

Aus dem Department für Interdisziplinäre Zahnmedizin und Technologie
der Donau-Universität Krems, Österreich

Kieferorthopädische Behandlungen mit transparenten Schienenapparaturen.
Therapeutische Möglichkeiten am Beispiel des Invisalign®-Systems

MASTERTHESE

zur Erlangung des
"Master of Science Kieferorthopädie" (MSc)

vorgelegt
2010

von
Jutta Engeln, Berlin

Prüfer: Prof. Dr. Dr. Dieter Müßig

Diese Arbeit widme ich meiner Familie.

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINLEITUNG	1
2 LITERATURÜBERSICHT	2
2.1. Ästhetische Behandlungsapparaturen	2
2.1.1. Lingualtechnik	2
2.1.2. Transparente Schienenapparaturen	3
2.2. Das Invisalign®-System	4
2.2.1. Dreidimensionale Behandlungssimulation	5
2.2.2. Herstellung und Anwendung der Aligner	8
2.2.3. Indikationen und Kontraindikationen	9
2.2.4. Vor- und Nachteile	12
2.3. Biomechanik	15
2.3.1. Grundlagen	15
2.3.2. Biomechanik des Invisalign®-Systems	17
2.3.3. Attachments	19
2.3.4. Verankerung	21
3 FRAGESTELLUNG	23
4 MATERIAL UND METHODE	24
4.1. Literaturrecherche	24
4.2. Literaturauswahl	24
5 ERGEBNISSE	25
5.1. Quantitative Auswertung	25
5.2. Qualitative Auswertung	26
5.2.1. Patientenalter und Geschlecht	26
5.2.2. Behandlungsmotivation	26
5.2.3. Behandlungsaufgabe	27
5.2.4. Behandlungsergebnis	28
5.2.5. Behandlungsdauer	29

6 DISKUSSION	32
6.1. Diskussion von Material und Methode	32
6.2. Diskussion der Ergebnisse	33
6.2.1. Patienten	33
6.2.2. Behandlung	33
6.2.3. Behandlungsaufgaben	37
7 SCHLUSSFOLGERUNGEN	47
8 ZUSAMMENFASSUNG	48
9 LITERATURVERZEICHNIS	49
10 ANHANG	54
10.1. Danksagung	54
10.2. Curriculum vitae	55
10.3. Eidesstattliche Erklärung	56

1 EINLEITUNG

Die Harmonie des Gesichtes und damit dessen Attraktivität kann entscheidend durch korrekt stehende Zähne beeinflusst werden. Hierbei kommt es nicht nur auf die Zahnstellung an, sondern vor allen Dingen auf ihr Zusammenspiel mit der Zahnform, dem Zahnfleisch, sowie der Lippen und Gesichtsform. Unter strenger Berücksichtigung aller Faktoren entsteht durch eine kieferorthopädische Behandlung ein ästhetisches Lächeln. Ein Lächeln mit schönen und geraden Zähnen signalisiert Gesundheit, Lebensfreude und Lebensqualität [Klages *et al.* 2004].

Patienten möchten durch eine kieferorthopädische Behandlung insbesondere die dentofaziale Ästhetik verbessern [Nattrass & Sandy 1995; Stenvik *et al.* 1997]. Das Interesse von Erwachsenen für eine kieferorthopädische Behandlung nimmt stetig zu und ihre hohen ästhetischen Ansprüche führen dazu, dass zunehmend mehr Patienten den Wunsch äußern, mit einer Zahnschlinge ohne optische Beeinträchtigung behandelt zu werden. Patienten lehnen es ab, eine sichtbare kieferorthopädische Apparatur zu tragen; auffällige orthodontische Behandlungsmittel hindern Patienten sogar, sich für eine medizinisch notwendige Zahnstellungskorrektur zu entscheiden [Meier *et al.* 2003].

Durch das Invisalign®-System steht seit 1999 eine kieferorthopädische Behandlungsapparatur zur Verfügung, mit der es möglich ist, dentoalveolare Zahnfehlstellungen zu behandeln und gleichzeitig den bestehenden ästhetischen Ansprüchen gerecht zu werden [Miethke 2001]. Bei dieser Behandlungsmethode werden mit einer Serie herausnehmbarer und nahezu unsichtbarer Kunststoffschienen Zahnfehlstellungen korrigiert. Durch eine neuartige CAD/CAM-Technologie lassen sich zudem der Behandlungsverlauf und das Behandlungsergebnis im Voraus visualisieren. Das Invisalign®-System wurde seit seiner Einführung durch technische Weiterentwicklungen und klinische Erfahrungen kontinuierlich verbessert. Seit 2004 ist Invisalign® auch in Deutschland ein wissenschaftlich anerkanntes Behandlungsmittel [Göz *et al.* 2004]. Trotz dieser Erkenntnisse besteht weiterhin eine kontroverse Diskussionen in Bezug auf die therapeutischen Möglichkeiten transparenter Schienenapparaturen.

Ziel dieser Literaturübersicht war, einen Überblick über die therapeutischen Möglichkeiten des Invisalign®-Systems zu liefern. Hierfür wurde in den elektronischen Datenbanken MEDLINE und PubMed nach Falldokumentationen recherchiert, bei denen kieferorthopädische Behandlungen mit dem Invisalign®-System beschrieben wurden.

2 LITERATURÜBERSICHT

2.1. Ästhetische Behandlungsapparaturen

Für viele Erwachsene sind konventionelle festsitzende Apparaturen vor allem wegen der damit verbundenen ästhetischen Beeinträchtigung aus beruflichen oder privaten Gründen nicht akzeptabel. Daher äußern zunehmend mehr Patienten den Wunsch, mit einer unauffälligeren Behandlungsform behandelt zu werden [Fritz *et al.* 2002; Meier *et al.* 2003; Shum 2004]. Dieser Wunsch, den ästhetischen Anforderungen bereits während einer kieferorthopädischen Behandlung nachzukommen, kann durch die Therapie mit nicht sichtbaren Apparaturen wie der Lingualtechnik [Fritz *et al.* 2002] oder einer transparenten Schienenapparatur erfüllt werden [Meier *et al.* 2003].

2.1.1. Lingualtechnik

Mit der Lingualtechnik steht eine kieferorthopädische Behandlungsapparatur zur Verfügung, die deutlich unauffälliger ist als konventionelle Behandlungsgeräte (Abb. 1). Orthodontische Behandlungen mit dieser Technik werden hohen ästhetischen Ansprüchen gerecht und daher vom Patienten besser akzeptiert [Shum *et al.* 2004].

Die Lingualtechnik ist heute eine erprobte und etablierte Behandlungsmethode, deren Verbreitung besonders in Europa und Japan kontinuierlich zunimmt [Shum *et al.* 2004]. Die Weiterentwicklung der Laborabläufe, aber auch Verbesserungen des Bracketdesigns und die Einführung neuer Adhäsiv- und Bogenmaterialien haben ein breites Behandlungsspektrum der Lingualtechnik ermöglicht. Die Indikation entspricht heute dem labialen Straight-Wire-Apparaturen und die Ergebnisse sollen vergleichbar sein [Thalheim & Wiechmann 2002].



Abb. 1: Lingualapparatur Incognito™ *in situ* (3M Unitek, Bad Essen, Deutschland) [Incognito 2009].

Bei der Lingualtechnik muss der Patient allerdings funktionelle Einschränkungen in Kauf nehmen; die innen liegende Zahnschlinge kann das Sprechen behindern, ebenso sind das Essen und die Mundhygiene beeinträchtigt [Hohoff *et al.* 2003a]. Generell haben Patienten mit festsitzenden lingualen Apparaturen erhebliche Gewöhnungsschwierigkeiten und die meisten Patienten fühlen sich in den ersten vier Wochen ihrer Behandlung unwohl [Fritz *et al.* 2002]. 65 % der Patienten weisen Zungenirritationen während der Behandlung auf und benötigen mindestens 1 - 3 Wochen, bis sie ohne Schwierigkeiten sprechen können [Miyawaki *et al.* 1999]; objektive Messungen der Lautbildung bestätigen diese Ergebnisse [Hohoff *et al.* 2003b]. Darüber hinaus kann in den ersten Wochen der Nivellierungsphase eine Behinderung der Kau- und Abbeißfunktion bestehen; insbesondere bei tiefen Bissen machen die Aufbissplateaus der oberen Frontzahnbrackets Schwierigkeiten bei der Nahrungszerkleinerung [Miyawaki *et al.* 1999]. Auch die Mundhygiene bleibt während der gesamten Behandlungszeit eingeschränkt [Hohoff *et al.* 2003a; Miyawaki *et al.* 1999] und die Nähe der Brackets zum Gingivarand führt unumgänglich zur Plaqueansammlung und der Entstehung einer Gingivitis. Des Weiteren sind 20 % der Patienten der Ansicht, dass eine festsitzende Apparatur ihr soziales und familiäres Leben stark beeinträchtigt [Fritz *et al.* 2002; Miyawaki *et al.* 1999].

2.1.2. Transparente Schienenapparaturen

Die kieferorthopädische Behandlungsmethode, Zahnfehlstellungen mit einer transparenten Kunststoffschiene zu korrigieren, stellt eine bekannte Therapieoption dar. Positioner, Miniplastschienen oder verwandte elastische Geräte werden seit Jahrzehnten mit Erfolg zur Korrektur leichter Zahnstellungsfehler und zur Stabilisierung des Behandlungsresultates eingesetzt. Das Konzept dieser Behandlungsapparatur geht auf den amerikanischen Kieferorthopäden Kesling zurück [Kesling 1945]. Es basierte auf dem Gedanken, durch die Therapie mit semielastischen Geräten eine schrittweise Annäherung an das Behandlungsziel zu verfolgen. Kesling wandte erstmals Positioner für geringgradige Zahnbewegungen nach einer Multibracket-Behandlung an und konnte zeigen, dass Restlücken mit Hilfe dieser Apparatur geschlossen werden können [Kesling 1945].

McNamara entwickelte das ursprüngliche Verfahren fort. Auf laborgefertigten Set-up-Modellen wurde eine Serie herausnehmbarer, durchsichtiger Kunststoffschienen (sog. Essix-Schienen) aus Druckformfolien hergestellt [McNamara *et al.* 1985]. Die Essix-Schiene sowie diverse Modifikationen werden noch heute für die Korrektur leichter Zahnfehlstellungen angewendet, z. B. in Form der sogenannten "Essix overlay appliance" [Giancotti *et al.* 2004; Lindauer &

Shoff 1998; Rinchuse & Rinchuse 1997; Sheridan *et al.* 1993; Sheridan *et al.* 1995]. Jedoch bleiben auch mit diesem Verfahren Zahnregulierungen auf einen sehr begrenzten Umfang beschränkt.

Mit der Entwicklung des Invisalign®-Systems (invisible: unsichtbar; align: ausrichten, begradigen) wurde die Möglichkeit geschaffen, auch umfangreiche orthodontische Zahnfehlstellungen mit transparenten Schienen zu behandeln (Abb. 2) [Boyd *et al.* 2000; Boyd & Vlaskalic 2001]. Die Invisalign®-Technologie

ist eine zeitgemäße Methode und basiert auf einem CAD/CAM-Verfahren (CAD: computer aided design = rechnerunterstützte Konstruktion; CAM: computer aided manufacturing = rechnerunterstützte Fertigung). Die vom Behandler gewünschte Zahnbewegung wird durch eine dreidimensionale Analyse am Computer im Voraus berechnet und das festgelegte Behandlungsziel virtuell dargestellt. Anhand der Behandlungssimulation wird eine Serie durchsichtiger semielastischer Polyurethan-Schienen (sog. Aligner) hergestellt, die eine Korrektur auch umfangreicher Zahnfehlstellungen bewirken sollen [Kuo & Miller 2003]. Durch diese rechnergestützte Technologie ist die kieferorthopädische Behandlung mit transparenten Schienenapparaturen erheblich verfeinert worden und mittlerweile nicht mehr mit dem zu vergleichen, was Kesling, McNamara, Sheridan oder Lindauer und Shoff erreichen konnten [Boyd *et al.* 2000].

Die Invisalign®-Technik steht seit 2001 dem deutschen Dentalmarkt zur Verfügung. Im Laufe der Zeit haben sich noch weitere Techniken etabliert, deren Konzepte in Anlehnung an das Invisalign®-System arbeiten; zu diesen Systemen zählen u. a. Orthocaps® (Orthocaps GmbH, Hamm, Deutschland), Clear Aligner™ (Scheu Dental GmbH, Iserlohn, Deutschland) und Alphalign® (Dental Vital GmbH, Kassel, Deutschland).



Abb. 2: Transparente Invisalign®-Schiene (Align Technology, Inc., Santa Clara, USA) [Invisalign 2009].

2.2. Das Invisalign®-System

Das Invisalign®-System ist ein dreidimensionales Planungs- und Herstellungsverfahren für die orthodontische Behandlung von Zahnfehlstellungen mit Hilfe transparenter Schienen. Dieses Verfahren wurde 1997 von Softwarespezialisten der amerikanischen Firma Align Technology,

Inc. (Santa Clara, Kalifornien, USA) zusammen mit den Universitäten von Indiana, Florida und Washington sowie der Pacific School of Dentistry entwickelt und im Jahr 2000 erstmalig beschrieben [Boyd *et al.* 2000].

2.2.1. Dreidimensionale Behandlungssimulation

Grundlage für alle Analysen und Simulationsschritte dieser Technologie sind präzise Modelle der Zahnstellung. Damit die Kiefermodelle besonders exakt sind, werden die Abformungen der Zahnreihen und das Okklusionsregistrat aus Vinylpolysiloxan (Silikone) angefertigt. Diese Abformungen werden an Align Technology gesandt und dort mit hoch auflösenden Computertomographen gescannt; die Genauigkeit des Scann-Prozesses beträgt 100 µm (Abb. 3).

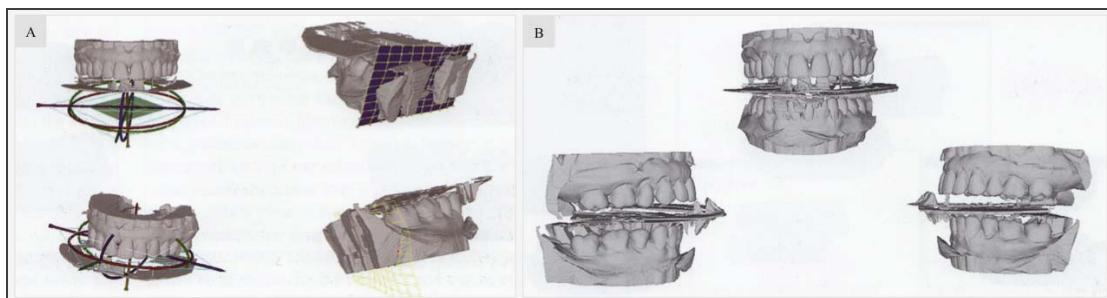


Abb. 3: Darstellung des dreidimensionalen Scann-Ergebnisses der Abdrücke (A) und ihrer Analyse zur Erstellung virtueller Modelle in zentrischer Okklusion (B); nach [Tuncay 2006].

Die gescannten Abformungen werden in dreidimensionale, digitale Bilder konvertiert und ein virtuelles Kiefermodell des Patienten erstellt. Auftretende Artefakte werden korrigiert (sog. tooth shaping), der Zahnfleischrand markiert und eine virtuelle Gingiva über den Alveolarfortsatz drapiert; die Gingiva definiert zu einem späteren Zeitpunkt die Schienenränder. Auf Grundlage des Bissregistrats sowie einer dreidimensionalen Vermessung des Abdrucks wird die Okklusion eingestellt und die virtuellen Modelle im sogenannten "bite zero" in zentrischer Okklusion artikuliert [Joffe 2003; Kuo & Miller 2003].

Mit der Graphik-Software Treat® werden die Kiefermodelle in einzelne Zähne zerlegt, indem alle Zähne an ihren Kontaktpunkten voneinander getrennt und die Zahnkronen mit einer virtuellen Wurzel versehen werden (Abb. 4, Abb. 5). Ausgehend vom Dysgnathie-Befund und dem Therapieplan des behandelnden Arztes wird am Computer der Behandlungsverlauf simuliert. Am virtuellen 3D-Modell werden hierfür die Zähne schrittweise in ihre endgültige Position verschoben, bis die Zahnfehlstellung vollständig behoben und das zuvor bestimmte

Behandlungsziel erreicht ist. Das Ergebnis ist eine computergestützte, dreidimensionale Simulation der gewünschten Zahnbewegungen [Kuo & Miller 2003].

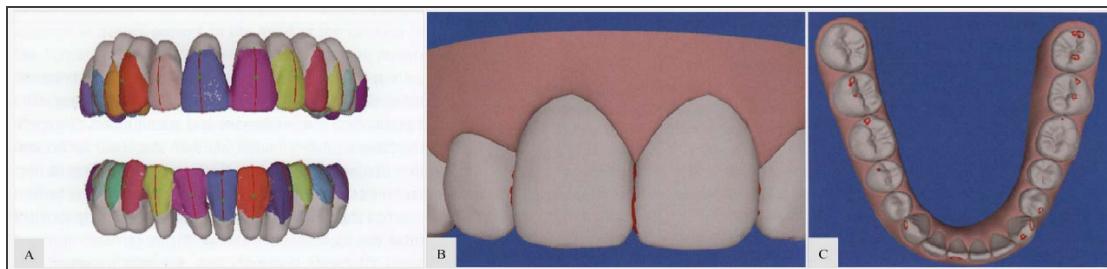


Abb. 4: Darstellung der metrischen Analyse der einzelnen Zähne sowie des Zahnbogens; (A) die klinischen Kronen werden dreidimensional vermessen und die Zahnnachsen eingezeichnet; (B) und (C) Darstellung der approximalen und okklusalen Kontaktpunkte (rot); nach [Tuncay 2006].

Die einzelnen Zahnbewegungen liegen in einer Größenordnung zwischen 0,10 - 0,25 mm. Abhängig vom Ausmaß der zu bewegenden Zähne sowie den biologischen Gegebenheiten des Patienten werden die Zahnbewegungen in kleine Behandlungsschritte unterteilt (sog. staging). Dadurch können die Zähne mit genau dosierten Kräften in die gewünschte Position bewegt werden. Die Auswahl der einzelnen Behandlungssequenzen ist neben der Behandlungsplanung durch den Kieferorthopäden von der detaillierten Umsetzung des Align-Technikers abhängig und umfasst u. a. die Beachtung okklusaler und interproximaler Interferenzen im Rahmen interner Staging-Protokolle (Abb. 4) [Tuncay 2006].

