplizierten, wenig zeitintensiven und ästhetisch nicht beeinträchtigenden Behandlung dar (Abb. 1).



Abb. 1: Patient links trägt durchsichtige Invisalign-Schiene. Patient rechts mit konventioneller Multiband-Bracket-Apparatur [Copyright © 2012 Align Technology Inc.].

Das Invisalign-Konzept greift die Prinzipien der „Tooth Positioning Appliance“ von Kesling [1944] auf, der eine flexible kieferorthopädische Apparatur beschrieb, die ohne Drähte, Bänder und Brackets Zahnbewegungen ermöglichte. Voraussetzung für die Behandlung mit Invisalign ist ein ausgewachsener Kiefer und eine vollständig durchgebrochene Dentition [Christensen, 2002]. Die Indikation für die herkömmliche Invisalign-Behandlung beschränkt sich daher auf die Therapie erwachsener Patienten. Daneben gibt es inzwischen mit dem Invisalign-Teen-System die Möglichkeit, die Korrektur von Zahnfehlstellungen bereits im Wechselgebiss vorzunehmen, sobald keine Milchzähne mehr vorhanden sind.

Mit herausnehmbaren Apparaturen, zu denen das Invisalign-System gehört, sind vor allem kippende Zahnbewegungen möglich. In der Vergangenheit stand die Korrektur leichter bis moderater Engstände, Lückenschluss im Frontzahnbereich und Aufrichtung gekippter Zähne im Vordergrund [Vlaskalic und Boyd, 2002]. Seit Einführung der Behandlungsmethode wird kontrovers diskutiert, ob auch moderate bis schwierige Zahnstellungskorrekturen mit Invisalign erfolgreich durchgeführt werden können. In früheren Studien wurde gezeigt, dass der Behandlung komplexer Fälle mit dem Invisalign-System Grenzen gesetzt sind [Bollen et al., 2003]. Die Deutsche Gesellschaft für Kieferorthopädie (DGKFO) bewertet Aligner ohne Anwendung zusätzlicher Hilfsmittel als bedingt indiziert für Extrusion, Derotation von Eckzähnen und Prämolaren sowie Lückenschluss nach Extraktion von Prämolaren [Göz, 2010].

Seit einiger Zeit bietet Invisalign mit speziell geformten Attachments und zusätzlichen Verankerungselementen jedoch eine verbesserte Retention der Aligner bei der Durchführung komplizierterer Zahnbewegungen. Nach langjähriger Erfahrung mit dem System finden sich in der Literatur inzwischen auch Beschreibungen über die erfolgreiche Therapie von Extraktionsfällen, Klasse-II-Anomalien und offenem Biss [Hönn und Göz, 2006; Miller et al., 2002; Schupp et al., 2010b und 2010c]. Körperliche Zahnbewegungen, In- und Extrusionen sowie relativer Wurzelorque gehören inzwischen zum festen Indikationsspektrum der Aligner-Behandlung [Boyd, 2008].

Beim Invisalign-Konzept wird das Therapieziel bereits vor Behandlungsbeginn durch die sog. ClinCheck-Software definitiv festgelegt. Die Endposition im ClinCheck stellt ein virtuelles Setup des gewünschten Behandlungsziels dar. Die reale Situation nach Beendigung der Behandlung sollte diesem virtuellen Behandlungsziel entsprechen. Der Behandler hat während der aktiven kieferorthopädischen Behandlung nur noch geringe Einflussmöglichkeiten [McKenna, 2001]. Angesichts dieser Tatsache stellt sich die Frage, inwieweit das tatsächlich erreichte Behandlungs-

ergebnis mit dem angestrebten Behandlungsziel übereinstimmt und mit welcher Effektivität bestimmte Zahnbewegungen durchgeführt werden können. Des Weiteren stellt sich die Problematik einer geeigneten Analyse-Methode zur Erfassung der Zahnbewegungen. Diese Fragen sollen in der vorliegenden Arbeit erörtert werden.

1.2 Historischer Überblick über die Elastodontie

Das Konzept der Invisalign-Behandlung ist angelehnt an die ursprünglichen Prinzipien der Elastodontie. In den vergangenen Jahrzehnten wurden herausnehmbare, elastische kieferorthopädische Apparaturen überwiegend für Feinkorrekturen und als Retentionsgeräte angewendet. Mit der Entwicklung neuer Materialien wurden die möglichen Zahnbewegungen immer umfangreicher. Das folgende Kapitel soll einen kurzen Überblick über die Geschichte der Elastodontie geben, als deren Begründer H.D. Kesling gilt. Der von Kesling im Jahr 1945 entwickelte bimaxilläre Positioner (Abb. 2) wurde in der Folgezeit vielfach modifiziert und das Behandlungsspektrum erweitert. Es bietet sich folgende grobe Einteilung der Positionertypen an: einteilige Positioner und geteilte Positioner sowie konfektionierte und individualisierte Positioner. Im Folgenden wird, wenn nicht anders erwähnt, von individualisierten Positionern gesprochen, welche auf Setup-Modellen des Patienten individuell angefertigt werden.

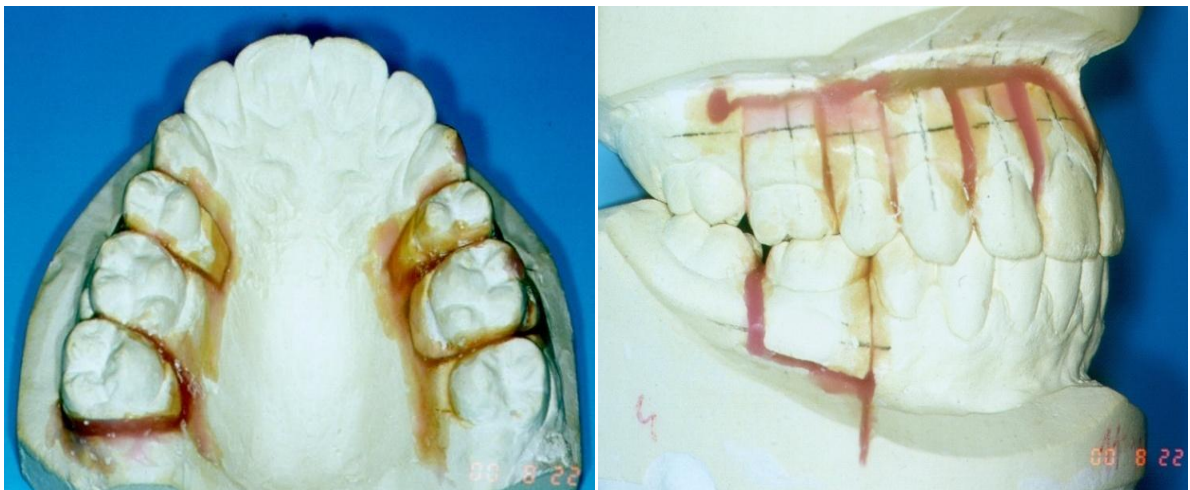


Abb. 2: Setup-Modelle zur Herstellung eines individualisierten Positioners. Die zu korrigierenden Zähne werden aus dem Modell herausgetrennt und mit Wachs in der gewünschten Position wieder befestigt. Auf einem Duplikat des Modells wird das Gerät hergestellt.

1.2.1 Einteilige Positioner

Kesling beschrieb bereits im Jahr 1945 die Verwendung von Setup-Modellen für die Anfertigung einer elastischen „Tooth Positioning Appliance“ zur Durchführung von Zahnbewegungen. Zur Herstellung des Setup-Modells wurden auf dem Patientenmodell die zu korrigierenden Zähne abgetrennt und mit Wachs in der gewünschten Position wieder befestigt [Kesling, 1946]. Der einteilige verformbare Positioner aus Kautschuk wurde auf einem Duplikat des Modells so angefertigt, dass er die oralen und vestibulären Zahnflächen beider Kiefer umfasste und den Raum zwischen Ober- und Unterkiefer vollständig ausfüllte (Abb. 3).



Abb. 3: Einteiliger bimaxillärer Positioner aus elastischem Material zur Feineinstellung der Ober- und Unterkieferdentition nach den Prinzipien von Kesling.

Eingesetzt wurde der Positioner zur Feineinstellung der Zähne im Anschluss an die kieferorthopädische Behandlung mit einer festsitzenden Apparatur, nachdem die Zähne erfolgreich derotiert waren und sich der gewünschten Position angenähert hatten. Als weitere Indikation nannte Kesling die Retention. Zahnbewegungen in größerem Umfang waren mit dem Positioner zu dieser Zeit noch nicht möglich. Allerdings erkannte der Autor bereits, dass auch größere Zahnstellungskorrekturen durchgeführt werden könnten, wenn eine Serie von Positionern auf schrittweise idea-

lisierten Setup-Modellen hergestellt würde. Dies schien zum damaligen Zeitpunkt jedoch noch nicht praktikabel [Kesling, 1945].

Elsasser [1950] war der Ansicht, dass der hochelastische Positioner für die Retentionsphase ungeeignet sei. Bei jedem Einsetzen und Entfernen der Apparatur wirkten intermittierende Kräfte auf die Zähne. Deshalb erlaube der Positioner kein dauerhaftes Settling der Zähne im Alveolar-knochen und könne die erreichte Zahnstellung nicht definitiv stabilisieren, dies wird auch von Kahl-Nieke [2002] bekräftigt. Elsasser empfahl eine Tragedauer von sechs bis acht Wochen, schlug dann aber die Anwendung eines regulären Retainers vor.

Vorhies [1960] bevorzugte eine kurze, intensive Therapie mit dem Positioner über maximal sechs Wochen mit einer täglichen Tragedauer von mindestens 17 Stunden. Er beschrieb bessere Resultate durch die intensive Kurztherapie gegenüber längerer Tragedauer, bei der öfter unerwünschte Nebeneffekte und Behandlungsmisserfolge auftraten. Vorhies bewies in seiner Studie, dass Wurzelorque der Frontzähne in einigen Fällen möglich sei, die Änderung der Achsneigung aber überwiegend durch eine Zahnkipfung entstehe. Der Positioner sei außerdem zur Korrektur von Kreuzbissen, zum Lückenschluss und zur Rotationsbehandlung indiziert. Der Autor beobachtete in seiner Untersuchung keine vorhersagbare selektive In- oder Extrusion einzelner Zähne durch den Positioner.

Ein neues Vakuum-Form-Verfahren zur Herstellung thermoplastischer kieferorthopädischer Geräte wurde von Nahoum [1964] vorgestellt. Diese Entwicklung legte den Grundstein zu Weiterentwicklungen und Vereinfachungen in der Produktion des Positioners.

Gottlieb [1968] führte eine Studie mit 100 Patienten zur Ermittlung des Erfolgs der Positionerbehandlung durch. Er beurteilte die Kriterien Okklusion, vertikaler und horizontaler Überbiss, Lückenschluss, Rotation, Mittellinienabweichung, Zahnbogenform und axiale Zahnstellung. Bei Verbesserung aller Faktoren galt die Behandlung als erfolgreich. Bei 60 % der Patienten traf dies zu. 26 % der Fälle wurden als teilweise erfolgreich eingestuft, weil nicht alle Kriterien erreicht wurden. 14 % der Patienten wiesen eine derart schlechte Compliance auf, dass sich keine Verbesserung der Situation zeigte. Daher beurteilte Gottlieb bei richtiger Indikationsstellung die Kooperation des Patienten als den entscheidenden prognostischen Faktor für den Behandlungserfolg mit dem Positioner.

Cottingham [1969] empfahl den gnathologischen Positioner als Ergänzung zur aktiven kieferorthopädischen Behandlung. Er testete verschiedene Kunststoffe und Gummis, um ein Material zu finden, welches einerseits verformbar genug war, um sich den Zähnen anzulegen, andererseits

aber so starr, dass aktive Zahnbewegungen möglich waren. Er entdeckte, dass das thermoplastische Material Impak (C.M.P. Industries, Albany, New York) geeignete Eigenschaften aufwies. Indiziert sei der Positioner, um Lücken nach der Entbänderung zu schließen und die Zähne in die optimale Position zum Antagonisten einzustellen. Zur Retention von rotierten Zähnen war die Apparatur laut Cottingham ungeeignet.

Wells veröffentlichte 1970 eine Untersuchung mit 29 Patienten, die mit Positionern behandelt worden waren. Die Tragedauer variierte zwischen 3 Wochen und 3 Jahren. Er stellte fest, dass alle Formen von Zahnrotationen nachweisbar waren. Die Korrektur von Kreuzbiss, Overbite, Overjet, Mittellinienabweichungen sowie Lückenschluss und Rotationen konnten erfolgreich durchgeführt werden. Nicht möglich seien Translationen und körperliche Zahnbewegungen mit dem Positioner [Wells, 1970]. Größere Bewegungen erreichte der Positioner vergleichsweise schneller als kleine Zahnbewegungen.

Sander und Fröhls [1989] veröffentlichten eine Untersuchung mit 59 Patienten, die im Anschluss an eine Multibandbehandlung einen einteiligen Positioner trugen. Die Änderung der Interkuspitation während der Behandlung wurde quantitativ erfasst. Die Autoren erkannten einen aktiven Settling-in-Effekt durch die Positionerbehandlung, der die Interkuspitation, Artikulation sowie das neuromuskuläre Kaumuster gegenüber gewöhnlichen Retentionsgeräten wesentlich verbesserte. Mithilfe des Periotestgerätes wiesen die Autoren eine langanhaltende Zahnbeweglichkeit durch die Positionertherapie nach und empfahlen deshalb im Anschluss einen konventionellen Retainer.

Hinz suchte nach einem geeigneteren Material für den Positioner und stellte 1991 das Elasto-KFO-System mit vier unterschiedlich einsetzbaren Apparaturen vor. Dazu gehörten Elasto-Aligner, Elasto-Finisher, Elasto-Bond und Elasto-Osamu. Zur Herstellung wurden Silikonelastomere der Shore Härtegrade 40 bzw. 65 verwendet, die ein höheres Rückstellvermögen aufwiesen als das bisherige Positionermaterial und damit umfangreichere Zahnbewegungen ermöglichten [Hinz, 1991].

„Elastodonten“ verschiedener Härtegrade für unterschiedliche Indikationsbereiche stellten auch Rollet et al. im Jahr 1991 vor. Harte Elastomere wurden für Verankerungszwecke genutzt, mittelharte für Rotationskorrekturen sowie kleinere Bewegungen und weiche Elastomere dienten dem Lückenschluss sowie größeren Zahnbewegungen von 4 bis 5 mm. Kombiniert wurden die Elasto-Geräte mit einer extraoralen Verankerung oder Brackets, um die elastischen Eigenschaften des Gerätes optimal auszunutzen. Das elastodontische Konzept sei zum Finishing und zur Retention

einsetzbar, da sowohl orthopädische, orthodontische wie auch funktionelle Wirkungen zu erzielen seien [Rollet et al., 1991].

Prestel et al. [1995] untersuchten die im Rahmen einer kieferorthopädischen Positionerbehandlung auftretenden orthodontischen Kraftsysteme und die erfolgten Zahnbewegungen mithilfe des Orthodontischen Mess- und Simulations-Systems (OMSS). Die Zähne 11, 13, 15 und 16 wurden hinsichtlich Intrusion, Extrusion, Aufrichtung, Torque und Derotation analysiert. Bei den Zähnen 11 und 13 waren bis auf die Intrusion alle Zahnbewegungen zumindest teilweise möglich, während bei den Zähnen 15 und 16 kaum nennenswerte Zahnbewegungen erreicht werden konnten. Extrusionen wurden nicht gemessen. Die Messergebnisse zeigten, dass die erreichte Zahnbewegung deutlich von der Zahnmorphologie und der Art der angestrebten Bewegung abhängig ist. Der Positioner könne ohne zusätzliche Hilfsmittel nicht als aktives orthodontisches Gerät betrachtet werden, sondern solle in der Hauptsache zum gesteuerten „settling“ im Anschluss an eine kieferorthopädische Behandlung Anwendung finden [Prestel et al., 1995]. Bourauel et al. [1997] zeigten in einer experimentellen Studie, dass durch die Applikation von Attachments wie Knöpfchen oder Brackets bei elastodontischen Geräten eine Steigerung der Effektivität erzielt werden kann.

1.2.2 Geteilte Positioner

Der ursprüngliche Tooth Positioner von Kesling [1945] ist eine einteilige Apparatur, mit der eine intermaxilläre Fixierung der Kiefer erreicht wurde. Zu späteren Zeiten kamen in der Elastodontie vermehrt geteilte monomaxilläre Positioner zum Einsatz. Die Schienen im Ober- und Unterkiefer wurden bei dieser Art von Positionern nicht miteinander verbunden. Im Jahr 1971 wurde von Ponitz mit dem „Invisible Retainer“ eine dem Positioner ähnliche kieferorthopädische Apparatur vorgestellt. Die Herstellung erfolgte in einem Tiefziehverfahren unter Vakuum auf dem Gipsmodell des Patienten. Neben der Aufgabe der Zahnretention konnte der Retainer ebenso auf einem idealisierten Setup-Modell hergestellt und für aktive Zahnbewegungen eingesetzt werden (Abb. 4) [Ponitz, 1971].

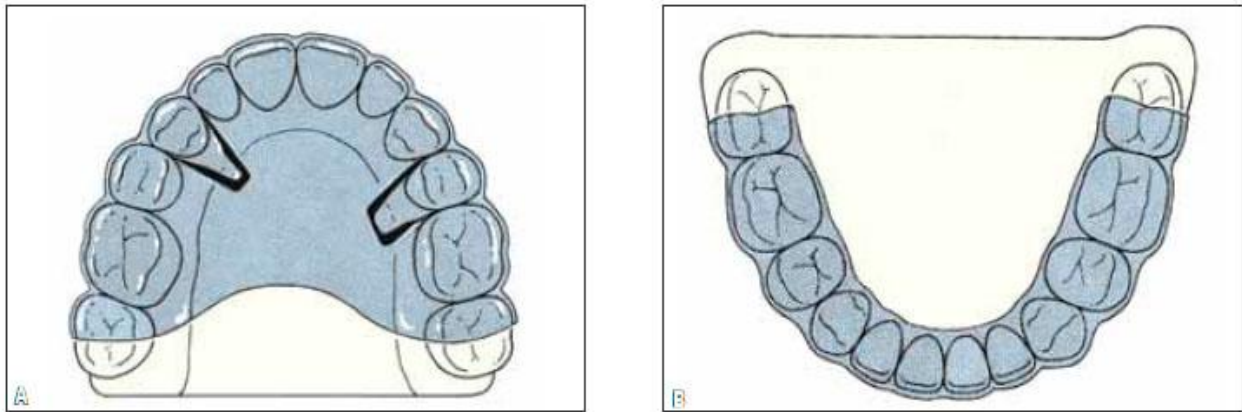


Abb. 4: Schematische Darstellung der monomaxillären „Invisible Retainer“ für Oberkiefer (links) und Unterkiefer (rechts) [McNamara und Brudon, 2004].

Roth und Gordon [1981] verwendeten den geteilten gnathologischen Positioner während der Feinjustierungsphase zur Annäherung des Unterkiefers an die zentrische Relation, nachdem die Interkuspitation durch Multibandbehandlung möglichst gut eingestellt worden war. Die Autoren waren der Ansicht, dass größere Zahnfehlstellungen mit diesem Gerät nicht effektiv korrigierbar seien.

McNamara et al. [1985] setzten den unimaxillären Positioner vor allem zur Überbrückung der Behandlungsphase zwischen Entbänderung und der weiterführenden kieferorthopädischen Behandlung ein. Als schnell und kostengünstig anzufertigendes Gerät konnten mit dem Positioner sowohl temporäre Retentionsaufgaben durchgeführt, als auch durch ein Setup festgelegte kleine Zahnstellungskorrekturen vorgenommen werden. Wegen der unzureichenden Widerstandsfähigkeit des Biocryl-Materials gegenüber Verschleiß sei jedoch laut der Autoren ein späterer Austausch gegen Hawley- oder geklebte Retainer angezeigt.

Manhartsberger und Richter [1989] bevorzugten den geteilten Positioner, da er angenehmer zu tragen sei als ein einteiliges Gerät und nach einer Eingewöhnungszeit auch das Sprechen ermögliche. Durch die geteilte Konstruktion konnte eine 24-stündige Tragedauer realisiert werden. Änderungen sowie Neuanfertigungen der Schienen waren vergleichsweise einfach zu bewerkstelligen, die Beeinflussung der Lagebeziehung beider Kiefer zueinander war jedoch nicht möglich. Indiziert sei der geteilte Positioner nach erfolgreicher Multibandbehandlung für abschließende geringe Zahnbewegungen der Ober- und Unterkieferfrontzähne sowie für minimale Zahnstellungskorrekturen im Prämolaren- und Molarenbereich. Für die ersten zwei bis vier Monate empfehlen die Autoren permanentes Tragen des Positioners, im Anschluss sollte die Tragedauer auf

14 bis 16 Stunden täglich reduziert werden. Nach zwei Monaten erfolgte üblicherweise eine Neuanfertigung der Schienen aufgrund des Elastizitätsverlustes des Materials. Als Behandlungsdauer wurde maximal ein Jahr angestrebt [Manhartsberger und Richter, 1989].

Sergl stellte 1989 mit dem Idealisator ein vom Aktivator abgeleitetes, weichelastisches Behandlungsgerät aus Acrylmaterial vor, welches auf einem Setup-Modell mit idealisierter Okklusion hergestellt wurde. Das Gerät sollte als Alternative zum Positioner gegen Ende der aktiven Behandlungsphase durch das Einbeißen in den elastischen Gerätekörper Feinkorrekturen ermöglichen und anschließend als Retentionsgerät dienen [Sergl, 1989]. Gegenüber dem Positioner bietet der Idealisator einige Vorteile, wie beispielsweise einen höheren Tragekomfort. Nachteilig sei hingegen die mangelnde bukkale und approximale Fassung, welche lediglich indirekt über das okklusale Relief gegeben und nur im Oberkiefer durch den Labialbogen gesichert sei.

Einige Jahre später wurden sogenannte „Essix Retainer“ von Sheridan et al. [1993] als eine ästhetische, komfortable und kostengünstige Alternative zu den bisherigen herausnehmbaren und fest-sitzenden Retentionsgeräten vorgestellt. Ursprünglich als reine Retentionsapparaturen entwickelt, berichteten in der Folgezeit weitere Autoren über aktive Zahnbewegungen durch die Anwendung von Essix Retainern. Rinchuse und Rinchuse [1997] erweiterten den Retainer durch konfektionierte kieferorthopädische Elemente und setzten ihn als aktives Behandlungsgerät ein. Lindauer und Shoff [1998] berichteten in einer Studie mit 430 Patienten über die Möglichkeit der Tiefbisskorrektur mit Essix Retainern unter Beibehaltung der Frontzahnrelation durch einen frontalen Aufbiss.

1.2.3 Konfektionierte Positioner

Erstmals vorgestellt wurde der konfektionierte „Gebissformer“ von Schuchard [1953]. Seine Idee, alle Patienten mit einem standardisierten Positioner zu behandeln, basierte auf der Annahme, dass die Summe der Schneidezahnbreiten bei den meisten Patienten annähernd gleich sei. Er empfahl das Gerät vor allem im Frühstadium der Anomalie sowie in der Retentionsphase, um die Zahnbögen in die ideale Form und Okklusion zu bringen.

Shilliday [1971] stellte mit dem Minipositioner eine konfektionierte Apparatur vor, welche jeweils nur die sechs Frontzähne in Ober- und Unterkiefer umfasste. Das Gerät sei für die Tiefbisskorrektur geeignet und durch nur zwei vorhandene Größen einfach und günstig in der Anwen-

dung. Zum Einsatz kam der Minipositioner in der kurzen Phase zwischen Entbänderung und definitiver Retention.

In einer von Lorentz [1973] vorgestellten Studie wurden 140 Patienten mit konfektionierten Positionern behandelt. 52 Patienten standen ein bis zehn Jahre später für eine Nachuntersuchung zur Verfügung. 47 dieser Patienten zeigten kein Rezidiv, was laut der Autorin auf die gute Mitarbeit der Patienten zurückzuführen sei. Diese äußere sich auch in der hohen Bereitschaft zur Nachkontrolle viele Jahre nach dem Behandlungsabschluss. Konfektionierte Positioner seien nicht bei jedem Patienten und jeglicher Form der Malokklusion geeignet, bei kooperativen Patienten und zum richtigen Zeitpunkt stellten sie aber laut Lorentz eine gute Behandlungsmöglichkeit dar.

Heute gelten konfektionierte Positioner nicht mehr als empfehlenswerte Alternative zu individuell hergestellten Geräten, weil sie den anatomischen und physiologischen Voraussetzungen des Patienten selten gerecht werden [Schopf, 2001].

1.2.4 Positionerwerkstoffe

1976 wurde der „Bioplast-Positioner“ aus Ethyl-Vinyl-Azetat von Andersen und Schramm vorgestellt. Die hohe Steifigkeit gewährte eine gute Formstabilität und erlaubte präzise Zahnbewegungen. Nachteilig sei hingegen der hohe Elastizitätsmodul, welcher zu einer übergroßen Kraftapplikation auf die Zähne führe [Andersen und Schramm, 1976].

1977 kamen Positioner aus LTV-Vinyl-Silikon (LTV = low temperature vulcanizing) auf den Markt. Das Material zeichnete sich durch seine gummiähnliche Elastizität, Formstabilität und Dehnbarkeit aus und ermöglichte Zahnbewegungen in größerem Umfang als bisherige Positionerwerkstoffe [Nishiyama et al., 1977].

Warunek et al. [1989] verglichen in einer Studie die Eigenschaften herkömmlicher Positionermaterialien mit denen von Silikonelastomeren. Letztere zeigten einen relativ geringen Kraftaufwand pro Bewegungseinheit, eine geringere Wasserabsorption sowie eine hohe Festigkeit. Die Autoren wiesen darauf hin, dass Positioner aus Silikonelastomeren für ein größeres Behandlungsspektrum einsetzbar seien und ausgedehntere Zahnbewegungen ermöglichten, als Geräte aus Kautschuk, Urethan oder Vinyl [Warunek et al., 1990].

Das ideale Positionermaterial sollte eine konstante Kraft auf den zu bewegenden Zahn ausüben, die über die Zeit und unter Verformung nicht abnimmt und das Material sollte nach Entfernung

aus dem Mund in seine Ausgangsform zurückkehren [Collet et al., 1994]. Von den in ihrer Studie untersuchten Materialien Urethan P1, weißer Gummi und Elastocryl schien keines für die Positionerherstellung ideal zu sein.

Rost et al. [1993] untersuchten 15 handelsübliche und vier experimentelle Materialien hinsichtlich ihres plastoelastischen Verhaltens und der Elastizitätsveränderung über drei Monate im mundähnlichen Milieu. Fast alle Materialien zeigten eine Zunahme des Elastizitätsmoduls, statistisch signifikante Änderungen wurden jedoch nur beim Material Memosil (Bayer Dental GmbH) beobachtet. Die elastische Verformung des Positioners verringerte sich mit Annäherung der Zähne an das Behandlungsziel. Der zunehmende Elastizitätsmodul wirkte hierbei der Kraftabnahme entgegen und wurde somit als positive Eigenschaft bewertet.

In einer weiteren Studie analysierten Rost et al. [1995] die Kraftgrößen sieben handelsüblicher Materialien. Es wurden Werte zwischen 0,4 bis 14 Newton pro Zahn gemessen, in Abhängigkeit vom Material und vom Protrusionsgrad des Zahns. In der Annahme, dass Kräfte zwischen 0,5 und 0,7 N für Zahnbewegungen physiologisch angemessen seien, konnten nur die Materialien Bisico Medium (Fa. Bisico) und Odontosil 55 (Dreve-Dentamid GmbH) für Zahnbewegungen bis 0,25 mm empfohlen werden [Rost et al., 1995].

1.3 Das Invisalign-System

Auf breiter Basis durchgesetzt hat sich keines der oben genannten Verfahren aufgrund des wesentlichen Nachteils, dass für annähernd jede Zahnbewegung neue Abformungen und Setup-Modelle hergestellt werden mussten [Boyd und Vlaskalic, 2001]. Dieser Aufwand stand in keinem Verhältnis zum möglichen Erfolg [Miethke, 2002].

Mit der Einführung des Invisalign-Konzepts 1997 durch Align Technology änderte sich die Situation grundlegend. Es wurde die Idee aufgegriffen, mithilfe mehrerer Setups auch größere Zahnstellungskorrekturen mit deutlich mehr Alignern durchzuführen. Die erforderlichen Modelle werden auf EDV-Basis hergestellt und die Behandlungsplanung basiert ausschließlich auf digitaler Technologie. Durch die dreidimensionale Computersoftware unterscheidet sich Invisalign grundlegend von vorherigen Systemen [Boyd et al., 2000; Brachwitz und Miethke, 2001]. Auf dem deutschen Markt wurde das System im Februar 2001 eingeführt und erhielt aufgrund modernster

CAD-CAM-Technologie (Computer-aided design/Computer-aided manufacturing) schnell Einzug in den klinischen Praxisalltag [Melkos, 2005].

Laut Stellungnahme der DGKFO aus dem Jahr 2010 sind die Hauptindikationen für die Behandlung mit dem Invisalign-System dentoalveoläre Korrekturen bei moderatem frontalen Eng- und Lückenstand, Pro- und Retrusion der Frontzähne, geringe Intrusion und Extrusion, ggf. mit Einsatz von Attachments, sowie dentoalveoläre Korrekturen bei stabiler neutraler Interkuspidation. Bedingt indiziert seien die Aligner ohne Anwendung zusätzlicher Hilfsmittel für Extrusion, Derotation von Eckzähnen und Prämolaren, Lückenschluss nach Extraktion von Prämolaren und Zahnretentionen. Bei sehr umfangreichen Translationen, Rotationen sowie In- und Extrusionen seien der Wirkung des Schienensystems wegen ungünstiger Zahnmorphologie und des begrenzten Kraftansatzes der Schiene Grenzen gesetzt [Göz, 2010]. Kontraindikationen für die Anwendung des Invisalign-Systems können laut DGKFO nicht formuliert werden. In bestimmten Behandlungsfällen wird eine Überkorrektur der Zahnfehlstellung empfohlen, um mögliche durch den Aligner bedingte Verzögerungen zu kompensieren [Bishop et al., 2002].