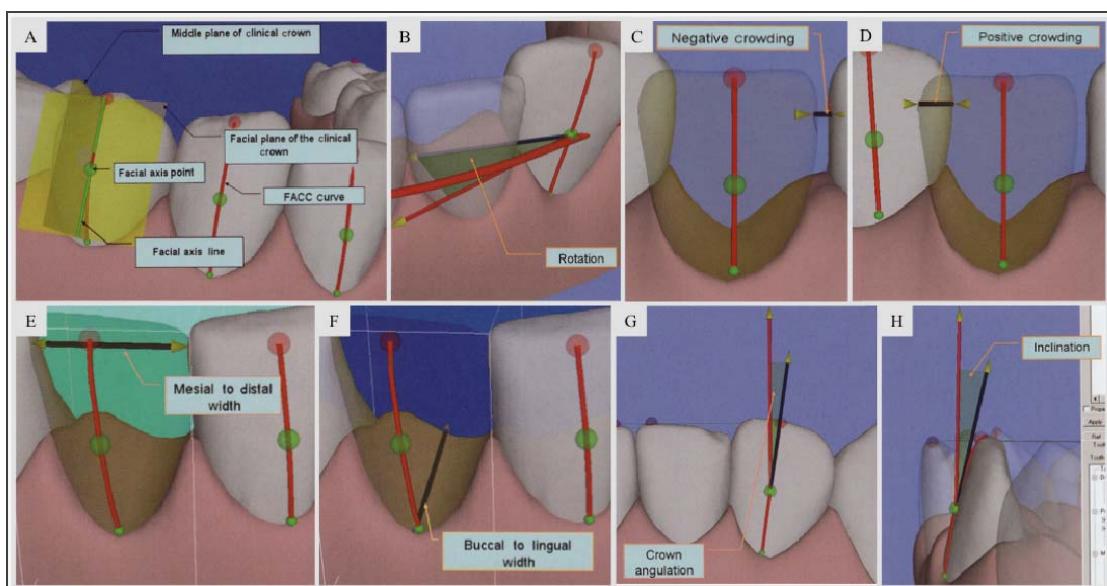


Abb. 5: Metrische Analyse und Vermessung der einzelnen Zähne; Vermessung der Zahnnachsen (A), der Rotationen (B), des Eng- und Lückenstandes (C) und (D), der Zahnbreiten (E) und (F), der Kronenangulation (G) und der Inklinations (H); nach [Tuncay 2006].

Aus diesem Bewegungsplan ergibt sich die Anzahl benötigter Schienen. Für einfache Zahnstellungskorrekturen werden 15 - 30 Aligner benötigt, für umfangreiche und komplexe Zahnbewegungen (z. B. nach Zahnektaktion) liegt die Anzahl der Aligner zwischen 30 und 60, in Einzelfällen sogar darüber. Die Behandlungszeit lässt sich anhand der geplanten Schienenanzahl kalkulieren und beträgt durchschnittlich 6 und 18 Monate. Damit entspricht die Behandlungsdauer ungefähr der einer Therapie mit herkömmlichen festsitzenden Geräten [Bishop *et al.* 2002; Miethke 2001].

Der Behandler erhält den nach seinen Vorgaben gefertigten virtuellen Bewegungsplan (sog. ClinCheck®) von Align Technology via Internet. In diesem ClinCheck® sind sowohl die einzelnen Schritte der Zahnbewegungen als auch das Behandlungsergebnis dreidimensional dargestellt (Abb. 6). Die einzelnen Bewegungsabläufe überprüft der Arzt in seiner "virtuellen Invisalign® Praxis" (VIP) und kann interaktiv via Internet Korrekturen, weitere Anleitungen und/oder eine Modifikation der Behandlungsplanung erteilen. Mit dem ClinCheck® kann darüber hinaus der Behandlungsablauf in Form einer filmähnlichen Sequenz simuliert werden [Joffe 2003].



Abb. 6: Exemplarische Darstellung des ClinChecks® einer 14-jährigen Patientin; (A) klinische Situation bei Behandlungsbeginn, (B) Simulation des Behandlungsziels, (C) Überlagerung der klinischen Ausgangssituation und des Behandlungsziels zur Visualisierung der Zahnbewegungen; (C) die blaue Schattierung zeigt die Zahnstellung zu Behandlungsbeginn, die weiß dargestellten Zähne die therapeutisch geplante Zahnposition; Attachments sind rot dargestellt; mit freundlicher Genehmigung von Herrn Dr. Walter Engeln, Fachzahnarzt für Kieferorthopädie, Berlin.

2.2.2. Herstellung und Anwendung der Aligner

Die Anfertigung der Aligner basiert auf einem computergesteuerten, stereolithographischen Herstellungsprozess der Modelle. Das Prinzip der Stereolithographie besteht darin, flüssigen Kunststoff gezielt durch Laserlicht schichtweise zu polymerisieren.

Anhand der Computerdaten des ClinChecks® wird für jeden einzelnen Behandlungsschritt ein Set-up-Modell des Zahnbogens berechnet und stereolithographisch hergestellt. Auf diesen dreidimensionalen Modellen werden die klarsichtigen Aligner aus Polyurethan (EX40™) im Druckformverfahren hergestellt. Aufgrund der Präzision dieses Verfahrens kann zu diesem Zeitpunkt die gesamte Serie der Korrekturschienen gefertigt werden [Kuo & Miller 2003]. Das Material ist bei einer Stärke von 0,75 mm viskoelastisch, d. h. es lässt sich gering verformen.

Die tägliche Tragedauer der Aligner sollte etwa 22 Stunden betragen, d. h. die Schienen sollten mit Ausnahme der Mahlzeiten fortlaufend getragen werden [Align Technology 2005a; Joffe 2003]. In regelmäßigen Abständen wird der Behandlungsverlauf vom Behandler überprüft. Die Kontrolltermine können abhängig von der klinischen Situation und der Patientenmitarbeit vergeben werden; im Allgemeinen empfehlen sich 4- bis 8-wöchige Intervalle, d. h. der Patient kommt zu jedem zweiten bis vierten Schienenwechsel in die Praxis des behandelnden Arztes [Joffe 2003; Womack 2006]. Während der Kontrollsitzung werden die Passgenauigkeit der Aligner, die Veränderung der Zahnstellung und der Okklusion geprüft sowie mit der Simulation im ClinCheck® verglichen; gegebenenfalls müssen die Voraussetzungen für die geplante Zahnbewegung geschaffen werden (z. B. durch approximale Schmelzreduktion) [Gummelt & Miethke 2008].

Eine unzureichende Passung der Aligner ist u. a. durch Hohlräume zwischen den Zähnen und der Innenfläche der Aligner erkennbar. Die Gründe für einen mangelhaften Sitz sind meist ungenügende Mitarbeit, fehlender Platz oder nicht erfolgte Zahnbewegung [Gummelt & Miethke 2008]. In einer solchen Situation sollte in Erwägung gezogen werden, zu einem vorherigen passenderen Aligner zurück zu gehen und die Bewegung zu wiederholen. Sollte interproximale Interferenz in Form von straffen Kontakten die Bewegung behindern, empfiehlt sich die approximale Reduktion früher als vorgesehen durchzuführen; gegebenenfalls kann auch eine zusätzliche Schmelzreduktion erforderlich sein. Bei einem rückständigen Zahn kann dieser mit Hilfsmitteln wie z. B. einem Knöpfchen und elastischen Zügen bis zu seinem besseren Sitz in der Schiene unterstützt werden [Duong & Kuo 2006; Gummelt & Miethke 2008; Womack 2006].

Besteht nach dem letzten Behandlungsschritt eine Abweichung zwischen dem gewünschten Behandlungsergebnis im ClinCheck® und der klinischen Situation, ist ein sogenanntes "Case

Refinement" indiziert. Durch die Anfertigung zusätzlicher Aligner kann gewährleistet werden, dass auch in solchen Fällen das gewünschte Behandlungsziel möglichst exakt erreicht wird. Die Wiedervorlage eines Falles (sog. Mid-Course Correction) ist hingegen erforderlich, wenn der ClinCheck® und die intraorale Situation stark voneinander abweichen, so dass die Aligner nicht mehr eindeutig passen [Align Technology 2005a]. Die klinische Situation weicht meist dann vom geplanten Behandlungsverlauf ab, wenn die Schienen während der aktiven Behandlung nicht nach den Instruktionen des Behandlers getragen wurden, ebenso wenn sich der Patient gegebenenfalls einer ausgedehnten Dentalbehandlung unterziehen musste [Gummelt & Miethke 2008]. Im Rahmen der Mid-Course Correction werden neue Silikon-Abdrücke sowie eine erneute Behandlungsinstruktion durch den Kieferorthopäden notwendig. Es können neue Behandlungsziele und/oder modifizierte Bewegungen definiert werden, so dass auch vom ursprünglichen Bewegungsplan abweichende Zahnbewegungen eingeplant werden können [Align Technology 2005a].

2.2.3. Indikationen und Kontraindikationen

Eine Behandlung mit dem Invisalign®-System ist grundsätzlich möglich, sobald alle bleibenden Zähne mit Ausnahme der Weisheitszähne vollständig durchgebrochen sind und kann daher sowohl bei Erwachsenen als auch bei jugendlichen Patienten ab dem 12. - 13. Lebensjahr eingesetzt werden [Boyd *et al.* 2000]. Eine bedingte Kontraindikation liegt bei Kindern während der Zeit des Zahndurchbruchs vor, in Ausnahmefällen ist jedoch ein früher Behandlungszeitpunkt auch bei nicht abgeschlossenem Zahnwechsel möglich [Göz *et al.* 2004; Neumann *et al.* 2004].

Das Indikationsspektrum umfasst folgende Leitsymptome (Tab. I) [Align Technology 2005a]:

- Zahnbogendiskrepanzen (Engstand, Lückenstand),
- transversale Diskrepanzen (enge Zahnbögen, Kreuzbiss),
- vertikale Diskrepanzen (tiefer Biss, offener Biss),
- sagittale Diskrepanzen (Klasse II, Klasse III),
- prärestaurative und -operative Behandlungen.

Die DGKFO bestätigt in ihrer Stellungnahme von 2004, dass das Invisalign®-System für dentoalveolare Korrekturen geeignet ist. Als Hauptindikation nennt die DGKFO Korrekturen bei moderatem frontalen Eng- und Lückenstand, Pro- und Retrusion der Front sowie geringen In- und Extrusionsbewegungen bei stabiler, neutraler Interkuspidation. Als bedingt geeignet sind ausgeprägte körperliche Bewegungen, Torsionen von Eckzähnen oder Prämolaren,

Lückenschluss nach Prämolaren-Extraktion und Zahnretention angegeben. Das Invisalign®-Verfahren gilt heute als "Bereicherung des kieferorthopädischen Behandlungsinstrumentariums" und ist mittlerweile auch in Deutschland wissenschaftlich anerkannt [Göz *et al.* 2004].

Tab. I: Therapeutische Möglichkeiten des Invisalign®-Systems; nach [Align Technology 2005a]

möglich	Lücken in der Größenordnung von bis zu 6 mm, leichter und mittlerer Engstand, Rotationen, Expansion der Zahnreihen.
bedingt möglich	Bisslagendiskrepanz von mehr als 2 mm, mittlere bis starke Rotationen von Prämolaren und/oder Eckzähnen ($> 20^\circ$), tiefer oder stark offener Biss, stark gekippte Zähne ($> 45^\circ$), Behandlung im Wechselgebiss.
nicht möglich	Bisslageabweichungen über 4 mm, Ex- oder Intrusionen mehrerer Zähne in einer Größenordnung > 1 mm, schlechte Mundhygiene, schlechte Compliance.

Nicht bzw. nicht für eine alleinige Therapie mit Invisalign® geeignet sind ausgeprägte Drehungen von Eckzähnen und Prämolaren, ein ausgeprägter tiefer bzw. offener Biss, stark gekippte Zähne, ein Lückenstand von mehr als 2 - 3 mm sowie der Lückenschluss nach Zahnextraktionen im Seitenzahnbereich. Da die Aligner weitgehend nur auf einen Kiefer wirken, sind sie nicht zur alleinigen Korrektur von deutlichen skelettalen Dysgnathien indiziert [Göz *et al.* 2004; Joffe 2003; Melkos 2005].

Seit der Einführung der Invisalign®-Technologie in Deutschland 2001 hat sich das System durch kontinuierliche Weiterentwicklungen und den technischen Fortschritt der ClinCheck®-Software, insbesondere jedoch durch die wachsende klinische Erfahrung der Behandler sowie erster wissenschaftlicher Erkenntnisse deutlich verbessert [Boyd *et al.* 2006; Göz *et al.* 2004]. Im Rahmen des sogenannten "New Protocol" kamen 2007 weitere Anwendungsmöglichkeiten hinzu, wodurch sich das Indikationsspektrum der Invisalign®-Behandlung erweitert hat. Neben den von der DGKFO angegebenen Indikationen können heute wesentlich mehr dentoalveoläre Korrekturen mit Invisalign® durchgeführt werden und stellt auch bei komplexen Zahnfehlstellungen eine Behandlungsmöglichkeit dar [Boyd 2007; Womack 2006].

Das erweiterte Behandlungsspektrum umfasst folgende therapeutische Möglichkeiten:

- Prämolaren-Extraktion,
- Distalisierung von Molaren,
- Korrektur tiefer Bisse, offener Bisse und Kreuzbisse,
- Behandlung im parodontal geschädigtem Gebiss.

Im Rahmen des erweiterten Behandlungsspektrums können somit auch Patienten behandelt werden, bei denen beispielsweise eine Zahnextraktion im Seitenzahnbereich oder Distalsierung oberer Molaren erforderlich wird. Ebenso kann eine kombinierte kieferorthopädisch-kieferchirurgische Behandlung oder die Behandlung einer craniomandibulären Dysfunktion erfolgen. Wird eine Invisalign®-Behandlung mit einer Multibracket-Teilapparatur kombiniert, kann darüber hinaus nahezu jede Behandlung mit Invisalign® durchgeführt werden. Zu Behandlungsbeginn wird der Patient gegebenenfalls mit herkömmlichen festsitzenden Apparaturen vorbehandelt, bis die Zahnstellung so verbessert wurde, dass die verbliebene Zahnfehlstellung mit der Invisalign®-Methode therapiert werden kann; z. B. sollten Rotationen über 20 Grad vorab mit Knöpfchen oder festsitzenden Apparaturen korrigiert werden [Boyd 2007; Womack 2006].

Tab. II: Invisalign®-Evaluation Guide; nach [Align Technology 2005b]

	Einsteiger	Erfahrene Behandler	Experten
	frontaler Engstand allgemeiner Lückenstand Tiefbiss prärestaurative Ausrichtung Extrusion mit Attachments Kieferexpansion frontaler Kreuzbiss Rezidiv	übermäßiger Eng- und Lückenstand starker Tiefbiss Extraktion der unteren Schneidezähne präoperative Ausrichtung Rotation runder Zähnen Distalisierung offener Biss seitlicher Kreuzbiss	Klasse II Klasse III Prämolaren-Extraktion Translation Molarenaufrichtung
Angle Klasse	Klasse I, keine sagittale Korrektur	Klasse I, End-on Klasse II	Klasse I, Klasse II, dentale Klasse III
Lückenstand pro Kiefer	≤ 4 - 6 mm	≤ 6 - 8 mm	≥ 8 mm
Engstand pro Kiefer	≤ 4 - 6 mm	≤ 6 - 8 mm	≥ 8 mm
Mittellinienverschiebung	≤ 2 mm	≤ 2 - 3 mm	≥ 2 - 3 mm
Übergreifen zweier Zähne	≤ 2 mm	≤ 2 mm	≥ 3 mm
Rotation Schneidezähne	≤ 30°	≤ 45°	≥ 45°
Rotation Eckzähne	≤ 30°	≤ 30°	≥ 30°
Rotation Seitenzähne	≤ 15°	≤ 30°	≥ 30°
Expansion	≤ 2 mm/Quadrant	≤ 3 mm/Quadrant	≥ 3 mm/Quadrant
Distalisierung	keine	≤ 2 mm	≥ 2 mm
Intrusion Frontzähne	≤ 2 mm/Kiefer	≤ 2 - 3 mm/Kiefer	≥ 2 - 3 mm/Kiefer
Intrusion Seitenzähne	0,5 - 1 mm/Kiefer	1 mm/Kiefer	1 mm/Kiefer
Extrusion Frontzähne	0,5 - 1 mm/Kiefer	0,5 - 1 mm/Kiefer	0,5 - 1 mm/Kiefer

Entscheidend für den Einsatz von Invisalign® ist die kieferorthopädische Erfahrung des Behandlers. Nur der erfahrene Arzt kann entscheiden, welche Therapie für seinen Patienten die Richtige ist [Boyd *et al.* 2006; Hönn & Göz 2006]. Das Invisalign®-System ist deshalb nur gut ausgebildeten Zahnärzten zu empfehlen, die in Diagnostik und Therapie das gesamte kieferorthopädische Spektrum beherrschen [Göz *et al.* 2004]. Einschränkungen im

Indikationsbereich werden auch von der Firma Align Technology überwiegend sowohl auf Grundlage der kieferorthopädischen Erfahrung des Arztes als auch auf seinem Erfahrungswert mit dem Invisalign®-Behandlungssystem gesehen. Align Technology empfiehlt dem Anwender, sich an einer sogenannten "Lernkurve" (Invisalign®-Evaluation Guide; Tab. II) zu orientieren, um sich selbst, seinem Patienten und dem System gerecht zu werden.

Der Invisalign®-Evaluation Guide stellt dar, ab welchem Erfahrungszuwachs des Arztes bestimmte Zahnfehlstellungen behandelt werden sollten. Die Lernkurve verdeutlicht, dass das Einsatzspektrum im hohen Maße von der Erfahrung des Behandlers abhängig ist und bei entsprechender Erfahrung umfangreiche kieferorthopädische Korrekturen möglich sind.

2.2.4. Vor- und Nachteile

Eine Invisalign®-Therapie macht eine kieferorthopädische Behandlung für die Patienten angenehmer, komfortabler und somit akzeptabler. Die Apparatur ist aus einem Abstand von 50 cm nicht sichtbar und die Frontzähne erscheinen heller und wirken gerader als ohne Aligner (Abb. 7). Die gute Motivation der Patienten ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass deren Ästhetik während der gesamten Therapie nur minimal beeinträchtigt wird und die Zahnfehlstellung korrigiert werden kann, ohne dass es jemand sieht [Meier *et al.* 2003].



Abb. 7: Patientin beim Einsetzen der transparenten Schiene; die Aligner sind nahezu unsichtbar [Invisalign 2009].

Vorteilhaft ist weiterhin, dass die Phonetik während der Behandlung, anders als bei der Lingualtechnik, kaum oder gar nicht beeinträchtigt wird. Auch hinsichtlich des Tragekomforts bietet das Invisalign®-System Vorteile und stellt insbesondere für Berufsgruppen mit besonderen ästhetischen und funktionellen Bedürfnissen (z. B. Personen des öffentlichen Lebens, Schauspieler, Blasmusiker) eine Erweiterung der Behandlungsmöglichkeiten dar [Lingenbrink *et al.* 2002; Sergl *et al.* 2000]. Patienten, die mit dem Invisalign®-System behandelt wurden, waren in der Regel begeistert von dem angenehmen Tragekomfort dieser Zahnschiene [Nedwed & Miethke 2005].