Der Behandlungsablauf einer Invisalign-Therapie gestaltet sich wie folgt: Zunächst werden präzise Kieferabformungen des Patienten mit einem additionsvernetzenden Silikon angefertigt. Diese werden zusammen mit einem zentrischen Bissregistrator in einer speziell für diese Zwecke angefertigten Verpackung an den Hersteller gesendet. Bei einigen Patienten sind Attachments nötig, um kompliziertere Zahnbewegungen wie Extrusionen, Schluss von Extraktionslücken oder Rotation unterer Prämolaren mit Invisalign zu ermöglichen bzw. zu erleichtern und die dreidimensionale Kontrolle der Zahnbewegung zu verbessern [Kuo und Hordt, 2001]. Die Applikation der Attachments sollte ebenso wie möglicherweise notwendige proximale Zahnschmelzreduktionen bereits vor der Abdrucknahme erfolgen [Vlaskalic et al., 2001]. Die für die Behandlungsplanung notwendigen Patientenunterlagen wie Orthopantomogramm, Fernröntgenseitenbild sowie intra- und extraorale Fotos können digitalisiert per Internet an die Firma übermittelt werden [Wong, 2002]. Die Abformung wird per Computertomographie digitalisiert, sodass eine Modellherstellung entfällt [Kaza, 2006]. In der ClinCheck-Software entsteht ein virtuelles Modell der klinischen Ausgangssituation. Die Zähne des digitalen Modells werden durch einen „Virtual Orthodontic Technician“ (VOT) segmentiert und schrittweise in die gewünschte Position verschoben [Wong, 2002].

Die virtuellen Modelle der Ausgangssituation, der Zwischenstadien sowie des gewünschten Behandlungsziels kann der Behandler mit einer ClinCheck-Software überprüfen. Mit verschiedenen

Tools kann das Behandlungsziel modifiziert bzw. korrigiert oder zusätzliche Attachments geplant werden (Abb. 5 und 6).

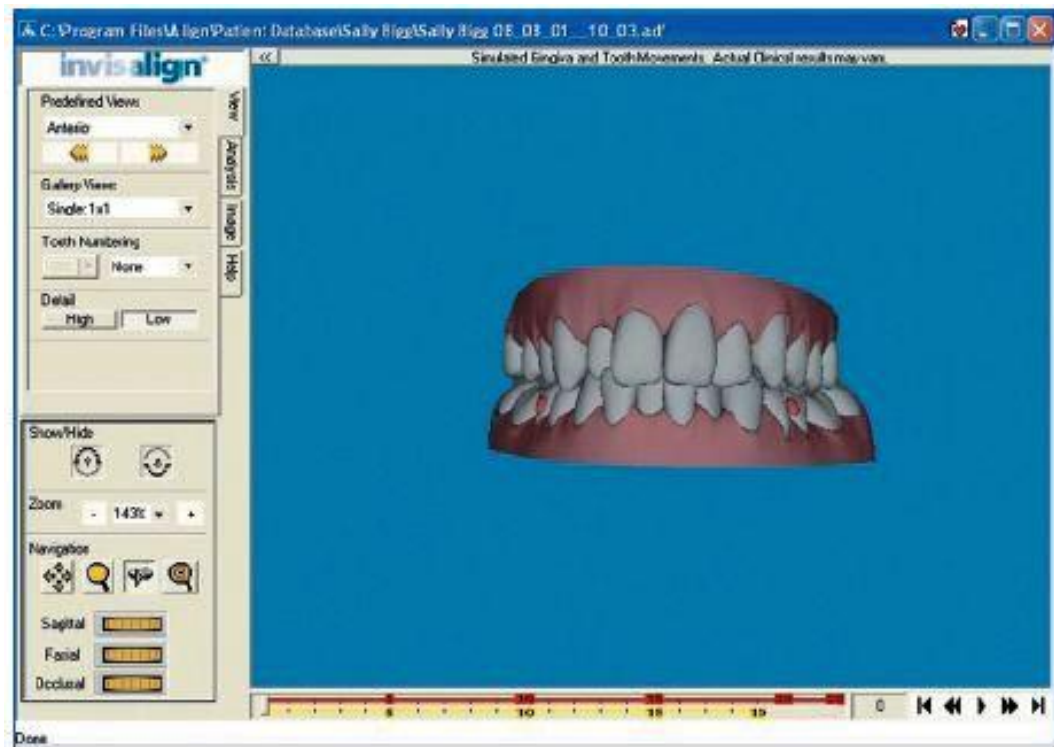


Abb. 5: Darstellung des virtuellen Patientenmodells in der ClinCheck-Software [Joffe, 2003].

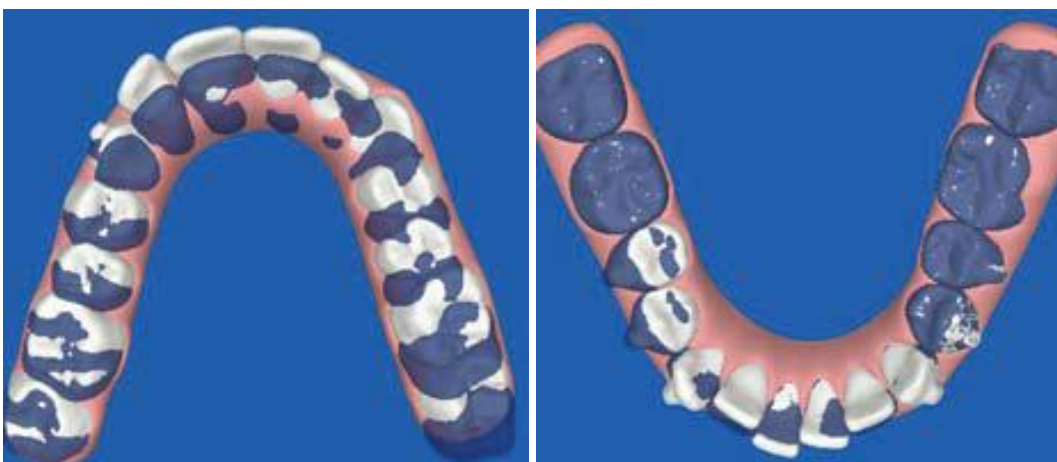


Abb. 6: Position der Zähne des Oberkiefers (links) und des Unterkiefers (rechts) vor Behandlungsbeginn (in weiß) und geplantes Behandlungsziel (in blau) [Schupp et al., 2010b].

Nachdem der Behandler die Therapieplanung mit dem Patienten abgestimmt und gegenüber der Firma bestätigt hat, beginnt der Herstellungsprozess der Aligner-Serie. Für jedes Behandlungsstadium wird in einem Stereolithographie-Prozess ein Kunststoffmodell angefertigt. Als Material für die 0,7 mm dicken Schienen (Abb. 7) wird ein von Align-Technology entwickelter thermoplastischer Kunststoff (Polyurethan) verwendet, der über die Kunststoffmodelle mit Biostar-Geräten tiefgezogen wird [Wong, 2002]. Anschließend erfolgt die Ausarbeitung der Aligner und deren Beschriftung mit Patienteninitialen, Fall- und Aligner-Nummer sowie Bezeichnung des Kiefers (Oberkiefer oder Unterkiefer) mittels Laser.

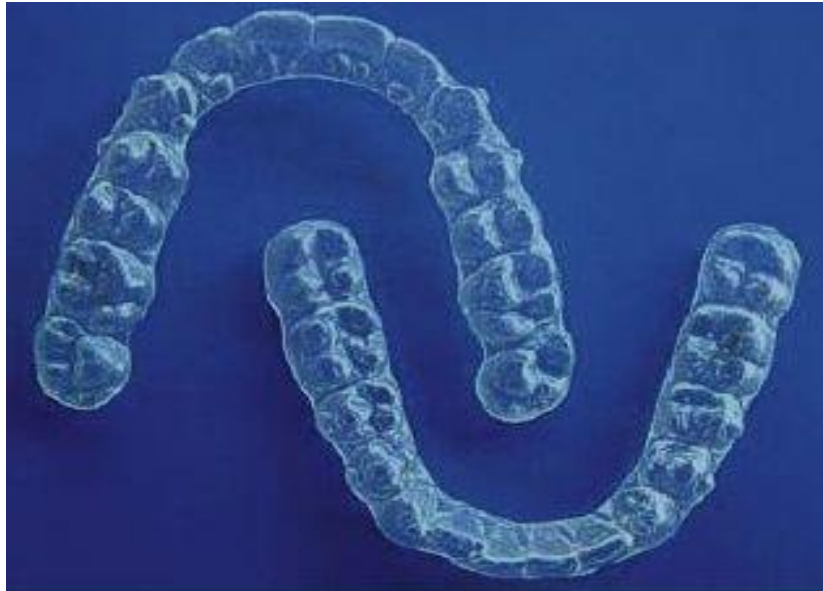


Abb. 7: Invisalign-Aligner für den Ober- und Unterkiefer [Faltin, 2003].

Es entsteht eine Serie von Alignern, die je nach Behandlungsumfang bis zu 60 Schienen umfasst. In der ersten Behandlungssitzung wird dem Patienten die erste Schiene eingesetzt. Es wird eine Tragedauer von zwei Wochen für mindestens 20 Stunden täglich empfohlen [Clements et al., 2003]. Lediglich während der Mahlzeiten und zur Durchführung der Mundhygiene sollte die Tragezeit unterbrochen werden. Nach durchschnittlich 14 Tagen wird der jeweilige Aligner gegen den Nächsten aus der Serie ausgetauscht, da dies nach einer Studie von Bollen et al. [2003] im Vergleich zum wöchentlichen Schienenwechsel einen besseren Behandlungserfolg verspricht. Mit jeder Schiene kann eine maximale Zahnbewegung zwischen 0,25 und 0,30 mm bzw. bis zu 2° erreicht werden [Phan und Ling, 2007; Torres et al., 2011]. Nach dem letzten Aligner wird der

Behandlungserfolg überprüft und die Behandlung abgeschlossen bzw. durch den Behandler entschieden, ob ein Case refinement für abschließende Feinkorrekturen notwendig ist. Der letzte Aligner sollte als Retainer weiter getragen werden [McKenna, 2001].

1.3.1 Invisalign-Teen

Der Zahnwechsel kann den Einsatz von Invisalign-Schienen erschweren oder unmöglich machen. Eine kieferorthopädische Behandlung ist allerdings in diesem Alter von besonderem Interesse, da das vorhandene Restwachstum für die kieferorthopädische Behandlung genutzt und der Zahndurchbruch gesteuert werden kann. Für Jugendliche stehen die Systeme Invisalign-Lite, Invisalign-Full und Invisalign-Teen in Abhängigkeit vom Stadium des Zahnwechsels zur Verfügung. Die ersten beiden Konzepte finden bei vollständig durchgebrochener Dentition Anwendung. Invisalign-Teen ermöglicht die Behandlung von Kindern und Jugendlichen im Wechselgebiss und kam im März 2009 auf den Markt.

In der ersten Wechselgebissphase im Alter von sechs bis zehn Jahren brechen die ersten Molaren sowie die zentralen und lateralen Inzisivi durch. Danach findet eine Pause im Zahnwechsel statt. Mit neun bis zwölf Jahren brechen die Canini, Prämolaren und zweiten Molaren durch. Normalerweise findet eine kieferorthopädische Behandlung in der Phase des späten Wechselgebisses statt, um den Zahndurchbruch in der Stützzone zu steuern und das vorhandene Restwachstum nutzen zu können [Kahl-Nieke, 2010]. Für die Invisalign-Teen-Aligner stehen deshalb spezielle Eruptionskompensatoren zur Verfügung, die für die Schienenanfertigung den Platzbedarf noch nicht durchgebrochener Eckzähne und zweiter Prämolaren errechnen. Die Zähne der späten Wechselgebissphase können so ungestört durchbrechen und eine zu starke Elongation wird verhindert. Voraussetzung für die Anwendung des Invisalign-Teen-Systems ist, dass keine Milchzähne mehr vorhanden sind. Die Schienen verfügen über einen blauen „Compliance-Indikator“, der über die Tragezeit im oralen Milieu verblasst. Dieser soll Patient und Zahnarzt als Referenzindikator für eine ausreichende Tragedauer dienen. In einer Studie von Tuncay et al. [2009] konnte belegt werden, dass sich der Farbindikator vielversprechend auf die Verbesserung der Effektivität der Alignerbehandlung auswirkt (Abb. 8).

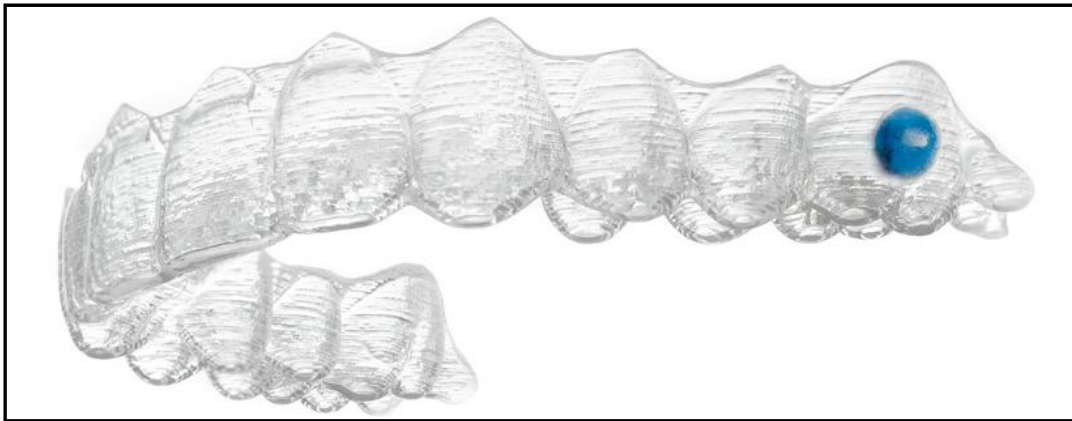


Abb. 8: Invisalign-Teen-Aligner mit blauem Compliance-Indikator [Copyright © 2012 Align Technology Inc.].

1.3.2 Literaturübersicht zur Effektivität der Invisalign-Behandlung

Unter den bisher veröffentlichten Studien zu Invisalign finden sich überwiegend Fallpräsentationen, Materialuntersuchungen und Studien über technische Aspekte der Behandlungsmethode. Untersuchungen zur Effektivität der Behandlungsmethode sind dagegen bislang nur in sehr geringer Anzahl veröffentlicht worden.

In einem systematischen Review wiesen Lagravère und Flores-Mir [2005] darauf hin, dass bis dato keine evidenzbasierte Studie zum Thema Indikation oder Limitation des Invisalign-Systems durchgeführt worden sei. Sie forderten randomisierte klinische Studien, die die Behandlungserfolge des Systems bewerten sollten.

Im Jahr 2003 veröffentlichten Faltin et al. eine Fallstudie zum Vergleich des virtuell geplanten Behandlungsziels mit dem klinischen Behandlungsergebnis der Invisalign-Therapie. Im untersuchten Fall wurde das geplante Behandlungsziel vollständig erreicht. Die Autoren stellten fest, dass die Übereinstimmung höchst befriedigend sei und dass Qualität, Quantität und Dauer der Behandlung mit Invisalign gut vorhersagbar seien [Faltin et al., 2003].

Djeu et al. [2005] verglichen in einer retrospektiven Kohortenanalyse die Invisalign-Behandlung mit der Multiband-Behandlung. Die Behandlungserfolge von zwei Gruppen mit je 48 Patienten (Invisalign- und Bracket-Gruppe) wurden mithilfe des objektiven Bewertungssystems (OGS) des American Board of Orthodontics beurteilt. Das Behandlungsergebnis, die Behandlungsdauer sowie Stärken und Schwächen der Behandlungssysteme wurden statistisch analysiert. Die Invisalign-Gruppe erreichte im Durchschnitt für alle Kriterien weniger OGS-Punkte als die Bra-

cket-Gruppe. Für Rotationen, Lückenschluss und Wurzelaufrichtung zeigten beide Gruppen ähnliche Ergebnisse. Bei der Korrektur von bukkolingualen Inklinationen und Overjet zeigte sich die Bracket-Apparatur leicht überlegen. Bei der Behandlung größerer anteroposteriorer Diskrepanzen und störender Okklusionskontakte erwies sich die Invisalign-Therapie als unzureichend. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass die Effektivität der Behandlung mit Invisalign geringer sei als mit einer Multiband-Apparatur.

Einige Jahre später untersuchten Kuncio et al. [2007] die Patienten aus der o.g. Studie hinsichtlich ihres Retentionserfolges. Die Invisalign-Gruppe zeigte größere Zahnstellungsänderungen in der Postretentionsphase, wobei insbesondere die Oberkieferfrontzähne häufiger ein Rezidiv zeigten als in der Bracket-Gruppe.

Van Nguyen und Cheng [2006] untersuchten in einer retrospektiven Studie an 60 Kiefermodellen die Effektivität der Zahnbewegungen bei Behandlung mit Invisalign. Die Überlagerung der Modelle erfolgte mit dem „Superimposition-Tool“ der Invisalign-Software. Die Autoren stellten eine unterschiedliche Präzision für die verschiedenen Zahnbewegungen und Zahngruppen fest. Die anterioren Zähne erreichten die angestrebte Intrusion mit einer relativ hohen Effektivität von ungefähr 80 %. Die Intrusion von Eckzähnen sowie Torque und Rotation der Inzisivi wurden mit einer Effektivität von ungefähr 60 % erreicht. Bei den Kriterien Zahnkipfung, Mesialisierung der Prämolaren, Rotation der Molaren und posteriore Expansion wurde das Behandlungsziel mit einer geringeren Effektivität (50 %) erreicht. Die Extrusion der anterioren Zähne, Rotation von Zähnen mit runder Kronenmorphologie sowie Eckzahnkipfung, Molarendistalisation und posteriorer Torque zeigten mit einer Effektivität von 25 – 45 % sehr geringe Übereinstimmungen zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung. Aus den Ergebnissen einer weiteren prospektiven Studie schlussfolgerten die Autoren, dass die durch den ClinCheck definierten geplanten Zahnbewegungen im Mittel zu 80 % erreicht werden und empfehlen deshalb eine Überkorrektur der Zahnfehlstellung, um das gewünschte Behandlungsziel zu erreichen [Van Nguyen und Cheng, 2006].

Kravitz et al. untersuchten den Einfluss von Attachments und approximaler Schmelzreduktion auf die Effektivität der Eckzahnrotation mit Invisalign. Sie stellten fest, dass die Canini die angestrebte Rotation mit einer Effektivität von 35,8 % erreichten, wobei weder Attachments noch approximale Schmelzreduktion einen signifikanten Einfluss auf dieses Ergebnis hatten [Kravitz et al., 2008].

Die Autoren führten 2009 eine weitere Studie mit 37 Patienten durch, deren Frontzähne mit Invisalign korrigiert worden waren. Das virtuelle Modell des geplanten Behandlungsziels wurde mit dem Tooth-Measure-Tool der Invisalign-Software auf das Abschlussmodell überlagert. Als Referenzpunkte für das Matching wurden Prämolaren und Molaren gewählt, die im Rahmen der orthodontischen Behandlung nicht bewegt worden waren. Untersucht wurde die Effektivität der Bewegungskomponenten Translation nach labial sowie lingual, Intrusion, Extrusion, mesio-distale sowie oro-vestibuläre Zahnkipfung und Rotation. Die mittlere Effektivität aller Zahnbewegungen lag bei 41 %. Die größte Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung zeigte die Zahnbogenkompression mit einer mittleren Effektivität von 47,1 %. Hierbei erzielten die mandibulären Canini (59,3 %) und lateralen Inzisivi (54,8 %) die höchste Effektivität. Die geringste Effektivität mit im Mittel 29,6 % wurde für die Extrusion ermittelt, wobei hier besonders die zentralen Inzisivi eine geringe Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Extrusion erreichten.

Die Eckzahnrotation zeigte signifikant schlechtere Ergebnisse als die Rotation aller anderen Frontzähne, mit Ausnahme der maxillären lateralen Inzisivi. Hier konnte im Mittel nur ein Drittel der angestrebten Rotation erreicht werden. Zahnkippungen nach lingual konnten mit einer signifikant höheren Effektivität (53,1 %) ausgeführt werden als in labialer Richtung (37,6 %), dies galt insbesondere für die maxillären Inzisivi. Statistisch signifikante Unterschiede zwischen der Effektivität der Zahnbewegungen in Ober- und Unterkiefer konnten nicht festgestellt werden [Krautz et al., 2009].

In einer Studie von Grobe [2011] wurden die Oberkiefermodelle von 35 Invisalign-Patienten untersucht. Analysiert wurden Translations- und Rotationsbewegungen der Inzisivi und Canini von Behandlungsbeginn bis Behandlungsabschluss. In oro-vestibulärer Richtung wurden für die Inzisivi im Mittel Translationen bis zu 1,3 mm und für die Canini bis zu 0,8 mm gemessen. In mesio-distaler Richtung wurden im Mittel Translationen bis zu 1,1 mm erzielt. Bei der Extrusion zeigten sich für die Canini mit 0,7 mm im Mittel signifikant geringere Werte als für die lateralen Inzisivi mit 1,1 mm. Die größten Werte für die Intrusion mit im Mittel 0,9 mm wurden ebenfalls bei den seitlichen Schneidezähnen gemessen. Rotationen in mesio-distaler Richtung wurden im Mittel mit 2,3° für die Canini und 3,5° für die Inzisivi gemessen. Die Rotationen in oro-vestibulärer Richtung betragen im Mittel 2,8° für die Canini und 5,3° für die Inzisivi. Rotationen um die Zahnängsachse ergaben für die Inzisivi ebenfalls signifikant höhere Werte als für die Canini.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass die ermittelten Zahnbewegungen deutlich von der angestrebten Bewegung sowie von der Zahnposition abhängig sind [Grobe, 2011].

Krieger et al. [2011] untersuchten in einer Pilotstudie mit 35 Invisalign Patienten die Übereinstimmung von Anfangsmodell und initialem ClinCheck sowie von Abschlussmodell und finalem ClinCheck. Die Parameter Overjet, Overbite und dentale Mittellinienabweichung (Ober- zu Unterkiefer) wurden bei Anfangs- und Endmodellen mit einer elektronischen Digitalschiebelehre vermessen. Die Anfangs- sowie die Endposition des ClinCheck wurde mit dem Tooth-Measure-Tool der Invisalign-Software vermessen. Die Messpunkte wurden für die jeweiligen Patientin bei allen Modellen identisch gewählt und erlaubten so eine Vergleichbarkeit der Messungen. Die Autoren stellten fest, dass es durch die Digitalisierung des Anfangsmodells in die ClinCheck-Darstellung nur zu sehr geringen, klinisch nicht relevanten Abweichungen kam, während zwischen virtuellem und tatsächlichem Behandlungsziel größere Diskrepanzen vorlagen. Das finale ClinCheck-Modell zeigte stärkere Korrekturen und bessere Behandlungsergebnisse als das klinische Modell nach Behandlungsabschluss. Die durchschnittlichen Differenzen betragen hierbei für den Overjet 0,4 mm, für den Overbite 0,9 mm und für die dentale Mittellinienabweichung 0,4 mm. Die Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Korrektur des Overbite lag bei 14,3 %. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass vertikale Zahnstellungskorrekturen schwieriger durchzuführen seien, als Korrekturen in den anderen Bewegungsrichtungen. Aus diesem Grund empfehlen sie eine Überkorrektur dieser Zahnbewegungen im ClinCheck. Alternativ könne ein Case refinement im Anschluss an die Behandlung stattfinden oder zusätzliche Hilfsmittel wie Attachments oder Gummizüge eingesetzt werden, um das Behandlungsziel in der vertikalen Ebene zu erreichen [Krieger et al., 2011].

1.4 Grundlagen der kieferorthopädischen Zahnbewegung

Eine orthodontische Kraft ist charakterisiert durch ihre Größe, Richtung, Dauer sowie ihren Ansatzpunkt. Für die Art der Zahnbewegung sind der Kraftangriffspunkt und die Lage des Widerstands- und Rotationszentrums von Bedeutung. In der Literatur existieren unterschiedliche Empfehlungen zur optimalen Kraftgröße für orthodontische Zahnbewegungen, die maximal verwendete Kraft sollte jedoch 1 N/cm^2 Wurzeloberfläche nicht überschreiten [Kahl-Nieke, 2001]. Es werden kontinuierliche kieferorthopädische Kräfte beim Tragen festsitzender Apparaturen und

intermittierende Kräfte unterschieden, die bei der Behandlung mit herausnehmbaren Geräten auftreten.

Herausnehmbare kieferorthopädische Apparaturen können über einen Ein-Punkt-Kraftangriff außerhalb des Widerstandszentrums der Zähne nur kippende Zahnbewegungen ausführen. Festsitzende Multiband-Bracket Apparaturen ermöglichen hingegen nicht nur kippende, sondern auch körperliche Zahnbewegungen. Über einen Zwei-Punkt-Kraftangriff im Bracket kann so die Zahnbewegung in allen drei Raumebenen kontrolliert werden.

In der Literatur finden sich nur sehr vereinzelt systematische Untersuchungen zu den biomechanischen Prinzipien und Kraftübertragungsmechanismen bei der orthodontischen Schienentherapie, sodass die Effekte der Zahnbewegung bislang überwiegend klinisch beschrieben werden können. Bei der Aligner-Therapie unterscheidet sich das Kraftsystem von dem festsitzender Apparaturen, da es keinen exakten Punkt der Kraftapplikation gibt [Beers und Duong, 2006]. Die Schiene umschließt die Zahnkrone von allen Seiten spaltfrei und soll so auch körperliche Zahnbewegungen ermöglichen. Die übertragenen Kräfte werden von der Form der Zahnkrone sowie von Art und Ausmaß der geplanten Bewegung bestimmt, da diese direkten Einfluss auf den Kontaktbereich zwischen Zahnkrone und der Innenfläche des Aligners haben. Dadurch sei die genaue Vorhersagbarkeit der entsprechenden Zahnbewegung sehr schwierig [Hahn et al., 2011]. Wesentlichen Einfluss auf die Kraftapplikation haben außerdem die Materialeigenschaften und die Dicke des Aligner-Werkstoffes [Kwon et al., 2008]. Die Größe der applizierten orthodontischen Kraft ist überwiegend davon abhängig, über welche Distanz der Zahn bewegt werden soll. Allerdings ist die durch den Aligner applizierte Kraft nicht konstant, sondern nimmt im Laufe der zweiwöchigen Tragedauer signifikant ab [Cao und Duong, 2006].

1.4.1 Biomechanik der Zahnbewegung

Die Art der Zahnbewegung unter einer einwirkenden Kraft ist von der Lage des Widerstandszentrums und des Rotationszentrums abhängig. Das Widerstandszentrum (WZ) eines Zahns ist abhängig von der Wurzelanatomie und der Verankerung des Zahns in der Umgebung. Bei einwurzeligen Zähnen liegt es bei $\frac{1}{3}$ der Wurzellänge [Burstone und Pryputniewicz, 1980]. Bei mehrwurzeligen Zähnen befindet sich das WZ bei 0,3 bis 0,4 des Abstandes vom Alveolarknochenrand zur Wurzelspitze [Burstone et al., 1981], d.h. ungefähr 1 bis 2 mm apikal der Furkation.

Die Lage des Rotationszentrums (RZ) ist abhängig vom applizierten Drehmoment/Kraft-Verhältnis (M/F), wobei das effektiv applizierte Kraftsystem über dieses Verhältnis beeinflusst werden kann.

In der Kieferorthopädie unterscheidet man drei Arten von Zahnbewegungen: (1) reine Translation, (2) reine Rotation und (3) Kombinationen aus Rotation und Translation [Smith und Burstone, 1985]. Erfolgt die Applikation einer kieferorthopädischen Kraft direkt im WZ, resultiert eine Translation, das heißt eine körperliche Zahnbewegung im Sinne einer Parallelverschiebung der Zahnachse. In der kieferorthopädischen Behandlung erfolgt die Kraftapplikation jedoch über das Bracket im Bereich der Zahnkrone und somit außerhalb des WZ. Jede Kraft, deren Wirkungslinie nicht durch das WZ geht, verursacht neben einer translatorischen auch immer eine rotatorische Komponente. Die Größe dieses Drehmoments M , das auf den Zahn einwirkt, ist abhängig von der Kraftgröße F und dem senkrechten Abstand r der Kraftwirkungslinie vom WZ:

$$M = F \cdot r$$

Bei der Translation muss das reaktive Drehmoment durch ein entgegengesetztes Drehmoment $-M = F \cdot (-r)$ neutralisiert werden. Das Verhältnis von Drehmoment zu Kraft entspricht dem Abstand r des Brackets zum WZ. Das RZ liegt im Unendlichen, sodass es zu einer reinen Translation des Zahns kommt.