Da diese Therapiemaßnahme keine Beeinträchtigung im Alltag mit sich bringt, ermöglicht sie problemlos ein nahezu ganztägiges Tragen [Lingenbrink *et al.* 2002; Sergl *et al.* 2000]. Trotz des intensiven Tragens und obwohl die Zähne und gegebenenfalls marginale Anteile der Gingiva von den Alignern bedeckt sind, treten Untersuchungen zufolge weder Irritationen der Schleimhäute noch kariöse Läsionen auf. Im Gegensatz zu einer festsitzenden Apparatur kann der Patient die Aligner zum Essen und zur Mundhygiene herausnehmen. Die häusliche Zahnpflege ist dadurch uneingeschränkt möglich und wird während der Behandlung nicht beeinträchtigt [Miethke & Brauner 2007; Nedwed & Miethke 2005]. Dadurch besteht ein deutlich geringeres Risiko von Entmineralisierungen des Zahnschmelzes und der Entstehung kariöser Defekte. Die gute Mundhygiene zeigt sich auch hinsichtlich einer besseren parodontalen Gesundheit im Vergleich zu Patienten mit Lingualbrackets: Invisalign®-Patienten wiesen insgesamt signifikant bessere Parodontal-Indizes auf [Miethke & Brauner 2007]. Hierdurch bleibt der Zahnfleischsaum unbelastet, was auch hinsichtlich der gingivalen Ästhetik von Bedeutung ist. Darüber hinaus besteht keine Gefahr einer Beschädigung der Zahnoberflächen bei der Bracket-Entfernung.

Ein weiterer Vorteil für den Patienten ist, dass, abhängig von der klinischen Situation, die Behandlung auch ohne Entfernung der prothetischen Versorgung durchgeführt werden kann [Turatti *et al.* 2006]. Im Rahmen der Extraktionstherapie oder eines früheren, vorzeitigen Zahnverlustes kann darüber hinaus durch das Einfügen eines zahnfarbenen Pontics in die Aligner die Zahnlücke bis zum kieferorthopädischen Lückenschluss oder einer anschließenden prothetischen Versorgung ästhetisch zufriedenstellend geschlossen werden.

Anhand der Computersimulation kann die Zahnbewegung bereits vor Behandlungsbeginn beurteilt werden. Das diagnostische dreidimensionale Set-up stellt, insbesondere bei einer Extraktionstherapie, einen Vorteil nicht nur für den behandelnden Arzt dar. Auch der Patient ist in der Lage, das voraussichtliche Behandlungsresultat zu betrachten und zu entscheiden, ob er das geplante Behandlungsergebnis wünscht. Hierdurch kann dieser vor falschen Erwartungen bewahrt werden [Hönn & Göz 2006]. Ferner ist es für die Motivation eines Patienten von Vorteil, im Voraus sehen zu können, wie die korrigierten Zahnreihen nach der Behandlung aussehen können; durch den ClinCheck® ist das Behandlungsergebnis ebenso prospektiv bestimmt wie die voraussichtliche Behandlungszeit.

Die Vorteile einer Invisalign®-Therapie sind aber nicht nur ästhetischer und motivierender Natur. Besonders hervorzuheben ist der Aspekt, dass diese Methode sehr schonend arbeitet. Aufgrund selektiver Druckapplikation und -dosierung kann dieser den spezifischen Zahnbewegungen und

den individuellen Gegebenheiten des Patienten angepasst werden; das Ausmaß einer Zahnbewegung beträgt 0,1 - 0,25 mm pro Aligner. Dabei wird der am stärksten zu bewegende Zahn als sogenannter "Leitzahn" definiert, der über seinen Bewegungsumfang die Anzahl der Schienen determiniert; die Bewegungen der anderen Zähne werden in ihrer Geschwindigkeit dem Leitzahn angepasst [Boyd 2007]. Hierdurch wird ein kontinuierlicher, leichter Druck auf die Zähne übertragen, so dass diese sanft und schonend bewegt werden [Clements *et al.* 2003]. Diese Voraussetzungen sind insbesondere für parodontal geschädigte Gebisse von deutlichem Vorteil; die Druckabgabe ist sehr moderat und aufgrund der alternierenden Krafteinwirkung liegt eine günstige Situation für das Parodont zugrunde [Polzar & Spyropoulos 2006; Gummelt & Miethke 2008]. Entsprechend sind bis zum heutigen Zeitpunkt keine messbaren Wurzelresorptionen bei Invisalign®-Behandlungen beschrieben. Es wird empfohlen, insbesondere Patienten mit kurzen Zahnwurzeln oder im Anschluss an eine Parodontalbehandlung, mit dem Invisalign®-System zu therapieren [Boyd *et al.* 2006; Boyd 2007].

Aufgrund der Disartikulation der Zähne durch die kauflächenbedeckenden Schienen werden bei Bruxismus-Patienten die Zahnhartsubstanz geschont und gleichzeitig myofasciale Beschwerden reduziert [Boyd *et al.* 2006; Miller *et al.* 2007; Nedwed & Miethke 2005]. Anfängliche Bedenken, die funktionelle Okklusion könne aufgrund der computergeplanten Idealisierung der Zahnbögen sowie den zahnumfassenden Schienen nur unzureichend berücksichtigt werden, ist nach derzeitigem Kenntnisstand unbegründet [Göz *et al.* 2004]. Neue Erkenntnisse konnten bekräftigen, dass eine gute Verzahnung der Antagonisten erzielt werden kann. Ebenso konnte gezeigt werden, dass sich das langfristige Tragen der Schienen nicht auf die Funktion, die Kiefergelenke oder den Zahnhalteapparat auswirkt. Das Tragen der Schiene besitzt keine negativen Effekte auf den parodontalen Zustand oder die Kiefergelenksfunktion [Nedwed & Miethke 2005].

Probleme sind zu erwarten, wenn die Schienen (z. B. aufgrund einer Erkrankung) längere Zeit nicht getragen wurden, bei geänderter Zahnmorphologie infolge einer restaurativen Behandlung oder dem Verlust mehrerer Schienen. Diese Komplikationen können es erforderlich machen, neue Schienen zu planen und anfertigen zu lassen (sog. Mid-Course Correction); dies führt in der Regel zu erhöhten Behandlungskosten [Göz *et al.* 2004]. Aus diesem Grund sollte beachtet werden, dass während einer Invisalign®-Behandlung keine weitreichenden konservierenden oder prothetischen Maßnahmen erfolgen, da solche Behandlungen den exakten Sitz der Aligner gefährden [Kaul & Miethke 2003]. Ein kritischer dentaler Befund sollte der Invisalign®-Behandlung jedoch vorausgehen und aufgrund der uneingeschränkten Mundhygiene das Entstehen einer Karies verhindert werden können [Miethke & Brauner 2007].

2.3. Biomechanik

Die Biomechanik ist die Wissenschaft von der Anwendung physikalischer Prinzipien wie Kraft und Widerstand auf ein biologisches System; in der Kieferorthopädie ist es die Wissenschaft vom Ansprechen der Zähne und des parodontalen Gewebes auf eine gerichtete, mechanische Kraft oder auf Druck und berücksichtigt deren Auswirkung in Bezug auf Ausrichtung, Verbreitung und Fortbestehen auf das Parodont und das umgebende Gewebe.

2.3.1. Grundlagen

Eine Zahnbewegung wird durch eine selektive Kombination aus Kraft und Druck ausgeübt und ist das Ergebnis der parodontalen Reaktion. Hinsichtlich der optimalen Kraft für kieferorthopädische Zahnbewegungen wurde bis heute kein abschließender Konsens gefunden [Kuncio *et al.* 2007]. Die optimale Kraftgröße für die meisten Zahnbewegungen soll 50 - 150 g betragen. Grundsätzlich bedürfen Zahnbewegungen wie Translation, Wurzeltorque, Rotation und Extrusion einer starken Kraft von 50 - 150 g, Kippungen erfordern eine mittlere Kraft von 50 - 75 g. Eine Intrusion hingegen sollte mit geringer Kraft von 10 - 25 g erfolgen. Das optimale Kraftlevel sollte hoch genug sein, um die zelluläre Aktivität des Parodonts zu aktivieren, aber so gering, um die Versorgung des parodontalen Ligaments zu gewährleisten; nur so kann eine Bewegung ohne Gewebeschädigung erzielt werden [Proffit 2000].

Grundsätzlich generiert jede kieferorthopädische Apparatur eine Kraft und wird aus diesem Grund einen Effekt besitzen. Ziel einer orthodontischen Bewegung sollte es jedoch sein, eine gezielt gerichtete Kraft zu applizieren und die Wurzelposition während der Zahnbewegung zu kontrollieren [Burstone 2000; Proffit 2000]. Das Wissen und das Verständnis über applizierte Kräfte sowie die Interaktion verwendeter Geräte ist entscheidend, um unerwartete Reaktionen und unkontrollierte Zahnbewegungen zu vermeiden oder zumindest zu minimieren [Kusy 1998]. Dies gilt selbstverständlich auch für transparente Schienenapparaturen.

Die Art der durchgeführten Zahnbewegung kann über den Drehmoment/Kraft-Quotienten (M/F-Quotient) bestimmt werden, d. h. dem Quotienten von der applizierten Kraft für die Zahnbewegung und der ausgleichenden Gegenkraft zur Kontrolle der Wurzelposition (Abb. 8). Ist der Quotient kleiner als 1, wird

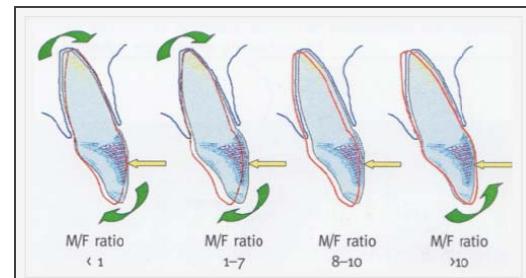


Abb. 8: Drehmoment/Kraft-Quotient [Tuncay 2006].

der Zahn sich nur kippend um das Widerstandszentrum bewegen. Wird der M/F-Quotient höher (1 - 7), verlagert sich das Rotationszentrum weiter nach apikal und eine kontrollierte Kippbewegung ist möglich. Bei einem M/F-Quotienten von 8 - 10 wird eine körperliche Bewegung erzielt und bei einem Quotienten > 10 wird die Wurzelspitze stärker zurückgenommen als die Zahnkrone (Abb. 8).

Die einfachste Zahnbewegung ist eine kippende Bewegung, da diese nur eine Kraftrichtung erfordert; gleiches gilt für eine Rotationsbewegung um das Widerstandszentrum. Translationen verlangen die Applikation von zwei oder mehr balanciert arbeitenden Kraftsystemen, wobei die eine Kraft für die Bewegung der Zahnkrone, die Gegenkraft für eine kontrollierte Wurzelbewegung benötigt wird (Abb. 9). Durch dieses Kräftepaar kann das Widerstandszentrum kontrolliert und nahezu jede gewünschte Bewegung erzielt werden, auch körperliche Zahnbewegungen oder ein Wurzeltorque.

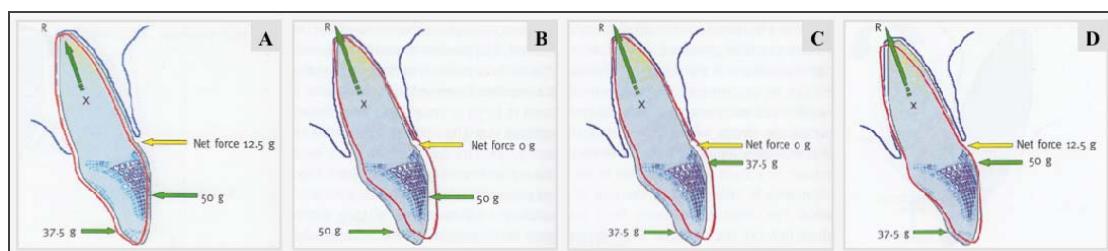


Abb. 9: Biomechanik kontrollierter Zahnbewegungen; (A) körperliche Translation nach lingual, (B) und (C) labialer Kronentorque, (D) lingualer Wurzeltorque; nach [Tuncay 2006].

Bei einer körperlichen Translation werden die Zahnkrone und ihre Wurzel zur gleichen Zeit und mit der gleichen Distanz in dieselbe Richtung bewegt. Ist dabei die auf die linguale Inzisalkante applizierte Kraft geringer als die vestibuläre Kraftkomponente, resultiert eine nach lingual gerichtete Kraft, die sich in einer körperlichen Bewegung des Zahnes nach lingual widerspiegelt, und umgekehrt (Abb. 9). Durch die Applikation von zwei gleichen Kraftgrößen auf der vestibulären und lingualen Zahnoberfläche wird das Widerstandszentrum ebenfalls nach apikal verlagert, hingegen beträgt die nach lingual gerichtete Kraft Null und ein gegen den Uhrzeigersinn gerichtetes Drehmoment wird erzeugt. Dadurch resultiert eine Bewegung des Apex nach lingual und eine stärkere Bewegung der Zahnkrone nach labial (Abb. 9). Ein gegen den Uhrzeigersinn gerichtetes Drehmoment mit einer Rotationsbewegung, bei der die Wurzelspitze stärker nach lingual bewegt wird als die Zahnkrone nach vestibulär, wird dadurch erzielt, indem eine unwe sentlich höhere Kraft auf die Fazialfläche bei gleichbleibender Kraft an der Lingualfläche appliziert wird. Es resultiert eine nach lingual gerichtete Kraft, die zu einem lingualen Wurzeltorque führt (Abb. 9).

2.3.2. Biomechanik des Invisalign®-Systems

Aligner bewegen die Zähne in der Regel wie herkömmliche herausnehmbare kieferorthopädische Apparaturen durch den gezielten Einsatz einer Kraft oder von Druck. Beim Invisalign®-System wird der applizierte Druck jedoch kontrolliert und gerichtet ausgeübt; bei Extrusionsbewegungen werden auch Zugkräfte angewandt. Der applizierte Druck wird für jede einzelne Phase im Bewegungsplan genau festgelegt und segmental können nur bestimmte Zähne für eine Bewegung vorgesehen werden [Boyd *et al.* 2006]. Hieraus resultiert ein Kraftsystem der effizienten, schonenden und kontrollierten Druckausübung [Clements *et al.* 2003]. Dieses scheint in einem physiologischen Bereich zu liegen und spiegelt sich in den folgenden Faktoren wieder:

- Das Ausmaß jeder einzelnen Zahnbewegung ist exakt bestimmbar;
- Durch die intermittierende Krafteinwirkung bestehen Erholungsphasen für das Parodont;
- Es wurden keine Wurzelresorptionen beschrieben.

Die Biomechanik des Invisalign®-Systems ist sehr umfangreich und stellt aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren eine Herausforderung dar, obwohl die Zahnbewegung und der applizierte Druck über den Bewegungsplan am Computer spezifisch simuliert und geplant werden kann. Aufgrund komplexer Vorgänge und diverser Einflussfaktoren sind Erforschung und Verständnis der Interaktionen zwischen den Alignern und Zähnen erschwert [Tuncay 2006]. So setzt beispielsweise eine definierte Kraftübertragung durch die Aligner ihre präzise Passung voraus. Die Aligner sind jedoch nicht starr auf den zu bewegenden Zähnen fixiert; durch eine gleitende Bewegung der Aligner kann der Kontakt zu den Zähnen in seiner Dynamik verändert werden. Des Weiteren erfolgt die Herstellung der Aligner computerisiert, so dass jede Abweichung der Zahnposition von der Computersimulation eine Veränderung der Biomechanik mit sich führen kann [Tuncay 2006].

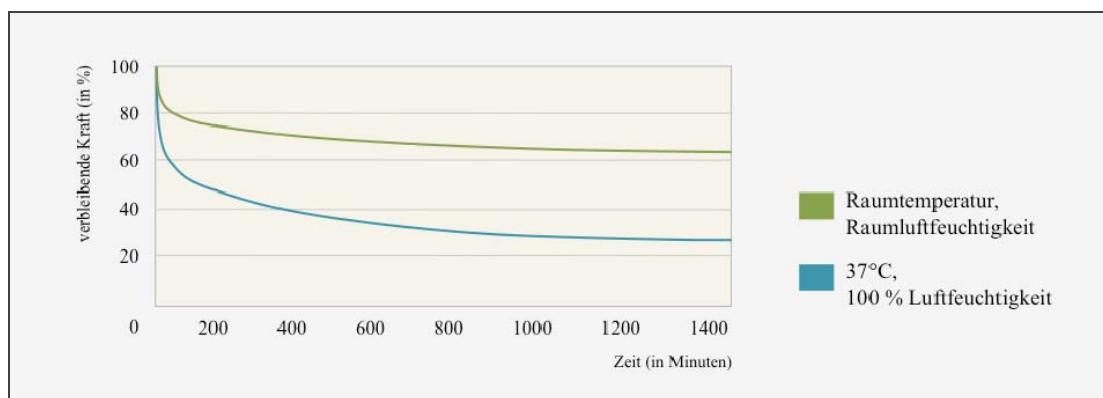


Abb. 10: Kraftverlust des Aligner-Materials EX30™ über die Zeit (in min.); ermittelt wurde die verbleibende Kraft in Prozent; nach [Tuncay 2006].

Die Biomechanik der Aligner ist zur Zeit noch nicht ausreichend bekannt [Kuncio *et al.* 2007]. Gesichert ist, dass die Dynamik eines Aligners von zwei Parametern abhängig ist: seiner Materialeigenschaft und seiner Geometrie. Der Druck ist aufgrund seiner intermittierenden Einwirkung und den Materialeigenschaften nicht konstant und nimmt während der Tragezeit ab (Abb. 10) [Gummelt & Miethke 2008; Tuncay 2006].

Durch einen Aligner wird beim erstmaligen Einsetzen eine anfängliche Kraft von 200 g erreicht. Innerhalb von Stunden fällt diese auf ein konstantes Level von durchschnittlich 40 - 50 g ab [Tuncay 2006]. Dieses Kraftlevel ist ausreichend, um körperliche Zahnbewegungen auszuführen und die Zähne in ihre vorgesehene Position zu bewegen; aktuelle Studien zeigen, dass körperliche Zahnbewegungen durch Kräfte erreicht werden, die bei 18 g liegen [Iwasaki *et al.* 2000]. Aus diesem Grund können durch das Invisalign®-System adäquate Kräfte auf den Zahn übertragen werden, die auch körperliche Zahnbewegungen zulassen. Um eine durchschnittliche Kraft von 40 g zu erzielen, wäre für eine Translation nach lingual ein Drehmoment von 320 - 400 g/mm (M/F-Quotient 8 - 10) und für eine linguale Wurzelbewegung ein Drehmoment von > 400 g/mm (M/F-Quotient > 10) erforderlich [Tuncay 2006].

Die unmittelbare Reaktion auf den ausgeübten Druck erfolgt primär durch das parodontale Ligament und die Gingiva. Die viskoelastischen Eigenschaften des Parodonts vermögen diesen zu dämpfen und in seiner Intensität zu mindern. Die Zahnbewegung wird durch die Relation zwischen der absorbierenden Kapazität des parodontalen Gewebes, den physikalischen Eigenschaften und der Reaktion des Knochens bestimmt; Umbauprozesse des Alveolarknochens sind aufgrund seiner Rigidität langsamer, verlaufen jedoch kontinuierlicher (Stunden/Tage) als die Deformation des Weichgewebes. Das unterschiedliche Ansprechen des parodontalen Gewebes sowie die Veränderung des Aligner-Materials (Stressrelaxation und Flexibilität), verändert den applizierten Druck im Laufe der Tragezeit [Proffit 2000].

Die Druckapplikation eines Aligners auf einen Zahn präzise zu messen ist schwierig, insbesondere da der Druck an der Innenfläche des Aligners auf den Zahn übertragen wird. Genau zu erfassen, an exakt welchem Punkt Zahnkontakt besteht, der avisierte Druck übertragen wird und ein Drehmoment resultiert, stellt eine Schwierigkeit dar. Derzeit sind die verfügbaren Messgeräte zu groß und es gibt keinen Sensor, der den klinisch applizierten Druck beurteilen kann [Tuncay 2006].

2.3.3. Attachments

Attachments sind kleine zahnfarbene Kompositaufbauten, die vestibulär und/oder oral auf der Zahnoberfläche ausgewählter Zähne befestigt werden (Abb. 11). Sie dienen dazu, die Retention des Aligners zu erhöhen und so seiner Dislokation vorzubeugen. Darüber hinaus ermöglichen Attachments eine bessere biomechanische Kontrolle, wodurch definierte, dreidimensionale Zahnbewegungen realisiert werden können [Boyd 2007; Miethke 2001]. Attachments sind indiziert, wenn die Zähne unzureichende Unterschnitte für die Retention des Aligners aufweisen oder komplizierte bzw. weniger genau vorhersagbare Zahnbewegungen erforderlich sind: Rotationen zylindrischer Zähne, Ex- und Intrusionen, körperliche Translationen über längere Strecken (z. B. nach Extraktion von Prämolaren), reine Wurzelbewegungen [Gummelt & Miethke 2008; Kaul & Miethke 2003].

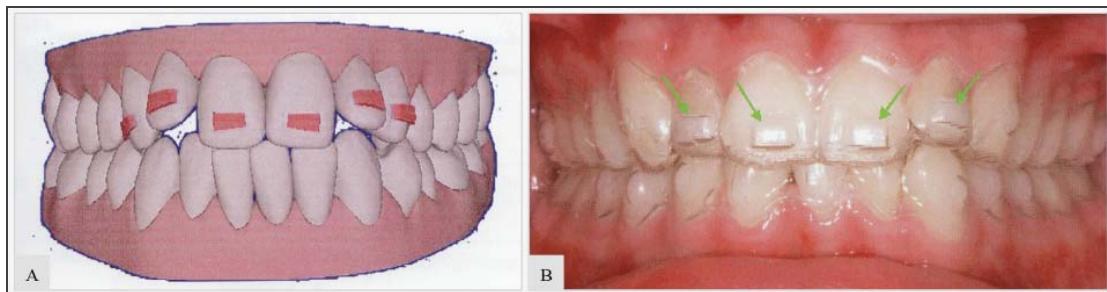


Abb. 11: Exemplarische Darstellung der Auswahl von Attachments und ihrer Platzierung; Darstellung der Attachments im ClinCheck® (A) sowie am Patienten (B); nach [Tuncay 2006].

An den Attachments entstehen unter sich gehende Strukturen, die den Alignern einen besseren mechanischen Halt geben. Mit jedem Attachment nimmt die Retention eines Aligners entsprechend zu, weshalb viele Attachments das Abnehmen eines Aligners komplizieren. Grundsätzlich sind bei Patienten mit langen klinischen Kronen aufgrund ausreichender Unterschnitte nur wenige Attachments erforderlich; im Gegensatz dazu fehlen diese Unterschnitte bei kurzen klinischen Kronen. Attachments vergrößern darüber hinaus die Zahnoberfläche, wodurch ein besseres Umfassen des Zahnes und eine bessere Griffigkeit des Aligners gegenüber einer Auslenkung gewährleistet werden soll [Miethke 2001; Tuncay 2006].

Es gibt zwei Grundformen von Attachments: ellipsoide und rechteckige (Abb. 12). Beide Grundformen können vertikal oder horizontal auf der lingualen und/oder vestibulären Zahnoberfläche angebracht werden. Die zu wählende Form, Größe und ihre Platzierung ist in erster Linie abhängig von der gewünschten Funktion [Boyd 2007]. Anhand der geeigneten Auswahl der Attachmentform und -platzierung ist es klinisch möglich ein Drehmoment zu erzeugen, durch das kontrollierte Zahnbewegungen erzielt werden können [Proffit 2000]. Die

korrekte Auswahl ist entscheidend für eine adäquate Kontrolle der Wurzelposition [Boyd 2007]. Hierfür sollte ein Attachment so konstruiert sein, dass an zwei Punkten Druck appliziert wird [Proffit 2000]. Das Drehmoment wird vom am weitesten inzisal gelegenen Druckpunkt des Attachments zum am weitesten gingival gelegenen Druckpunkt des Aligners berechnet; der effektivste gingivale Kontaktpunkt des Aligners liegt ungefähr 1 - 2 mm von der Gingiva entfernt (Abb. 12).

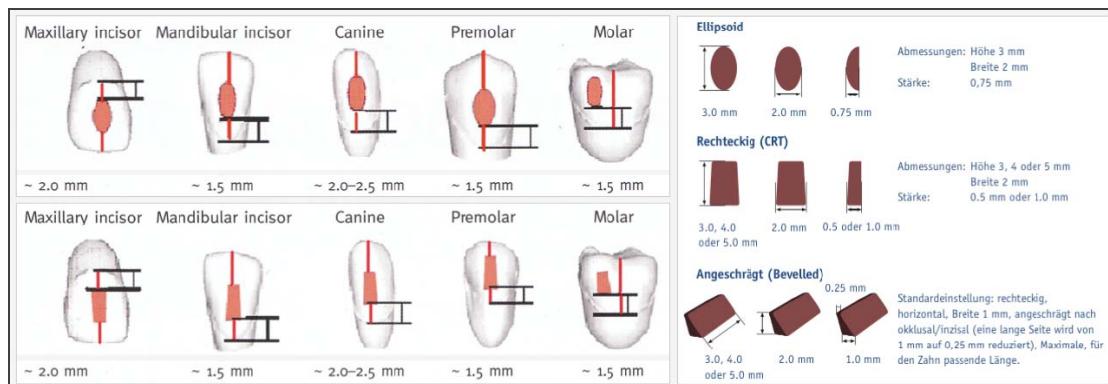


Abb. 12: Grundformen der Attachments, ihrer Größe und Platzierung; Attachments können in vertikaler oder horizontaler Ausrichtung angebracht werden; nach [Align Technology 2007; Tuncay 2006].

Bei Extrusionsbewegungen eignet sich die ellipsoide Form, während rechteckige Attachments für die Wurzelpositionierung bei anterior-posterioren Bewegungen geeigneter erscheinen. Durch die Anbringung einer Abschrägung am Attachment resultiert abhängig von der Ausrichtung des "bevels" ein unterschiedliches Drehmoment und es wird ein zusätzlicher extrusiver oder intrusiver Kraftvektor erzeugt (Abb. 13) [Boyd 2007; Tuncay 2006]. Daher sollten bei gezielten Extrusions- und Intrusionsbewegungen rechtwinkelige Attachments eingesetzt werden. Der extrusive bzw. intrusive Kraftvektor wird dadurch erhalten, indem diese horizontal positioniert und entsprechend der gewünschten Bewegung angeschrägt werden: bei einer Extrusion nach gingival, bei einer Intrusion nach okklusal (Abb. 13) [Tuncay 2006; Turatti *et al.* 2006].

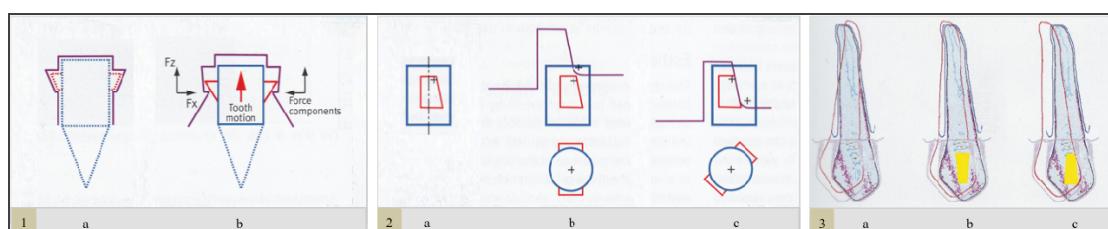


Abb. 13: Mechanische Wirkung von Attachments bei (1) einer Extrusionsbewegung, (2) einer Rotationsbewegung; (3) Auswirkung der unterschiedlichen Attachment-Positionierung auf die resultierende Zahnbewegung: (3a) kein Attachment, (3b) flaches vertikales Attachment mit intrusivem Kraftvektor, (3c) hohes vertikales Attachment mit extrusivem Kraftvektor; nach [Tuncay 2006].

Um zu verhindern, dass sich der Aligner aufgrund seiner Eigenelastizität dehnt und vom Attachment rutscht, sollten Attachments grundsätzlich mit einem Abstand von 1 - 2 mm von der Gingiva platziert werden (Abb. 12) [Tuncay 2006]. Des Weiteren führen die Attachments nur dann zu den simulierten Behandlungsergebnissen, wenn sie in Form und Größe exakt den virtuell definierten Vorgaben entsprechen [Böhme *et al.* 2003; Miethke 2001]. Daher ist bei der Herstellung und dem Befestigen der Attachments viel Sorgfalt erforderlich, um diese mit Hilfe einer Formschablone positionsgerecht auf der Zahnoberfläche anzubringen; die Formschablone (0,2 mm dünne Druckformfolie) wird von der Firma Align Technology mitgeliefert und weist entsprechende Hohlräume für die Attachments auf [Align Technology 2005a]. Die Passung der Attachments sollte bei jedem Kontrolltermin dadurch kontrolliert werden, indem diese markiert und die Passung von den Alignern über den Attachments beurteilt wird [Womack 2006].

2.3.4. Verankerung

Unter Verankerung wird in der Kieferorthopädie die Resistenz gegen Bewegung verstanden. Der Verankerungswert kann leicht, moderat oder maximal gewählt werden und ist abhängig von der erwünschten Zahnbewegung. Bei konventionellen Multibracket-Apparaturen werden für eine adäquate Verankerung gegebenenfalls zusätzliche intra- und/oder extraorale Hilfsmittel benötigt; die am häufigsten verwendeten intraoralen Hilfsmittel sind der Lingual- und der Palatinalbogen, sowie sogenannte "Mini-Implantate". Beim Invisalign®-System wird die erforderliche Verankerung zum einen anhand der gewählten Bewegungsabfolge und zum anderen durch die Aligner selber erzielt.

Tab. III: Indikation des zu wählenden Verankerungswertes beim Invisalign®-System; nach [Tuncay 2006]

geringe Verankerung	moderate Verankerung	maximale Verankerung
Lückenschluss bei Klasse I Expansionen Auflösen von Engständen (keine Distalisierung)	Extraktionen eines unteren Schneidezahnes reziproker Lückenschluss	Klasse II-Behandlungen Distalisieren der Molaren Auflösen eines frontalen Engstandes nach distal Lückenschluss von distal Mittenlinienkorrektur

Eine geringe Verankerung wird dadurch erreicht, indem alle oder zumindest die meisten Zahnbewegungen während der gesamten Bewegungssequenz gleichzeitig durchgeführt werden. Sämtliche Zähne werden dann zur gleichen Zeit, aber mit unterschiedlicher Geschwindigkeit bewegt, abhängig von der totalen Distanz, die ein Zahn bewegen soll; die kleinste Bewegungseinheit beträgt 0,1 mm pro Aligner, die größte 0,25 mm pro Aligner [Tuncay 2006].

Eine maximale Verankerung kann erzielt werden, indem eine Verblockung der nicht bewegten Zähne gegen die durchgeführte Zahnbewegung über die Aligner bewirkt wird. Über diese "intra-Bogen-Verankerung" kann eine gute Verankerungseinheit gegenüber den reaktiven Kräften geschaffen werden. Die reaktiven Kräfte werden über das gesamte Zahnsegment abgeleitet, ohne eine kompromittierende Wirkung auf die angrenzenden Zähne zu besitzen [Giancotti & Ronchin 2006; Turatti *et al.* 2006]. Darüber hinaus können Zähne selektiv bewegt werden, so dass die nicht in die Bewegung einbezogenen Zähne ihre natürliche Festigkeit und damit einen wesentlich höheren Verankerungswert beibehalten [Polzar & Spyropoulos 2006].

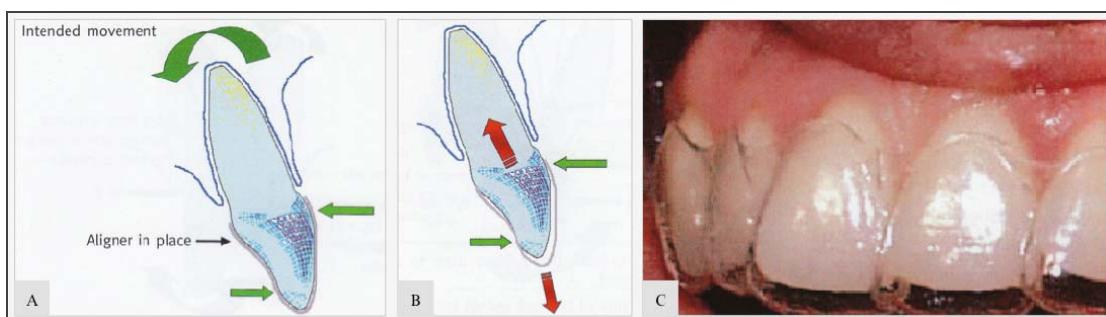


Abb. 14: Verankerungsverlust aufgrund einer mangelhaften Kraftübertragung und Retention der Aligner; (A) schematische Darstellung der geplanten Druckapplikation; (B) und (C) Verankerungsverlust mit der Folge der Intrusion und schlechten Aligner-Passung. Die gewünschte Bewegung erfordert einen höheren Verankerungswert, kleinere Bewegungssequenzen und die Applikation von Attachments; nach [Tuncay 2006].

Sind ausreichend Zähne zur Verankerung vorhanden, lassen sich Zahnbewegungen mit den Alignern relativ problemlos durchführen und Verankerungsverluste sind unwahrscheinlich [Gummelt & Miethke 2008]. Hilfsmittel wie z. B. Attachments und intraorale Gummizüge können die Verankerung darüber hinaus verstärken [Tuncay 2006].

Die biomechanischen Möglichkeiten sollten nicht ausgereizt und bei der Behandlungsplanung beachtet werden. Dies gilt insbesondere für die maximale Bewegungsgeschwindigkeit, die bei 0,25 mm pro Aligner liegt; Rotationen sollten unter 2 - 3 Grad pro Aligner betragen [Tuncay 2006]. Zur Distalisierung eines Molaren bei maximaler Verankerung ist es erforderlich, dass auf der ipsilateralen Kieferseite nur ein Molar zur gleichen Zeit bewegt wird und so das anteriore Segment als Verankerungseinheit genutzt wird. Ein weiterer Zahn sollte erst dann in die Distalbewegung einbezogen werden, sobald der erstbewegte Zahn den halben Weg seiner endgültigen Position erreicht hat. Bei gleichgerichteten Zahnbewegungen auf kontralateralen Kieferhälften können beide Seiten symmetrisch bewegt werden [Neumann *et al.* 2004].

3 FRAGESTELLUNG

Seit Einführung des Invisalign®-Systems im Jahr 1999 konnte durch technische Weiterentwicklungen und auf Grundlage der vorliegenden klinischen Langzeiterfahrungen die Behandlungsmethode kontinuierlich verbessert werden. In der Fachliteratur existieren zahlreiche Veröffentlichungen und seit der Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Kieferorthopädie 2004 ist das Invisalign®-System auch in Deutschland ein wissenschaftlich anerkanntes Behandlungsmittel.

Trotz dieser Erkenntnisse besteht weiterhin eine kontroverse Diskussionen hinsichtlich der therapeutischen Möglichkeiten transparenter Schieneapparaturen. Einige Autoren vertreten die Meinung, Invisalign® sei nur bei leichten dentoalveolären Dysgnathien ohne skelettale Disharmonie anzuwenden [Bollen *et al.* 2003; Clements *et al.* 2003; Melkos 2005; Phan & Ling 2007], während Anwender in neueren Publikationen zeigen, dass auch komplexe kieferorthopädische Fälle mit dieser Behandlungstechnologie erfolgreich therapiert werden können [Boyd *et al.* 2006; Boyd 2005; Hönn & Göz 2006; Womack 2006].

Ziel dieser Literaturübersicht war die retrospektive Beurteilung der therapeutischen Möglichkeiten transparenter Schienenapparaturen anhand publizierter Falldokumentationen von kieferorthopädischen Behandlungen mit dem Invisalign®-System. In den elektronischen Datenbanken MEDLINE und PubMed wurde nach klinischen Patientenberichten recherchiert, bei denen eine kieferorthopädische Behandlung ausschließlich mit dem Invisalign®-System durchgeführt worden ist.

4 MATERIAL UND METHODE

4.1. Literaturrecherche

Die elektronischen Datenbanken MEDLINE und PubMed wurden nach Veröffentlichungen zum Thema Invisalign® durchsucht. Berücksichtigt wurden Publikationen in englischer, französischer und deutscher Sprache.

Anhand des Suchbegriffs "Invisalign" wurde nach Veröffentlichungen recherchiert. Als Auswahlkriterium für die Selektion der Artikel wurde dieser Begriff erst alleine, danach in Kombination mit dem Begriff "case report" angewendet. Bei den Falldokumentationen wurden nur solche berücksichtigt, die innerhalb der vergangenen fünf Jahre, d. h. im Zeitraum vom 21.10.2004 bis zum 20.10.2009 publiziert worden sind.

4.2. Literaturauswahl

Um relevante Veröffentlichungen zu identifizieren, wurden sämtliche Ergebnisse der Literaturrecherche entsprechend den aufgestellten Kriterien ausgewertet.

Es wurden klinische Berichte von Invisalign®-Behandlungen herangezogen, in denen die kieferorthopädische Behandlung bei Patienten mit vollständiger permanenter Dentition dokumentiert worden war. Die Behandlung sollte abgeschlossen und ausschließlich mit dem Invisalign®-System (Align Technology, Inc., Santa Clara, CA, USA) durchgeführt worden sein. Vorangegangene Therapieerfolge oder Therapiemaßnahmen durch andere Behandlungsgeräte, wie z. B. funktionskieferorthopädische Vorbehandlungen, wurden nicht berücksichtigt.