Bei den Rotationsbewegungen kann differenziert werden zwischen der Drehung des Zahns um seine Längsachse und der Drehung der Zahnachse um ein Rotationszentrum [Schmuth und Vardimon, 1994]. Je nach Lage des RZ apikal oder koronal des WZ resultiert eine Kippung der Zahnkrone oder eine Wurzelbewegung (Torque). Bei den Bewegungen der Zahnkrone werden je nach Drehmoment/Kraft-Verhältnis unkontrollierte von kontrollierten Kippungen unterschieden. Bei der unkontrollierten Kippung ist das Verhältnis von Drehmoment zu Kraft $M/F = 0$. Das RZ liegt im unteren Wurzeldrittel. Die Zahnkrone und die Wurzelspitze bewegen sich dabei in entgegengesetzte Richtungen. Das Drehmoment/Kraft-Verhältnis ist bei der kontrollierten Kippung kleiner als der Abstand r des Brackets zum WZ. Das RZ befindet sich im Apex, sodass sich der Zahn um die Wurzelspitze dreht. Ist das Drehmoment/Kraft-Verhältnis größer als der Abstand zwischen Kraftansatzpunkt und WZ, resultiert eine Wurzelbewegung um ein im inzisalen Bereich liegendes RZ.

1.4.2 Gewebereaktion auf die Zahnbewegung

Bei Kraftapplikation entstehen im Desmodont eine Druck- und eine Zugzone, die je nach Lokalisation und Ausmaß der Bewegung variieren können. Die Gewebereaktion auf eine orthodontische Kraftapplikation durchläuft verschiedene Phasen. In der initialen Phase kommt es zunächst zu einer kraftinduzierten Deformation des Desmodonts. Durch das anhaltende Ungleichgewicht von Druck- und Zugspannungen kommt es in der zweiten Phase zu Zirkulationsstörungen und zur Freisetzung von Zytokinen, Neurotransmittern und Wachstumsfaktoren, die verschiedene zelluläre Reaktionen induzieren und günstige Voraussetzungen für die Resorption und Apposition von Gewebe schaffen [Krishnan und Davidovitch, 2006]. Das desmodontale Gewebe hyalinisiert und die Zahnbewegung sistiert aufgrund des fehlenden Stoffwechsels. In der dritten, resorptiven Phase tritt durch die osteoklasteninduzierte Resorption des Alveolarknochens eine Druckentlastung des Desmodonts ein. So wird die Perfusion des Gewebes wieder ermöglicht und die Umbauvorgänge im Parodont können fortgesetzt werden. Bei unphysiologisch großen Kräften und vollständiger Kompression des Desmodontalspaltes findet eine unterminierende indirekte Resorption ausgehend von den Spongiosaräumen des benachbarten Alveolarknochens statt. Bei geringer Kraftapplikation wird die Blutzirkulation des Knochens nicht gänzlich unterbrochen und die Zellaktivität bleibt erhalten. Es kommt zur Differenzierung von Osteoklasten im Desmodont, die den Spaltraum durch direkte Resorption erweitern. Zur gleichen Zeit findet im Bereich der Zugzone eine Dehnung des desmodontalen Gewebes statt, welche die Zellproliferation erhöht und die Apposition von Knochen durch Osteoblasten veranlasst [Harzer, 2011]. In dieser Phase erfolgt die orthodontische Zahnbewegung.

Mithilfe der Finite-Elemente-Methode konnte nachgewiesen werden, dass die Kraftverteilung im Desmodont mit den applizierten orthodontischen Kräften korreliert [Andersen et al., 1991]. Kieferorthopädische Zahnbewegungen basieren auf dem Prinzip, dass der knöcherne Anteil des Parodonts auf aktive mechanische Reize mit Resorptions- und Appositionsvorgängen reagiert [Harzer, 2011].

2 Fragestellung und Ziele

In der vorliegenden Arbeit wurde die Effektivität der Behandlung mit dem Invisalign-Teen-System analysiert. Das Ziel der Untersuchung war, zu prüfen, inwieweit die durch den ClinCheck definierten angestrebten Zahnbewegungen mit den tatsächlich erreichten Zahnbewegungen übereinstimmen. Die Analyse der Effektivität der Behandlung wurde mit verschiedenen Methoden durchgeführt, um herauszufinden, ob es Unterschiede zwischen den verschiedenen Analysemethoden gibt und ob diese nachweisbar sind. Die Zuverlässigkeit der angewendeten Analysemethoden sollte beurteilt werden. Abschließend stellte sich die Frage, ob anhand der vorliegenden Untersuchung eine geeignete Methode zur Analyse von Invisalign definiert werden kann.

3 Material und Methode

Die Grundlage dieser Untersuchung bilden digitalisierte Situationsmodelle von fünf jugendlichen Patienten, die mit dem Invisalign-Teen-System behandelt wurden. Von diesen Patienten lagen jeweils die Oberkiefer- und Unterkiefermodelle von Behandlungsbeginn sowie nach Behandlungsabschluss vor. Für jeden Patienten lagen außerdem die Modelle des virtuellen Behandlungsziels (ClinCheck) vor, die von Align Technology zur Verfügung gestellt wurden.

Durch eine Überlagerung der korrespondierenden Modelle jedes Patienten konnten die klinisch erfolgten Zahnbewegungen von Behandlungsbeginn bis Behandlungsabschluss bestimmt werden. Die angestrebten Zahnbewegungen konnten durch eine Überlagerung von Anfangsmodell und ClinCheck-Modell ebenfalls rekonstruiert werden. Es wurden die klinisch erfolgten Zahnbewegungen mit den angestrebten Zahnbewegungen verglichen, um die Effektivität der Behandlung mit dem Invisalign-Teen-System zu beurteilen.

Für die digitale Überlagerung zweier Kiefermodelle unterschiedlicher Behandlungszeitpunkte bedarf es einer Referenzstruktur, anhand derer die Modelle aneinander ausgerichtet werden können. Als Referenzstruktur der Oberkiefermodelle können die Gaumenfalten-Paare herangezogen werden, die im Laufe der kieferorthopädischen Behandlung mit dem Invisalign-System keinen beziehungsweise nur unwesentlichen Veränderungen unterliegen [Almeida et al., 1995; Hoggan und Sadowsky, 2001]. Im Unterkiefer liegt eine solche anatomische Referenzstruktur auf den Modellen nicht vor, sodass in diesem Fall unbewegte Molaren als Referenzstruktur herangezogen wurden bzw. die Modelle nach der „best surface match“-Methode überlagert wurden [Van Nguyen und Cheng, 2006]. Um vergleichbare Ergebnisse bei den Oberkiefer- und Unterkiefermessungen zu erzielen, wurden die Oberkiefermodelle zusätzlich ebenfalls anhand nicht bewegter Molaren überlagert.

3.1 Auswahl der Modelle

Es wurden die Modelle von fünf jugendlichen Patienten analysiert, deren Zahnfehlstellungen mit Invisalign-Teen in der kieferorthopädischen Praxis von Dr. Werner Schupp und Kollegen in Köln behandelt wurden. Die Auswahl der Modelle erfolgte anonym, es lagen weder Patientennummern noch Patientennamen vor. Es wurden die Patientenfälle ausgesucht, bei denen zum Erreichen des durch den ClinCheck definierten Behandlungsziels die zu untersuchenden Zahnbewegungen

stattgefunden haben mussten. Es wurden nur solche Patienten für die Studie ausgewählt, die ausschließlich mit dem Invisalign-Teen-System behandelt wurden und regelmäßig zu Kontrollterminen erschienen sind. Im Rahmen der kieferorthopädischen Behandlung wurden, abgesehen von den im ClinCheck geplanten Attachments, keine weiteren Hilfsmittel eingesetzt. Für jeden Patienten lagen folgende Modellpaare bestehend aus Ober- und Unterkiefermodell vor:

M_{in} = initiales Modell vor Behandlungsbeginn

M_{fin} = finales Modell nach Behandlungsabschluss

Cl_{in} = initiales ClinCheck-Modell

Cl_{fin} = finales ClinCheck-Modell (virtuelles Behandlungsziel).

Die Modelle M_{in} und M_{fin} sind digitalisierte Gipsmodelle vom behandelnden Kieferorthopäden. Die Modelle Cl_{in} und Cl_{fin} sind virtuelle Modelle, die mit der ClinCheck Software von Align Technology erstellt wurden. Cl_{in} wird aus M_{in} erstellt, indem die Zähne aus dem digitalisierten Modell separiert und in eine neue Modellbasis eingefügt werden. Diese Basis hat die Form eines Zahnbogens, gibt aber keine anatomischen Strukturen des Patienten wieder. Die Positionen der Zähne sind bei diesen beiden Modellen identisch. Die Zähne werden aus der Ausgangsposition (Cl_{in}) in die gewünschte Endposition verschoben (Cl_{fin}). Die basale Punktefläche der Modellbasis wird dabei durch die Zahnbewegungen nicht verändert. Cl_{fin} stellt das virtuelle Behandlungsziel dar.

3.2 Untersuchungsmethode

Die zu untersuchenden Modelle wurden per Laserscanner digitalisiert. Mit einer speziellen 3D-Graphik-Software (Surfacer 10.5, Imageware/Siemens PLM Software, Plano, Texas, USA) wurden die Schleimhaut- und Zahnoberflächen des Modells als dreidimensionale Punktwolke dargestellt. Für die digitale Vermessung der klinisch erfolgten Zahnbewegungen wurden die korrespondierenden Modelloberflächen anhand eines unveränderten Referenzbereiches übereinander gelagert (Matching). Für die Überlagerung wurden in dieser Untersuchung zwei verschiedene Referenzstrukturen gewählt. In Abschnitt 3.3 werden diese beiden Matching-Methoden vorgestellt.

Die Bestimmung der Zahnbewegung zwischen den korrespondierenden Modellen erfolgte durch die Überlagerung der Punktwolken der Modelloberflächen. Zur Vermessung der Zahnbewegung wendet die Surfacer-Software einen sogenannten Surface-Surface-Matching-Algorithmus an. Zunächst wurden bei jedem Modell die Einzelzähne mit einer „Lasso“-Funktion segmentiert. Zur Bestimmung der klinisch erfolgten Zahnbewegung wurde mithilfe des o.g. Algorithmus die Punktwolke des finalen Modells M_{fin} anhand der Referenzstruktur auf die Punktwolke von M_{in} überlagert. Die Zähne des finalen Modells folgten dabei der Bewegung der Überlagerung. Im nächsten Schritt wurde der o.g. Algorithmus erneut angewendet, um die Punktwolken der Einzelzähne zu überlagern. So konnten die angestrebten sowie klinisch erfolgten Zahnbewegungen rekonstruiert werden. Die Bewegungen wurden für jeden Zahn und jede Bewegungskomponente einzeln gemessen und tabellarisch erfasst.

3.3 Überlagerung der Modelle

3.3.1 Ausrichtung an einer nicht bewegten, ausgeprägten Referenzstruktur

Bei den Oberkiefermodellen dienten die Gaumenfalten als Referenzstruktur für das Surface-Surface-Matching der korrespondierenden Modelle, da sie im Laufe des Wachstums keinen physiologischen Veränderungen unterliegen und auch im Rahmen der kieferorthopädischen Behandlung eine stabile Referenz darstellen [Almeida et al., 1995; Hoggan und Sadowsky, 2001]. Voraussetzung für das Matching ist in diesem Fall eine einwandfrei abgeformte Gaumenpartie und ein luftblasenfrei hergestelltes Modell ohne Artefakte. Ungenauigkeiten in diesem Bereich können zu einer Diskrepanz der zu überlagernden Modelloberflächen und somit zu Messungenauigkeiten führen. Die übrigen anatomischen Strukturen auf dem Modell unterliegen sowohl physiologischen als auch behandlungsbedingten Veränderungen und können aus diesem Grund nur bedingt für den Matching-Prozess herangezogen werden. Diese Methode lässt sich nur für die Überlagerung von Oberkiefermodellen anwenden. Sie kann als „Goldstandard“ bezeichnet werden, da die Ausrichtung ausschließlich anhand eines nicht bewegten, ausgeprägten Referenzbereiches erfolgt und die Zahnbewegung dadurch unverfälscht nachvollzogen werden kann (Abb. 9). Für Unterkiefermodelle ist die Methode nicht geeignet, da eine solche unveränderliche anatomische Struktur auf den Modellen nicht vorhanden ist.

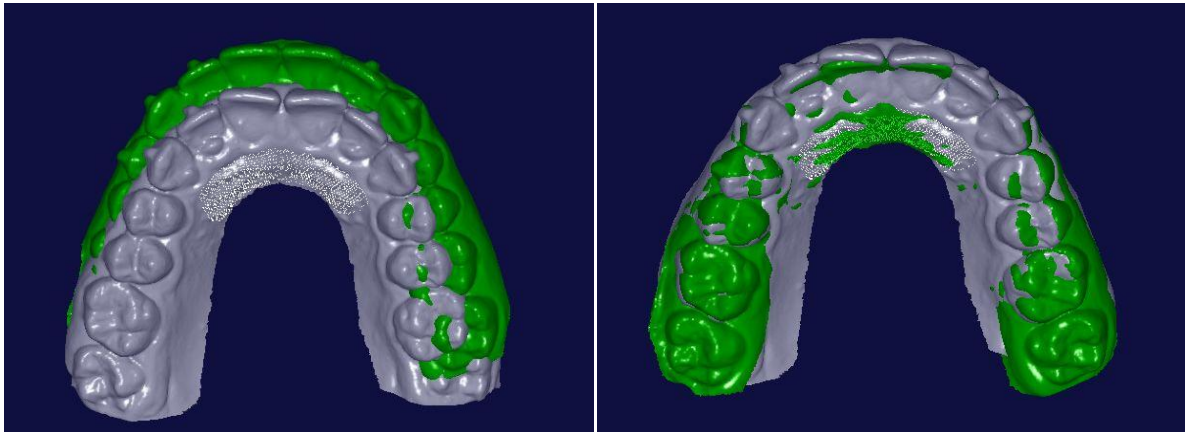


Abb. 9: Prinzip des Gaumenfalten-Matchings von initialem Modell (grau) und finalem Modell (grün). Oberkiefermodelle vor der Überlagerung links und nach erfolgtem Matching rechts. Die Referenzstruktur (Gaumenfalten) ist auf beiden Modellen als Punktwolke dargestellt.

Zunächst wurden die Modelle in eine einheitliche Grundposition gebracht. Mithilfe des Surface-Surface-Matching-Algorithmus wurden die Modelle überlagert, wobei das finale Modell M_{fin} am initialen Modell M_{in} ausgerichtet wurde. Als Referenzstruktur für die Überlagerung diente wie bereits oben erwähnt der Bereich der Gaumenfalten, der in beiden Modellen als unveränderte, ausgeprägte Struktur vorlag. Der Algorithmus arbeitet nach dem Prinzip der Abstandsminimierung. Es wird zunächst eine geeignete Funktion definiert, welche den Abstand zwischen beiden Punktwolken beschreibt. Eine solche Abstandsfunktion kann zum Beispiel der mittlere Abstand aller Punkte der Ausgangsfläche zu allen Punkten der bewegten Fläche sein. In dieser Funktion werden die Parameter so lange variiert, bis ein minimaler Abstand zwischen den Flächen erreicht wird. Dieser ist genau dann erreicht, wenn die von ihnen beschriebenen Flächen deckungsgleich sind [Keilig et al., 2003]. Durch die Überlagerung von M_{fin} mit M_{in} konnten die klinisch erfolgten Zahnbewegungen im Verlauf der kieferorthopädischen Behandlung erfasst werden.

Es erfolgte anschließend das Matching von Cl_{fin} auf M_{in} , um die angestrebten Zahnbewegungen im Oberkiefer zu ermitteln. Diese Überlagerung erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurde Cl_{in} an M_{in} ausgerichtet, wobei die identischen Punktwolken der Zähne als Referenz dienten. In einem zweiten Schritt wurde Cl_{fin} anhand eines unveränderten Bereichs der Modellbasis an Cl_{in} ausgerichtet. Durch dieses Vorgehen konnte die Überlagerung an ausschließlich konstanten Strukturen erfolgen. Mit dieser Methode wurden die Zahnbewegungen aller Oberkiefermodelle vermessen. Die Reproduzierbarkeit dieser Überlagerungsmethode wurde durch wiederholte Analyse der Zahnbewegungen überprüft.

3.3.2 Ausrichtung mit allgemeiner Methode

Für die Überlagerung von Modellen, bei denen kein unveränderter anatomischer Referenzbereich vorliegt, wird eine allgemeine Matching-Methode angewendet. Als Referenzstruktur kann hierbei eine zusammengesetzte Punktwolke aus zwei nicht bewegten Molaren sowie dem punktereduzierten Zahnbogen herangezogen werden. In den Fällen, in denen alle Zähne im Rahmen der kieferorthopädischen Behandlung bewegt worden sind, kann die Ausrichtung mittels der „best surface match“-Methode anhand der am wenigsten bewegten Zähne durchgeführt werden [Van Nguyen und Cheng, 2006].

Das Matching erfolgte wie oben beschrieben zunächst mehrfach automatisch durch die Surfacer-Software. In einer weiteren Analyse wurde das automatische Matching manuell nachbearbeitet. Die Ausrichtung des zu überlagernden Modells wurde dabei durch translatorische sowie rotatorische Bewegungen so korrigiert, dass die bestmögliche Übereinstimmung der Modelloberflächen erzielt wurde. Die Überlagerung von Cl_{fin} auf M_{in} entspricht dabei dem Vorgehen bei der Überlagerung von M_{fin} auf M_{in} . Mit dieser Methode wurde die Überlagerung der Unterkiefermodelle aller Patienten durchgeführt. Zur Vergleichbarkeit der Zahnbewegungen in Ober- und Unterkiefer wurde die Bestimmung der Zahnbewegungen im Oberkiefer zusätzlich mit dieser allgemeinen Matching-Methode durchgeführt. Die Reproduzierbarkeit dieser Überlagerungsmethode wurde durch wiederholte Analyse der Zahnbewegungen überprüft.

3.4 Zahneigenes Koordinatensystem zur Darstellung der Zahnbewegung

Die Patientenmodelle wurden unter Verwendung des Surface-Surface-Matching-Algorithmus in ein Referenzkoordinatensystem überführt. Dieses rechtshändige globale Koordinatensystem gewährleistet eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse der verschiedenen Modellserien. Die Bestimmung der Zahnbewegung erfolgt unter Berücksichtigung der Achsstellung des Zahns im Zahnbogen in einem dreidimensionalen zahnbezogenen Koordinatensystem (Abb. 10).

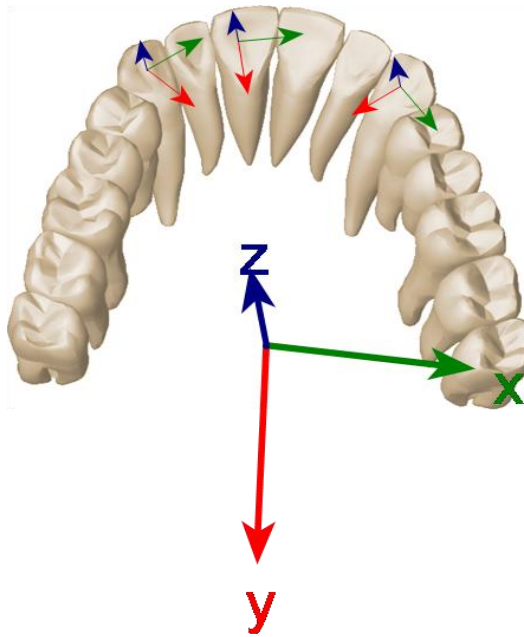


Abb. 10: Dreidimensionales zahnbezogenes Koordinatensystem. Auf der x-Achse werden Zahnbewegungen in mesio-distaler Richtung dargestellt. Auf der y-Achse werden Zahnbewegungen in oro-vestibulärer Richtung dargestellt. Zahnbewegungen entlang der z-Achse entsprechen Intrusion bzw. Extrusion.

Das Koordinatensystem wurde so gewählt, dass auf der x-Achse Bewegungen in mesio-distaler Richtung dargestellt werden, auf der y-Achse Bewegungen in oro-vestibulärer Richtung und auf der z-Achse Bewegungen in korono-apikaler Richtung. Die erfolgte Zahnbewegung kann demzufolge durch drei Translationen entlang der Achsen des Referenzkoordinatensystems sowie drei Rotationen um die Achsen dieses Koordinatensystems beschrieben werden [Keilig et al., 2003].

3.5 Messung der Zahnbewegung

Orthodontische Zahnbewegungen sind definiert als die Differenz zwischen initialer und finaler Zahnposition. Ausgehend von diesen zwei Zahnpositionen kann die erfolgte Zahnbewegung zwischen Behandlungsbeginn und Behandlungsabschluss ermittelt werden. In der vorliegenden Studie wurden für jeden Zahn sechs verschiedene Bewegungskomponenten erfasst: drei Translationen entlang der Achsen des Referenzkoordinatensystems (T_x , T_y , T_z) und drei Rotationen um die Achsen dieses Koordinatensystems (R_x , R_y , R_z).

Die segmentierten Zähne aus dem initialen Modell M_{in} wurden jeweils einzeln in den Koordinatensprung verschoben und der entsprechende Zahn aus dem finalen Modell M_{fin} bzw. Cl_{fin} wurde parallel dazu mit verschoben. Zur Bestimmung der klinisch erfolgten Zahnbewegung zwischen Behandlungsbeginn und Behandlungsabschluss wurde der separierte Zahn aus M_{in} durch erneute Anwendung des Surface-Surface-Matching-Algorithmus auf das korrespondierende Zahnsegment aus M_{fin} überlagert. Mit dieser Methode konnte die klinisch erfolgte Zahnbewegung aller Zähne von Behandlungsbeginn bis Behandlungsabschluss rekonstruiert und berechnet werden. Zur Bestimmung der angestrebten Zahnbewegung wurde der Zahn aus M_{in} auf das korrespondierende Zahnsegment aus Cl_{fin} überlagert. Die Berechnung der Zahnbewegung erfolgte im Oberkiefer für die Zähne 16 - 26 und im Unterkiefer für die Zähne 36 - 46. Die Zähne 17, 27, 37 und 47 waren nicht in allen Fällen auf den Modellen vorhanden beziehungsweise nicht einwandfrei abgeformt und wurden deshalb aus der Untersuchung ausgeschlossen.

3.6 Auswertung und statistische Analyse

Die Analyse der Effektivität der Zahnbewegungen wurde anhand der oben beschriebenen Methoden durchgeführt. Bei der Ausrichtung an einer nicht bewegten, ausgeprägten Referenzstruktur (Matching-Methode 1) erfolgte das Matching der Oberkiefermodelle anhand der Gaumenfalten. Bei der allgemeinen Matching-Methode (Methode 2) wurde die zusammengesetzte Punktwolke aus zwei nicht bewegten Molaren sowie dem punktereduzierten Zahnkranz als Referenzstruktur für die Überlagerung der Ober- und Unterkiefermodelle herangezogen. Die Ergebnisse der Messungen wurden mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel (Microsoft Corporation, Redmond, Washington, USA) erfasst und tabellarisch sortiert. Die Einzelzähne wurden im Oberkiefer und Unterkiefer jeweils zu den Zahntypen zentrale Inzisivi (1er), laterale Inzisivi (2er), Canini (3er), erste Prämolaren (4er), zweite Prämolaren (5er) und erste Molaren (6er) zusammengefasst. Für jeden Zahntyp und jede Bewegungskomponente wurde die Effektivität einzeln bestimmt. Aus den ermittelten Effektivitäten der erfolgten und geplanten Zahnbewegungen wurde jeweils der Mittelwert berechnet. Um zu vermeiden, dass bei kleinen Messwerten ein hoher relativer Fehler unverhältnismäßig stark in den Mittelwert einfließt, wurde bei dieser Untersuchung ein gewichteter Mittelwert gebildet, wobei als Wichtungsfaktor das Quadrat des Absolutwertes der angestrebten Zahnbewegung verwendet wurde:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Durch die unterschiedliche Gewichtung der Werte ist es möglich, verschiedene Messwerte unterschiedlich stark zu berücksichtigen. Einflussreiche Daten, d.h. große geplante Zahnbewegungen, können betont werden, während der Einfluss weniger wichtiger Daten, d.h. kleine oder geringe geplante Zahnbewegungen, reduziert wird. Der gewichtete Mittelwert verhindert, dass geplante oder erfolgte Zahnbewegungen nahe der Messgenauigkeit die Ergebnisse verfälschen. So wurde in dieser Untersuchung kleinen Zahnbewegungen durch einen kleinen Wichtungsfaktor eine geringere Signifikanz zugeordnet als größeren Zahnbewegungen. Da gerade kleine Zahnbewegungen einen stark verfälschenden Einfluss auf die Messgenauigkeit nehmen können, wurden Rotationen unter 1° und Translationen unter 0,1 mm nicht berücksichtigt, um Ausreißer in der Statistik zu eliminieren. Es wurden nur Messungen mit einer Mindestanzahl von 3 Werten berücksichtigt. Anhand der Differenz zwischen erfolgter und geplanter Zahnbewegung wurde für jede Zahngruppe die mittlere gewichtete Effektivität berechnet, mit der die geplante Zahnbewegung erreicht wurde. Weiterhin wurde die mittlere geplante Zahnbewegung einer jeden Gruppe errechnet. Die Ergebnisse wurden jeweils getrennt für die drei Translations- und Rotationsbewegungen in Ober- und Unterkiefer und für die beiden unterschiedlichen Matching-Methoden graphisch dargestellt.

Die Ergebnisse zur Effektivität erwiesen sich als normalverteilt. Da die einzelnen Bewegungen der Zähne nicht in Relation zueinander stehen, wurden die einzelnen Zahnbewegungen jeweils für die Zahngattungen paarweise mit dem t-Test auf statistische Signifikanz überprüft. Eine statistische Überprüfung des Unterschiedes in der Effektivität der Zahnbewegung der einzelnen Zahntypen oder der einzelnen Bewegungsrichtungen untereinander erscheint nicht sinnvoll, da Ausmaß und Art der angestrebten Bewegungen sich stark unterscheiden können. Eine statistisch überprüfte Aussage hierzu erscheint klinisch daher nicht relevant. Es wurden die folgenden Vergleiche analysiert: (1) Vergleich der Effektivität der Zahnbewegungen ermittelt mit Matching-Methode 1 gegen Matching-Methode 2 für die Zähne des Oberkiefers. Hierdurch sollte festgestellt werden, ob Matching-Methode 2 valide Ergebnisse liefern kann, da Matching-Methode 1 als Goldstandard gilt und nicht für den Unterkiefer geeignet ist. (2) Überprüfung der Effektivität für Zahnbewegungen im Ober- und Unterkiefer ebenfalls mit dem t-Test, um festzustellen, ob einzelne Zahnbewegungen in einem der Kiefer mit höherer Effektivität durchzuführen sind.

4 Ergebnisse

Auf den folgenden Seiten werden die Ergebnisse der Untersuchung vorgestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde das Kapitel in drei Abschnitte gegliedert. In Kapitel 4.1 werden die Ergebnisse bei Ausrichtung an einer nicht bewegten, ausgeprägten Referenzstruktur (Matching-Methode 1) dargestellt und beschrieben. In Kapitel 4.2 werden die Ergebnisse der allgemeinen Ausrichtungsmethode (Matching-Methode 2) vorgestellt. Kapitel 4.3 befasst sich mit einem Vergleich der Ergebnisse beider Methoden.

Die Ergebnisse sind in Säulendiagrammen graphisch dargestellt. Die Diagramme zeigen für jede Zahngruppe den gewichteten relativen Mittelwert der Effektivität, mit dem die angestrebte Zahnbewegung erreicht wurde, sowie die mittlere geplante Zahnbewegung. Die Effektivität der Zahnbewegungen wurde jeweils einzeln für die Translations- und Rotationsbewegungen für alle drei Achsen des Koordinatensystems ermittelt und dargestellt. Die Bewegungsachsen x, y und z wurden durch das Koordinatensystem des Surfacer-Programmes definiert. Der Mittelpunkt eines jeden Zahns wurde in gleicher Weise auf das Koordinatensystem ausgerichtet, so dass die gemessenen Werte vergleichbar sind.

4.1 Ausrichtung an einer nicht bewegten, ausgeprägten Referenzstruktur

Die Ausrichtung der Patientenmodelle erfolgte bei dieser Methode automatisch durch die Surfacer-Software anhand der Gaumenfalten als Referenzstruktur für das Matching. Eine manuelle Nachbearbeitung des Matchings erfolgte nicht. Im folgenden Abschnitt wird zunächst die Reproduzierbarkeit der Methode beschrieben. Im Abschnitt 4.1.2 werden die Ergebnisse der Analyse-methode 1 dargestellt.

4.1.1 Reproduzierbarkeit der Methode

Die Reproduzierbarkeit der Modellausrichtung an einer nicht bewegten, ausgeprägten Referenzstruktur (Gaumen) wurde durch fünffache Analyse der Zahnbewegung überprüft. Der Abstandsminimierungsalgorithmus führte bei dieser Mehrfachanalyse der Zahnbewegung stets zum gleichen Ergebnis. Auf eine exemplarische Darstellung dieser Daten wird daher verzichtet.