Ein weiteres Einschlusskriterium für die Literaturauswahl war die Einbeziehung des gesamten Zahnbogens in die Behandlungsplanung; kieferorthopädische Maßnahmen ausschließlich im Frontzahnbereich wurden nicht berücksichtigt. Sowohl Extraktionsbehandlungen als auch kombinierte kieferorthopädisch-kieferchirurgische Behandlungen sollten mit aufgeführt werden, ebenso interdisziplinäre Behandlungen im Rahmen einer restaurativen, implantologischen oder parodontalen oralen Rehabilitation.

Publikationen, die keinen Patientenbericht beinhalteten oder nur eine Zusammenfassung dieser darstellten, wurden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

5 ERGEBNISSE

5.1. Quantitative Auswertung

Unter dem Suchbegriff "Invisalign" wurden sowohl bei MEDLINE als auch bei PubMed 57 Dokumente gefunden; beide Literaturdatenbanken zeigten die selben Publikationen an (Tab. IV). Bei 19 der gelisteten Publikationen handelte es sich um Patientenberichte. 13 dieser Falldokumentationen wurden nach dem 21.10.2004 veröffentlicht. Von diesen entsprachen 9 den zuvor festgelegten Auswahlkriterien (Tab. V).

Tab. IV: Ergebnisse der Literaturrecherche vom 20.10.2009

Datenbank	Suchbegriff	Ergebnis
MEDLINE	Invisalign	57
	Invisalign AND case report	0
PubMed	Invisalign	57
	Invisalign AND case report	19

Für die vorliegende Arbeit wurden aus den 9 Publikationen die Daten von insgesamt 15 Patientenberichten einbezogen. Die Dokumentation der Patientenbehandlungen erfolgte durch 6 unterschiedliche Behandler, wobei 11 der Patienten von 2 Behandlern behandelt worden sind (Tab. V). Alle Behandler konnten eine Fachspezialisierung auf dem Gebiet der Kieferorthopädie nachweisen und waren zertifizierte Invisalign®-Anwender.

Tab. V: Relevante Publikationen

Autor	Jahr	Journal	Title
Giancotti <i>et al.</i>	2008	J Clin Orthod	Correction of deep bite in adults using the Invisalign system.
Breznik & Wasserstein	2008	Angle Orthod	Root resorption following treatment with aligners.
Boyd	2008	J Dent Educ	Esthetic orthodontic treatment using the Invisalign appliance for moderate to complex malocclusion.
Womack & Day	2008	J Clin Orthod	Surgical-orthodontic treatment using the Invisalign system.
Boyd	2007	J Clin Orthod	Complex orthodontic treatment using a new protocol for the Invisalign appliance.
Giancotti & Ronchin	2006	J Clin Orthod	Pre-restorative treatment with the Invisalign system.
Womack	2006	J Clin Orthod	Four-premolar extraction treatment with Invisalign.
Hönn & Göz	2006	J Orofac Orthop	A premolar extraction case using the Invisalign system.
Giancotti <i>et al.</i>	2006	Prog Orthod	Extraction treatment using Invisalign® Technique.

5.2. Qualitative Auswertung

5.2.1. Patientenalter und Geschlecht

Bei der Literaturrecherche wurden überwiegend Falldokumentationen von erwachsenen Patienten gefunden. Das Alter der Patienten betrug im Durchschnitt 26 Jahre; der jüngste Patient war 13 Jahre alt, der älteste 56 Jahre (Tab. VI). Vier der Patienten hatten das 18. Lebensjahr noch nicht erreicht.

Von den 15 Patienten waren 9 weiblichen Geschlechts, d. h. der Anteil an Frauen lag bei 60 %; hingegen machten Männer am gesamten Patientenklientel nur 40 % aus (Tab. VI).

Tab. VI: Übersicht über die Ergebnisse der Patientenberichte

Fall	Publikation	Patient	Aligner		Behandlungsdauer	Behandlungsaufgaben						Behandlung																				
			Alter	Geschlecht		Oberkiefer	Unterkiefer	Case Refinement	Klasse I	Klasse II	Klasse III	sagittale Stufe	tiefer Biss	offener Biss	Kreuzbiss	Engstand	Lückenstand	Rotationen	Kippungen	ASR	Protrusion	Retraktion	Intrusion	Extrusion	Aufrichtung	Dortation	Mestalisierung	Distalisierung	Expansion	Extraktion	okklusale Relation	Hilfsmittel
1	Giancotti et al. 2008	23	f	23	29	15	●	●				●				●	●	●	●	●	●	●	●									
2	Giancotti et al. 2008	33	m	22	32	16	●	●	●			●				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●				
3	Giancotti et al. 2008	23	f	11	33	17		●				●				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
4	Breznik & Wasserstein 2008	25	m	27	24	14	●		●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			
5	Boyd 2008	14	f	14	24	13		●				●				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
6	Boyd 2008	16	f	14	24	13		●	●			●				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
7	Womack & Day 2008	37	m	22	13	16	●		●			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
8	Boyd 2007	13	m	29	16	15		●	●			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
9	Boyd 2007	16	f	35	30	18	●	●				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
10	Boyd 2007	55	f	37	33	31	●	●				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
11	Boyd 2007	32	m	43	14	25	●		●			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
12	Giancotti & Ronchin 2006	32	f	17	24	13		●				●				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
13	Womack 2006	28	m	50	49	24	●	●				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
14	Hönn & Göz 2006	23	f	43	28	21	●	●				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
15	Giancotti et al. 2006	25	f	32	14	kA	●		●			●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		

Legende: female (f); male (m); keine Angabe (kA); approximale Schmelzreduktion (ASR); Empfehlung eines Case Refinements wurde abgelehnt (●); stark ausgeprägt (●●).

5.2.2. Behandlungsmotivation

Die persönlichen Beweggründe der Patienten waren in der Mehrzahl der Fälle eine Verbesserung der dentofazialen Ästhetik. Sechs Patienten waren nicht bereit, eine feste Multibracket-Apparatur (Fall 4, Fall 7, Fall 10, Fall 11, Fall 12, Fall 15), eine Extraktion (Fall 4) oder eine kombiniert kieferorthopädisch-kieferchirurgische Therapie zu akzeptieren (Fall 4, Fall 10). Die Art der gewählten Behandlungsapparatur besaß deutlichen Einfluss auf die Entscheidung für eine kieferorthopädische Behandlung.

5.2.3. Behandlungsaufgabe

Bei der Mehrzahl der Patienten lag eine medizinische Behandlungsindikation vor, die eine kieferorthopädische Zahnstellungskorrektur erforderte. Insbesondere funktionelle Probleme aufgrund ausgeprägter vertikaler oder transversaler Kieferdiskrepanzen, sowie das Vorliegen eines Schlafapnoe-Syndroms bedingt durch eine bimaxilläre Retrognathie (Fall 7) führten zu einer Behandlung (Tab. VII). Bei 3 Patienten erfolgte die kieferorthopädische Zahnstellungs-korrektur im Rahmen einer interdisziplinären Behandlung; die dentale Situation erforderte eine kieferorthopädische Behandlung vor der restaurativen oder implantat-prosthetischen Maßnahme oder im Anschluss an eine Parodontalbehandlung (Fall 4, Fall 10, Fall 12; Tab. VII).

Die Behandlungsaufgabe der meisten Falldokumentationen war das Leitsymptom "moderater bis starker Engstand im Ober- und Unterkiefer"; bei 7 Patienten war der Engstand moderat, bei 7 Patienten stark ausgeprägt. Vier der Patienten mit ausgeprägtem Engstand zeigten eine neutrale Verzahnung im Seitenzahnbereich. Der Engstand war verstärkt im anterioren Zahnsegment und äußerte sich in Form einer bialveolären Protrusion, Elongationen und/oder Rotationen (Tab. VI, Tab. VII).

Bei 8 Patienten lag eine Klasse I-Relation vor, bei 6 Patienten eine Klasse II und ein Patient zeigte eine Klasse II/2. Vertikale Abweichungen äußerten sich bei 9 Patienten in Form eines tiefen Bisses, während die Behandlung des offenen Bisses von nur einem Patienten dokumentiert war (Fall 11; Tab. VI, Tab. VII).

Eine Extraktionstherapie wurde bei 5 Patienten durchgeführt (Fall 8, Fall 10, Fall 13, Fall 14, Fall 15; Tab. VI, Tab. VII). Die Extraktion war bei 2 Patienten zur Reduktion des stark ausgeprägten Überbisses (Fall 8) oder zur Korrektur der dentoalveolären Mittenlinien-verschiebung (Fall 10) notwendig. Bei den anderen Patienten erfolgte die Extraktionstherapie von vier Prämolaren im Rahmen der Behandlung eines starken Engstandes mit bialveolärer Protrusion (Fall 13, Fall 14). Der Lückenschluss sollte bei 3 dieser Patienten durch die Retraktion des Frontzahnsegments erfolgen und bei einem Patienten durch die Korrektur der Mittenlinienverschiebung im Oberkiefer (Tab. VI, Tab. VII).

Die am häufigsten erfolgten Zahnbewegungen waren außer der Retraktion der Frontzähne ($n = 6$), deren Protrusion ($n = 9$) und/oder Intrusion ($n = 10$). Bei 4 Patienten wurde eine Distalisierung, bei einem Patienten die Mesialisierung von Seitenzähnen durchgeführt. Die Aufrichtung von Molaren wurden in 2 Falldokumentationen beschrieben (Fall 12, Fall 14). Des Weiteren erfolgte bei 3 Patienten die Behandlung eines seitlichen Kreuzbisses durch die Expansion des Oberkiefers (Fall 4, Fall 10, Fall 13). Bei 8 Patienten wurde eine approximale

Schmelzreduktion (ASR) durchgeführt, wobei 7 davon sich ausschließlich auf das Frontzahnsegment beschränkten (Tab. VI, Tab. VII); über das Ausmaß und den Zeitpunkt der Schmelzreduktion wurden von den Autoren keine konkreten Angaben gemacht.

Bei einem Patienten wurde eine kombinierte kieferorthopädisch-kieferchirurgische Behandlung durchgeführt. Hierbei handelte es sich um eine Klasse II/2-Behandlung bei bimaxillärer Retrognathie (Fall 7; Tab. VI, Tab. VII).

Als zusätzliches Hilfsmittel wurde bei 3 Patienten eine Klasse II-Mechanik gewählt, mit dem Ziel, die okklusale Relation zu behandeln (Fall 5, Fall 6, Fall 11). Des Weiteren nutzten 2 Behandler Elastics, entweder um die Angulation eines Eckzahnes nach erfolgter Retraktion zu verbessern (Fall 13), oder um die Bewegung eines Zahnes im Aligner zu unterstützen (Fall 12; Tab. VII). Hierfür wurden klarsichtige Knöpfchen entsprechend des gewünschten Kraftvektors auf den vestibulären und/oder oralen Zahnflächen angebracht und Elastics (2 oz bzw. 4 oz) in diese eingehängt.

5.2.4. Behandlungsergebnis

Die Patienten zeigten während der Behandlung alle eine sehr gute Compliance. Die Übereinstimmung der klinischen Situation mit dem ClinCheck® war bei 10 der Fälle sehr gut oder gut, bei 5 Patienten stimmte diese nur annähernd überein. Ein Case Refinement im Anschluss an die Behandlung wurde 10 der 15 Patienten empfohlen, wobei dies insbesondere nach umfangreichen Zahnbewegungen notwendig erschien; z. B. bei Patienten, bei denen starke Rotationen oder ein Lückenschluss nach Extraktion angestrebt worden ist. Vier Patienten wurde nach erfolgter Extraktionstherapie ein Case Refinement empfohlen (Fall 10, Fall 13, Fall 14, Fall 15; Tab. VII). Ziel des Case Refinement in 3 der Fälle war es, die achsengerechte Einstellung der die Extraktionslücke begrenzenden Zähne zu gewährleisten; der Lückenschluss war bereits vollständig erfolgt.

Fünf der Patienten zeigten nach Ausformung der Zahnbögen eine deutlich geringere Compliance. Sie lehnten das Case Refinement ab (Fall 4, Fall 7, Fall 13, Fall 14, Fall 15; Tab. VI, Tab. VII). Hierdurch war die Feineinstellung der Zahnbögen und der Okklusion nicht gewährleistet und das gewünschte Behandlungsziel konnte nicht vollständig erreicht werden. Ein Behandler führte in diesem Fall eine "Kompromiss"-Behandlung mit sogenannten "Refinement Elastics" fort, um die Angulation der Eckzähne über diese Gummizüge zu verbessern (Fall 13).

Ein Mid-Course Correction musste in keinem der Falldokumentationen durchgeführt werden.

5.2.5. Behandlungsdauer

Durchschnittlich wurden im Oberkiefer 28 Aligner, im Unterkiefer 26 Aligner für die Korrektur der Zahnstellung hergestellt. Patienten, bei denen Zähne extrahiert und ein Lückenschluss nur mit dem Invisalign®-System angestrebt worden ist, hatten entsprechend dem Umfang der Zahnbewegung deutlich mehr Schienen für die Zahnstellungskorrektur erhalten. Die Anzahl der Aligner nach Extraktion betrug 38 Aligner im Oberkiefer und 28 Aligner im Unterkiefer (Tab. VI).

Die meisten Behandler hielten ihre Patienten an, einen Aligner zwei Wochen zu tragen. Die Kontrollsitzungen wurden von 2 Behandlern in einem 4 - 6 wöchigem Abstand durchgeführt, bei 2 Behandlern erfolgten die kieferorthopädischen Kontrollen alle 8 - 12 Wochen. Die übrigen Autoren führten keine spezifischen Angaben hinsichtlich des Trageintervalls und den Kontrollterminen auf.

Die Behandlung mit den Invisalign®-Schienen dauerte im Durchschnitt 18 Monate; ohne Extraktion 16 Monate, im Rahmen einer Extraktionsbehandlung 22 Monate.

Tab. VII/1: Übersicht über die qualitativen Ergebnisse der Patientenberichte

Fall	Befund und Diagnose	Behandlungsplan	Behandlungsergebnis
1	Klasse I, tiefer Biss, moderater Engstand im Ober- und Unterkiefer, Retroinklination der mittleren oberen und der unteren Incisivi	ASR in der Ober- und Unterkieferfront, Protrusion und Intrusion der Incisivi im Ober- und Unterkiefer, Beibehalten der okklusalen Relation	Case Refinement im Unterkiefer erforderlich (6 Monate)
2	Klasse I, tiefer Biss, starker Engstand im Ober- und Unterkiefer, diverse Rotationen; Gummy-Smile	Protrusion und Intrusion im Ober- und Unterkiefer, Expansion, ASR im 3. Quadranten, Beibehalten der okklusalen Relation	Case Refinement im Ober- und Unterkiefer erforderlich (5 Monate)
3	Klasse I, tiefer Biss, moderater Engstand im Unterkiefer	Protrusion und Intrusion im Ober- und Unterkiefer, Beibehalten der okklusalen Relation	gute Ausformung der Zahnbögen, kein Case Refinement erforderlich
4	Klasse III (dental und skelettal), Overjet: 1 mm, Overbite: 1 mm, starker Engstand im Oberkiefer, moderater Engstand im Unterkiefer, anteriore Rotationen, Schmalkiefer, Kreuzbiss 12/42, 22/32 und 24/34	Expansion im Oberkiefer, ASR in der Unterkieferfront, Protrusion der Ober- und Unterkieferfront, Überstellen des Kreuzbisses, Ausformung der Zahnbögen, Beibehalten der Klasse III-Verzahnung	ASR erfolgte wie geplant, Ausformung der Zahnbögen nicht vollständig erreicht; ein Case Refinement wurde nicht erwünscht
5	Klasse II, tiefer Biss, moderater Engstand im Oberkiefer, starker Engstand im Unterkiefer	Protrusion im Ober- und Unterkiefer, Expansion und Ausformung der Zahnbögen, Einstellen in Klasse I-Okklusion mit Klasse II-Elastics (4 oz)	Ausformung der Zahnbögen und Einstellung in Neutralokklusion; das Restwachstum des Unterkiefers unterstützte die sagittale Korrektur

Abkürzungen: approximale Schmelzreduktion (ASR), ounce (oz).

Tab. VII/2: Übersicht über die qualitativen Ergebnisse der Patientenberichte

Fall	Befund und Diagnose	Behandlungsplan	Behandlungsergebnis
6	Klasse II rechts, ausgeprägter Überbiss, moderater Engstand im Oberkiefer, leichter Engstand im Unterkiefer, Labialstand und Mesialangulation von 13	Protrusion der Inzisivi, Ausformung der Zahnbögen, Einstellen in Klasse I-Okklusion mit Klasse II- Elastics (4 oz)	Ausformung der Zahnbögen und Einstellung in Neutralokklusion
7	Klasse II/2, ausgeprägter tiefer Biss, anteriore Rotationen; retrognathia Unterkiefer, geringe maxilläre Retrognathie, kleiner Nasolabialwinkel; chronisches Schnarchen und Schlafapnoe mit ausgeprägter Tagesmüdigkeit	Protrusion und Intrusion der Incisivi im Oberkiefer, ASR in der Unterkieferfront, Ausformen der Zahnbögen; bignathie Chirurgie 6 Wochen nach kieferorthopädischer Vorbehandlung, postoperative Stabilisierung für 6 Wochen; Case Refinement 14 Wochen postoperativ: Restlückenschluss, Feinausformung	Einstellung in Klasse I-Relation durch skelettale Korrektur, Verbesserung des Nasolabialwinkels; annähernd Übereinstimmung des ClinCheck® und der klinischen Situation, leicht distal offener Biss (Schließen durch intermaxilläre Gummizüge); Case Refinement nicht erwünscht, postoperativ schlechte Compliance; gute Stabilität 9 Monate nach Behandlungsende
8	Klasse II/1, Overjet: 13 mm, Overbite: 7 mm, leichter Engstand, Proklination der Oberkieferfront; starke maxilläre dentoalveolare Prognathie, leicht retrognathia Unterkiefer	Extraktion 14 und 24, Retraktion und Intrusion der Oberkieferfront, Einstellen in Klasse I-Okklusion; vertikale rechteckige Attachments an 13, 15, 23, 25	Lückenschluss mit regelrechter Wurzelangulation, distal leicht offener Biss rechts; das Restwachstum des Unterkiefers unterstützte die Reduktion des Überbisses; ClinCheck® stimmig mit der klinischen Situation, kein Case Refinement erforderlich
9	Klasse I, Lückenstand in der Oberkieferfront, starke Retroinklination der Incisivi und Superposition von 11 und 21, Mesialangulation und Rotation der Eckzähne, Lingualstand 44, moderater Engstand im Unterkiefer, diverse Rotationen; ungleichmäßiger Gingivaverlauf, 18, 28, 38 und 48 teilretiniert	Protrusion und Intrusion der Incisivi, Distalisierung des 2. Quadranten um 2 mm nach Extraktion der Weisheitszähne, Einordnen von 44, Ausformung der Zahnbögen; elliptische Attachments an allen Prämolaren	Ausformung der Zahnbögen, Verbesserung des tiefen Bisses und des Gingivaverlaufs, Reduktion des Interinzisalwinkels, geringe Beeinflussung der skelettalen Relationen; ClinCheck® annähernd erreicht, Case Refinement zur Derotation von 13, Fortbestehen einer leichten Rotation nach Case Refinement
10	Klasse I, offener Biss, starker Engstand im Ober- und Unterkiefer, dentoalveolare Mittenlinienverschiebung im Oberkiefer, ausgeprägte Rotationen, Schmalkiefer, Kreuzbiss 14/44, Mesialstand und Kippung von 27 und 28, 26 fehlt; Z. n. Parodontalbehandlung mit einem Knochenverlust von 20 %, keine Anzeichen einer Entzündung oder Progredienz	Extraktion 14, Expansion, ASR in der Ober- und Unterkieferfront, Retraktion und Extrusion im Oberkiefer, Proklination und Extrusion im Unterkiefer, Mittellinienkorrektur, Derotation, Ausformung der Zahnbögen; vertikale rechteckige Attachments an 13, 15, 16 und 17; elliptische Attachments an 34, 35, 44 und 45 sowie den Frontzähnen im Ober- und Unterkiefer	Lückenschluss mit regelrechter Wurzelangulation, Verbesserung der Okklusion, Schließen des offenen Bisses mit Ausnahme von 12 und 22 (1 mm außer Okklusion); 2 Case Refinements erforderlich, 15 Monate nach Abschluss stabil; eine kieferorthopädisch-chirurgische Behandlung wurde nicht erwünscht

Abkürzungen: approximale Schmelzreduktion (ASR), ounce (oz).