4.1.2 Ergebnisse bei Oberkieferausrichtung an einer nicht bewegten, ausgeprägten Referenzstruktur

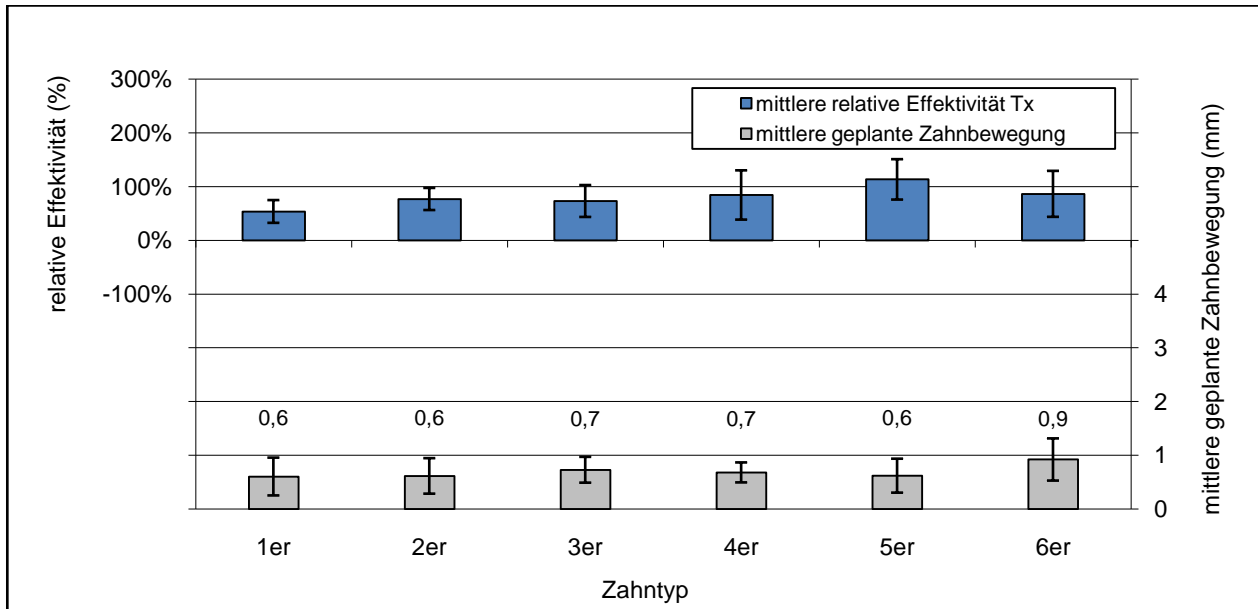


Abb. 11: Säulendiagramm zur Darstellung der mittleren relativen Effektivität der Translationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Oberkiefer entlang der x-Achse, d.h. in mesio-distaler Richtung. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand des Gaumens der Modelle (Matching-Methode 1). Die Säulen im oberen Bereich stellen den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die Säulen im unteren Bereich zeigen den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Zahnbewegung in mm mit der jeweiligen Standardabweichung an.

Das Säulendiagramm in Abb. 11 stellt die mit der Matching-Methode 1 ermittelte mittlere relative Effektivität dar, mit der die geplanten Translationen in mesio-distaler Richtung erreicht wurden. Der Vergleich der Zahntypen zeigt ähnliche Ergebnisse für die 2er, 3er und 4er, die die angestrebte Translation von durchschnittlich 0,6 bis 0,7 mm mit einer mittleren Effektivität von 73 bis 84 % ausführten. Die größte mittlere geplante Zahnbewegung lag bei 0,9 mm in der Gruppe der 6er, diese wurde mit einer mittleren Effektivität von 86 % erreicht. Die 1er erreichten die geplante Translation von im Mittel 0,6 mm mit einer mittleren Effektivität von 54 %, während die 5er bei der gleichen geplanten Bewegung eine Effektivität von 113 % aufzeigten. Im Vergleich der Übereinstimmung des geplanten und erzielten Behandlungsergebnisses ließ sich für die Translationsbewegung in mesio-distaler Richtung bei allen Zähne mit Ausnahme der zentralen Inzisivi eine Übereinstimmung von über 70 % erzielen.

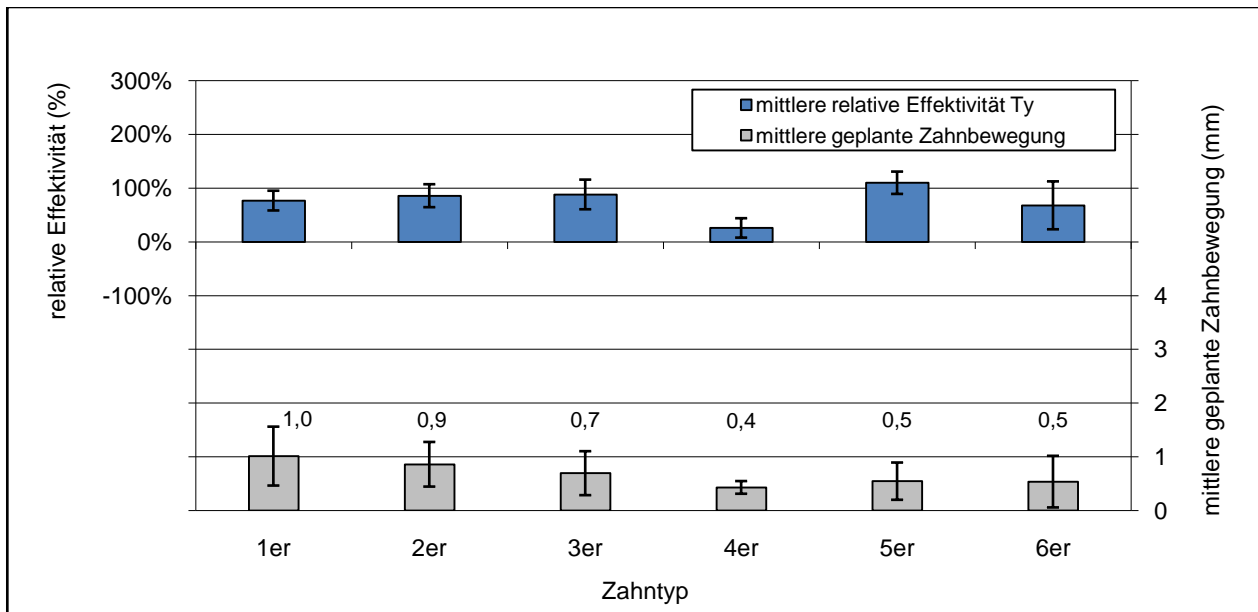


Abb. 12: Säulendiagramm zur Darstellung der mittleren relativen Effektivität der Translationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Oberkiefer entlang der y-Achse, d.h. in oro-vestibulärer Richtung. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand des Gaumens der Modelle (Matching-Methode 1). Die Säulen im oberen Bereich stellen den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die Säulen im unteren Bereich zeigen den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Zahnbewegung in mm mit der jeweiligen Standardabweichung an.

Translationen entlang der y-Achse entsprechen körperlichen Zahnbewegungen in oro-vestibulärer Richtung. Aus dem Säulendiagramm in Abb. 12 geht die mit der Matching-Methode 1 ermittelte mittlere relative Effektivität dieser Zahnbewegungen im Oberkiefer hervor. Die 1er, 2er und 3er erreichten die mittlere geplante Zahnbewegung von 0,7 bis 1,0 mm mit einer Effektivität von 77 bis 88 %. Die 4er zeigten mit 26 % die geringste Effektivität bei einer geplanten Zahnbewegung von 0,4 mm. Die 5er erreichten mit 110 % eine sehr hohe Effektivität bei geplanten 0,5 mm Translation. Die 6er erreichten die angestrebte Translation von 0,5 mm mit einer Effektivität von 68 %. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass die geplanten körperlichen Zahnbewegungen in oro-vestibulärer Richtung bei allen Zahntypen, mit Ausnahme der ersten Prämolaren, mit einer relativ hohen Effektivität erreicht werden konnten.

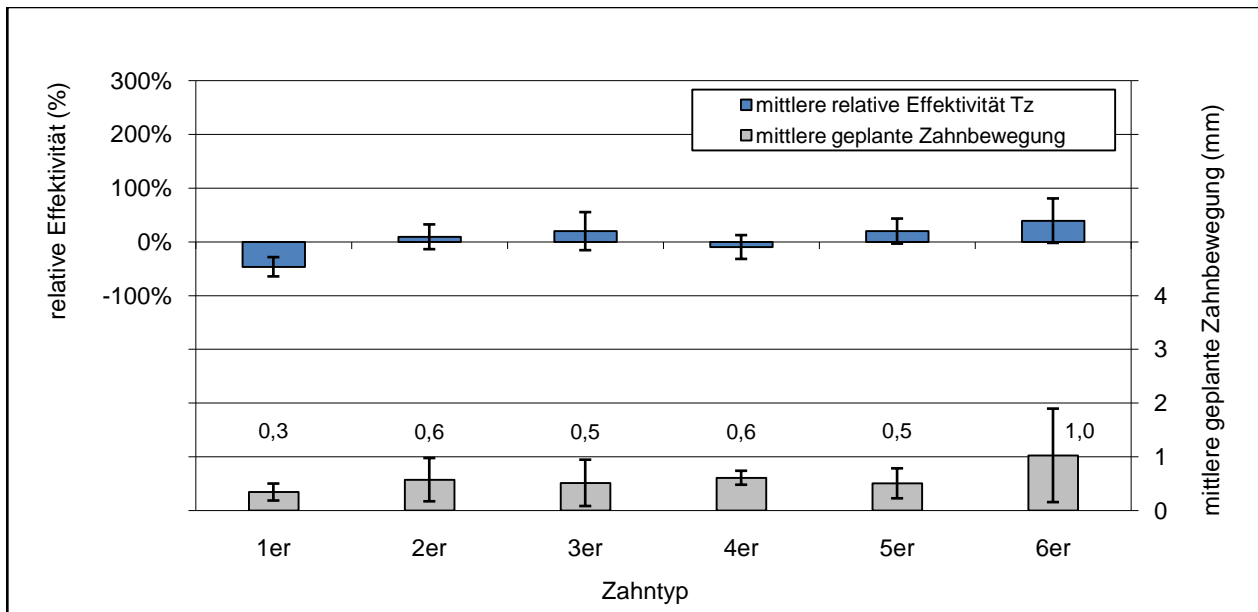


Abb. 13: Säulendiagramm zur Darstellung der mittleren relativen Effektivität der Translationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Oberkiefer entlang der z-Achse, d.h. in korono-apikaler Richtung. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand des Gaumens der Modelle (Matching-Methode 1). Die Säulen im oberen Bereich stellen den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die Säulen im unteren Bereich zeigen den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Zahnbewegung in mm mit der jeweiligen Standardabweichung an.

Das Säulendiagramm in Abb. 13 stellt die mit der Matching-Methode 1 ermittelte mittlere relative Effektivität dar, mit der die geplanten Translationsbewegungen entlang der z-Achse erreicht wurden. Diese Translationen entsprechen körperlichen Zahnbewegungen entlang der Zahnlängsachse, im Sinne von Intrusion und Extrusion. Die 2er, 3er und 5er erreichten die mittlere geplante Zahnbewegung von 0,5 bis 0,6 mm zu 10 bis 20 %. Die 1er erreichten die mittlere geplante Zahnbewegung von 0,3 mm mit einer Effektivität von -46 %. Die 4er zeigten bei der geplanten Zahnbewegung von 0,6 mm eine Effektivität von -10 %. Bei den zentralen Inzisivi und ersten Prämolaren wurde die Bewegung dementsprechend gar nicht ausgeführt bzw. es erfolgte eine Bewegung entgegen der geplanten Translationsrichtung. Die größten Zahnbewegungen waren bei den 6ern geplant, die die Translation von durchschnittlich 1,0 mm mit einer mittleren Effektivität von 39 % erreichten. Insgesamt war die Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Intrusion bzw. Extrusion bei allen Zähne eher gering.

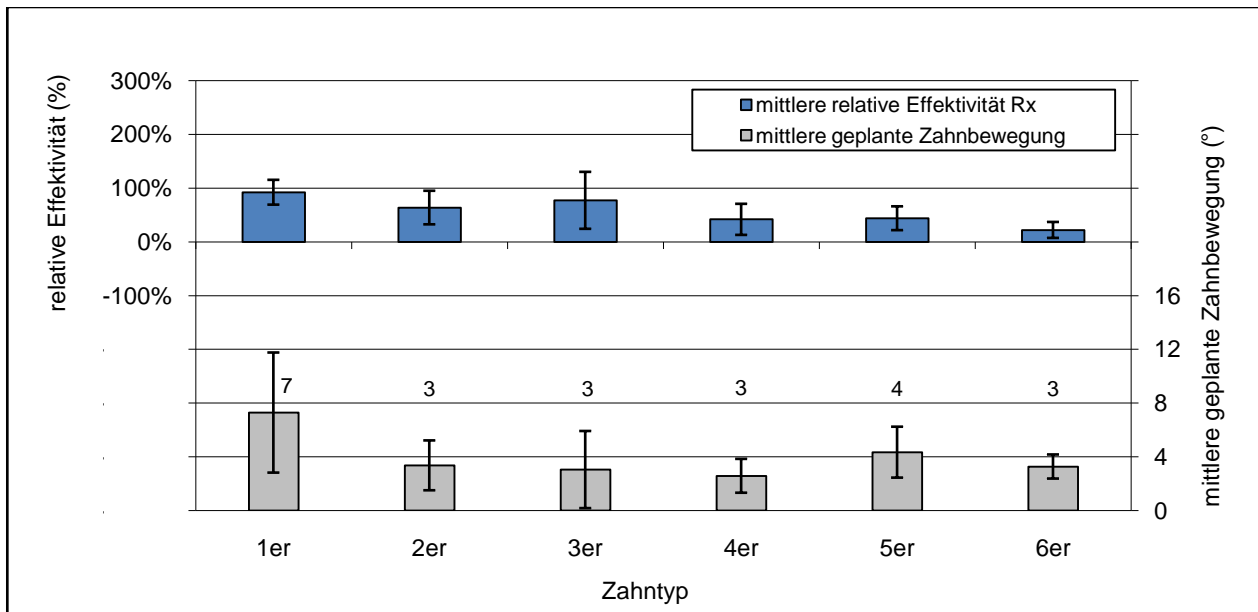


Abb. 14: Säulendiagramm zur Darstellung der mittleren relativen Effektivität der Rotationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Oberkiefer um die x-Achse, d.h. Zahnkippen in oro-vestibulärer Richtung. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand des Gaumens der Modelle (Matching-Methode 1). Die Säulen im oberen Bereich stellen den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die Säulen im unteren Bereich zeigen den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Rotationsbewegung in Grad mit der jeweiligen Standardabweichung an.

Rotationsbewegungen um die x-Achse entsprechen Zahnkippen in oro-vestibulärer Richtung. Das Säulendiagramm in Abb. 14 stellt die mit der Matching-Methode 1 ermittelte mittlere relative Effektivität dar, mit der die geplanten Rotationen in dieser Richtung erreicht wurden. Die 1er erreichten mit einer mittleren Effektivität von 92 % die durchschnittlich geplante Rotationsbewegung von 7°. Die 2er und 3er erreichten die geplante Zahnrotation von 3° mit einer mittleren Effektivität von 64 bzw. 70 %. Bei den 4ern und 5ern wurde die geplante Rotation von 3 bzw. 4° in oro-vestibulärer Richtung mit einer Effektivität von 42 bzw. 44 % ausgeführt. Die geringste Übereinstimmung der geplanten und erfolgten Zahnbewegung zeigten die 6er mit einer mittleren Effektivität von 22 %. Aus dem Diagramm geht hervor, dass die geplanten Zahnkippen in oro-vestibulärer Richtung bei den Inzisivi und Canini mit einer deutlich höheren Effektivität erreicht wurden als bei den Prämolaren und Molaren.

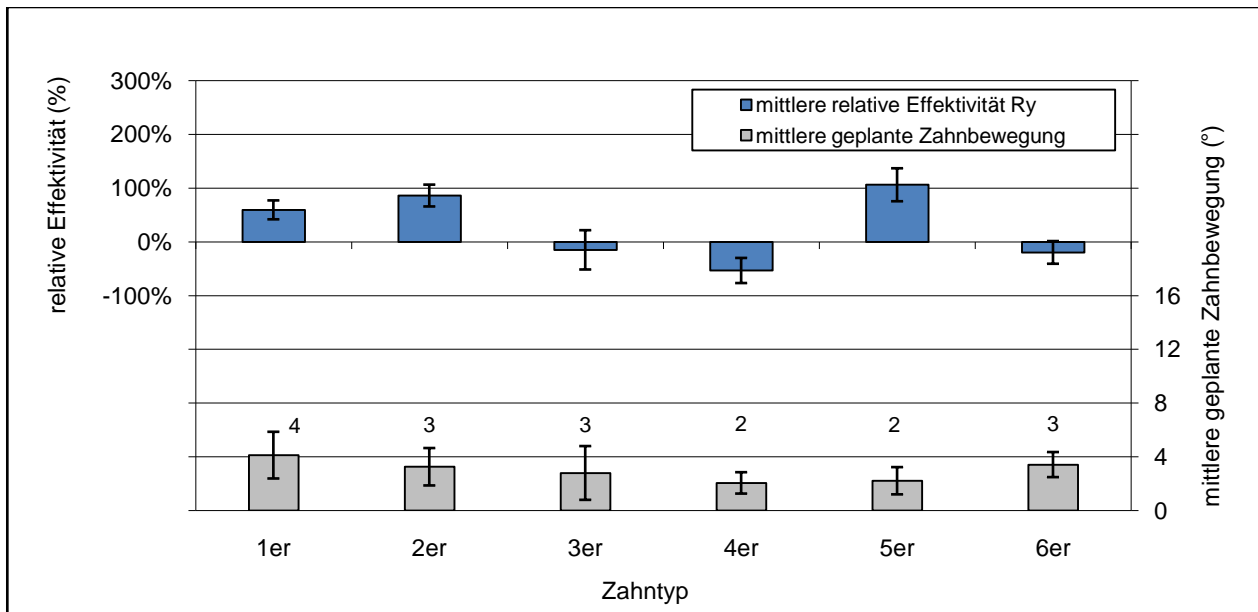


Abb. 15: Säulendiagramm zur Darstellung der mittleren relativen Effektivität der Rotationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Oberkiefer um die y-Achse, d.h. Zahnkippungen in mesio-distaler Richtung. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand des Gaumens der Modelle (Matching-Methode 1). Die Säulen im oberen Bereich stellen den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die Säulen im unteren Bereich zeigen den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Rotationsbewegung in Grad mit der jeweiligen Standardabweichung an.

Das in Abb. 15 dargestellte Säulendiagramm veranschaulicht die mit der Matching-Methode 1 ermittelte mittlere relative Effektivität der Rotationsbewegungen um die y-Achse. Diese Rotationen entsprechen kippenden Zahnbewegungen in mesio-distaler Richtung. Der Vergleich der einzelnen Zahntypen lässt deutliche Unterschiede erkennen. Die 1er und 2er führten die geplanten Rotationen von 4 bzw. 3° mit einer mittleren Effektivität von 60 bzw. 86 % aus. Bei den Zahntypen 3er, 4er und 6er lagen die ermittelten Werte bei -15 bis -53 %. Die 5er erreichten die angestrebte Rotation von 2° mit der höchsten Effektivität von 106 %. Zusammenfassend erreichten die lateralen Inzisivi und zweiten Prämolaren im Oberkiefer mit einer sehr hohen Effektivität die angestrebte Rotationsbewegung, gefolgt von den zentralen Inzisivi. Bei den Canini, ersten Prämolaren und Molaren fand gar keine Bewegung bzw. eine Rotation entgegen der geplanten Richtung statt.

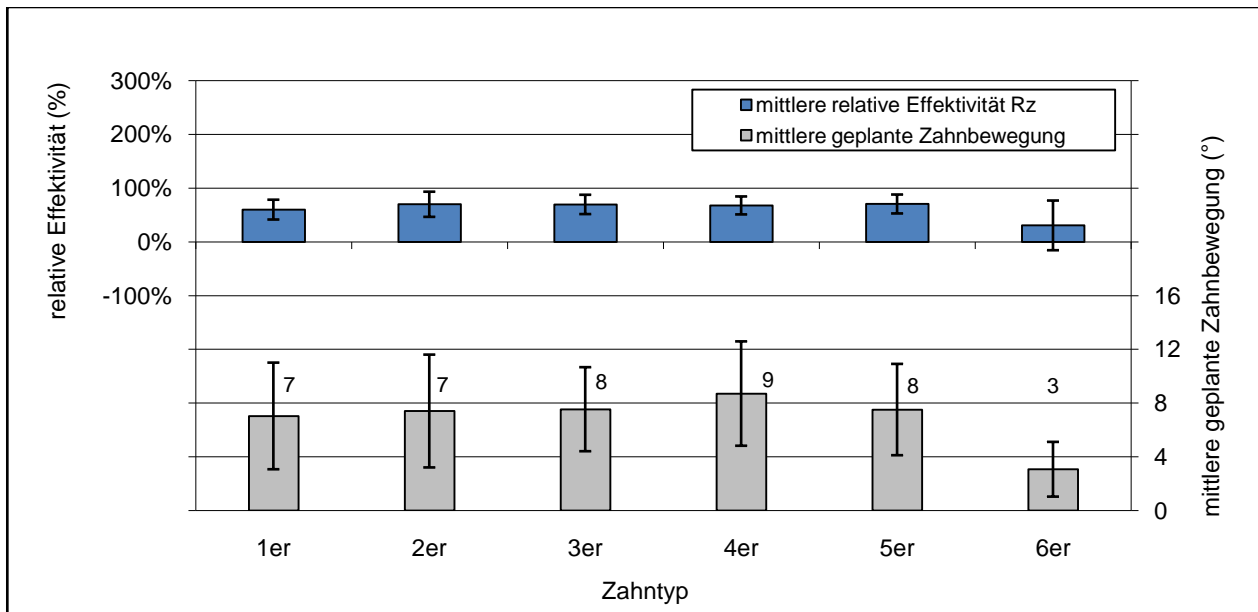


Abb. 16: Säulendiagramm zur Darstellung der mittleren relativen Effektivität der Rotationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Oberkiefer um die z-Achse, d.h. Rotationen um die Zahn längsachse. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand des Gaumens der Modelle (Matching-Methode 1). Die Säulen im oberen Bereich stellen den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die Säulen im unteren Bereich zeigen den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Rotationsbewegung in Grad mit der jeweiligen Standardabweichung an.

Das Säulendiagramm in Abb. 16 stellt die mit der Matching-Methode 1 ermittelte mittlere relative Effektivität dar, mit der die geplanten Rotationsbewegungen um die z-Achse von den einzelnen Zahntypen erreicht wurden. Rotationen um diese Achse entsprechen einer Mesial- bzw. Distalrotation des Zahns um seine Längsachse. Die 1er, 2er, 3er, 4er und 5er zeigten mit einer mittleren Effektivität von 60 bis 71 % relativ ähnliche Ergebnisse bei der Übereinstimmung von geplantem und tatsächlichem Behandlungsziel. Im Mittel waren hier Rotationen von 7 bis 9° geplant. Die 6er lagen mit einer mittleren Effektivität von 31 % bei geplanten 3° Rotation deutlich hinter den anderen Zähnen. Es wird ersichtlich, dass die Inzisivi, Canini und Prämolaren die angestrebte Rotationsbewegung mit einer deutlich höheren Effektivität erreichten als die Molaren.

4.2 Allgemeine Ausrichtungsmethode

Die Überlagerung der Patientenmodelle erfolgte mit der allgemeinen Ausrichtungsmethode automatisch durch die Surfacer-Software anhand der gewählten Referenzstruktur. Zur Überprüfung der Qualität der Ausrichtung wurde die Untersuchung sowohl mit als auch ohne manuelle Nachkorrektur des automatischen Matchings durchgeführt. In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse dieser Ausrichtungsmethode unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der manuellen Nachbearbeitung dargestellt. Im Abschnitt 4.2.1 wird die Reproduzierbarkeit der Methode beschrieben. Im Abschnitt 4.2.2 werden exemplarisch für eine Zahnbewegung die Ergebnisse der allgemeinen Ausrichtungsmethode mit und ohne manuelle Nachkorrektur des Matchings vorgestellt. Im Abschnitt 4.2.3 werden die Ergebnisse der allgemeinen Ausrichtungsmethode mit manueller Nachbearbeitung des automatischen Matchings dargestellt.

4.2.1 Reproduzierbarkeit der Methode

Zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit der allgemeinen Ausrichtungsmethode wurde die Analyse der Zahnbewegung jeweils fünffach wiederholt. Sowohl für die Ausrichtungsmethode mit als auch ohne manuelle Korrektur des automatischen Matchings lag die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse in der Größenordnung der Messgenauigkeit der Methode von etwa 100 μm .

4.2.2 Exemplarischer Vergleich der Ergebnisse bei allgemeiner Ausrichtungsmethode mit und ohne manuelle Korrektur des automatischen Matchings

Die Ausrichtung der Modelle bei Matching-Methode 2 wurde zunächst mehrfach automatisch durch die Surfacer-Software anhand unbewegter Molaren und dem punktereduzierten Zahnkranz durchgeführt. Bei einigen Modellen zeigte sich, dass durch die automatische Ausrichtung nicht immer eine optimale Überlagerung der Modelle erzielt werden konnte. In einer zusätzlichen Analyse wurden daher nach der automatischen Ausrichtung der Modelle die Modelloberflächen manuell so verschoben, dass der optische Vergleich der anatomischen Strukturen eine gute Übereinstimmung lieferte. Im Folgenden werden exemplarisch anhand einer Bewegungskomponente die Ergebnisse der allgemeinen Ausrichtungsmethode mit und ohne manuelle Korrektur des Matchings vorgestellt und einer vergleichenden Analyse unterzogen.

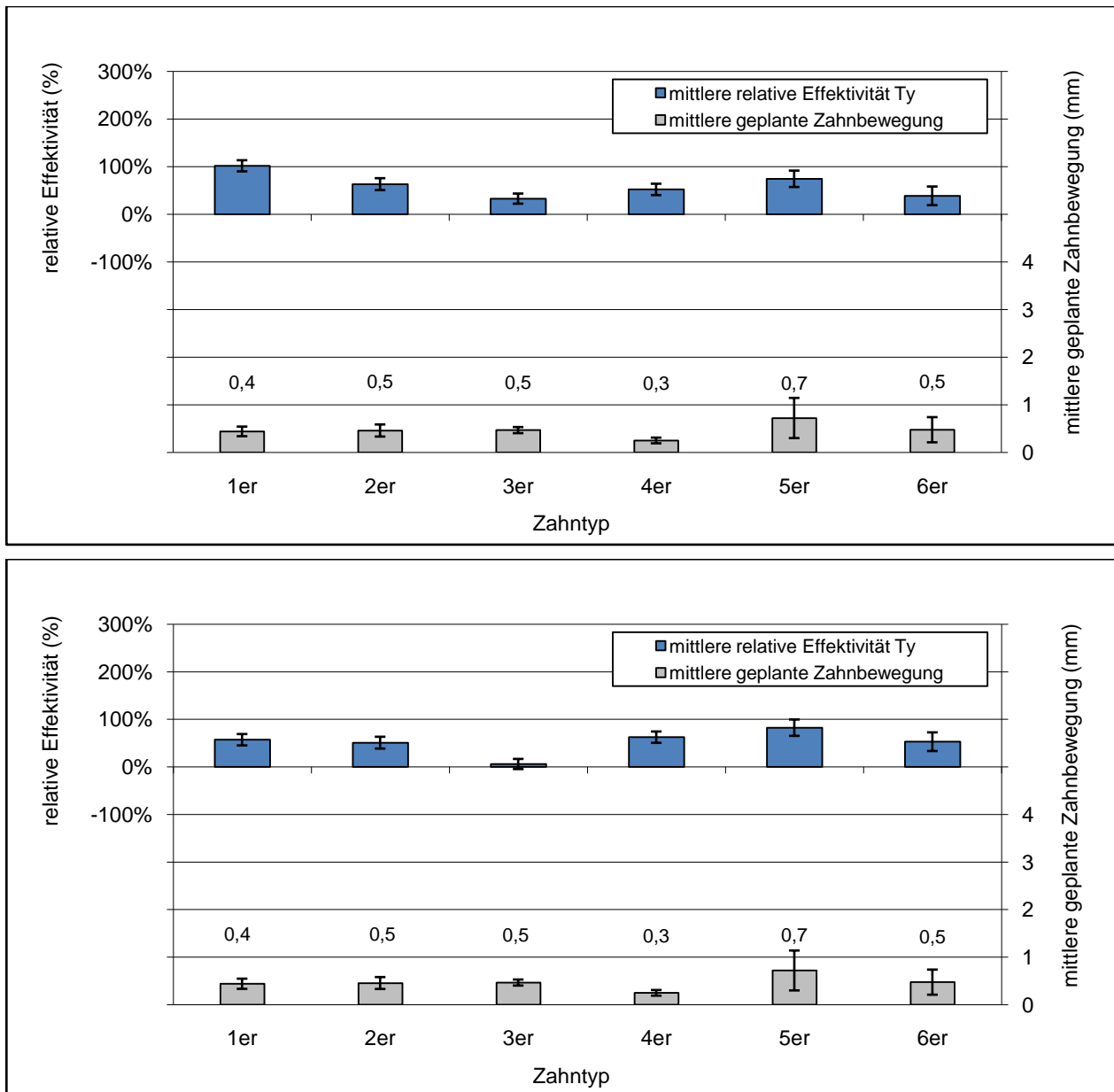


Abb. 17: Vergleich der Ergebnisse der allgemeinen Matching-Methode ohne manuelle Korrektur des automatischen Matchings (oben) sowie mit manueller Korrektur des automatischen Matchings (unten). Die Säulendiagramme stellen die mittlere relative Effektivität der Translationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Oberkiefer entlang der y-Achse, d.h. in oro-vestibulärer Richtung, dar. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand unbewegter Molaren und dem reduzierten Zahnkranz der Modelle (Matching-Methode 2) ohne manuelle Korrektur des Matchings (Abb. 17 oben) bzw. mit manueller Korrektur des Matchings (Abb. 17 unten). Die blauen Säulen im oberen Bereich des Diagramms stellen jeweils den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die grauen Säulen im unteren Bereich des Diagramms zeigen jeweils den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Zahnbewegung in mm mit der jeweiligen Standardabweichung an.

Das obere Diagramm in Abb. 17 stellt die mittlere relative Effektivität der Translationsbewegungen in oro-vestibulärer Richtung dar, die mit der allgemeinen Ausrichtungsmethode ohne manuelle Korrektur des automatischen Matchings ermittelt wurde. Das untere Diagramm in Abb. 17 zeigt die mittlere relative Effektivität der Translationsbewegungen in oro-vestibulärer Richtung, die mit der allgemeinen Ausrichtungsmethode und anschließender manueller Korrektur des automatischen Matchings ermittelt wurde. Es wird ersichtlich, dass sich die mittleren geplanten Zahnbewegungen bei beiden Analysemethoden nicht voneinander unterscheiden, da die Überlagerung des ClinCheck-Modells auf das initiale Modell zur Ermittlung der geplanten Zahnbewegung in beiden Fällen mit der gleichen Methode erfolgte. Bei Betrachtung der mittleren relativen Effektivität, mit der die einzelnen Zahntypen die angestrebte Zahnbewegung erreichten, zeigt sich, dass die Front- und Eckzähne beim automatischen Matching mit manueller Nachkorrektur eine geringere Effektivität (6 - 57 %) verzeichneten als beim automatischen Matching ohne manuelle Nachkorrektur (33 – 102 %). Bei den ersten und zweiten Prämolaren sowie Molaren zeigten sich beim Vergleich der beiden Methoden ähnliche Ergebnisse. Für diese Zähne wurde mit der allgemeinen Ausrichtungsmethode mit manueller Nachbesserung eine Effektivität von 63 bis 83 % ermittelt, bei der Ausrichtungsmethode ohne manuelle Nachbesserung zeigte sich eine Effektivität von 39 bis 75 %.

Insbesondere ausgeprägte Zahnfehlstellungen im Frontzahnbereich können eine Fehlerquelle für das automatische Matching durch die Surfacer-Software darstellen und zu einer antero-posterioren bzw. medio-lateralen Diskrepanz bei der Modellausrichtung führen. Eine ungenaue Überlagerung der Patientenmodelle in antero-posteriorer Richtung kann zu einer Verfälschung der gemessenen Zahnbewegung Ty (Translation in oro-vestibulärer Richtung) insbesondere im Frontzahnbereich führen, da sich die Surfacer-Software bei der Überlagerung an der Position der Molaren und dem Verlauf des Zahnbogens orientiert. Des Weiteren kann bei den als Referenzstruktur gewählten Molaren eine geringe Zahnbewegung aufgrund der rein desmodontalen Verankerung nicht sicher ausgeschlossen werden. Hierdurch ergibt sich die Notwendigkeit einer kritischen Überprüfung des Matchings. Da bei allen Matching-Ergebnissen der allgemeinen Ausrichtungsmethode ohne manuelle Korrektur visuell ein Nachbesserungsbedarf festgestellt wurde, wurde die umfassende Analyse der Zahnbewegung für alle Patientenmodelle mit der allgemeinen Ausrichtungsmethode aus diesem Grund ausschließlich mit einer manuellen Nachbearbeitung des Matchings durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analyse werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

4.2.3 Ergebnisse bei allgemeiner Ausrichtungsmethode mit manueller Korrektur

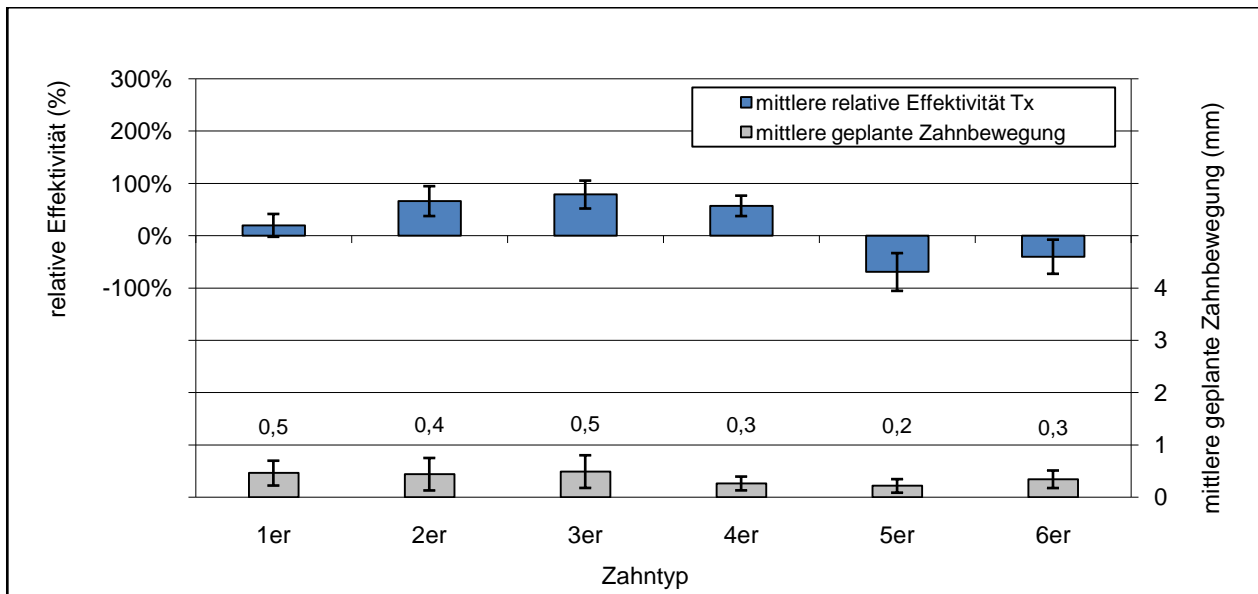


Abb. 18: Säulendiagramm zur Darstellung der mittleren relativen Effektivität der Translationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Oberkiefer entlang der x-Achse, d.h. in mesio-distaler Richtung. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand unbewegter Molaren und dem reduzierten Zahnkranz der Modelle (Matching-Methode 2). Die Säulen im oberen Bereich stellen den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die Säulen im unteren Bereich zeigen den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Zahnbewegung in mm mit der jeweiligen Standardabweichung an.

Das Säulendiagramm in Abb. 18 stellt die mit der Matching-Methode 2 ermittelte mittlere relative Effektivität dar, mit der die geplanten Translationsbewegungen in mesio-distaler Richtung im Oberkiefer erreicht wurden. Die 1er führten die im Mittel geplante Translation von 0,5 mm mit einer mittleren Effektivität von 20 % aus, während die 2er, 3er und 4er bei geplanten Bewegungen von 0,3 bis 0,5 mm eine Effektivität von 57 bis 79 % verzeichneten. Für die 5er und 6er wurden negative Werte von -69 bzw. -40 % ermittelt. Die Messergebnisse zeigten, dass mesio-distale Translationsbewegungen von den lateralen Inzisivi, Canini und ersten Prämolaren mit deutlich höherer Effektivität erreicht wurden als von den zentralen Inzisivi, während diese Bewegung bei den zweiten Prämolaren und ersten Molaren gar nicht stattfand, bzw. die Zähne eine Bewegung entgegen der geplanten Richtung ausführten.

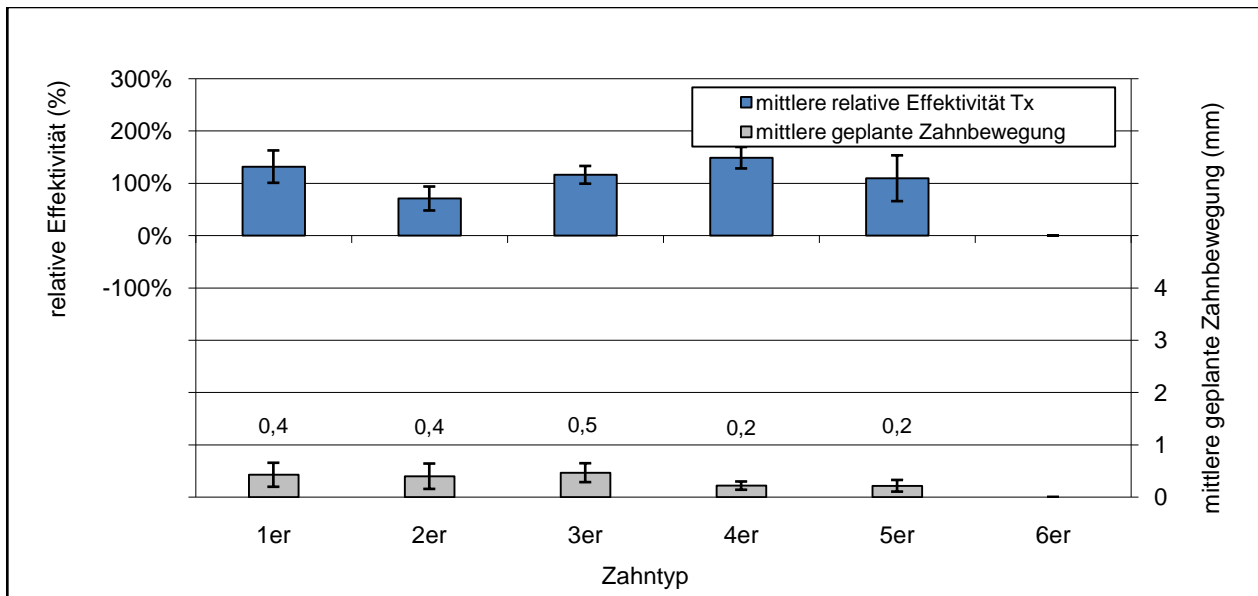


Abb. 19: Säulendiagramm zur Darstellung der mittleren relativen Effektivität der Translationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Unterkiefer entlang der x-Achse, d.h. in mesio-distaler Richtung. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand unbewegter Molaren und dem reduzierten Zahnkranz der Modelle (Matching-Methode 2). Die Säulen im oberen Bereich stellen den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die Säulen im unteren Bereich zeigen den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Zahnbewegung in mm mit der jeweiligen Standardabweichung an.

Im Unterkiefer zeigten die einzelnen Zahntypen im Durchschnitt eine deutlich höhere Übereinstimmung von geplanter und erfolgter Translation (Abb. 19). Die 5er erreichten die geplante Zahnbewegung von 0,2 mm mit einer sehr hohen Effektivität von 110 %. Die 1er, 3er und 4er lagen mit einer mittleren Effektivität von 116 bis 149 % über der geplanten Zahnbewegung. Die 2er erreichten mit einer mittleren Effektivität von 71 % die angestrebte Translation von 0,4 mm. Die mittlere geplante Zahnbewegung der 6er lag in dieser Messung unter der Minimalgrenze von 0,1 mm und wurde aus diesem Grund nicht berücksichtigt. Es wird ersichtlich, dass die angestrebte Translationsbewegung in mesio-distaler Richtung mit der höchsten Effektivität von den zweiten Prämolaren im Unterkiefer ausgeführt wurde, gefolgt von den Canini und Inzisivi. Die Zahnbewegung der ersten Prämolaren wurde mit 149 % überkorrigiert.

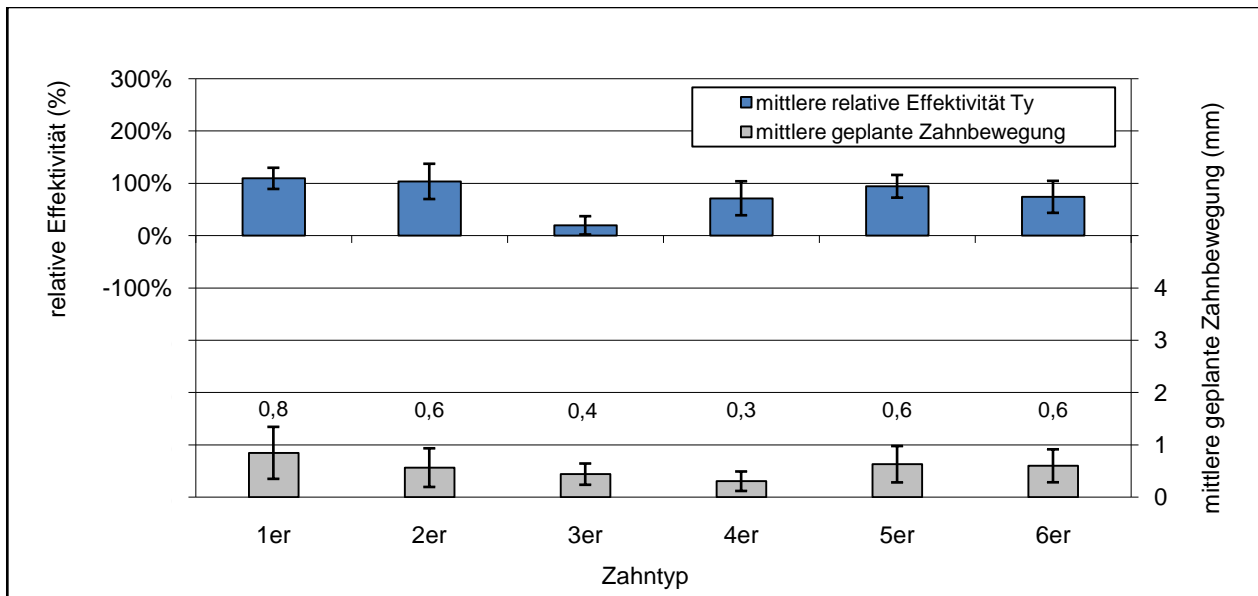


Abb. 20: Säulendiagramm zur Darstellung der mittleren relativen Effektivität der Translationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Oberkiefer entlang der y-Achse, d.h. in oro-vestibulärer Richtung. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand unbewegter Molaren und dem reduzierten Zahnkranz der Modelle (Matching-Methode 2). Die Säulen im oberen Bereich stellen den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die Säulen im unteren Bereich zeigen den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Zahnbewegung in mm mit der jeweiligen Standardabweichung an.

Das Säulendiagramm in Abb. 20 stellt die mit der Matching-Methode 2 ermittelte mittlere relative Effektivität dar, mit der die angestrebten Translationsbewegungen in oro-vestibulärer Richtung (y-Achse) im Oberkiefer erreicht wurden. Es zeigten sich beim Vergleich der einzelnen Zahntypen Unterschiede im Behandlungserfolg. Die 1er, 2er und 5er erreichten mit einer sehr hohen Effektivität von 94 bis 109 % die angestrebte Translationsbewegung. Im Mittel waren hier Bewegungen zwischen 0,6 und 0,8 mm geplant. Die 4er und 6er verzeichneten eine Effektivität von 71 bzw. 74 %. Die geringste Übereinstimmung von geplanter und erfolgter Translation in oro-vestibulärer Richtung zeigten die 3er, die die angestrebte Bewegung von 0,4 mm mit einer Effektivität von 20 % erreichten. Insgesamt wurde die geplante Translationsbewegung in oro-vestibulärer Richtung bei allen Zähnen im Oberkiefer mit Ausnahme der Canini mit einer hohen Effektivität erreicht.

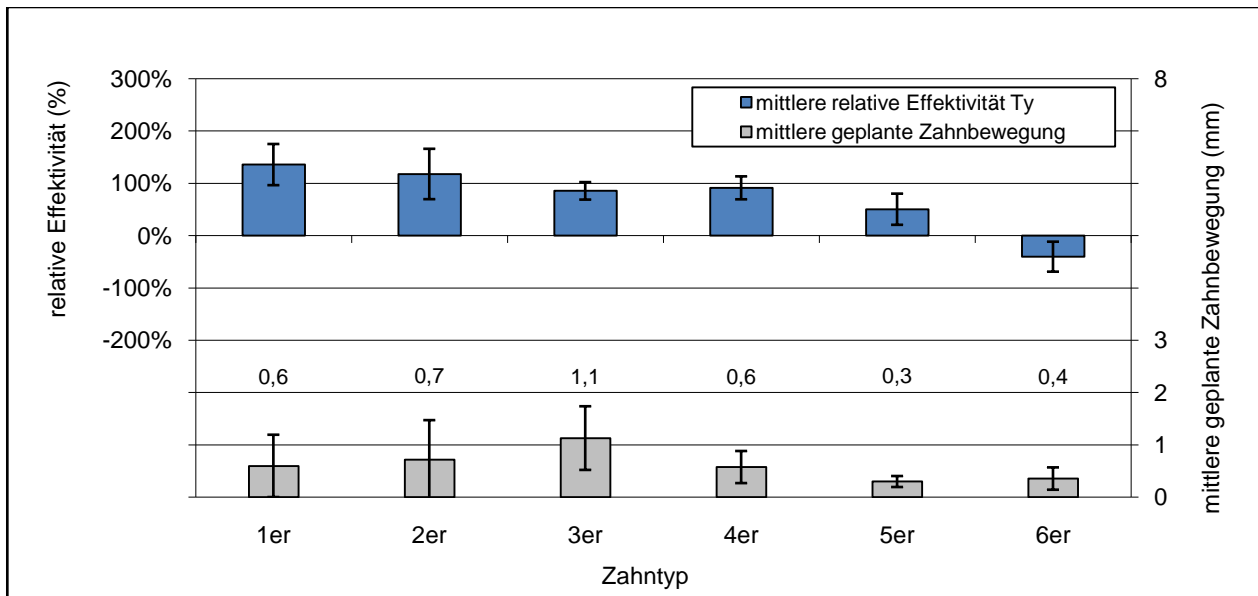


Abb. 21: Säulendiagramm zur Darstellung der mittleren relativen Effektivität der Translationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Unterkiefer entlang der y-Achse, d.h. in oro-vestibulärer Richtung. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand unbewegter Molaren und dem reduzierten Zahnkranz der Modelle (Matching-Methode 2). Die Säulen im oberen Bereich stellen den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die Säulen im unteren Bereich zeigen den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Zahnbewegung in mm mit der jeweiligen Standardabweichung an.

Im Unterkiefer erreichten die 4er mit einer sehr hohen Effektivität von 91 % die geplante Translation von 0,6 mm, gefolgt von den 3ern mit 86 % mittlerer Effektivität bei geplanten 1,1 mm Translation (Abb. 21). Die 1er und 2er zeigten mit einer mittleren Effektivität von 136 bzw. 118 % eine leichte Überkorrektur des angestrebten Behandlungsziels. Geplant waren hier im Mittel Translationen von 0,6 bis 1,1 mm. Die 5er erreichten die geplanten 0,3 mm Translation mit einer Effektivität von 50 %. Die geringste Übereinstimmung von geplanter und angestrebter Translation in dieser Richtung zeigten die 6er mit einer relativen Effektivität von -40 % bei einer angestrebten Translation von 0,4 mm. Es zeigte sich, dass die geplanten Translationsbewegungen in oro-vestibulärer Richtung bei den Inzisivi, Canini und ersten Prämolaren im Unterkiefer mit einer deutlich höheren Effektivität ausgeführt wurden als bei den zweiten Prämolaren, während sich die Translation der Molaren entgegen der geplanten Richtung entwickelte.

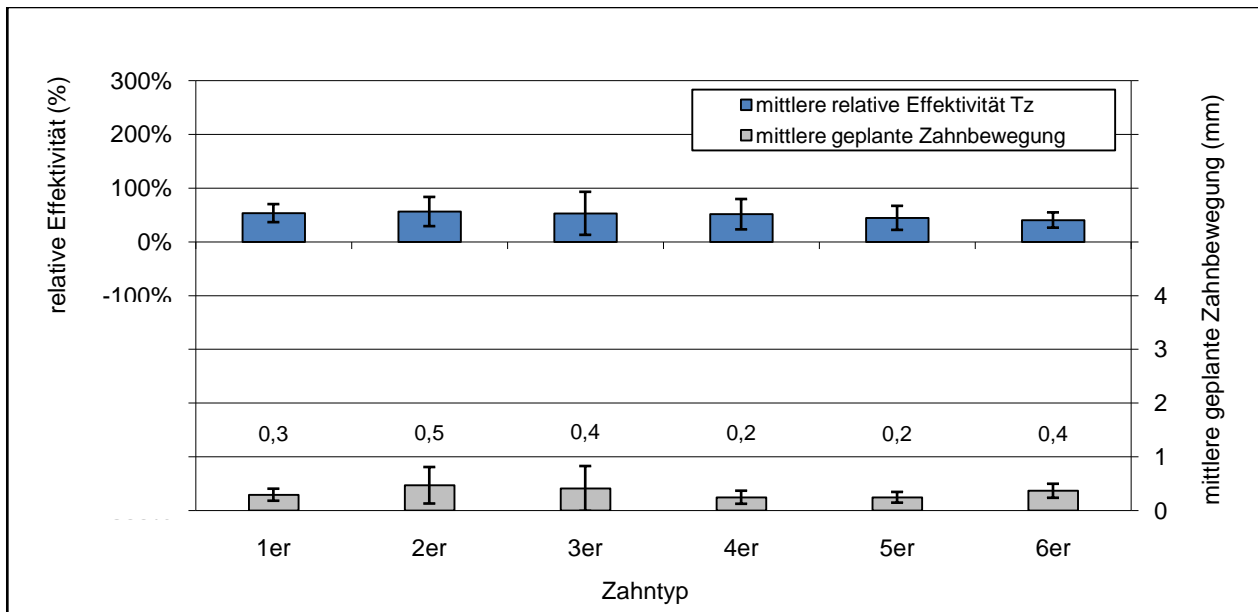


Abb. 22: Säulendiagramm zur Darstellung der mittleren relativen Effektivität der Translationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Oberkiefer entlang der z-Achse, d.h. in korono-apikaler Richtung. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand unbewegter Molaren und dem reduzierten Zahnkranz der Modelle (Matching-Methode 2). Die Säulen im oberen Bereich stellen den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die Säulen im unteren Bereich zeigen den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Zahnbewegung in mm mit der jeweiligen Standardabweichung an.

In Abb. 22 wird die mit der Matching-Methode 2 ermittelte mittlere relative Effektivität dargestellt, mit der die geplanten Translationen entlang der z-Achse im Oberkiefer erreicht wurden. Diese Zahnbewegungen entsprechen körperlichen Bewegungen entlang der Zahnängsachse, im Sinne von Extrusion und Intrusion. Der Vergleich zwischen den einzelnen Zahntypen zeigt übereinstimmende Ergebnisse in dieser Bewegungsrichtung. Im Mittel wurden In- und Extrusionen zwischen 0,2 bis 0,5 mm geplant. Diese wurden von den 1ern, 2ern, 3ern und 4ern mit einer mittleren Effektivität von 52 bis 57 % erreicht. Die 5er und 6er verzeichneten eine mittlere Effektivität von 45 bzw. 41 %. Aus diesem Ergebnis wird ersichtlich, dass die geplanten Translationsbewegungen entlang der Zahnängsachse bei allen Zähnen im Oberkiefer ungefähr zur Hälfte erreicht wurden.

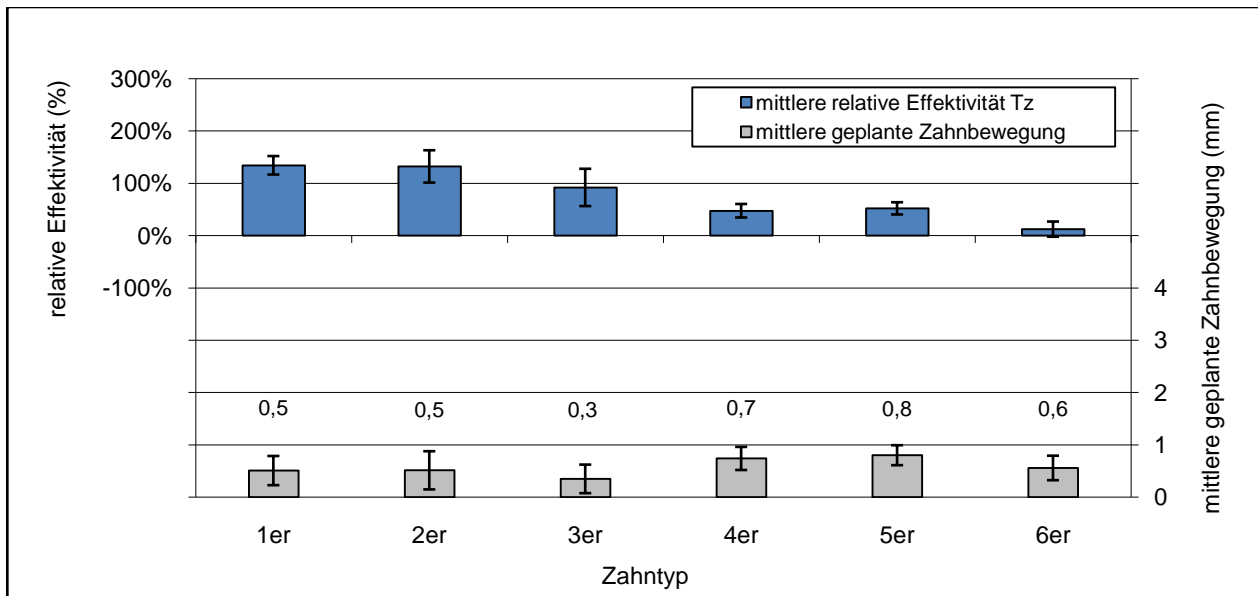


Abb. 23: Säulendiagramm zur Darstellung der mittleren relativen Effektivität der Translationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Unterkiefer entlang der z-Achse, d.h. in korono-apikaler Richtung. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand unbewegter Molaren und dem reduzierten Zahnkranz der Modelle (Matching-Methode 2). Die Säulen im oberen Bereich stellen den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die Säulen im unteren Bereich zeigen den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Zahnbewegung in mm mit der jeweiligen Standardabweichung an.

Die Übereinstimmung von geplanter und erzielter Translationsbewegung in korono-apikaler Richtung lag bei den Inzisivi und Canini im Unterkiefer deutlich höher als im Oberkiefer (Abb. 23). Die 3er erreichten die im Mittel geplante Translation von 0,3 mm mit einer sehr hohen Effektivität von 92 %, die 1er und 2er zeigten eine Effektivität von 134 bzw. 132 % bei einer angestrebten Translation von 0,5 mm. Die 4er und 5er verzeichneten bei dieser Zahnbewegung eine Effektivität von 48 bzw. 52 % und zeigten damit eine ähnliche Effektivität der Zahnbewegung wie die Oberkieferzähne in dieser Bewegungsrichtung. Die 6er führten die geplante Translation von durchschnittlich 0,6 mm mit der geringsten Effektivität von 12 % aus. Zusammenfassend erreichten die Inzisivi und Canini die angestrebte Zahnbewegung mit einer deutlich höheren Effektivität als die ersten und zweiten Prämolaren, während bei den Molaren mit Abstand die geringste Übereinstimmung zwischen angestrebter und erfolgter In- bzw. Extrusion erzielt werden konnte.

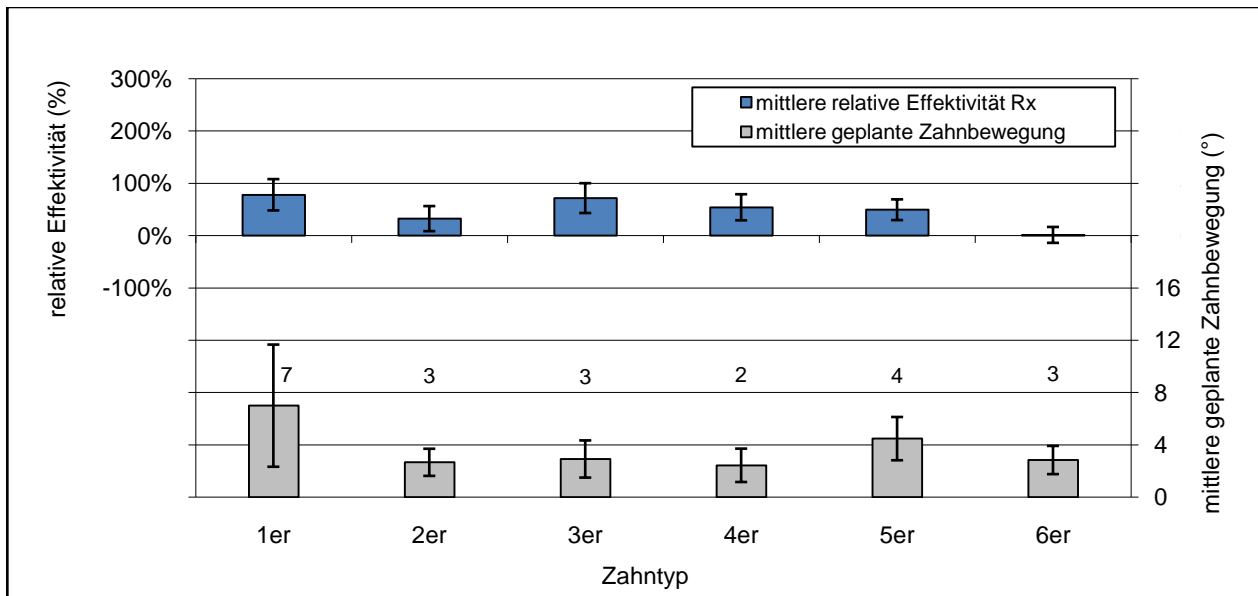


Abb. 24: Säulendiagramm zur Darstellung der mittleren relativen Effektivität der Rotationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Oberkiefer um die x-Achse, d.h. Zahnkippen in oro-vestibulärer Richtung. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand unbewegter Molaren und dem reduzierten Zahnkranz der Modelle (Matching-Methode 2). Die Säulen im oberen Bereich stellen den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die Säulen im unteren Bereich zeigen den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Rotationsbewegung in Grad mit der jeweiligen Standardabweichung an.