Tab. VII/3: Übersicht über die qualitativen Ergebnisse der Patientenberichte

Fall	Befund und Diagnose	Behandlungsplan	Behandlungsergebnis
11	Klasse II/1, moderater Engstand im Ober- und Unterkiefer, Overbite: 3 mm, Overjet: 7 mm; Z. n. kieferorthopädischer Behandlung als Jugendlicher (vier Prämolaren-Extraktion), geringe Wurzelresorptionen	ASR in der Oberkieferfront, Retraktion von 11 und 21 um 3 mm, Intrusion im Ober- und Unterkiefer, Einstellen der okklusalen Relation (Klasse II-Elastics, 4 oz)	Case Refinement erforderlich, leichte Rotation von 43 (zuvor war kein Attachment geplant); nach Case Refinement Übereinstimmung der klinischen Situation mit dem ClinCheck®
12	Klasse I, leicht tiefer Biss, ausgeprägte Spee-Kurve, Supraposition der unteren Incisivi, anteriorer Lückenstand im Unterkiefer, diverse Rotationen, Elongation 16 und 26, Mesialangulation 37 und 47; 36 und 46 fehlen	Intrusion und Protrusion der unteren Incisivi, Mesialisierung der Eckzähne und Prämolaren im Unterkiefer, Lückenschluss im anterioren Unterkiefer von distal, Derotation der Frontzähne im Ober- und Unterkiefer, Intrusion von 16 und 26, Aufrichtung von 37 und 47, Lückenöffnung für die Implantation 36 und 46	Aufrichtung und achsengerechte Einstellung von 37 und 47, Intrusion um ca. 1,5 mm; 42 stieg aus den Aligner aus: 2 oz Elastics für 30 Tage über ein linguales und labiales Knöpfchen; kein Case Refinement erforderlich
13	Klasse I, starker Engstand im Ober- und Unterkiefer, Kreuzbiss der ersten Molaren sowie von 22/33, Labialstand und Mesialangulation der Eckzähne, Lingualstand der seitlichen unteren Inzisivi, regelrecht inklinierte mittlere Incisivi, diverse Rotationen, Schmalkiefer	Extraktion von 14, 24, 34 und 44, Retraktion der Ober- und Unterkieferfront, Derotation, Beibehalten der nach mesial angulierten Eckzahnwurzeln während deren Retraktion, Aufrichtung der Eckzähne nach erfolgtem Lückenschluss	Ausformung der Zahnbögen, Einstellen der Okklusion und des regelrechten Überbisses, Aufrichtung der Eckzähne, eine korrekte Angulation wurde nicht erzielt, insb. von 43; schwacher okklusaler Kontakt von 16 und 26; Case Refinement nicht erwünscht, Verbesserung der Eckzahnangulation durch Powerarms und "Refinement Elastics" (4 Monate)
14	dentale Klasse I, Overjet: 6 mm, Overbite: 1 mm, leicht asymmetrische Schmalkiefer, ausgeprägter frontaler Engstand, Proklination und Anteposition der Frontsegmente, Außenstand von 22, 33 und 43, Palatalinstand von 12, Einengung der unteren Stützzone um 3,5 mm rechts und 4,5 mm links, dentaloalveoläre Mittenlinienverschiebung im Oberkiefer 1 mm nach rechts, Mesialangulation von 33, 34, 35, 43 und 45, erschwerter Lippenschluss	Extraktion von 14, 24, 34 und 44, Aufrichtung und Retraktion des frontalen Segments, achsengerechte Einstellung von 33 und 43, Auflösen des Engstandes, Korrektur der Mittenlinienverschiebung, Beibehalten der Klasse I-Okklusion, erzielen einer physiologische Frontzahnbeziehung in sagittaler und vertikaler Ebene	Lückenschluss mit nahezu achsengerechter Einstellung, Retraktion und Aufrichtung der Ober- und Unterkieferfront, Korrektur der Mittenlinienverschiebung, Beibehalten der Neutralokklusion, Overjet: 2 mm; Behandlungsziele wurden zufriedenstellend erreicht, Therapie verlief entsprechend der virtuellen Behandlungssimulation; Optimierung hätte durch ein Case Refinement erzielt werden können (wurde von der Patientin abgelehnt)
15	Klasse II, ausgeprägter tiefer Biss, starker Eng- und Drehstand im Ober- und Unterkiefer, Proklination der unteren Incisivi, dentaloalveoläre Mittenlinienverschiebung im Oberkiefer um 2 mm nach links; mandibuläre Retrognathie, dolichofazialer Gesichtsaufbau, konkaves Gesicht, regelrechter Nasolabialwinkel, retrusives Lippenprofil	Extraktion von 14 und 24, Retraktion der Oberkieferfront, ASR in der Unterkieferfront, Derotation und Ausformung der Zahnbögen, Einstellen einer Klasse I-Eckzahnrelation, Erhalten der Molarenrelation; Kontrolle der vertikalen Dimension, Beibehalten der skelettalen Divergenz; moderate Verankerung	Korrektur des tiefen Bisses und der Mittenlinienverschiebung, Lückenschluss; die Eckzähne, Prämolaren und Molaren sind nicht achsengerecht ausgerichtet, Verbesserung der dentalen und skelettalen Relation und des Profils; geplante Überkorrekturen der anterioren Segmente waren notwendig, kein Case Refinement erforderlich

Abkürzungen: approximale Schmelzreduktion (ASR), ounce (oz).

6 DISKUSSION

6.1. Diskussion von Material und Methode

Die ausgewählten Publikationen befassten sich mit dem Behandlungsvorgehen und den erzielten Therapieresultaten von kieferorthopädischen Behandlungen mit dem Invisalign®-System. Es zeigten sich qualitative Unterschiede zwischen den Falldokumentationen hinsichtlich ihres Umfangs und der Vollständigkeit von Angaben zur Behandlung. Während einige Publikationen nur knappe Ausführungen in Bezug auf Diagnose, Behandlungsplanung und Therapieresultat machten [Giancotti *et al.* 2008], beschrieben andere Autoren nicht nur detailliert das gewählte Behandlungsvorgehen, sondern äußerten sich zudem kritisch zur Behandlung [Hönn & Göz 2006]. Die Studie von Brezniak und Wasserstein erfüllte die zuvor festgelegten Auswahlkriterien und die Darstellung der Diagnose und der Behandlungsplanung war umfassender als bei anderen Fallberichten, jedoch wurden die Behandlungsergebnisse überwiegend unter dem Aspekt der Wurzelresorption diskutiert [Brezniak & Wasserstein 2008]; eine kritische Betrachtung hinsichtlich des kieferorthopädischen Behandlungserfolges entsprach in dieser Publikation nicht der Fragestellung.

Die Anzahl der in MEDLINE-gelisteten Fallberichte ist derzeit noch gering; im gesamten Zeitraum seit Einführung des Invisalign®-Systems in den USA wurden insgesamt 19 Case Reports veröffentlicht. Neun Publikationen entsprachen den in dieser Literaturrecherche festgelegten Auswahlkriterien. Diese 9 Artikel führten 15 Falldokumentationen auf, wodurch ein Einblick in die Behandlungsmöglichkeiten mit dem Invisalign®-System möglich war. Eine abschließende Aussage hinsichtlich der Effektivität des Invisalign®-Systems bzw. des Indikationsspektrums war auf dieser Grundlage nur bedingt gegeben. Dies galt insbesondere aus dem Grund, weil die einzelnen Fallzahlen für die unterschiedlichen Dysgnathien zu gering waren und die Artikel eher methodisches Interesse zeigten. Grundsätzlich aber bietet das computergestützte Invisalign®-Verfahren die Möglichkeit, Behandlungen derart zu dokumentieren, dass die erfolgten Therapiemaßnahmen auf wissenschaftlicher Grundlage untersucht werden könnten; für keine andere kieferorthopädische Behandlungsmethode liegen so viele Daten für eine evidenzbasierte Untersuchung vor.

6.2. Diskussion der Ergebnisse

6.2.1. Patienten

Die bei der vorliegenden Literaturrecherche evaluierten Daten zeigten, dass es sich bei den Patienten, die mit dem Invisalign®-System behandelt wurden, überwiegend um junge Frauen im Alter von durchschnittlich 26 Jahren handelte (Tab. VI). Das Klientel entsprach somit annähernd dem charakteristischen Patientenprofil kieferorthopädischer Invisalign®-Behandlungen; nach einer Untersuchung von Meier *et al.* beträgt das Alter im Durchschnitt 35 Jahre und der Anteil von Frauen an der Gesamtklientel liegt bei 72 % [Meier *et al.* 2003].

Die Gründe für ein Behandlungsanliegen von Erwachsenen kann stark variieren. Das Aussehen ihrer Zähne und gleichzeitig ihr psychosoziales Wohlfühlgefühl zu verbessern, steht jedoch im Vordergrund [Klages *et al.* 2004; Inglehart & Bagramian 2002; Nattrass & Sandy 1995]. Für den Behandler hingegen sind Gesichtspunkte wie Vorbeugen oder Beheben parodontaler Schäden oder funktioneller Störungen im Kiefer- und Gesichtsbereich entscheidende Parameter für eine kieferorthopädische Behandlung. Diese Zusammenhänge sind den meisten Patienten nicht bekannt oder die dentofaziale Ästhetik spielt bei Erwachsenen eine bedeutendere Rolle als die Funktion [Meier *et al.* 2003]. Die persönlichen Beweggründe der Patienten in der vorliegenden Untersuchung waren überwiegend ästhetischer Natur, obgleich bei einem Großteil der Patienten auch eine medizinische Behandlungsindikation vorlag (Tab. VII).

Eine Vielzahl der Patienten lehnte die Behandlung mit einer festen Multibracket-Apparatur ab. Einige Patienten hatten im Rahmen einer kieferorthopädischen Behandlung zu einem früheren Zeitpunkt bereits Erfahrung mit einer festen Apparatur gemacht und waren nicht bereit, die erfahrenen Einschränkungen während der Behandlung erneut zu akzeptieren. Die gewählte Behandlungsapparatur besaß aus diesen Gründen einen deutlichen Einfluss auf die Entscheidung für eine kieferorthopädische Behandlung [Meier *et al.* 2003].

6.2.2. Behandlung

Aus den vorliegenden Publikationen ging hervor, dass die Behandler eine tägliche Tragedauer der Aligner von 20 - 22 Stunden vorgaben und die Patienten anwiesen, die Aligner alle 2 Wochen zu wechseln. Untersuchungen bekräftigen, dass die Tragezeit der Aligner entscheidend dazu beiträgt, dass die avisierten Zahnbewegungen klinisch umgesetzt werden. Die optimale Tragezeit eines Aligners entspricht einem ganztägigen Tragen über einen Zeitraum von zwei

Wochen [Bollen et al. 2003; Duong & Kuo 2006]. Einige erfahrene Invisalign®-Anwender empfehlen bei körperlichen Zahnbewegungen ein verlängertes Trageintervall von 3 Wochen, da hierdurch komplexe Bewegungen in ihrer Umsetzung begünstigt werden sollen [Turrati et al. 2006].

Der Zeitpunkt einer Überprüfung der klinischen Situation durch den Behandler wird in der Literatur unterschiedlich angegeben und wurde auch in den vorliegenden Falldokumentationen verschieden gehandhabt; beispielsweise führte Womack bei seinen Patienten Kontrollen in einem durchschnittlichen Zeitrahmen von 8 - 12 Wochen durch, während Brezniak und Wasserstein alle 4 - 6 Wochen die Passung der Aligner kontrollierten [Womack 2006; Bezniak & Wasserstein 2008]. Das gewählte Kontrollintervall durch den Behandler schien keinen Einfluss auf das Behandlungsergebnis zu besitzen. Um die geplanten Zahnbewegungen erfolgreich durchführen zu können, erscheint die regelmäßige Überprüfung der klinischen Situation mit der Simulation im ClinCheck® von größerer Relevanz zu sein; der Vergleich sollte alle 6 - 10 Aligner erfolgen [Womack 2006]. Über den Bewegungsplan wird die Bewegungsstrecke und der dafür erforderliche Druck individuell definiert und seine Übertragung setzt die präzise Passung der Aligner voraus. Eine Abweichung der Zahnposition vom simulierten Behandlungsplan würde zu einer Veränderung der Biomechanik führen können, da der Kontaktspunkt zwischen dem Aligner und den Zähnen verändert wird [Tuncay 2006]. Aus diesen Gründen sollte die Behandlung unterbrochen werden, wenn die Übereinstimmung nicht zu mindestens 90 % gegeben ist [Womack 2006].

Abweichungen von der Simulation im ClinCheck® wurden während der Behandlung in keinem der Fälle dokumentiert. Der ClinCheck® stimmte bei allen Patienten mit der klinischen Situation insoweit überein, dass keine Abweichung vom Behandlungsvorgehen erfolgte oder ein Mid-Course Correction erforderlich war. Lediglich bei einem Patienten war die Unterstützung einer Zahnbewegung durch zusätzliche Hilfsmittel dokumentiert (Fall 12; Tab. VI, Tab. VII). Ein Eingreifen während der Behandlung wurde in diesem Fall notwendig, da ein unterer Eckzahn nicht mit dem Bewegungsimpuls des Aligners mitgegangen war. Durch das Einhängen eines 2 ounce starken Elastics über die Aligner konnte die klinische Situation deutlich verbessert werden [Giancotti & Ronchin 2006]. Beobachtungen von Womack zufolge kann die Planung kleinerer Behandlungsschritte dazu beitragen, dass die Zähne mit den Alignern die gewünschten Bewegungen mitgehen [Womack 2006].

Bei nahezu allen Patienten wurden die geplanten Zahnbewegungen erfolgreich umgesetzt und die Patienten waren zufrieden mit dem erzielten Behandlungsergebnis. Eine Empfehlung seitens

des Behandlers zum Case Refinement wurde bei 10 Patienten ausgesprochen und sollte eine zusätzliche Verbesserung des Behandlungsergebnisses bewirken. Die Indikation für ein Case Refinement war insbesondere zur Verbesserung von Rotationen bei Eckzähnen und Prämolaren, sowie der Wurzelangulation nach Lückenschluss gegeben (Tab. VI, Tab. VII) [Duong & Kuo 2006; Phan & Ling 2007]. Rotationen unterer Eckzähne scheinen grundsätzlich mit einer geringeren Genauigkeit ausgeführt zu werden und erfordert bei 41 % der Patienten ein Case Refinement [Kravitz *et al.* 2008; Kravitz *et al.* 2009]. Dem gegenüber konnten drei Studien nachweisen, dass mit dem Invisalign®-System vergleichbare oder bessere Ergebnisse insbesondere in Bezug auf Ausformung der Zahnbögen, Einstellen approximaler Kontaktpunkte sowie der Wurzelangulation erzielt werden können [Djeu *et al.* 2005; Kuncio *et al.* 2007; Vincent 2005]. Die Untersuchungen von Djeu *et al.* und Kuncio *et al.* verglichen das Ergebnis kieferorthopädischer Behandlungen mit dem Invisalign®-System und konventioneller Multibracket-Apparaturen anhand des "American Board of Orthodontics objective grading system" [Casko *et al.* 1998]; Extraktionsbehandlungen wurden in diesen Studien nicht untersucht.

Die Beobachtungen aus den vorliegenden Patientenberichten verdeutlichen dennoch, dass eine exakte Umsetzung von komplexen Zahnbewegungen nicht mit Sicherheit gewährleistet werden kann. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, für bestimmte Bewegungen bereits bei der Behandlungsplanung ein Case Refinement mit einer "Überkorrektur" zum Abschluss der Behandlung vorzusehen. Bei einer Überkorrektur wird die Zahnbewegung über die Idealstellung hinaus geplant um sicherzustellen, dass die gewünschte Bewegung trotz Materialelastizität und einer potentiellen Rezidivgefahr erreicht wird und auch erhalten bleibt. Um beispielsweise eine korrekte Wurzelangulation oder Rotation zu gewährleisten, sollten in der Bewegungsphase Zahnbewegungen über die avisierte Position hinaus eingeplant werden [Tuncay 2006]. Giancotti *et al.* planten bereits im Voraus eine Überkorrektur für die Derotation der Frontzähne ein. Das Behandlungsergebnis zeigte, dass erst durch das Tragen aller Schienen die gewünschten Zahnbewegungen optimal ausgeführt und die Ausformung der Zahnbögen erfolgt waren (Fall 15; Tab. VI, Tab. VII) [Giancotti *et al.* 2006]. Auch bei der Retraktion der Frontzähne sollten die biologischen und biomechanischen Gesetzmäßigkeiten gleichermaßen beachtet werden: Die Wurzeln der Frontzähne richten sich in dem Moment auf, wo sie retrahiert werden. Dies gilt auch, wenn diese Bewegung im ClinCheck® nicht vorgesehen ist. Um die Wurzelangulation zu verbessern, sollte in der virtuellen Simulation die palatinale bzw. linguale Wurzelangulation als Überkorrektur beibehalten werden [Womack 2006].