Rotationen um die x-Achse entsprechen kippenden Zahnbewegungen in oro-vestibulärer Richtung. Das Diagramm in Abb. 24 zeigt die mit der Matching-Methode 2 ermittelte mittlere relative Effektivität, mit der die angestrebten Rotationen in dieser Richtung im Oberkiefer erreicht wurden. Vergleicht man die einzelnen Zahntypen miteinander, so zeigt sich eine große Varianz der Ergebnisse. Die 1er und 3er zeigten mit einer mittleren Effektivität von 78 bzw. 72 % die größte Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung. Die 4er und 5er führten die mittlere geplante Zahnbewegung von 2 bis 4° mit einer mittleren Effektivität von 54 bzw. 49 % aus. Die 2er erreichten die angestrebte Rotation mit einer Effektivität von 32 %. Die geringste Übereinstimmung verzeichnete die Gruppe der 6er mit 1 % mittlerer Effektivität. Zusammenfassend erreichten die zentralen Inzisivi und Canini die angestrebte Rotation mit einer deutlichen höheren Effektivität als die ersten und zweiten Prämolaren, während bei den lateralen Inzisivi nur eine sehr geringe Effektivität gezeigt werden konnte und bei den ersten Molaren annähernd keine Zahnbewegung stattfand.

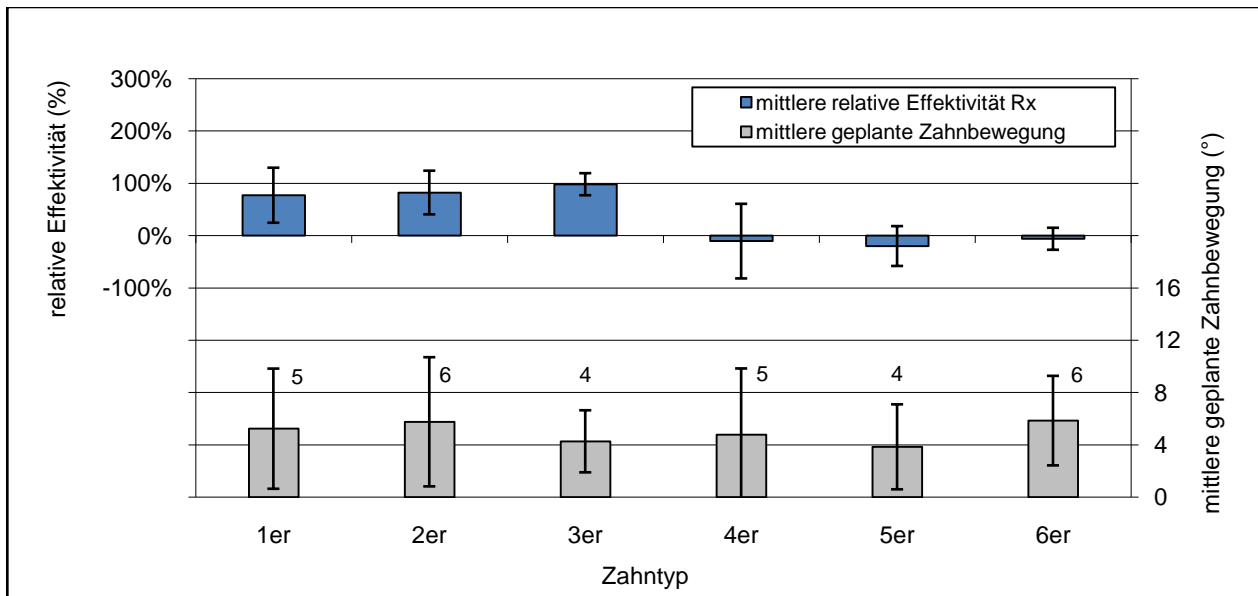


Abb. 25: Säulendiagramm zur Darstellung der mittleren relativen Effektivität der Rotationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Unterkiefer um die x-Achse, d.h. Zahnkippen in oro-vestibulärer Richtung. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand unbewegter Molaren und dem reduzierten Zahnkranz der Modelle (Matching-Methode 2). Die Säulen im oberen Bereich stellen den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die Säulen im unteren Bereich zeigen den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Rotationsbewegung in Grad mit der jeweiligen Standardabweichung an.

Im Unterkiefer zeigten die einzelnen Zahntypen ebenfalls deutliche Unterschiede in der mittleren relativen Effektivität der Rotationsbewegung (Abb. 25). Die 1er und 2er erreichten die im Mittel angestrebte Rotation von 5 bis 6° in oro-vestibulärer Richtung mit einer mittleren Effektivität von 77 bzw. 82 %. Die 3er verzeichneten mit einer Effektivität von 98 % die größte Übereinstimmung zwischen angestrebter und erreichter Zahnbewegung. Für die 4er, 5er und 6er lagen die ermittelten Werte im negativen Bereich zwischen -6 und -20 %. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass nur bei den Inzisivi und Canini die geplante Zahnkippen in oro-vestibulärer Richtung mit einer hohen Effektivität erreicht werden konnte, während die geplante Rotationsbewegung bei den Prämolaren und Molaren gar nicht ausgeführt wurde bzw. die Zähne entgegen der geplanten Richtung rotierten.

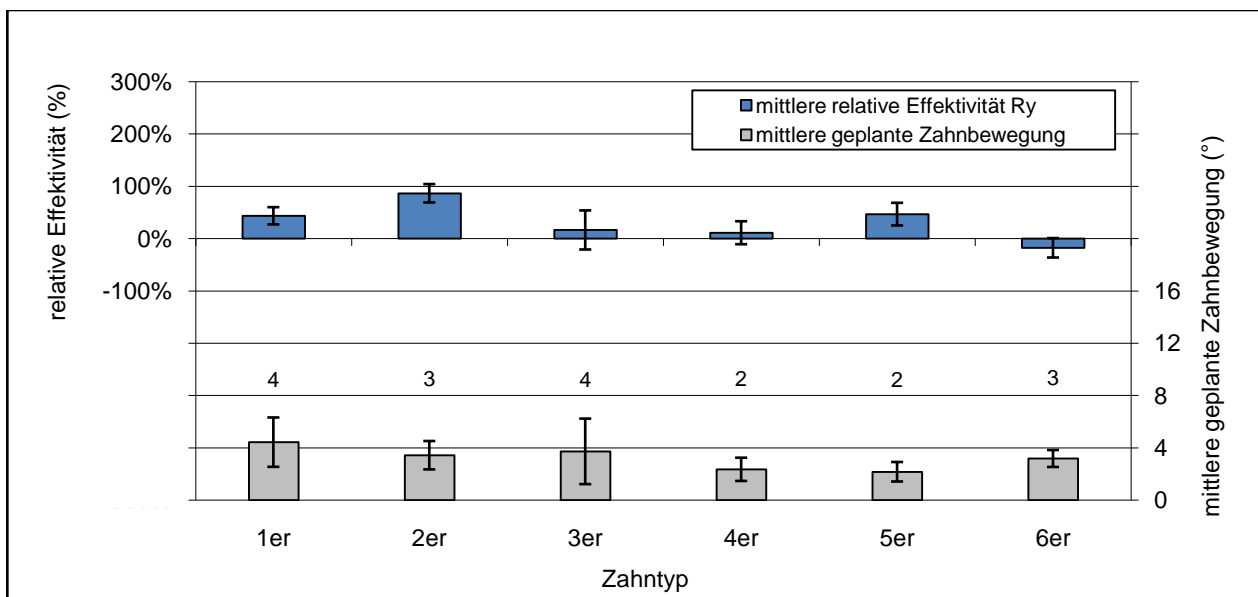


Abb. 26: Säulendiagramm zur Darstellung der mittleren relativen Effektivität der Rotationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Oberkiefer um die y-Achse, d.h. Zahnkippen in mesio-distaler Richtung. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand unbewegter Molaren und dem reduzierten Zahnkranz der Modelle (Matching-Methode 2). Die Säulen im oberen Bereich stellen den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die Säulen im unteren Bereich zeigen den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Rotationsbewegung in Grad mit der jeweiligen Standardabweichung an.

Das Säulendiagramm in Abb. 26 veranschaulicht die mit der Matching-Methode 2 ermittelte mittlere relative Effektivität, mit der die angestrebten Rotationsbewegungen um die y-Achse von den Zähnen im Oberkiefer erreicht wurden. Rotationen um diese Achse entsprechen einer Kippung des Zahns in mesio-distaler Richtung. Der Vergleich der einzelnen Zahntypen lässt deutliche Unterschiede in der ermittelten Effektivität erkennen. Die 1er und 5er erreichten die angestrebte Rotation von 2 bis 4° mit einer mittleren Effektivität von 44 bis 47 %. Die 2er führten die geplante Rotationsbewegung von im Durchschnitt 3° mit der höchsten Effektivität von 87 % aus. Die 3er, 4er und 6er zeigten mit -18 bis 17 % eine geringe Effektivität. Insgesamt zeigten die Ergebnisse, dass Zahnkippen in mesio-distaler Richtung bei den lateralen Inzisivi mit hoher Effektivität durchgeführt werden konnten, während bei den zentralen Inzisivi und zweiten Prämolaren weniger als die Hälfte der geplanten Rotation erreicht wurde. Die restlichen Zähne zeigten eine sehr geringe Effektivität bzw. rotierten entgegen der geplanten Richtung.

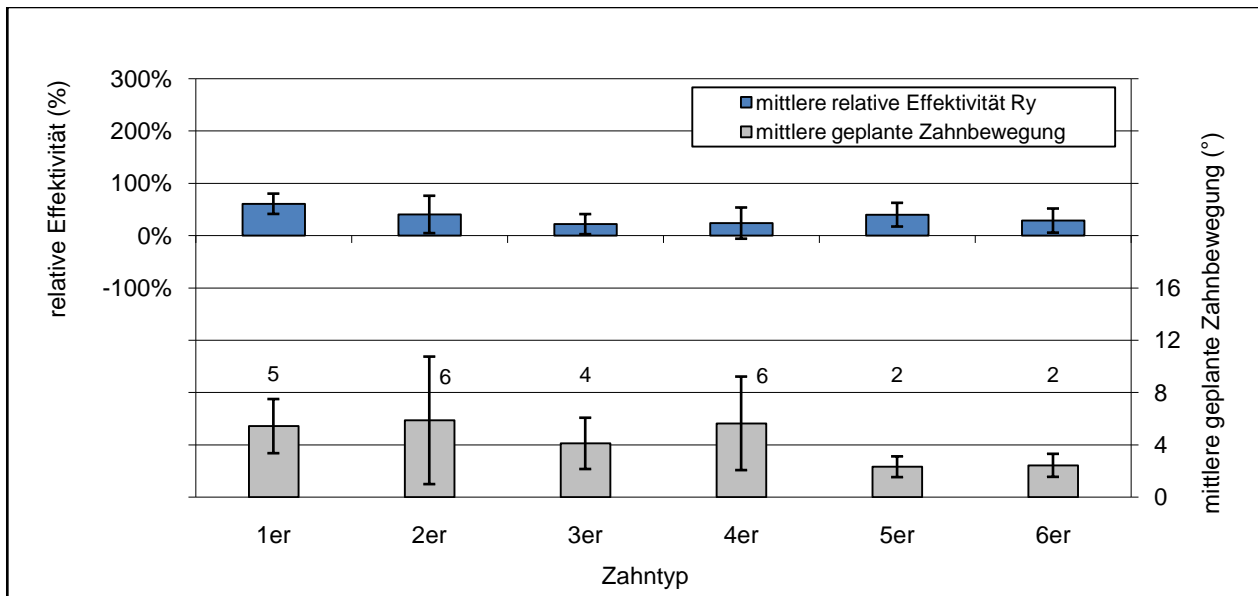


Abb. 27: Säulendiagramm zur Darstellung der mittleren relativen Effektivität der Rotationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Unterkiefer um die y-Achse, d.h. Zahnkippen in mesio-distaler Richtung. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand unbewegter Molaren und dem reduzierten Zahnkranz der Modelle (Matching-Methode 2). Die Säulen im oberen Bereich stellen den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die Säulen im unteren Bereich zeigen den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Rotationsbewegung in Grad mit der jeweiligen Standardabweichung an.

Im Unterkiefer zeigten die 2er, 3er, 4er, 5er und 6er relativ ähnliche Ergebnisse für die Effektivität der Rotationsbewegung um die y-Achse (Abb. 27). Diese Zähne erreichten die mittlere geplante Zahnkippen in mesio-distaler Richtung von 2 bis 6° mit einer mittleren Effektivität von 22 bis 40 %. Die 1er erzielten bei dieser Bewegung bei einer geplanten Rotation von durchschnittlich 5° die höchste Effektivität mit 61 %. Diese Messergebnisse verdeutlichen, dass die geplanten Rotationen in mesio-distaler Richtung bei allen Zähnen im Unterkiefer mit Ausnahme der zentralen Inzisivi nur etwa zu einem Drittel ausgeführt werden konnten.

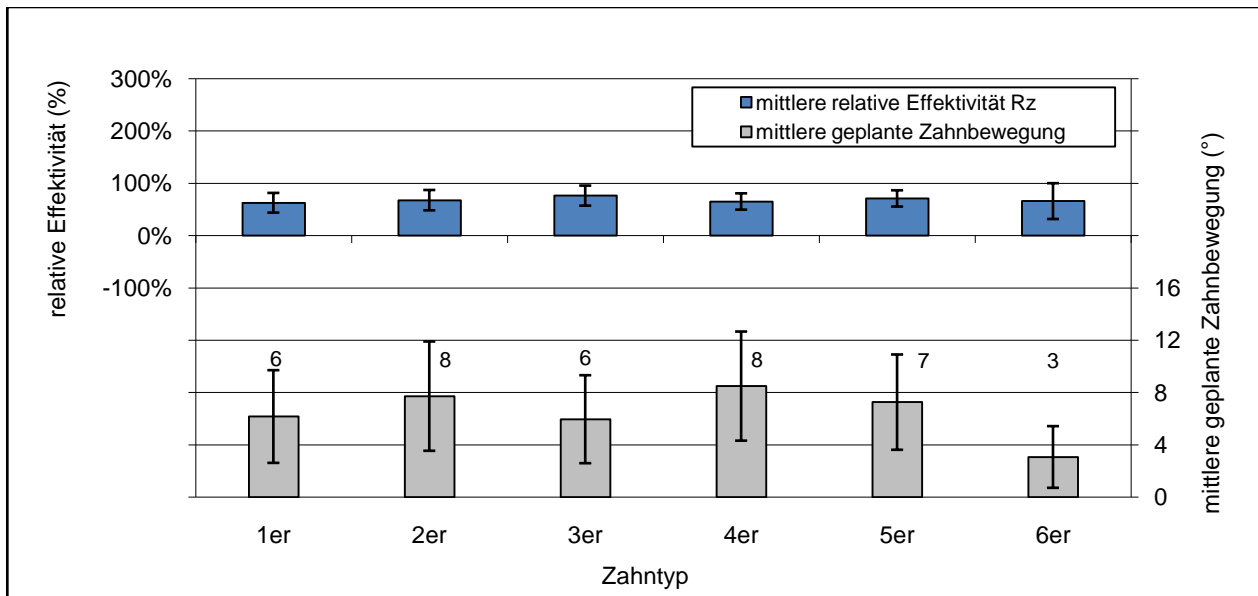


Abb. 28: Säulendiagramm zur Darstellung der mittleren relativen Effektivität der Rotationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Oberkiefer um die z-Achse, d.h. Rotationen um die Zahn längsachse. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand unbewegter Molaren und dem reduzierten Zahnkranz der Modelle (Matching-Methode 2). Die Säulen im oberen Bereich stellen den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die Säulen im unteren Bereich zeigen den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Rotationsbewegung in Grad mit der jeweiligen Standardabweichung an.

Die in Abb. 28 dargestellten Säulen veranschaulichen die mit der Matching-Methode 2 ermittelte mittlere relative Effektivität, mit der die geplanten Rotationsbewegungen um die z-Achse von den Zähnen im Oberkiefer tatsächlich erreicht wurden. Rotationen um diese Achse entsprechen einer Mesial- bzw. Distalrotation des Zahns. Im Vergleich der einzelnen Zahntypen ließen sich für alle Gruppen relativ ähnliche Messergebnisse feststellen. Geplant wurden im Mittel Rotationen zwischen 3 und 8° um die Zahn längsachse. Die Übereinstimmung von geplanter und erfolgter Zahnbewegung in dieser Richtung lag bei allen Zähnen im Oberkiefer zwischen 63 und 76 %.

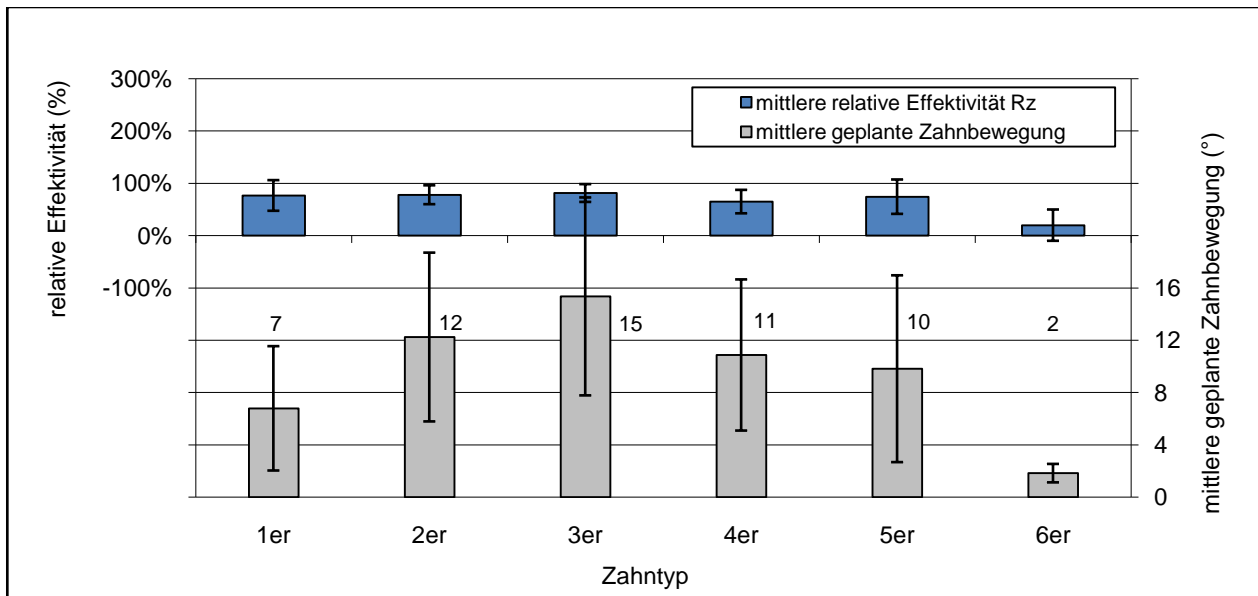


Abb. 29: Säulendiagramm zur Darstellung der mittleren relativen Effektivität der Rotationsbewegungen für die einzelnen Zahntypen im Unterkiefer um die z-Achse, d.h. Rotationen um die Zahn längsachse. Die Überlagerung für diese Messungen erfolgte anhand unbewegter Molaren und dem reduzierten Zahnkranz der Modelle (Matching-Methode 2). Die Säulen im oberen Bereich stellen den gewichteten Mittelwert und Fehler der prozentualen Übereinstimmung zwischen geplanter und erfolgter Zahnbewegung dar. Die Säulen im unteren Bereich zeigen den Mittelwert der für diesen Zahntyp geplanten Rotationsbewegung in Grad mit der jeweiligen Standardabweichung an.

Das Diagramm in Abb. 29 zeigt, dass die Übereinstimmung zwischen angestrebter und erzielter Rotation bei den 1ern, 2ern, 3ern, 4ern und 5ern im Unterkiefer mit einer mittleren relativen Effektivität von 65 bis 81 % ähnliche Werte für alle Zahntypen ergab. Geplant waren hier relativ große Rotationsbewegungen zwischen 7 und 15°. Bei den 6ern war die geplante Zahnbewegung von 2° Mesial- bzw. Distalrotation mit Abstand am kleinsten. Dieser Zahntyp erreichte die angestrebte Rotation mit einer Effektivität von 20 %. Aus den Diagrammen in Abb. 28 und 29 wird ersichtlich, dass die geplanten Rotationen um die Zahn längsachse sowohl im Ober- als auch im Unterkiefer bei allen Zähnen mit Ausnahme der mandibulären ersten Molaren mit einer ähnlich hohen Effektivität zwischen 63 und 81 % durchgeführt werden konnten.

4.3 Vergleich der Ergebnisse beider Ausrichtungsmethoden

Im nachfolgenden Abschnitt werden die ermittelten Ergebnisse der beiden Untersuchungsmethoden einer vergleichenden Analyse unterzogen. Die Ausrichtung an der nicht bewegten, ausgeprägten Referenzstruktur (Gaumen) der Modelle wird im Folgenden als Matching-Methode 1 bezeichnet, die allgemeine Ausrichtungsmethode der Modelle an unbewegten Zähnen und dem reduzierten Zahnkranz wird als Matching-Methode 2 bezeichnet.

Bei Betrachtung der geplanten mesio-distalen Translationsbewegungen (Tx) in den Abbildungen 11 und 18 wird ersichtlich, dass bei Matching-Methode 1 mit 0,6 bis 0,9 mm Translation im Schnitt deutlich größere geplante Zahnbewegungen ermittelt wurden als bei Methode 2 mit 0,2 bis 0,5 mm. Bei Matching-Methode 1 wurde für alle Zahntypen mit Ausnahme der zentralen Inzisivi eine mittlere Effektivität von über 70 % gemessen. Bei den lateralen Inzisivi und Canini wurde die angestrebte Zahnbewegung bei beiden Ausrichtungsmethoden mit einer Effektivität von 66 bis 79 % erreicht, während sich bei den übrigen Zähnen deutlichere Unterschiede zeigten. Bei den zentralen Inzisivi und ersten Prämolaren konnte die angestrebte Zahnbewegung bei Überlagerungsmethode 1 jeweils mit einer deutlich höheren Effektivität erreicht werden als bei Methode 2. Am größten waren die Abweichungen bei den zweiten Prämolaren und ersten Molaren, die bei der ersten Messmethode sehr hohe Effektivitätswerte zeigten, während die Ergebnisse bei Methode 2 weit im negativen Bereich lagen.

Bei der mittleren Effektivität der Translationsbewegungen in oro-vestibulärer Richtung (Ty) in den Abbildungen 12 und 20 zeigten beide Matching-Methoden bei fast allen Zahntypen relativ hohe Werte. Die Übereinstimmung von angestrebter und tatsächlicher Zahnbewegung lag bei beiden Methoden für die Inzisivi, zweiten Prämolaren sowie ersten Molaren zwischen 68 und 110 %. Abweichend waren die Ergebnisse bei den ersten Prämolaren (Methode 1) und Canini (Methode 2), die eine wesentlich niedrigere Präzision bei der Zahnbewegung aufwiesen. Bei der geplanten mittleren Zahnbewegung zeigten sich für beide Methoden ebenfalls nur geringe Abweichungen. Bei Matching-Methode 1 lagen die geplanten Bewegungen im Bereich von 0,4 bis 1,0 mm, bei Methode 2 wurden Werte zwischen 0,3 und 0,8 mm ermittelt.

Die Effektivität der Extrusions- bzw. Intrusionsbewegungen (Tz) in den Abbildungen 13 und 22 lag bei Matching-Methode 1 deutlich niedriger als bei Methode 2. Die mit Methode 1 ermittelte Effektivität für die Molaren lag mit 39 % am höchsten, die anderen Zahntypen wiesen Werte zwischen -46 bis 20 % auf. Im Gegensatz dazu ergaben die Messungen mit Methode 2 für alle Zahn-

typen eine Effektivität von 41 bis 57 %, d.h. die geplanten Intrusionen und Extrusionen wurden von allen Zähnen ungefähr zur Hälfte ausgeführt. Geplant waren mittlere Zahnbewegungen in Höhe von 0,3 bis 1,0 mm bei Methode 1, während die angestrebten Translationen bei Methode 2 mit 0,2 bis 0,5 mm etwas geringer waren.

Die Auswertung der Rotationsbewegungen um die x-Achse (Abb. 14 und 24) zeigte beim Umfang der geplanten Zahnrotation nur sehr geringe Abweichungen zwischen den beiden Methoden. Für die Effektivität, mit der die angestrebte Rotation erreicht wurde, wurden mit beiden Ausrichtungsmethoden ebenfalls ähnliche Ergebnisse ermittelt. Die Abweichung der mittleren Effektivität zwischen beiden Methoden lag für die zentralen Inzisivi, Canini und Prämolaren bei maximal 14 %. Eine Ausnahme bildeten die lateralen Inzisivi und ersten Molaren, für die jeweils mit Methode 1 eine deutlich höhere Effektivität ermittelt wurde als mit Methode 2.

Bei den Rotationsbewegungen um die y-Achse (Abb. 15 und 26) zeigten die Ergebnisse der mittleren geplanten Zahnbewegung ebenfalls sehr ähnliche Werte für beide Matching-Methoden. Für die lateralen Inzisivi und Molaren entsprach sich die ermittelte Effektivität bei beiden Ausrichtungsmethoden. Für die zentralen Inzisivi lag die Effektivität bei Methode 1 leicht über dem Messwert aus Methode 2, für die zweiten Prämolaren lag er hingegen deutlich darüber. Die mittlere Effektivität, mit der die geplante Rotation von den Canini und ersten Prämolaren erreicht wurde, lag bei Methode 1 im negativen Bereich, bei Methode 2 verzeichneten diese Zähne Werte in Höhe von 11 bis 17 %. Die Ergebnisse beider Methoden zeigen, dass die Inzisivi und zweiten Prämolaren die angestrebte Zahnbewegung mit einer deutlich höheren Präzision erreichten als die Canini, ersten Prämolaren und Molaren.

Die Auswertung der Rotationsbewegungen um die z-Achse (Abb. 16 und 28) zeigt für den Umfang der geplanten Zahnbewegung bei beiden Methoden annähernd gleiche Ergebnisse. Die Effektivität, mit der die geplante Rotation tatsächlich erreicht wurde, lag bei beiden Matching-Methoden für alle Zahngruppen mit Ausnahme der Molaren im Bereich zwischen 60 bis 76 %. Mit dem t-Test wurde untersucht, ob sich die Messergebnisse zwischen den verschiedenen Analysemethoden sowie zwischen Oberkiefer und Unterkiefer signifikant unterscheiden. Es handelte sich um normalverteilte Daten. Da ein statistischer Vergleich der Effektivität der Zahngruppen untereinander aufgrund der stark abweichenden Zahnbewegungen wenig sinnvoll erscheint, wurde ein Paarvergleich durchgeführt. Es wurde untersucht, ob die ermittelten Effektivitäten für jede Zahngruppe im Vergleich zwischen den verschiedenen Analysemethoden (Tabelle 1) bzw. im

Vergleich Oberkiefer zu Unterkiefer (Tabelle 2) signifikante Unterschiede aufweisen. Als Signifikanzniveau wurde 0,05 festgelegt.

Beim t-Test in Tabelle 1 ergaben sich nur für die 1er bei Tx sowie für die 3er bei Ty statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Analysemethoden, welche durch einen minimalen Fehler in der Modellausrichtung bedingt sein können. Die geringe Anzahl an Abweichungen zeigt, dass mit Methode 2 annähernd die gleichen Ergebnisse erzielt werden können wie mit Methode 1. Beim t-Test in Tabelle 2 ergaben sich bei mehreren Paarvergleichen statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Effektivitäten der Ober- und Unterkieferzahnbewegung. Diese Abweichungen können durch die unterschiedliche Zahnmorphologie bedingt sein, welche den Kraftangriff des Aligners am Zahn limitiert. Eine weitere Diskussion dieses Sachverhalts erfolgt in Kapitel 5.2.

	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz
1er	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
2er	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
3er	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
4er	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
5er	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
6er	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Tabelle 1: Ergebnisse des t-Tests mit einem Signifikanzniveau von 0,05 zur Beurteilung der statistischen Signifikanz des Vergleichs von Matching-Methode 1 und 2 für die Ausrichtung der Oberkiefermodelle. Signifikante Unterschiede sind mit „*“ gekennzeichnet. Nicht signifikante Unterschiede sind mit „n.s.“ gekennzeichnet.

	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz
1er	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
2er	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
3er	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	*
4er	n.s.	*	*	n.s.	*	n.s.
5er	*	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.
6er	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Tabelle 2: Ergebnisse des t-Tests mit einem Signifikanzniveau von 0,05 zur Beurteilung der statistischen Signifikanz des Vergleichs der Ober- und Unterkieferzahnbewegung bei Matching-Methode 2. Signifikante Unterschiede sind mit „*“ gekennzeichnet. Nicht signifikante Unterschiede sind mit „n.s.“ gekennzeichnet.

5 Diskussion

5.1 Diskussion der Methode

Im Folgenden werden die ermittelten Ergebnisse beider Untersuchungsmethoden diskutiert und die Methoden hinsichtlich ihrer Validität kritisch analysiert. Mit Methode 1 wurde für mesio-distale Translationsbewegungen (T_x) für alle Zahntypen im Oberkiefer mit Ausnahme der zentralen Inzisivi eine mittlere Effektivität über 70 % ermittelt. Diese Ergebnisse liegen im Schnitt für alle Zähne mit Ausnahme der Eckzähne deutlich höher als bei Methode 2. Die mittlere geplante Translation ergab mit Methode 1 ebenfalls größere Bewegungen als mit Methode 2.

Die Effektivität der oro-vestibulären Translationsbewegungen (T_y) zeigt bei beiden Ausrichtungsmethoden ähnliche Ergebnisse, wobei die Inzisivi und zweiten Prämolaren mit Methode 1 eine etwas höhere Übereinstimmung von angestrebtem und tatsächlichem Behandlungsziel zeigen. Die Effektivität, mit der die Canini und ersten Prämolaren die geplante Zahnbewegung ausführen, zeigt deutliche Unterschiede zwischen beiden Methoden.

Es ist anzunehmen, dass ein Ausrichtungsfehler bei Matching-Methode 2 zu diesen abweichenden Messwerten bei den Translationsbewegungen auf der x- und y-Achse geführt hat. Es ist nicht sicher auszuschließen, dass eine geringe Bewegung der Referenzzähne stattgefunden hat. Durch Verwendung dieser Zähne als Referenzstruktur für die Überlagerung kann sich eine medio-laterale und antero-posteriore Diskrepanz in der Ausrichtung der Modelle ergeben, die zu größeren bzw. kleineren Messwerten als bei Methode 1 führt.

Die mittlere relative Effektivität der Intrusions- und Extrusionsbewegungen (T_z) liegt bei Methode 1 deutlich unter den Ergebnissen von Methode 2. Diese wesentlich höhere Effektivität der Intrusion bzw. Extrusion bei Methode 2 ergibt sich wiederum durch die gewählte Referenzstruktur. In einer Studie von Melkos [2005] wurde gezeigt, dass es im Rahmen der Invisalign-Behandlung zu einer vorübergehenden leichten Intrusion der Molaren kommen kann, die aber in der Retentionsphase korrigiert werde. Werden diese intrudierten Zähne als Referenzstruktur für die Überlagerung der Modelle gewählt, so ergeben sich gegebenenfalls zu große Werte für die Extrusion und zu kleine Werte für die Intrusion der anderen Zähne.

Bei der mittleren relativen Effektivität der Rotationsbewegungen um die x-Achse werden nur geringe Abweichungen der Ergebnisse zwischen den beiden Ausrichtungsmethoden ersichtlich. Eine Ausnahme bilden hier nur die lateralen Inzisivi und ersten Molaren, für die die ermittelte Effektivität bei Methode 1 deutlich höher ist als bei Methode 2.

Die mittlere relative Effektivität der Rotationen um die y-Achse zeigt für die Inzisivi und zweiten Prämolaren bei beiden Methoden deutlich höhere Werte als für die anderen Zähne. Jedoch unterscheidet sich die Höhe der Effektivität, mit der die einzelnen Zahntypen die angestrebte Rotation erreichen, zum Teil deutlich im Vergleich der beiden Methoden. Die zweiten Prämolaren verzeichnen bei Methode 1 eine mehr als doppelt so hohe Präzision bei der Zahnbewegung wie bei Methode 2. Die Canini und ersten Prämolaren zeigen bei Methode 1 eine Rotation entgegen der geplanten Richtung, während bei Methode 2 eine geringe Rotation in die angestrebte Richtung ermittelt wird. Die ermittelte Effektivität der Inzisivi und Molaren zeigt nur geringe Abweichungen zwischen beiden Methoden.

Die mittlere relative Effektivität der Rotationsbewegungen um die x-Achse zeigt bei beiden Ausrichtungsmethoden vergleichbare Ergebnisse, bei den Rotationen um die y-Achse zeigen sich teilweise etwas größere Abweichungen. Demzufolge scheint es bei der Ausrichtung des Modells um die x-Achse keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Matching-Methoden zu geben. Im Vergleich der Ergebnisse für die Rotation der Zähne um die y-Achse zeigen sich hingegen etwas größere Abweichungen zwischen den unterschiedlichen Überlagerungsmethoden. Das Ausmaß der geplanten In- und Extrusionen der Zähne in den benachbarten Quadranten scheint sich hierbei auf die Modellausrichtung und damit auf die Qualität des Matchings auszuwirken. Des Weiteren könnte die Ausrichtung durch den Umstand beeinflusst worden sein, dass die Patienten sich zum Zeitpunkt der Behandlung in der späten Wechselgebissphase befanden und nicht alle Zähne der Stützzone die Okklusionsebene vollständig erreicht hatten. Für die aufgetretenen Diskrepanzen zwischen den ermittelten Ergebnissen können zudem Überlagerungen der Translations- und Rotationsbewegungen der Zähne verantwortlich sein, die aus der unterschiedlichen Ausrichtungsmethode resultieren.

Bei der Rotation um die z-Achse zeigt sich ein konstantes Ergebnis für alle Zähne mit Ausnahme der Molaren. Bei beiden Methoden erreichen die Zahntypen die angestrebte Zahnbewegung mit einer mittleren Effektivität zwischen 60 – 76 %. In dieser Bewegungsrichtung scheint die Ausrichtungsmethode keinen eindeutigen Einfluss auf die Messergebnisse zu haben.

Um die Effektivität der Zahnbewegungen bei der Invisalign-Behandlung zu beurteilen, ist es notwendig, eine möglichst exakte Überlagerungsmethode für die Messungen anzuwenden. Ideal ist das Surface-Matching der Modelle an einer konstanten Referenzstruktur wie den Gaumenfalten. Das Matching ermöglicht in diesem Fall eine exakte Ausrichtung der Modelle in allen drei Raumebenen, ohne sich an den im Rahmen der orthodontischen Behandlung bewegten Zähnen zu

orientieren. Mögliche Ursachen für ein unzureichendes Matching können bei dieser Methode eine nicht einwandfrei abgeformte Referenzstruktur bzw. ein Verziehen des Abdrucks nach der Abformung sein.

Da die ideale Überlagerung der Modelle nur anhand des Gaumens möglich ist, kann diese Matching-Methode für Unterkiefermodelle nicht verwendet werden. Um eine Vergleichbarkeit der Zahnbewegungen in Ober- und Unterkiefer zu gewährleisten, wurde in der vorliegenden Untersuchung zusätzlich die Überlagerung beider Kiefer mit der allgemeinen Ausrichtungsmethode durchgeführt. Es wurden für diese Überlagerung Molaren als Referenzstruktur ausgewählt, die nicht aktiv kieferorthopädisch bewegt wurden. Allerdings können relative Bewegungen der Referenzzähne aufgrund der rein desmodontalen Verankerung nicht sicher ausgeschlossen werden, sodass hierdurch möglicherweise Ungenauigkeiten im Matching resultieren können. Die Erweiterung der Referenzstruktur um den punktereduzierten Zahnkranz wurde gewählt, um eine Verkipfung des zu überlagernden Modells zu vermeiden und der Software eine weitere Referenz in der z-Achse vorzugeben. Das Matching wurde manuell nachgebessert und korrigiert, weil bei der automatischen Ausrichtung zum Beispiel Fehler durch eine starke Protrusion oder Retrusion im Bereich der Frontzähne entstehen können. Da eine exakte Überlagerung der korrespondierenden Modelle die Grundvoraussetzung für die genaue Bestimmung der Zahnbewegung ist, fanden diese Faktoren bei der Durchführung des Surface-Matchings besondere Berücksichtigung. Die Zähne wurden zur Bestimmung der Zahnbewegung in den korrespondierenden Modellen einzeln mit einer „Lasso“-Funktion der Surfacer-Software segmentiert. Hier ist als Fehlerquelle anzumerken, dass die zu überlagernden Modelle gegebenenfalls minimale Unterschiede beim Ausschnitt des Zahnsegments aufweisen können, wodurch die Qualität des Matchings beeinflusst wird.

Aus den oben genannten Gründen sind bei der Überlagerung mit Methode 1 genauere Werte für die ermittelten Zahnbewegungen zu erwarten als mit Matching-Methode 2, da hier die gemessenen Zahnbewegungen durch die Wahl der Referenzstruktur gewisse Abweichungen in beide Richtungen zeigen können. Es stellt sich die Frage, ob diese Abweichungen klinisch relevant sind. Trotz der möglichen Ungenauigkeiten bei der Ausrichtung rechtfertigt die Notwendigkeit einer vergleichbaren Überlagerung von Ober- und Unterkiefermodellen die Anwendung der allgemeinen Matching-Methode. Im folgenden Kapitel werden aus diesem Grund nur die Ergebnisse der allgemeinen Methode ausführlich diskutiert.

5.2 Diskussion der Ergebnisse im Vergleich zur Literatur

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass bestimmte Zahnbewegungen mit einer sehr hohen Effektivität von Invisalign ausgeführt werden, während die Präzision anderer Bewegungskomponenten deutlich geringer ist. In diesem Kapitel werden die Untersuchungsergebnisse der allgemeinen Matching-Methode im Vergleich zu den Ergebnissen bisheriger Studien diskutiert. Für die Interpretation der ermittelten Ergebnisse wurde eine eigene Bewertungsskala (Abb. 30) erarbeitet:

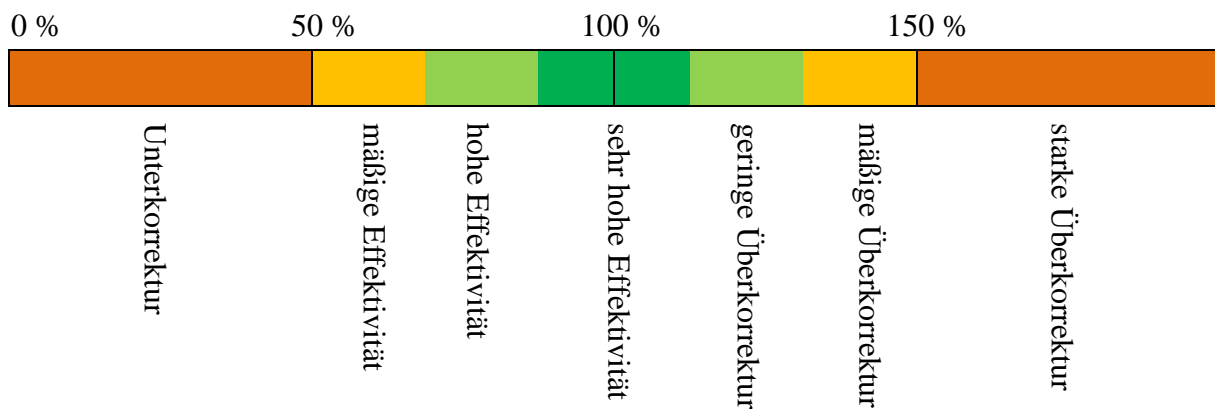


Abb. 30: Eigene Bewertungsskala zur Interpretation der Untersuchungsergebnisse. Der farbige Balken stellt die relative mittlere Effektivität der Zahnbewegung mit der jeweiligen Interpretation des Messwertes dar.

Die Messergebnisse zeigen, dass Translationsbewegungen in mesio-distaler Richtung (Tx) von den mandibulären zweiten Prämolaren mit sehr hoher Präzision (110 %) ausgeführt werden. Es folgen die mandibulären (116 %) und maxillären (79 %) Canini und die mandibulären lateralen Inzisivi (71 %), die die angestrebte Translation mit geringer Überkorrektur bzw. hoher Effektivität erreichen. Die mandibulären zentralen Inzisivi (132 %) und die maxillären lateralen Inzisivi (66 %) erreichen die geplante Zahnbewegung mit mäßiger Überkorrektur. Die maxillären zentralen Inzisivi zeigen mit einer mittleren Effektivität von 20 % eine deutliche Unterkorrektur der Zahnfehlstellung. Die maxillären zweiten Prämolaren (-69 %) und ersten Molaren (-40 %) scheinen mit Invisalign in dieser Bewegungsrichtung gar nicht kontrollierbar. In anderen Studien finden sich sehr unterschiedliche Ergebnisse zur Effektivität dieser Translationsbewegung. Für größere antero-posteriore Bewegungen der Seitenzähne mit Invisalign zeigten sich in den Studien

von Clements et al. [2003] und Djeu et al. [2005] Schwierigkeiten, was durch die vorliegenden Ergebnisse der Oberkieferzahnbewegungen bestätigt wird. Die Translation von Zähnen in mesio-distaler Richtung ist insbesondere bei der kieferorthopädischen Korrektur von Zahnengständen oder beim Lückenschluss nach Zahnextraktion von Bedeutung. Aufgrund des begrenzten Kraftansatzes des Aligners am Zahn ist grundsätzlich eher eine Zahnkipfung zu erwarten, als ein körperlicher Versatz des Zahns im Knochen. Hönn und Göz [2006] beschreiben im Gegensatz dazu den erfolgreichen Lückenschluss mit Invisalign nach Prämolarenextraktion. In der vorliegenden Studie konnte ebenfalls im Unterkiefer eine sehr hohe Effektivität für die mesio-distale Translation der zweiten Prämolaren beobachtet werden. Hahn et al. [2011] konnten feststellen, dass Aligner die Tendenz zeigen, sich in Abhängigkeit vom Ausmaß der geplanten Zahnbewegung von den Zähnen abzuheben, sodass gegebenenfalls kein wirksames Kräftepaar zur Kontrolle der körperlichen Zahnbewegung erzielt werden kann. Aus diesem Grund ist nicht sicher auszuschließen, dass die in der vorliegenden Studie ermittelten Translationsbewegungen möglicherweise durch reaktive Zahnkipfungen überlagert wurden. Djeu et al. betrachten den Lückenschluss als eine Stärke des Invisalign-Systems. In ihrer Studie wurden jedoch ebenso wie in der vorliegenden Analyse keine Extraktionsfälle vermessen. Beim Lückenschluss nach Extraktion wird für Multi-band-Bracket-Apparaturen weiterhin eine signifikant höhere Effektivität erwartet als für Invisalign [Djeu et al., 2005].

Die geplanten Translationsbewegungen in oro-vestibulärer Richtung (Ty) werden von den maxillären zentralen (109 %) und lateralen (104 %) Inzisivi mit einer sehr hohen Präzision ausgeführt, gefolgt von den maxillären zweiten Prämolaren (94 %) und den mandibulären ersten Prämolaren (91 %). Die mandibulären Canini (86 %) und die mandibulären lateralen Inzisivi (118 %) erreichen die angestrebte Translation mit hoher Effektivität bzw. geringer Überkorrektur. Die mandibulären ersten Molaren (-40 %) scheinen mit Invisalign in dieser Bewegungsrichtung nicht effektiv korrigierbar. Die maxillären Canini zeigen mit 20 % eine deutliche Unterkorrektur der Zahnfehlstellung. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die geplanten oro-vestibulären Translationen von allen Zähnen mit Ausnahme der Eckzähne im Oberkiefer sowie der zweiten Prämolaren und ersten Molaren im Unterkiefer mit einer hohen bis sehr hohen Effektivität erreicht werden. Die hohe Präzision der Translationsbewegung der mandibulären Canini und lateralen Inzisivi wird durch die Ergebnisse einer Studie von Kravitz et al. [2009] bestätigt. Als Zahnbewegung mit der höchsten Präzision erwies sich die linguale Translation der Canini (59,3 %) und lateralen Inzisivi (54,8 %). In der Untersuchung von Kravitz zeigte die Zahnbogenverengung im Sinne

einer Translation der Zähne nach oral mit im Mittel 47,1 % insgesamt die höchste Effektivität aller Zahnbewegungen. Es ist anzumerken, dass in der vorliegenden Studie nicht differenziert wurde zwischen Translation in vestibulärer bzw. in oraler Richtung, sondern dass diese Bewegungen zusammengefasst wurden zu „Translationsbewegungen auf der y-Achse“. Von besonderer Bedeutung sind diese Zahnbewegungen bei der Behandlung eines frontalen Überbisses, bei Lücken- bzw. Engständen und bei der Ausformung des Zahnbogens. Es zeigen sich für die Effektivität oro-vestibulärer Translationen mit Invisalign für alle Zahngruppen mit Ausnahme der maxillären Canini, mandibulären zweiten Prämolaren und ersten Molaren sehr vielversprechende Ergebnisse.

Die geplanten Translationen auf der z-Achse (In- und Extrusion) werden von allen Oberkieferzähnen sowie den mandibulären Prämolaren mit einer mittleren Effektivität von 41 bis 57 % ausgeführt und liegen damit im Bereich der Unterkorrektur bzw. mäßiger Effektivität. Diese Zahngruppen erreichen nur ungefähr die Hälfte der angestrebten Zahnbewegung. Im Unterkiefer zeigen die Canini mit 92 % eine sehr hohe Präzision der Zahnbewegung, gefolgt von den lateralen (132 %) und zentralen (134 %) Inzisivi mit mäßiger Überkorrektur. Die geplante Translation auf der z-Achse wird bei den Unterkiefermolaren mit 12 % deutlich unterkorrigiert. In anderen Studien zeigen sich große Diskrepanzen zwischen der Effektivität von Extrusion und Intrusion. Van Nguyen und Cheng [2006] ermittelten für Intrusionen der anterioren Zähne (79 %) eine signifikant höhere Effektivität als für Extrusionen (29 %). Die deutlich höhere Effektivität der Zahnbewegung bei den Unterkieferinzisivi in der vorliegenden Untersuchung ergibt sich möglicherweise durch die vergleichsweise kleine Wurzeloberfläche. Nach Kravitz et al. [2009] stellt die Extrusion ebenfalls die Zahnbewegung mit der geringsten Effektivität (29,6 %) dar, welche damit deutlich unter der Präzision der Intrusion (41,3 %) liegt. Es ist allerdings anzumerken, dass die Autoren nur in 17 % der Fälle Attachments zur Unterstützung der Extrusion verwendeten, wodurch die Effektivität der Extrusion maßgeblich beeinflusst werden kann. Im Unterschied zu den oben genannten Studien wurde in der vorliegenden Untersuchung nicht zwischen Intrusion und Extrusion differenziert, sondern diese Bewegungen zusammen als „Translation auf der z-Achse“ dargestellt. Dementsprechend beinhaltet die berechnete mittlere Effektivität möglicherweise ebenfalls höhere Werte für die Intrusion und niedrige Werte für die Extrusion. Krieger et al. [2011] stellten fest, dass Zahnstellungskorrekturen in der Vertikalebene schwieriger durchzuführen seien als in sagittaler oder transversaler Richtung. In der vorliegenden Studie erreichen alle Zahngruppen im Oberkiefer sowie die Unterkieferprämolaren nur ungefähr die Hälfte der angestrebten Zahnbewe-

gung und bestätigen damit diese Ergebnisse. Generell stellen Extrusionsbewegungen eine sehr große Herausforderung für Aligner dar, da der Zahn dem Aligner nur wenig Retentionsfläche für die Krafterzeugung in koronaler Richtung bietet. Runde Zähne wie Prämolaren und Canini weisen nur geringe Unterschnitte auf und bieten somit eine schlechte Angriffsfläche für die Extrusion [Van Nguyen und Cheng, 2006]. Die Wurzellänge und die Größe der Wurzeloberfläche spielen für die Effektivität der Extrusion bzw. Intrusion ebenfalls eine bedeutsame Rolle. Brezniak [2008] beschreibt als Nebenwirkung der Aligner den sogenannten Melonenkerneffekt. Dieser besagt, dass es bei der Bewegung eines Zahns durch die okklusal wirkenden Alignerkräfte zu einer ungewünschten Intrusion kommt. Durch Attachments, die die retentive Oberfläche zwischen Zahn und Schiene durch Unterschnitte und Vorwölbungen erhöhen, könne diese Intrusion vermindert und die geplante Zahnbewegung präziser ausgeführt werden (Abb. 31). In Anlehnung an diese Ergebnisse scheinen Zahnstellungskorrekturen in der Vertikalebene und hierbei insbesondere die Extrusion trotz verbesserter Hilfsmittel nicht mit hoher Präzision durch Invisalign korrigierbar. Eine weitere Verbesserung der Bewegungskontrolle wäre hier wünschenswert.



Abb. 31: Die Pfeile zeigen auf zahnfarbene Attachments aus Komposit zur Unterstützung der Zahnbewegung mit dem Aligner [Foto wurde zur Verfügung gestellt von Dr. med. dent. N. Daratsianos, Poliklinik für Kieferorthopädie, Universitätsklinikum Bonn].

Bei den Rotationsbewegungen um die x-Achse (oro-vestibuläre Zahnkipfung) weisen die mandibulären Canini (98 %) eine sehr hohe Effektivität auf, gefolgt von den mandibulären lateralen

Inzisivi (82 %), den maxillären (78 %) und mandibulären (77 %) zentralen Inzisivi sowie den maxillären Canini (72 %) mit hoher Effektivität. Die geringste Übereinstimmung zwischen angestrebter und erzielter Rotation zeigen die mandibulären Prämolaren und Molaren mit -6 bis -20 %. Die oro-vestibuläre Rotation dieser Zahngruppen scheint mit Invisalign nicht effektiv kontrollierbar. Insgesamt führen die Prämolaren und Molaren die Rotation in oro-vestibulärer Richtung mit einer deutlich geringeren Präzision aus als die Inzisivi und Canini, mit Ausnahme der maxillären lateralen Inzisivi (32 %). In der Studie von Kravitz et al. [2009] wurde für die Rotation der anterioren Zähne eine mittlere Effektivität von 40,3 bis 47,4 % ermittelt, wobei die Zahnkipfung nach oral mit einer signifikant höheren Effektivität (53,1 %) erreicht wurde als nach vestibulär (37,6 %). Die in der vorliegenden Studie ermittelten Werte liegen mit 72 bis 98 % mittlerer Effektivität deutlich über der bisher angenommenen Effektivität für Rotationsbewegungen der anterioren Zähne um die x-Achse. Allerdings wurde in der vorliegenden Studie nicht zwischen Rotationen nach oral bzw. nach vestibulär differenziert. Zur Durchführung einer Zahnkipfung ist die Applikation einer Einzelkraft im Bereich der Zahnkrone notwendig, die mittels herausnehmbarer Apparaturen, zu denen auch das Invisalign System gehört, erreicht werden kann. Durch die Lage des Kraftansatzpunktes werden so überwiegend unkontrollierte Kippungen ausgeführt. Rotationen in oraler oder vestibulärer Richtung sind bei der Aufrichtung gekippter Zähne von zentraler Bedeutung. Diese Rotation der Inzisivi und Canini kann durch Invisalign mit hoher Präzision erreicht werden. Für die Prämolaren und Molaren zeigt sich noch Steigerungsbedarf hinsichtlich der Effektivität der Zahnbewegung, damit in Zukunft auch größere Rotationen der Seitenzähne mit Invisalign erfolgreich durchgeführt werden können.

Die geplanten Rotationen in mesio-distaler Richtung (Ry) werden nur von den maxillären lateralen Inzisivi (87 %) mit hoher Effektivität erreicht, gefolgt von den mandibulären zentralen Inzisivi (61 %) mit mäßiger Effektivität. Die übrigen Zahngruppen führen die angestrebte Rotation mit geringer Präzision (11 – 47 %) aus. Die Zahnfehlstellung dieser Zähne wird in dieser Bewegungsrichtung unterkorrigiert. Kravitz et al. [2009] konnten mit einer mittleren Effektivität von 40,5 % für mesio-distale Zahnkippungen ebenfalls ähnliche Messwerte für diese Bewegung feststellen. In der Studie von Kravitz erreichten die lateralen Oberkieferinzisivi (43,1 %) und die Unterkieferinzisivi (48,6 %) das Behandlungsziel mit der höchsten Präzision. Am geringsten war die Übereinstimmung bei den maxillären (35,5 %) und mandibulären (26,9 %) Canini sowie den zentralen Oberkieferinzisivi (38,6 %). Kravitz et al. schlussfolgerten, dass Zähne mit großen Wurzeln bei mesio-distalen Zahnbewegungen möglicherweise größere Schwierigkeiten verursa-

chen. Die maxillären ersten Molaren zeigen in der vorliegenden Studie mit einer mittleren Effektivität von -18 % ebenfalls, dass mesio-distale Rotationsbewegungen der Molaren nicht kontrolliert durchgeführt werden können. Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass die Zähne mit der grazilsten Zahnwurzel die mesio-distale Rotation mit der höchsten Präzision ausführen. Wegen des mangelhaften Kraftangriffs des Aligners scheinen die angestrebten mesio-distalen Rotationen mit Invisalign bei den meisten Zähnen nur in geringem Maße realisierbar zu sein. Für eine Zahnstellungskorrektur in dieser Richtung scheint aus diesem Grund eine Überkorrektur ratsam.

Die geplanten Rotationsbewegungen um die Zahnlängsachse (Rz) werden in der vorliegenden Studie von allen Zähnen mit Ausnahme der Unterkiefermolaren mit einer mäßigen bis hohen Effektivität von 63 – 81 % erreicht. Die mandibulären ersten Molaren zeigen mit einer Effektivität von 20 % eine deutliche Unterkorrektur der Zahnfehlstellung. Die Ergebnisse dieser Studie unterscheiden sich maßgeblich von den bisher veröffentlichten Ergebnissen. In der Studie von Kravitz et al. [2009] zeigten sich für die Rotation um die Zahnlängsachse statistisch signifikante Unterschiede für die unterschiedlichen Zahngruppen. Die Canini führten die geplante Rotation mit einer signifikant geringeren Präzision (35,8 %) als alle anderen Zähne aus, mit Ausnahme der maxillären lateralen Inzisivi. Die höchste Effektivität zeigten die maxillären zentralen Inzisivi (54,2 %) und mandibulären lateralen Inzisivi (51,6 %). Diese Ergebnisse belegen auch Van Nguyen und Cheng [2006], in deren Studie die Inzisivi (60 %) die höchste Präzision zeigten, während die Canini und Prämolaren nur eine Effektivität von 39 % erreichten. Kravitz et al. [2009] weisen darauf hin, dass sich in ihrer Untersuchung kein Unterschied zwischen der Effektivität der Eckzahnbewegung im Oberkiefer und Unterkiefer zeigte. Sie schlussfolgerten, dass die Morphologie der Zahnkrone einen größeren Einfluss auf die Effektivität der Zahnbewegung habe als die Größe der Zahnkrone. Die Derotation von Zähnen mit zylindrischer Kronenform, wie Canini und Prämolaren, stellt sich als biomechanische Herausforderung für Invisalign dar. Aufgrund der fehlenden approximalen Unterschnitte bietet die Zahnkrone keine ausreichende Kraftangriffsmöglichkeit, sodass der Aligner beim Rotationsversuch abrutscht [Kravitz et al., 2008; Van Nguyen und Cheng, 2006]. Es empfiehlt sich dementsprechend eine Überkorrektur der Zahnfehlstellung sowie der Einsatz von labial und lingual platzierten Attachments, um die geplante Rotation zu unterstützen [Boyd und Vlaskalic, 2001; Kuo und Duong, 2006]. In der vorliegenden Studie wurden bereits zu Beginn der Behandlung Attachments appliziert, wodurch sich die höhere Effektivität der Zahnbewegung im Vergleich zu anderen Studien erklären lassen könnte. Rotationsbewegungen um die Zahnlängsachse können offensichtlich von Invisalign unter Einsatz von

Attachments nur mit einer befriedigenden Effektivität durchgeführt werden, wenn eine gewisse Überkorrektur bereits im ClinCheck festgelegt wird.

5.3 Diskussion der Behandlungsmethode im Hinblick auf die ermittelte Effektivität

Die Vor- und Nachteile von Invisalign wurden bereits in zahlreichen Studien beschrieben [Chenin et al., 2003; Joffe, 2003; Melkos, 2005; Vlaskalic et al., 2001; Vlaskalic und Boyd, 2002]. Die ästhetischen Vorzüge sind sicherlich der größte Vorteil des Invisalign-Systems gegenüber konventionellen festsitzenden kieferorthopädischen Apparaturen. Außerdem sind die einfache Handhabbarkeit, der hohe Tragekomfort und eine verkürzte Stuhlzeit hervorzuheben [Joffe, 2003; Vlaskalic et al., 2001]. Ein weiterer Pluspunkt des computergestützten Therapieverfahrens ist die Möglichkeit, das geplante Behandlungsziel im Voraus mit dem Patienten besprechen und ihn konkret mit in die Behandlungsplanung einbeziehen zu können [Vlaskalic et al., 2001].

Die Befestigungsschwierigkeit von Brackets auf Restaurationsmaterialien entfällt bei der Invisalign-Behandlung und etwaige Metallallergien können vermieden werden [Chenin, 2003]. Schupp und Haubrich [2010a] stellten fest, dass unerwünschte Nebenwirkungen festsitzender Zahnspangen wie Demineralisationen, Schmelzabrasionen durch Bracket-Kontakt, Schmelzläsionen bei Bracketentfernung sowie parodontale Risiken bei der Therapie mit Invisalign-Schienen geringer sind als bei einer festsitzenden kieferorthopädischen Behandlung. Herausnehmbare kieferorthopädische Apparaturen führen zu signifikant weniger entzündlichen Gingivareaktionen als festsitzende Geräte [Müller und Flores de Jacoby, 1982]. Barbagallo et al. [2008] konnten feststellen, dass unerwünschte externe Wurzelresorptionen im Rahmen der Schienenbehandlung in etwa vergleichbar sind mit dem Einsatz von leichten kieferorthopädischen Kräften in der Multi-bandtherapie. Ein weiterer großer Vorteil der Invisalign-Therapie sei, dass durch die 22-stündige Tragedauer die parodontologische Sicherheit herausnehmbarer Geräte mit der Therapiesicherheit festsitzender Apparaturen kombiniert werden könne [John, 2001].

Diesen Vorteilen gegenüber stehen die bereits oben erwähnten Indikationseinschränkungen und Limitationen des Systems. Joffe [2003] weist darauf hin, dass komplexere Malokklusionen und ausgeprägte Engstände für die Invisalign-Therapie nicht geeignet seien und dass die Zähne mit Alignern nur eingeschränkt translatorisch bewegt werden könnten. Extraktionsfälle sollten sehr zurückhaltend mit Invisalign behandelt werden, da hierbei eine starke kippende Bewegung der Zähne in die Extraktionslücke auftreten kann [Bollen et al., 2003]. Diese Ergebnisse werden auch

in der vorliegenden Studie bestätigt. So zeigen die zweiten Prämolaren bei mesio-distalen Translationsbewegungen, die zum Schluss der Lücke nach Extraktion eines ersten Prämolaren erforderlich sind, eine Effektivität von -69 %. Es wird deutlich, dass diese körperliche Zahnbewegung der zweiten Prämolaren mit Invisalign schwer kontrollierbar ist. Nach Womack et al. [2002] sind ausgeprägte Rotationen und Extrusionen sowie große Translationsbewegungen mit dem System schlecht vorhersagbar und verlangen gegebenenfalls zusätzliche Therapiehilfsmittel.