Die Bereitschaft der Patienten für eine Weiterbehandlung im Rahmen des Case Refinements spiegelt wider, dass es sich bei den ausstehenden Korrekturen überwiegend um ästhetische Gesichtspunkte handelte und die Notwendigkeit für ein Case Refinement weniger im Zusammenhang mit dem ursprünglichen Patientenanliegen stand. Obgleich die Patienten heutzutage deutlich höhere ästhetische Ansprüche zeigen, lehnten 5 der 10 Patienten, denen ein Case Refinement empfohlen worden war, dieses ab. Die Entscheidung der Patienten gegen ein Case Refinement wird darin begründet gewesen sein, dass ihr Hauptanliegen, die Verbesserung der dentalen Ästhetik, mit dem vorliegenden Therapieergebnis bereits zu ihrer Zufriedenheit gelöst war [Meier *et al.* 2003]. Die mangelnde Bereitschaft, die Behandlung mit einem Case Refinement abzuschließen, könnte jedoch auch daher röhren, dass die Patienten grundsätzlich nicht länger bereit waren, sich einer kieferorthopädischen Behandlung zu unterziehen. Einer Untersuchung zufolge akzeptieren Invisalign®-Patienten jedoch eine Behandlungszeit von 2,5 Jahren [Meier *et al.* 2003]. Die tatsächliche durchschnittliche Behandlungsdauer betrug in den vorliegenden Falldokumentationen 18 Monate; ohne Extraktion 16 Monate, im Rahmen einer Extraktionsbehandlung 22 Monate. Die Behandlungsdauer war somit mit der einer festsitzenden Apparatur bei Heranwachsenden vergleichbar [Bishop *et al.* 2002; Miethke 2001]. Nattrass und Sandy machen hingegen darauf aufmerksam, dass die Behandlungsdauer von Erwachsenen mit Multibracket-Apparaturen aufgrund biologischer Besonderheiten 75 % über der von Kindern und Heranwachsenden liegen kann [Nattrass & Sandy 1995].

Die vorgestellten Patienten zeigten grundsätzlich eine sehr gute Motivation und Mitarbeit. Die Mitarbeit des Patienten leistet einen entscheidenden Beitrag für den Erfolg einer Behandlung und ist Voraussetzung für ein gutes Behandlungsergebnis; respektiv lassen sich die meisten Misserfolge auf eine mangelhafte Compliance zurückführen [Duong & Kuo 2006]. Einigen Autoren zufolge soll der Behandlungserfolg sogar vollständig von der Patientenmitarbeit abhängen und verantwortlich dafür sein, ob das vom Behandler geplante Behandlungsziel erreicht wird [Boyd 2007; Womack 2006]. Hingegen bekräftigen andere Publikationen, dass die Kenntnis über biologische Gegebenheiten, die Biomechanik der Aligner und die Behandlungsplanung in gleicher Weise am Therapieerfolg beteiligt sind [Boyd *et al.* 2006; Hönn & Göz 2006]. Ein gutes Ergebnis insbesondere bei stark ausgeprägten Dysgnathien zu erzielen, ist abhängig von der klinischen Erfahrung des Behandlers mit den biomechanischen Prinzipien der Invisalign®-Therapie und auch mit denen anderer kieferorthopädischer Behandlungsmethoden. Die Bedeutung einer umfangreichen und sorgfältigen Diagnostik und Behandlungsplanung, der Definition des Behandlungsziels sowie das Verständnis sowohl für die Biomechanik als auch für Zahnbewegungen mit Invisalign®, ist insbesondere beim erweiterten

Einsatz dieses Behandlungssystems hervorzuheben. Deren Kenntnisse sind Voraussetzung für eine gute Übersicht beim ClinCheck®, dem Staging der Aligner und der Analyse des gesamten Prozesses [Boyd *et al.* 2006; Boyd 2007; Boyd 2008; Hönn & Göz 2006].

Die Firma Align Technology übernimmt im wesentlichen die Aufgabe eines Dienstleisters; sie stellt mit ihrer Software die Möglichkeit der digitalen Planung des Bewegungsablaufs zur Verfügung und garantiert eine exakte Anfertigung der Schienen nach Freigabe des ClinChecks® durch den Behandler. Für den Behandlungserfolg ist allein der Behandler verantwortlich [Göz *et al.* 2004]. Aus diesem Grund sollte die Invsalign®-Therapie von Behandlern durchgeführt werden, die eine fundierte Ausbildung auf dem Gebiet der Kieferorthopädie absolviert haben und in Diagnostik und Therapie das umfassende kieferorthopädische Spektrum beherrschen. Es benötigt ausreichend kieferorthopädische Erfahrung, um mit Invisalign® erfolgreich arbeiten zu können [Boyd 2007; Boyd 2008; Göz *et al.* 2004]. Diese Gesichtspunkte verdeutlichen, dass das Zusammenwirken zwischen dem Wissen und der Erfahrung des Behandlers sowie der Mitarbeit seines Patienten eine unabdingbare Voraussetzung für einen erfolgreichen Behandlungsabschluss darstellen.

6.2.3. Behandlungsaufgaben

Die am häufigsten genannte Behandlungsaufgabe war das Auflösen von Engständen. Engstände manifestieren sich meist in Form von Rotationen oder labiolingualen und mesiodistalen Kippungen [Gummelt & Miethke 2008; Meier *et al.* 2003]. Um Engstände aufzulösen, kann eine approximale Schmelzreduktion (ASR, interproximale Schmelzreduktion/IPR, sog. Stripping) erforderlich sein. Die approximale Schmelzreduktion ist eine approbate Methode, um insbesondere bei leichten bis moderaten frontalen Engständen den notwendigen Platz zu schaffen (Fall 1, Fall 11; Tab. VI, Tab. VII). Die Therapieentscheidung für die approximale Schmelzreduktion liegt darin begründet, dass bei einer Vielzahl der Invisalign®-Patienten bereits zu einem früheren Zeitpunkt eine kieferorthopädische Behandlung durchgeführt worden ist; der tertiäre Engstand war meist moderat ausgeprägt und eine Extraktion hätte zuviel Platz geschaffen [Meier *et al.* 2003]. Die ASR ist darüber hinaus ein effektives Mittel, um sogenannte "schwarze Dreiecke" in den Approximalräumen zu beseitigen oder um zu verhindern, dass diese während der Behandlung zur Geltung kommen. Ein Verlust von attached Gingiva kann gegebenenfalls erst in Folge der Zahnstellungskorrektur sichtbar werden und äußert sich besonders mit steigendem Alter und bei fortgeschrittenen parodontalen Erkrankungen [Nattrass & Sandy 1995]. Lokalisation, Ausmaß und Zeitpunkt des Beschleifens werden im Rahmen einer Invisalign®-

Behandlung in einem Formblatt (sog. Reproximation Chart) explizit aufgelistet, gegebenenfalls ist die Schmelzreduktion jedoch zu einem früheren Zeitpunkt indiziert [Gummelt & Miethke 2008]. Bei den vorgestellten Falldokumentationen wurde die approximale Schmelzreduktion wie geplant durchgeführt. Grundsätzlich empfiehlt es sich die Schmelzreduktion im ClinCheck® einzuplanen, sobald ein besserer Zugang zu den Kontaktpunkten gegeben ist [Boyd 2007]. Die Schmelzreduktion kann aber auch vor der Abdrucknahme erfolgen. Dass hierdurch das gescannte Modell alle Informationen über das bereits vorgenommene und individuell mögliche Ausmaß der Schmelzreduktion enthält, kann in bestimmten Situationen von Vorteil sein [Miller 2001].

Eine körperliche Distalisierung und Aufrichtung der Seitenzähne ist mit dem Invisalign®-System möglich [Neumann *et al.* 2004]. Den Autoren Gummelt und Miethke zufolge soll die aktive Distalisation systembedingt auf 3 - 4 mm beschränkt sein [Gummelt & Miethke 2008]. Auch Mesialisierungen zum Schließen von Extraktionslücken sollten nicht mehr als 4 - 5 mm betragen; anderenfalls wird empfohlen, den Lückenschluss mit einer Multibracket-Apparatur durchzuführen [Womack 2006]. Um einen besseren Bewegungsablauf zu gewährleisten, müssen die Aligner gut sitzen. Dies kann durch rechteckige Attachments erreicht werden, da sie die Kontrolle der Wurzelposition verbessern und die Retention der Aligner erhöhen [Boyd *et al.* 2006].

Im Bezug auf die biomechanischen Möglichkeiten der Distalisierung mit dem Invisalign®-System besteht eine kontroverse Diskussion. Einige Autoren sind der Auffassung, dass es bei der Distalbewegung der Seitenzähne zu einer reziproken Protrusion der Frontzähne kommt; diese reziproken Kräfte sollen mit intermaxillären Gummizügen abgefangen werden können [Gummelt & Miethke 2008]. Hingegen berichtet Neumann *et al.*, dass aktives Distalisieren zu keiner Protrusion der Front führt, vorausgesetzt die intra-Bogen-Verankerung wurde korrekt gewählt. Wird ausschließlich die Bewegung der Molaren in einer entsprechenden Bewegungssequenz eingeplant und alle übrigen Zähne eines Zahnbogens zur Verankerung herangezogen, ist auch eine Distalisation kontralateraler Molaren möglich [Neumann *et al.* 2004]. Die erfolgreiche Aufrichtung eines unteren Molaren konnten Giancotti und Ronchin durch die gleichzeitige Bewegung des gesamten Zahnbogens nach mesial erzielen [Giancotti & Ronchin 2006]. Sie hatten eine reziproke Zahnbewegung im ClinCheck® eingeplant und nutzen die klinische Notwendigkeit dieser gegengerichteten Bewegungsvektoren erfolgreich aus. Die Autoren bekräftigen, dass ein aufrichtendes Drehmoment nur im Zusammenhang mit der reziproken Bewegung des frontalen Segmentes erzielt werden kann [Giancotti & Ronchin 2006].

Abhängig von der Position und der Morphologie eines Zahnes, ist eine Derotation mit Invisalign® möglich. Die Rotation von flachen Zähnen (z. B. untere Schneidezähne) ist relativ unproblematisch, so dass frontale Engstände mit starken Rotationen ausschließlich mit Invisalign® korrigiert werden können [Boyd *et al.* 2006; Duong & Kuo 2006]. Hingegen ist die Rotation von Zähnen mit zylindrischem oder rundem Querschnitt (z. B. Eckzähne und Prämolaren) schwieriger, und auch Molaren lassen sich aufgrund ihrer großen Wurzeloberfläche schlechter rotieren [Duong & Kuo 2006; Kravitz *et al.* 2008; Kravitz *et al.* 2009]. Die Aligner liegen zylindrischen und runden Zähnen anfänglich nur punktförmig auf. Eine adäquate Druckapplikation kann durch die geeigneten Auswahl und Platzierung von Attachments erfolgen [Tuncay 2006]. Das Attachment sollte so konstruiert sein, dass an zwei Punkten Druck appliziert wird, wie z. B. durch ein rechteckiges, 1 mm hohes, vertikal ausgerichtetes Attachment. Dadurch ist es klinisch möglich ein Drehmoment zu erzeugen, durch das eine kontrollierte Rotationsbewegungen erzielt werden kann [Proffit 2000]. In einem Patientenbericht avisierte Boyd die Derotation der Frontzähne im Ober- und Unterkiefer, ohne ein Attachment für die Eckzähne vorzusehen (Fall 11; Tab. VII) [Boyd 2007]; die Behandlung wurde vor dem "New Protocol" begonnen. Der unzureichende Druckangriffspunkt für die Rotationsbewegung der Eckzähne äußerte sich in einem leichten Fortbestehen der Rotation, so dass sich die Notwendigkeit für ein Case Refinement ergab. Erst durch das Case Refinement und die Anbringung eines Attachments an den Eckzähnen stimmte bei Behandlungsabschluss die klinische Situation mit der Simulation im ClinCheck® überein [Boyd 2007]. Bei starken Rotationen im Seitenzahnbereich von über 45° ist es aus diesem Grund von Vorteil, entweder vor der Invisalign®-Therapie oder dem Case Refinement kurzzeitig eine Derotation mit einer Multibracket-Teilapparatur durchzuführen [Boyd & Vlaskalic 2001].

Ein Lückenschluss nach Extraktion lässt sich mit dem Invisalign®-System durch Attachments und gegebenenfalls Zusatzmechaniken gut bewältigen, vorausgesetzt die Indikation stimmt, der Patient arbeitet gut mit und der Behandler besitzt ausreichend Erfahrung im Umgang mit dem Invisalign®-System [Gummelt & Miethke 2008; Hönn & Göz 2006]. Im Rahmen der Prämolaren-Extraktion ist Invisalign® zum Schließen von Extraktionslücken der ersten Prämolaren indiziert, wenn die Eckzähne nach mesial gekippt stehen und das Patientenprofil eine Retraktion des frontalen Segments erlaubt. In dem Patientenbericht von Hönn und Göz wurde die Extraktion von vier Prämolaren zur Korrektur einer bialveolären Protrusion mit ausgeprägtem Engstand durchgeführt (Fall 14; Tab. VII) [Hönn & Göz 2006]. Die Dokumentation bestätigt, dass sich das Invisalign®-System zum Schließen der 7 - 8 mm großen Extraktionslücke eignet. Die Autoren betonen jedoch, dass die Indikation für den Lückenschluss

ausschließlich mit dem Invisalign®-System grundsätzlich kritisch gewählt werden sollte [Hönn & Göz 2006]. In dem vorliegenden Fall waren die zuvor genannten Voraussetzungen für eine Extraktionsbehandlung gegeben; überdies waren relativ wenig körperliche Bewegungen, nur geringe Rotationen und keine Ex- oder Intrusionsbewegungen oder Torquebewegungen erforderlich. Ferner lag annähernd eine skelettale Klasse I-Relation vor. Diese Faktoren werden den Lückenschluss begünstigt haben.

Im Rahmen einer Extraktionsbehandlung stellen Kippungen in die Extraktionslücke eine Herausforderung an die Behandlung dar [Bollen *et al.* 2003; Phan & Ling 2007]. Der Gebrauch eines rechteckigen, 1 mm hohen Attachments auf den lückenbegrenzenden Zähnen kann deren Kippung verhindern und die korrekte Wurzelangulation ohne eine Multibracket-Teilapparatur ermöglichen [Boyd *et al.* 2006; Boyd 2007; Womack 2006]. Bei einer von Womack dokumentierten Behandlung gelang es trotz der Anwendung von rechteckigen Attachments für die Eckzahnretraktion nicht, die Wurzeln exakt parallel auszurichten (Fall 13; Tab. VII). Das Ergebnis hätte durch eine stärkere Wurzelkippung verbessert werden können [Womack 2006]. Aus diesem Grund empfiehlt Miller im Bewegungsplan zusätzlich eine Kronenangulation von der Extraktionslücke weg einzuplanen, um eine körperliche Translation zu gewährleisten [Miller 2001]. Eine weitere Möglichkeit die Kontrolle der Wurzelbewegung zu verbessern und die Angulation erfolgreich mit dem Invisalign®-System auszurichten besteht darin, zusätzliche Hilfsmittel wie z. B. Elastics mit einem Mini-Implantat oder Powerarm einzusetzen [Womack 2006]. Durch das nächtliche Tragen von 2 ounce starken Gummizügen konnte die Eckzahnretraktion deutlich verbessert und eine achsengerechte Einstellung gewährleistet werden (Fall 13; Tab. VII) [Womack 2006]. Polzar und Spyropoulos nutzen hingegen das natürliche Jiggling für die achsengerechte Einstellung der Zähne [Polzar & Spyropoulos 2006]. Sie begründen ihre Überlegung darauf, dass mit dem Invisalign®-System, wie bei Multibracket-Apparaturen, zunächst mehr kippende Zahnbewegungen erreicht werden. Die gekippten Zähne richten sich anschließend wieder auf, ähnlich dem Konzept der Begg-Technik. Auch Diedrich und Wehrbein empfehlen bei der Straight-Wire-Technik Zähne zunächst in eine Extraktionslücke hineinkippen zu lassen; hat sich neuer alveolärer Knochen gebildet, erfolgt eine entsprechende Aufrichtung [Diedrich & Wehrbein 1997]. Bei der Invisalign®-Behandlung kann dies erreicht werden, indem die Zahnbögen ausgeformt werden und darauffolgend den Zähnen Zeit gegeben wird, sich aufzurichten. Im Anschluss wird ein Case Refinement durchgeführt. Durch dieses Prozedere soll die Umsetzung von körperlichen Zahnbewegungen erfolgreich mit dem Invisalign®-System auszuführen sein und ein qualitativ hochwertiges Behandlungsergebnis erzielt werden [Polzar & Spyropoulos 2006].

Einige Autoren sind der Ansicht, dass aufgrund einer eingeschränkten Torquekontrolle die Indikation der Invisalign®-Technik bei Extraktionsbehandlungen eingeschränkt ist [Bollen *et al.* 2003; Clements *et al.* 2003]. Zum Zeitpunkt dieser Publikationen waren noch keine rechteckigen Attachments mit einer hohen Basis verfügbar; diese wurden erst 2007 im Rahmen des "New Protocol" eingeführt [Boyd 2007]. Der Lückenschluss nach Prämolaren-Extraktion ausschließlich mit dem Invisalign®-System kann bei der richtigen Indikationsstellung gut gelöst werden und die Ergebnisse sind mittlerweile mit veröffentlichten Ergebnissen fester Multibracket-Apparaturen vergleichbar [Hönn & Göz 2006; Womack 2006]. Dennoch sind weitere klinische Erfahrungen und Entwicklungen beim Lückenschluss nach Prämolarenextraktion notwendig. Aus diesem Grund werden derartige Behandlungen nicht ausdrücklich von Align Technology empfohlen [Boyd 2007].

Kippungen von Zahnkronen lassen sich relativ einfach beheben. Auch die Möglichkeit Zahnwurzeln nach Distalisierung parallel auszurichten haben einige Publikationen bestätigen können. Diese Zahnbewegungen sind die am besten prognostizierbaren Bewegungen des Invisalign®-Systems [Bollen *et al.* 2003; Brezniak 2008; Clements *et al.* 2003; Djeu *et al.* 2005; Kravitz *et al.* 2009; Kuncio *et al.* 2007]. Die Wurzeln bereits gekippter Zähne *in loco* parallel auszurichten ist hingegen nur schwer möglich. Dies gilt insbesondere dann, wenn eine starke Speekurve vorliegt [Boyd 2007; Gummelt & Miethke 2008; Womack 2006]. Diese Situationen erfordern eine Behandlung mit einer Multibracket-Teilapparatur, weshalb in bestimmten Fällen eine kombinierte Behandlung mit dem Invisalign®-System und einer Multibracket-Teilapparatur in Betracht gezogen werden sollte [Giancotti *et al.* 2006]. Überschreitet eine Kippung beispielsweise mehr als 10°, sollte im Voraus mit einer Multibracket-Teilapparatur gearbeitet werden, um das Aufrichten der Wurzeln zu gewährleisten [Boyd 2007]. Bei einer Patientin von Giancotti und Ronchin sollte die Aufrichtung der zweiten unteren Molaren im Rahmen einer interdisziplinären Behandlung erfolgen. Ziel der Invisalign®-Behandlung war die nach mesial angulierten Zähne aufzurichten und ausreichend Platz für die Implantation der ersten unteren Molaren zu schaffen (Fall 12; Tab. VII) [Giancotti & Ronchin 2006]. Die Aufrichtung konnte erfolgreich allein mit dem Invisalign®-System gelöst werden.