Weitere Limitationen des Systems sind die Mesialisierung von Molaren um mehr als 1,5 mm, die Aufrichtung gekippter Molaren und absoluter Wurzeltorque, welche nur durch eine zusätzliche Teilmultiband-Bracket-Apparatur zu realisieren seien [Schupp und Haubrich, 2010a]. Kuncio et al. [2007] beobachteten ein größeres Rezidiv bei Invisalign-Patienten gegenüber Patienten mit festsitzenden Geräten.

Für Boyd [2008] gilt die Patientencompliance als kritischster Faktor für den Erfolg der Invisalign-Behandlung, welcher bei festsitzender Behandlung hingegen gesichert sei. Als weitere Nachteile von Invisalign sind das mögliche vorübergehende Auftreten eines posterior offenen Bisses durch die Materialstärke der Schiene sowie die relativ hohen Behandlungskosten zu nennen [Vlaskalic und Boyd 2002; Melkos, 2005]. Die Disklusion durch die körperliche Umfassung der Zähne erleichtert jedoch die Therapie von dentalem Kreuzbiss oder frontalem Tiefbiss [Boyd et al., 2006].

Das Eingreifen in den Behandlungsplan oder die Modifizierung des Therapieziels während der Behandlungsphase ist primär nicht vorgesehen [Joffe, 2003]. Besteht die Notwendigkeit, den Behandlungsplan zu korrigieren, müssen neue Schienen angefertigt werden. Weiterhin sind konservierende oder prothetische Restaurationen während der Aligner-Behandlung problematisch, da die Passgenauigkeit der folgenden Schienen unter Umständen nicht mehr gewährleistet ist [Sander et al., 2009]. Die Flexibilität des Alignermaterials und die Variabilität der parodontalen Reaktion auf die Kraftapplikation können unter Umständen dazu führen, dass die geplanten Zahnbewegungen mit einem Aligner nicht erreicht werden [Cao und Duong, 2006].

Stellt man die oben genannten Vor- und Nachteile des Invisalign-Systems der Effektivität der Behandlungsmethode gegenüber, so stellt sich Invisalign bei der richtigen Indikationsstellung durchaus als gute kieferorthopädische Behandlungsalternative für ästhetisch anspruchsvolle Patienten dar. Die Kenntnisse der klinischen Möglichkeiten und Limitationen des Systems bilden hierbei die Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Behandlung.

5.4 Klinische Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die angewendete allgemeine Analyse­methode (Matching-Methode 2) geeignet ist, um Zahn­bewegungen durch die Invisalign-Behandlung zu untersuchen. Eine absolute Aussage über die Eignung der Methode ist aufgrund der geringen Patientenzahl jedoch nur eingeschränkt möglich. Derzeit erfolgen weitere Untersuchungen an Patientenmodellen mit der entwickelten Matching-Methode 2. Weiterhin zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass eine Vielzahl von Zahn­fehlstellungen effektiv mit Invisalign korrigiert werden kann. Mit der größten Effektivität können mesio-distale sowie oro-vestibuläre Translationen ausgeführt werden. Bestimmte Zahn­bewegungen werden im Rahmen der Invisalign-Behandlung jedoch unterkorrigiert. Dies betrifft insbesondere Translationsbewegungen in korono-apikaler Richtung sowie mesio-distale Zahn­kip­pungen und Rotationen um die Zahn­längsachse. Als klinische Konsequenz ergibt sich daraus die Notwendigkeit einer Überkorrektur der Zahn­fehlstellung im ClinCheck, um das gewünschte Behandlungsziel zu erreichen (Abb. 32). Kuo [2006] schlägt vor, die nötige Überkorrektur für Frontzahnrotationen, geringe Lücken und frontalen Tiefbiss erst im Rahmen eines Case refinement vorzunehmen. Die Beurteilung welche Zähne überkorrigiert werden müssen, sei zu diesem Zeitpunkt eindeutiger.

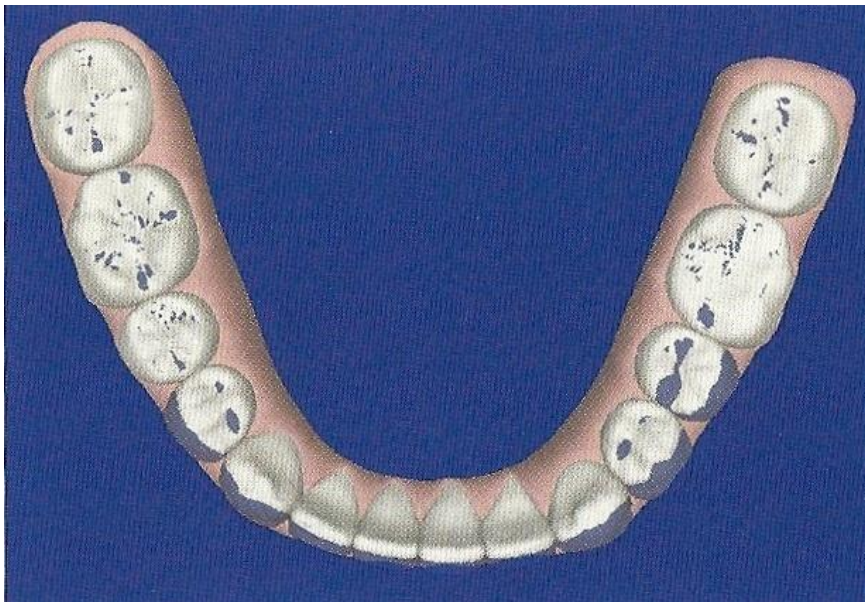


Abb. 32: Beispiel für eine Überkorrektur der Zahn­fehlstellung im ClinCheck (dunkelblau) um das geplante Behandlungsziel (weiß) zu erreichen [Kuo, 2006].

Align Technology empfiehlt außerdem den Einsatz von Attachments, approximaler Schmelzreduktion und weiterer Hilfsmittel um die Durchführung komplizierter Zahnbewegungen zu erleichtern. Um die Kontrolle über vertikale Zahnbewegungen zu verbessern, sollen horizontal abgeschrägte, rechtwinkelige Attachments auf die Prämolaren appliziert werden, um die Alignerretention zu erhöhen. Für die zusätzliche Unterstützung der Extrusion ist der Einsatz von vertikalen Gummizügen möglich. Wird das Behandlungsziel nicht vollständig erreicht, kann die Zahnfehlstellung im Rahmen eines Case refinement korrigiert werden. Mit herausnehmbaren kieferorthopädischen Geräten sind vor allem kippende Zahnbewegungen möglich. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen jedoch, dass mit dem Invisalign-System in bestimmtem Umfang auch körperliche Zahnbewegungen, In- und Extrusionen sowie Rotationen um die Zahnlongsachse durchführbar sind. Es zeigt sich, dass die Präzision, mit der das angestrebte Behandlungsziel erreicht wird, im Wesentlichen von der Art der Zahnbewegung sowie vom Zahntyp abhängig ist. Eine umfangreiche Diagnostik sowie die Kenntnis der biomechanischer Prinzipien und Limitationen des Systems stellen die Grundlage für eine erfolgreiche Invisalign-Behandlung dar.

6 Zusammenfassung

Die Nachfrage nach „unsichtbaren“ Behandlungsmethoden hat in der Kieferorthopädie in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Mit einer Serie von herausnehmbaren Aligern ermöglicht das Invisalign-System dem Patienten neben guter Ästhetik einen hohen Tragekomfort und uneingeschränkte Mundhygienemöglichkeiten. Während sich das Indikationsspektrum von Invisalign in der Vergangenheit eher auf die Korrektur milder bis moderater Zahnfehlstellungen beschränkte, wird inzwischen in der Literatur immer häufiger die erfolgreiche Behandlung von komplexeren Malokklusionen beschrieben. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie effektiv bestimmte Zahnbewegungen mit Invisalign durchgeführt werden können.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde die Effektivität des Invisalign-Teen-Systems analysiert und eine geeignete Analyseverfahren validiert. Durch Überlagerung der digitalisierten Patienten- und ClinCheck-Modelle konnten die angestrebten und erfolgten Zahnbewegungen bestimmt werden. Anhand eines Vergleichs von prognostiziertem und tatsächlich erreichtem Behandlungsergebnis wurde die Effektivität der Zahnbewegung für die Bewegungskomponenten Translation und Rotation in allen drei Raumebenen ermittelt. Es wurden drei Varianten zur Ausrichtung der Situationsmodelle verwendet: (1) automatische Ausrichtung an den Gaumenfalten, (2) automatische Ausrichtung an nicht bewegten Molaren und dem Zahnbogen und (3) wie (2) mit zusätzlicher manueller Korrektur des Matchings. Die Analyseverfahren 3 erwies sich als geeignet für die Bestimmung der Zahnbewegung im Rahmen der Invisalign-Behandlung, wobei aufgrund der geringen Patientenzahl nur eine eingeschränkte absolute Aussage über die Eignung der Methode möglich ist.

Es zeigte sich, dass mesio-distale Translationen an den mandibulären zweiten Prämolaren mit einer sehr hohen Effektivität (110 %) ausgeführt werden konnten, gefolgt von den Canini und Inzisivi (66 - 132 %). Die geplanten oro-vestibulären Translationen wurden bei fast allen Zahngruppen mit einer Effektivität von 71 bis 118 % ausgeführt und zeigten damit ebenfalls eine hohe bzw. sehr hohe Effektivität. Korono-apikale Translationen (In- und Extrusion) wurden bei allen Oberkieferzähnen sowie den mandibulären Prämolaren nur ungefähr zur Hälfte (41 – 57 %) ausgeführt. Im Unterkiefer zeigten die Canini und Inzisivi (92 - 134 %) eine sehr hohe Effektivität dieser Zahnbewegung. In anderen Studien zeigten sich allerdings große Diskrepanzen zwischen der Effektivität von Extrusion- und Intrusion zu Lasten der Extrusion. Angesichts dieser Tatsache scheinen Zahnstellungskorrekturen in der Vertikalebene und hierbei insbesondere die Extrusion

trotz verbesserter Hilfsmittel nicht mit hoher Effektivität korrigierbar. Oro-vestibuläre Rotationen der Inzisivi und Canini wurden durch Invisalign mit hoher bzw. sehr hoher Effektivität durchgeführt (72 – 98 %). Mesio-distale Zahnkippen waren mit Invisalign bei den meisten Zähnen nur in geringem Maße realisierbar (11 – 47 %). Rotationen um die Zahnlängsachse konnten mit Invisalign bei allen Zähnen mit Ausnahme der Unterkiefermolaren mit einer Effektivität von 63 bis 81 % erreicht werden.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass mesio-distale sowie oro-vestibuläre Translationen mit der höchsten Effektivität ausgeführt wurden. Translationsbewegungen in korono-apikaler Richtung sowie mesio-distale Zahnkippen und Rotationen um die Zahnlängsachse wurden von Invisalign im Mittel unterkorrigiert. Hier zeigte sich ein Verbesserungsbedarf der Behandlungsmethode. Es empfiehlt sich daher neben der Applikation von Attachments eine Überkorrektur dieser Zahnfehlstellungen im ClinCheck, um das angestrebte Behandlungsziel zu erreichen. In Anbetracht der Ergebnisse stellt die Invisalign-Technik bei ästhetisch anspruchsvollen Patienten unter Berücksichtigung der klinischen Limitationen eine gute Behandlungsmöglichkeit dar. Profunde Kenntnisse der Limitationen und Möglichkeiten von Invisalign stellen die Grundlage für eine erfolgreiche Behandlung dar. Ebenso kommen der gründlichen Diagnostik und dem Verständnis der biomechanischen Prinzipien des Systems insbesondere bei der Behandlung komplexer Zahnfehlstellungen eine große Bedeutung zu.

7 Literaturverzeichnis

Almeida MA, Phillips C, Kula K, Tulloch C. Stability of the palatal rugae as landmarks for analysis of dental casts. *Angle Orthod* 1995; 65: 43-48

Andersen CE, Schramm E. The bioplast positioner – a new production method. *J Clin Orthod* 1976; 10: 692- 697

Andersen KL, Mortensen HT, Pedersen EH, Melsen B. Determination of stress levels and profiles in the periodontal ligament by means of an improved three dimensional finite element model for various types of orthodontic and natural force systems. *J Biomed Eng* 1991; 13: 293-303

Barbagallo LJ, Jones AS, Petocz P, Darendeliler MA. Physical properties of root cementum: Part 10. Comparison of the effects of invisible removable thermoplastic appliances with light and heavy orthodontic forces on premolar cementum. A microcomputed-tomography study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2008; 133: 218-227

Beers A, Duong T. Mechanics of tooth movement with Invisalign. In: Tuncay OC, Hrsg. *The Invisalign System*. New Malden, United Kingdom: Quintessenz, 2006: 149-151

Bishop A, Womack WR, Derakhshan M. An esthetic and removable orthodontic treatment option for patients: Invisalign. *Dent Assist* 2002; 71: 14-17

Bollen AM, Huang G, King G, Hujoel P, Ma T. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 1: Ability to complete treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003; 124: 496-501

Bourauel C, Wolter H, Drescher D. Können die Kraftsysteme von Positionern durch den zusätzlichen Einsatz von Attachments beeinflusst werden? Eine experimentelle Studie. *Kieferorthop* 1997; 11: 183-190

Boyd RL. Esthetic orthodontic treatment using the Invisalign Appliance for moderate to complex malocclusions. *J Dent Educ* 2008; 72: 948-967

Boyd RL, Miller RJ, Vlaskalic V. The Invisalign System in adult orthodontics: mild crowding and space closure cases. *J Clin Orthod* 2000; 34: 203-213

Boyd RL, Oh HS, Fallah M, Vlaskalic V. An update on present and future considerations of aligners. *J Calif Dent Assoc* 2006; 34: 793-805

Boyd RL, Vlaskalic V. Three-dimensional diagnosis and orthodontic treatment of complex malocclusions with the Invisalign Appliance. *Semin Orthod* 2001; 7: 274-293

Brachwitz J. Über die Bedeutung der Ästhetik für die Erwachsenenkieferorthopädie. *Kieferorthopädie Sonderheft Invisalign* 2001; 15: 7-10

Brachwitz J, Miethke RR. Die Entwicklungsgeschichte von Align Technology. *Kieferorthopädie Sonderheft Invisalign* 2001; 15: 55-56

Brezniak N. The clear plastic appliance: A biomechanical point of view. *Angle Orthod* 2008; 78: 381-382

Burstone CJ, Pryputniewicz RJ. Holographic determination of centers of rotation produced by orthodontic forces. *Am J Orthod* 1980; 77: 396-409

Burstone CJ, Pryputniewicz RJ, Weeks R. Centers of resistance of the human mandibular molars. *J Dent Res* 1981; 60: 515

Cao H, Duong T. Applications of mechanics with Invisalign. In: Tuncay OC, Hrsg. *The Invisalign System*. New Malden, United Kingdom: Quintessenz, 2006: 153-161

Chenin DA, Trosien AH, Fong PF, Miller RA, Lee RS. Orthodontic treatment with a series of removable appliances. *JADA* 2003; 134: 1232-1239

Christensen GJ. Orthodontics and the general practitioner. *JADA* 2002; 133: 369-371

Clements KM, Bollen AM, Huang G, King G, Hujoel P, Ma T. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 2: Dental improvements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003; 124: 502-508

Collet AR, Cook WD, West VC. Mechanical properties of some polymer materials used for tooth positioners. *Aust Dent J* 1994; 39: 298-305

Cottingham LL. Gnathologic clear plastic positioner. *Am J Orthod* 1969; 55: 23-31

Djeu G, Shelton C, Maganzini A. Outcome assessment of Invisalign and traditional orthodontic treatment compared with the American Board of Orthodontics objective grading system. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2005; 128: 292-298

Elsasser WA. Some observations on the history and uses of the Kesling positioner. *Am J Orthod* 1950; 36: 368-374

Faltin RM, de Almeida MAA, Kessner CA, Faltin K. Efficiency, three-dimensional planning and prediction of the orthodontic treatment with the Invisalign System: case report. *R Clin Orthod Dent* 2003; 2: 61-71

Göz G. Stellungnahme der DGKFO zur Behandlung mit Alignern - Stand Januar 2010. Internet: http://www.dgkfo-vorstand.de/fileadmin/redaktion/stellungnahmen/Stellungnahme_Aligner.pdf (Zugriffsdatum 04.01.2012)

Gottlieb EL. Success and failure with the positioner appliance. Report of 100 cases. *J Pract Orthod* 1968; 2: 506-522

Grobe J. Inaugural-Dissertation: Dreidimensionale Analyse von Invisalign-Behandlung. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2011

Hahn W, Zapf A, Dathe H, Fialka-Fricke J, Fricke-Zech S, Gruber R, Kubein-Meesenburg D, Sadat-Khonsari R. Wurzelbewegung an einem oberen mittleren Schneidezahn mithilfe von Aligern – einwirkende Kräfte und biomechanische Grundlagen. *Inf Orthod Kieferorthop* 2011; 43: 97-104

Harzer, W. Kieferorthopädie. Stuttgart: Thieme, 2011

Hinz R. Das Elasto-KFO-System – Eine Weiterentwicklung des Positioners. *Prakt Kieferorthop* 1991; 5: 179-188

Hönn M, Göz G. A premolar extraction case using the Invisalign system. *J Orofac Orthop* 2006; 67: 385-394

Hoggan BR, Sadowsky C. The use of palatal rugae for the assessment of anteroposterioer tooth movements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2001; 119: 482-488

Joffe L. Invisalign: early experiences. *J Orthod* 2003; 30: 348-352

John HD. Erwachsenenkieferorthopädie und parodontale Aspekte. *Kieferorthopädie Sonderheft Invisalign* 2001; 15: 11-16

Kahl-Nieke B. Einführung in die Kieferorthopädie. München: Urban & Schwarzenberg, 2001

Kahl-Nieke B. Retention, Stabilität, Rezidiv. In: Diedrich P, Hrsg. *Praxis der Zahnheilkunde, Kieferorthopädie III*. München: Urban & Fischer, 2002, 4.Auflage: 209-239

Kahl-Nieke B. Optimaler Zeitpunkt für die Durchführung kieferorthopädischer Maßnahmen unter besonderer Berücksichtigung der kieferorthopädischen Frühbehandlung. Überarbeitete Stellungnahme der DGKFO April 2010. Internet: http://www.dgkfo-vorstand.de/fileadmin/redaktion/stellungnahmen/Stellungnahme_Behandlungsbeginn.pdf (Zugriffsdatum 15.01.2012)

Kaza S. Scanning process and stereolithography. In: Tuncay OC, Hrsg. The Invisalign System. New Malden, United Kingdom: Quintessenz, 2006: 47-54

Keilig L, Piesche K, Jäger A, Bourauel C. Applications of surface-surface matching algorithms for determination of orthodontic tooth movements. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 2003; 6: 353-359

Kesling HD. The tooth positioning appliance as the means of final positioning of teeth to a predetermined pattern. *J Dent Child* 1944; 11: 103-105

Kesling HD. The philosophy of the tooth positioning appliance. *Am J Orthod Oral Surg* 1945; 31: 297-304

Kesling HD. Coordinating the predetermined pattern and tooth positioner with conventional treatment. *Am J Orthod Oral Surg* 1946; 32, 285-293

Kravitz ND, Kusnoto B, Agran B, Viana G. Influence of attachments and interproximal reduction on the accuracy of canine rotation with Invisalign. A prospective clinical study. *Angle Orthod* 2008; 78: 682-687

Kravitz ND, Kusnoto B, BeGole E, Obrez A, Agran B. How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009; 135: 27-35

Krieger, E, Seiferth J, Saric I, Jung BA, Wehrbein H. Accuracy of Invisalign treatments in the anterior tooth region: First results. *J Orofac Orthop* 2011; 72:141-149

Krishnan V, Davidovitch Z. Cellular, molecular, and tissue-level reactions to orthodontic force. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2006; 129, 469.e1-32

Kuncio D, Maganzini A, Shelton C, Freeman K. Invisalign and traditional orthodontic treatment postretention outcomes compared using the American Board of Orthodontics objective grading system. *Angle Orthod* 2007; 77: 864-869

Kuo E. Overcorrection: principles and considerations. In: Tuncay OC, Hrsg. *The Invisalign System*. New Malden, United Kingdom: Quintessenz, 2006: 115-119

Kuo E, Duong T. Invisalign attachments: Materials. In: Tuncay OC, Hrsg. *The Invisalign System*. New Malden, United Kingdom: Quintessenz, 2006: 91-97

Kuo E, Hordt C. Attachments in der Invisalign-Therapie. *Kieferorthopädie Sonderheft Invisalign* 2001; 15: 25-28

Kwon JS, Lee YK, Lim BS, Lim YK. Force delivery properties of thermoplastic orthodontic materials. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2008; 133: 228-234

Lagravère MO, Flores-Mir C. The treatment effects of Invisalign orthodontic aligners - A systematic review. *J Am Dent Assoc* 2005; 136: 1724-1729

Lindauer SJ, Shoff RC. Comparison of Essix and Hawley Retainers. *J Clin Orthod* 1998; 32: 95-97

Lorentz H. Treatment with preformed positioners. *Trans Eur Orthod Soc, Third international orthodontic congress*, 1973; 207-213

Manhartsberger C, Richter M. Der geteilte Positioner. *Zahnärztl Prax* 1989; 40: 6-7

McKenna S. Invisalign: Technology or mythology? *J Mass Dent Soc* 2001; 50: 8-9

McNamara JA, Brudon WL. Invisible retainers and aligners. In: McNamara JA, Brudon WL, Hrsg. *Orthodontics and dentofacial orthopedics*. Ann Arbor, Michigan: Needham Press, 2001: 475-486

McNamara JA, Kramer KL, Juenker JP. Invisible Retainers. *J Clin Orthod*. 1985; 19: 570-578

Melkos AB. Advances in digital technology and orthodontics: a reference to the Invisalign method. *Med Sci Monit* 2005; 11: 139-142

Miethke RR. Invisalign, die Korrektur mit der durchsichtigen Schiene. *ZM* 2002, 92: 40-45

Miller RJ, Duong TT, Derakhshan M. Lower incisor extraction treatment using the Invisalign System. *J Clin Orthod* 2002; 36: 95-102

Miller RJ, Hordt C. Behandlung von Patienten mit frontalem Engstand mit Hilfe des Invisalign-Systems – zwei Patientenberichte. *Kieferorthopädie Sonderheft Invisalign* 2001; 15: 29-38

Müller HP, Flores de Jacoby L. Zusammensetzung der subgingivalen Mundflora bei Trägern fest-sitzender kieferorthopädischer Geräte. *Dtsch Zahnarzt Z* 1982; 37: 855-860

Nahoum HI. The vacuum formed dental contour appliance. *NY State Dent J* 1964; 9: 385-390

Nishiyama M, Kamada K, Horiuchi S. A new construction of tooth positioner by LTV vinyl silicone rubber. *J Nihon Univ Sch Dent* 1977; 19: 93-102

Phan X, Ling PH. Clinical Limitations of Invisalign. *J Canad Dent Assoc* 2007; 73: 263-266

Ponitz RJ. Invisible retainers. *Am J Orthod* 1971; 59: 266-272

Prestel B, Drescher D, Bourauel C. Kräfte und Drehmomente beim Einsatz von Positionern. *Kieferorthop* 1995; 9: 117-120

Rinchuse DJ, Rinchuse DJ. Active tooth movement with Essix-based appliances. *J Clin Orthod* 1997; 31: 109-112

Rollet D, Graindorge JC, Guezennec P. Ein neues Therapiekonzept: Die Elastodontie. *Inf Orthod Kieferorthop* 1991; 23: 527-544

Rost D, Schwarze CW, Hilgers RD. Materialeigenschaften der Werkstoffe für Positioner – Eine in-vitro Untersuchung. *Fortschr Kieferorthop* 1993; 54: 71-75

Rost D, Schwarze CW, Hilgers RD. Die Kraftabgabe von Positionern bei unterschiedlicher Schneidezahnposition - Eine in-vitro Untersuchung. *Fortschr Kieferorthop* 1995; 56: 104-109

Rosvall MD, Fields HW, Ziuchkovski J, Rosenstiel SF, Johnston WM. Attractiveness, acceptability, and value of orthodontic appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009; 135: 276-277

Roth RH, Gordon WW. Der gnathologische Positioner. *Inf Orthod Kieferorthop* 1981; 13: 125-148

Sander C, Wiethoff HC, Sander FM. Die kieferorthopädische Behandlung mit thermoplastischen Schienen. *Inf Orthod Kieferorthop* 2009; 41: 183-188

Sander FG, Fröhls M. Qualitative und quantitative Bestimmung des Settling-Effektes durch die Positioner-Therapie. *Inf Orthod Kieferorthop* 1989; 21: 311-318

Schmuth GPF, Vardimon AD. *Kieferorthopädie*. 3. Auflage. Stuttgart: Thieme, 1994

Schopf P. Rezidiv/Retention. In: Schopf P, Hrsg. Curriculum Kieferorthopädie Band I: Schädel- und Gebißentwicklung, Prophylaxe, Kieferorthopädische Diagnostik, Herausnehmbare Behandlungsgeräte. Berlin: Quintessenz, 2001, 3. Auflage: 291-295

Schuchard T. Ein Gebissformer aus elastischem Gummi. Zahnärztl Praxis 1953; 4/8: 5

Schupp W, Haubrich J. Möglichkeiten und Grenzen der Invisalign-Behandlung. Quintessenz Sonderdruck 2010a; 61: 951-962

Schupp W, Haubrich J, Neumann I. Class II correction with the Invisalign system. J Clin Orthod 2010b; 44: 28-35

Schupp W, Haubrich J, Neumann I. Treatment of anterior open bite with the Invisalign System. J Clin Orthod 2010c; 44: 501-507

Sergl HG. Der Idealisator – ein funktionelles Endgerät aus weichbleibendem Kunststoff. Fortschr Kieferorthop 1989; 50: 338-346

Sheridan JJ, Ledoux W, McMinn R. Essix retainers: fabrication and supervision for permanent retention. J Clin Orthod 1993; 27: 37-45

Shilliday DJ. Minimizing finishing problems with the mini-positioner. Am J Orthod 1971; 59: 596-599

Smith RJ, Burstone CJ. Mechanics of tooth movement. Am J Orthod 1985; 85: 294-307

Torres FC, Jóias RP, Cepera F, Paranhos LR, Sanders D. A clinical case treated with clear aligners. Int J Orthod Milwaukee 2011; 22: 11-15

Tuncay OC, Bowman SJ, Nicozisis JL, Amy BD. Effectiveness of a compliance indicator for clear aligners. *J Clin Orthod* 2009; 43: 263-268

Van Nguyen C, Cheng J. Three-dimensional superimposition tool. In: Tuncay OC, Hrsg. *The Invisalign System*. New Malden, United Kingdom: Quintessenz, 2006: 121-131

Vlaskalic V, Boyd RL. Clinical evolution of the Invisalign appliance. *J Calif Dent Assoc* 2002; 30: 769-776

Vlaskalic V, Boyd R, Hordt C, Miethke RR. Die kieferorthopädische Behandlung mit dem Invisalign-System. *Kieferorthopädie Sonderheft Invisalign* 2001; 15: 17-24

Vorhies JM. Short, intensive use of tooth positioners and an appraisal of the results. *Angle Orthod* 1960; 30: 248-254

Warunek SP, Sorensen SE, Cunat JJ, Green LJ. Physical and mechanical properties of elastomers in orthodontic positioners. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1989; 95: 388-400

Warunek SP, Strychalski ID, Cunat JJ. Klinische Anwendung von Silikonelastomer-Apparaturen. *Inf Orthod Kieferorthop* 1990; 23: 349-356

Wells NE. Application of the positioner appliance in orthodontic treatment. *Am J Orthod* 1970; 58: 351-366

Womack WR, Ahn JH, Ammari Z, Castillo A. A new approach to correction of crowding. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2002; 122: 310-316

Wong BH. Invisalign A to Z. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2002; 121: 540-541

8 Danksagung

Ich danke meinem Doktorvater Professor Dr. rer. nat. Dipl.-Phys. Christoph Bourauel, der mich bei der Anfertigung dieser Dissertation zu jeder Zeit ausgezeichnet betreut und motiviert hat.

Bei Herrn Dr. rer. nat. Dipl.-Math. Ludger Keilig möchte ich mich ganz herzlich für die allzeit intensive und freundliche Unterstützung und die zahlreichen Ideen und Anregungen zur Durchführung dieser Arbeit bedanken.

Ich danke der Praxis Dr. Schupp und Kollegen für die Bereitstellung der Patientendaten, die die Grundlage dieser Arbeit darstellen. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei den Mitarbeitern von Align Technology für die freundliche Überlassung der ClinCheck Daten und die Bereitschaft zur Rücksprache. Mein Dank gilt weiterhin allen Mitarbeitern des Labors für oralmedizinische Technologie für die Hilfsbereitschaft und Freundlichkeit, die mir in allen Phasen der Erstellung dieser Arbeit und von allen Seiten entgegengebracht wurde.

Meinen Eltern, Michael und Annette Hauschopp, bin ich für ihre allzeitige Unterstützung sehr dankbar, und möchte mich an dieser Stelle auch für die Ermöglichung meiner beruflichen Ausbildung und meines Promotionsvorhabens bedanken. Bei meinem Freund Tilman möchte ich mich ebenfalls ganz besonders für die geduldige Unterstützung und Motivation in jeder Phase dieser Arbeit bedanken.