Bei dem Vorliegen eines Kreuz- und Zwangsbisses ist die Invisalign®-Therapie eine therapeutische Möglichkeit, die gestörte Okklusion zu beheben und eine funktionelle Harmonisierung in statischer und dynamischer Okklusion zu erzielen [Nedwed & Miethke 2005]. Die Aligner bieten bei der Behandlung einen deutlichen Vorteil: Durch das Tragen der Schiene kommt es zu einer leichten Disklusion der Zahnreihen, wodurch okklusale Interferenzen verhindert und das Überstellen eines Zwangsbisses begünstigt werden [Boyd *et al.* 2006; Miller

et al. 2003; Taylor *et al.* 2003; Windsheimer & Holzmeier 2009]. Die Disklusion erleichtert bei einem frontalen Kreuzbiss die Protrusion der oberen Frontzähne, respektive die Retrusion der Unterkieferfront [Boyd 2005; Turatti *et al.* 2006]. Bei den vorliegenden Falldokumentationen hatten 4 Patienten einen frontalen bzw. seitlichen Kreuzbiss (Fall 4, Fall 10, Fall 13, Fall 14; Tab. VI, Tab. VII). Bei Patienten mit einem seitlichen Kreuzbiss erfolgte die Überstellung durch die Expansion des Zahnbogens (Fall 4, Fall 10, Fall 13). Der Zwangsbiss konnte bei allen Patienten erfolgreich behoben werden [Boyd 2007; Brezniak & Wasserstein 2008; Hönn & Göz 2006; Womack 2006].

Das Invisalign®-System stellt auch bei vertikalen Diskrepanzen eine gute Alternative zu einer Multibracket-Apparatur dar. Die Behandlung soll sowohl bei tiefen Bissen als auch bei offenen Bissen gleichermaßen erfolgreich sein [Boyd *et al.* 2006; Turatti *et al.* 2006]. Auch hier nutzt das Invisalign®-System die Wirkungen einer die Okklusionsfläche bedeckenden Schiene aus, indem diese nicht nur zu einer Disklusion der Zahnräihen führt, sondern zusammen mit der Kaukraft eine intrudierende Wirkung auf die Zähne besitzt [Iscan & Sarisoy 1997; Dellinger 1986]. Im Rahmen der Behandlung eines anterior offenen Bisses kann durch die resultierende Intrusion der Seitenzähne das Schließen des Bisses unterstützt werden [Djeu *et al.* 2005; Boyd *et al.* 2006]. Eine Multibracket-Apparatur hingegen extrudiert die Zähne, insbesondere wenn zusätzlich intermaxilläre Gummizüge angewendet werden [Arat & Iseri 1992; Pearson 1986]. Bei der Behandlung eines tiefen Bisses kann durch die Anfertigung von Aufbissplateaus hinter den oberen Frontzähnen (sog. Bite Turbos) die Disklusion der Seitenzähne verstärkt werden, so dass überwiegend anteriorer Zahnkontakt besteht. Der intrudierende Kraftvektor wird somit auf die Frontzähne übertragen und es resultiert eine leichte Intrusion der Incisivi. Die Bite Turbos unterstützen in diesem Fall sowohl die Intrusion der Frontzähne als auch die Extrusion der Seitenzähne. Ferner werden durch die Aligner Klasse II-Behandlungen und anterior-posteriore Bewegungen erleichtert [Boyd 2007].

Die Ergebnisse der vorliegenden Literaturarbeit konnten zeigen, dass vertikale Bewegungen mit dem Invisalign®-System erfolgreich umgesetzt werden können; Röntgenaufnahmen bestätigen den Erfolg der Behandlung. Bemerkenswert war die Feststellung, dass in den Falldokumentationen sowohl Intrusions- als auch Extrusionsbewegungen über die von Align Technology angegebene Größenordnung von 1 mm hinaus durchgeführt wurden. Giancotti und Ronchin berichteten beispielsweise über eine Intrusion der Frontzähne von über 1,5 mm (Fall 12; Tab. VII) [Giancotti & Ronchin 2006]. Eine kompromittierende Wirkung auf die angrenzenden Zähne wurde nicht dokumentiert und verdeutlicht, dass bei der Behandlung eine gute

Verankerungskontrolle möglich ist [Hönn & Göz 2006; Giancotti & Ronchin 2006; Turatti *et al.* 2006].

Aufgrund der exakten Bewegungsplanung im ClinCheck® kann das Invisalign®-System eine besser voraussagbare Intrusionsmechanik und einen Nivellierungs-Mechanismus im Vergleich zu konventionellen Therapiemethoden gewähren [Boyd & Vlaskalic 2001; Boyd 2007; Djeu *et al.* 2005; Kuncio *et al.* 2007; Taylor *et al.* 2003]. Die Aligner leiten die reaktiven Kräfte über die nicht bewegten Zahnsegmente ab, wodurch eine effiziente Verankerungseinheit geschaffen werden kann [Giancotti & Ronchin 2006; Turatti *et al.* 2006]. Die mechanische Retention der Aligner ermöglicht eine segmentale Bewegung einzelner, spezifisch gewählter Zähne. Dadurch kann mit dem Invisalign®-System ein ähnliches Behandlungskonzept angewendet werden, wie bei der Teilbogentechnik [Giancotti & Ronchin 2006; Turatti *et al.* 2006]. Bezug nehmend auf eine Publikation von Ng *et al.* stellt die Segmentbogen-Mechanik die effektivste Methode für Intrusionsbewegungen dar [Ng *et al.* 2005]. Durch diese Mechanik können sowohl gezielt nur bestimmte Zähne in die Bewegung eingebunden als auch mit geringen, kontrollierten Kräften gearbeitet werden [Ng *et al.* 2005].

Die Zähne werden pro Aligner um maximal 0,25 mm bewegt und dabei eine durchschnittliche Kraft von 40 - 50 g erzielt [Tuncay 2006]; eine aktuelle Studie konnte zeigen, dass eine Kraft von 18 g ausreichend ist, um körperliche Zahnbewegungen auszuführen [Iwasaki *et al.* 2000]. Eine Überlastung einzelner Zähne, wie es in der Nivellierungsphase einer Multibracket-Behandlung erfolgen kann, wird damit vermieden [Proffit 2000]. Die Berücksichtigung dieser Aspekte ist insbesondere bei der Behandlung von Erwachsenen aufgrund der biologischen und biomechanischen Besonderheiten erstrebenswert.

Erwachsene Patienten zeigen häufig involutive und destruktive Veränderungen des Parodonts, wie z. B. parodontalen Knochenabbau, pathologische Zahnwanderungen und Rezessionen [Nattrass & Sandy 1995]. Zudem vermögen kieferorthopädische Behandlungen bestehende Parodontopathien zu verstärken [Boyd & Baumrind 1992]. Da bei einer Invisalign®-Therapie zahlreiche Zähne miteinander verblockt sind und leichter Druck appliziert wird, eignet sich dieses Verfahren besonders für die Behandlung im parodontal geschwächten Gebiss [Polzar & Spyropoulos 2006]. Eine Intrusion parodontal vorgeschädigter, entzündungsfreier Zähne kann zu einem Gewinn an Attachment führen, wenn kontrolliert leichte Kräfte angewendet werden. Diese Kräfte müssen zielgerichtet sein, um Hyalinisationen, Wurzelresorptionen und Pulpanekrosen zu vermeiden [Melson *et al.* 1988]. Werden Zähne maximal 0,25 mm pro Aligner bewegt, werden gezielt geringe Kräfte übertragen [Clements *et al.* 2003].

Inwiefern leichte oder starke Kräfte im Zusammenhang mit Wurzelresorptionen stehen, ist in einigen Autoren zufolge noch nicht eindeutig erwiesen [Owman-Moll *et al.* 1996a; Owman-Moll *et al.* 1996b]. Klinische Erfahrungen zeigen Wurzelresorptionen vor allem nach Intrusionsbewegungen, insbesondere bei vorgeschädigten Wurzeln [Levander 1988]. Für Patienten, die mit dem Invisalign®-System behandelt wurden, liegen bis zum heutigen Zeitpunkt keine Beschreibungen für messbare Wurzelresorptionen zugrunde [Boyd 2007; Brezniak & Wasserstein 2008]. Im Vergleich dazu werden bei durchschnittlich 10 % der Patienten, die mit Multibracket-Apparaturen behandelt wurden, Wurzelresorptionen von mindestens 3 mm beobachtet [Baumrind *et al.* 1996; Vlaskalic *et al.* 1998]. Brezniak und Wasserstein weisen wiederum darauf hin, dass wie mit jeder anderen Behandlungsapparatur auch bei Invisalign® Wurzelresorptionen möglich sein können, obgleich dies in Studien noch nicht nachgewiesen werden konnte [Brezniak & Wasserstein 2008]. Sie begründen ihre Überlegung damit, dass intermittierende Kräfte es zwar ermöglichen, resorbiertes Zahnzement auszuheilen und dadurch Wurzelresorptionen vorzubeugen [Dougherty 1968; Reitan 1964], andererseits sind intermittierende Kräfte an Jiggling-Effekte gekoppelt [Hall 1978]. In dem Patientenbericht von Brezniak und Wasserstein wurde erstmalig ein Fall mit einer apikalen Wurzelresorption dokumentiert (Fall 4; Tab. VII) [Brezniak & Wasserstein 2008]. Die Autoren geben an, nach der Intrusionsbewegung eine Wurzelresorption der zentralen Schneidezähne von zirka 2 mm radiologisch nachgewiesen zu haben. Inwiefern die apikale Veränderung nicht im Zusammenhang mit einer bestehenden, nicht restaurativ versorgten traumatischen Zahnfraktur stand oder zumindest durch diese provoziert gewesen sein könnte, wurde nicht eindeutig erörtert [Brezniak & Wasserstein 2008].

Inzwischen wird das Invisalign®-System nicht nur bei der kieferorthopädischen Erwachsenenbehandlung angewendet, sondern auch Jugendliche werden vermehrt mit Alignern behandelt [Boyd *et al.* 2006; Boyd 2007; Boyd 2008]. In den untersuchten Publikationen dieser Literaturübersicht hatten 4 Patienten das 18. Lebensjahr noch nicht erreicht; bei Behandlungsbeginn waren jeweils ein Patient 13 bzw. 14 Jahre und zwei Patienten 16 Jahre alt. Die bleibenden Zähne waren bei allen Patienten vollständig durchgebrochen (Fall 5, Fall 6, Fall 8, Fall 9; Tab. VI, Tab. VII) [Boyd 2007; Boyd 2008]. Das Leitsymptom von zwei Patienten war eine Klasse II-Verzahnung mit einer deutlich vergrößerten sagittalen Stufe und moderatem bis starkem Engstand im Ober- und Unterkiefer (Fall 6, Fall 8; Tab. VI, Tab. VII). Durch die Ausformung der Zahnbögen und den Gebrauch zusätzlicher Klasse II-Elastics (4 ounce) konnte bei beiden Patienten eine Neutralokklusion eingestellt werden. Die Analyse des

Fernröntgenseitenbildes der 13-jährigen Patientin zeigte, dass das Restwachstum des Unterkiefers die sagittale Korrektur unterstützt haben wird (Fall 8; Tab. VI, Tab. VII).

Bei Jugendlichen kann mit der Invisalign®-Behandlung mittlerweile selbst dann begonnen werden, wenn die Eckzähne, die zweiten Prämolaren sowie die zweiten Molaren noch nicht oder noch nicht vollständig durchgebrochen sind [Neumann *et al.* 2004]. Für eine Behandlung zum Zeitpunkt des Zahnwechsels steht dem Kieferorthopäden Invisalign-teen™ zur Verfügung. Mit diesem System besteht die Möglichkeit in den Alignern Platzhalter für den weiteren Durchbruch der Zähne einzufügen. Darüber hinaus kann durch sogenannte Durchbruchskompensatoren eine Supraeruption der zweiten Molaren verhindert werden [Align Technology 2009]. Die regelrechte Okklusion aller Zähne wird nach erfolgtem Zahndurchbruch im Rahmen eines Case Refinements eingestellt.

Da alle Aligner zum gleichen Zeitpunkt hergestellt werden, ist es verständlich, dass die Zähne ihre Stellung nach Abdrucknahme zueinander nicht mehr verändern dürfen. Dies ist bei Heranwachsenden, deren Zahndurchbruch noch nicht abgeschlossen ist, natürlicherweise nicht gegeben [Kaul & Miethke 20003]. Durch die Anfertigung von Halteschienen nach dem Silikon-Abdruck kann die Position der Zähne bis zum Einsetzen der Aligner sichergestellt werden. Autoren bekräftigen, dass durch das Tragen der Aligner das natürliche transversale Kieferwachstum nicht beeinträchtigt wird [Neumann *et al.* 2004]; die durch Wachstum bedingte Breitenentwicklung der Kiefer findet hauptsächlich zwischen dem 6. und 8. Lebensjahr statt [Moorrees *et al.* 1969]. Des Weiteren ist es durch die Behandlung mit Invisalign-teen™ möglich, die Kiefer- und Zahnentwicklung therapeutisch zu beeinflussen und die Entwicklung individuell zu unterstützen. Aus diesen Gründen kann mit der Invisalign-teen™ Behandlung bereits vor dem Durchbruch aller bleibenden Zähne und ohne abgeschlossenes Kieferwachstum begonnen werden, gleich der Behandlung mit einer Multibracket-Apparatur [Ellis 2004; Neumann *et al.* 2004; Womack 2006]. Bereits Zachrisson konnte nachweisen, dass sich im Anschluss an eine aktive kieferorthopädische Behandlung das weitere Kieferwachstum und die künftige Zahnentwicklung normal fortsetzen [Zachrisson 1977]. Um diesen Prozess kieferorthopädisch zu unterstützen, sollte nach einer kurzen aktiven Behandlungsphase mit den Alignern eine Stabilisierung der bewegten Zähne erfolgen, die das dentoalveolare Wachstum beim Durchbruch der bleibenden Zähne lenkt [Neumann *et al.* 2004]. Erfahrene Invisalign®-Anwender empfehlen jedoch nach Möglichkeit die Behandlung bei Kindern und Jugendlichen erst zu beginnen, wenn die regelrechte Kieferrelation zwischen Ober- und Unterkiefer mit einer funktionskieferorthopädischen Apparatur (z. B. Bionator) eingestellt und der Biss in der vertikalen Dimension korrigiert wurde.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Invisalign®-System eine etablierte Therapiemethode darstellt und sich vor allem in der kieferorthopädischen Behandlung von Erwachsenen bewährt hat [Bollen *et al.* 2003; Djeu *et al.* 2005]. Auch für die Behandlung von Jugendlichen stellt Invisalign® mittlerweile eine neue Therapieoption dar [Ellis 2004; Womack 2006]. Die vorliegenden Ergebnisse haben zeigen können, dass Behandler mit langjähriger Erfahrung im Umgang mit Invisalign® erfolgreich ein breites Spektrum komplexer Dysgnathien mit diesem System behandeln können; die Behandlungsergebnisse sollen mit denen von Multibracket-Apparaturen vergleichbar sein [Djeu *et al.* 2005; Duong & Kuo 2006; Kuncio *et al.* 2009; Vincent 2005]. Wesentliche Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz des Invisalign®-Systems scheint die Kenntnis des jeweiligen Indikationsbereiches sowie eine eingehende Behandlungsplanung zu sein. Der Fortschritt des Invisalign®-Systems verdeutlicht, dass ein neues Behandlungsmittel einen ebensolchen Lernprozess vom Behandler wie eine Entwicklung von der Apparatur verlangt [Boyd *et al.* 2006; Boyd 2007; Djeu *et al.* 2005].

7 SCHLUSSFOLGERUNGEN

In der vorliegenden Arbeit wurden die Literaturdatenbanken MEDLINE und PubMed nach Falldokumentationen von kieferorthopädischen Behandlungen mit dem Invisalign®-System durchsucht. Hierdurch sollte ein Überblick über die therapeutischen Möglichkeiten von transparenten Schienenapparaturen zur Behandlung von Zahnfehlstellungen am Beispiel des Invisalign®-Systems erstellt werden.

Seit 1999 wird das Invisalign®-System klinisch eingesetzt und gilt heute als wissenschaftlich anerkannte Behandlungsmethode. Kontinuierliche Weiterentwicklungen der Technologie, der verwendeten Materialien und des Attachment-Designs haben dazu geführt, dass das Indikationsspektrum des Invisalign®-Systems in den letzten Jahren erweitert werden konnte. Erste wissenschaftliche Erkenntnisse sowie die klinischen Langzeiterfahrungen zeigen, dass dieses System über ein hohes Potential verfügt und zukünftig einen festen Bestandteil des kieferorthopädischen Behandlungsspektrums darstellen wird. Mit Invisalign® kann sowohl die individuelle dentale und faziale Ästhetik der Patienten verbessert, als auch eine funktionelle Einstellung in statischer und dynamischer Okklusion erzielt werden. Die Behandlungsergebnisse sind mit denen von Multibracket-Apparaturen vergleichbar, allerdings ohne ästhetische Beeinträchtigung des Patienten während der Behandlung. Der Einsatz von transparenten Schienenapparaturen als universell einsetzbare Behandlungsapparatur ist nach derzeitigem Kenntnis- und Entwicklungsstand jedoch noch nicht gegeben. Kombiniert man die Invisalign®-Behandlung allerdings mit einer funktionskieferorthopädischen Vorbehandlung bei Jugendlichen bzw. einer chirurgischen Bisseinstellung bei Erwachsenen oder mit einer Multibracket-Teilapparatur, ist bereits nahezu jede Behandlung mit Invisalign® möglich.

Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um vertiefende Kenntnisse über die Biomechanik transparenter Schienenapparaturen zu erlangen. Darüber hinaus ist die Durchführung randomisierter klinischer Untersuchungen sinnvoll, in denen Behandlungen unterschiedlicher Dysgnathien jeweils mit einer transparenten Schienenapparatur und/oder einer Multibracket-Apparatur erfolgen. Beide Systeme verfügen über ein hohes Potential, mit dem herausragende Behandlungsergebnisse erzielt werden können. In diesem Zusammenhang bleibt zu bedenken, dass die therapeutischen Ergebnisse nicht nur durch das Behandlungs-System, sondern auch durch die Erfahrung des Behandlers, seiner Kompetenz und dem Wissen um die richtige Anwendung der Apparatur, beeinflusst werden.

8 ZUSAMMENFASSUNG

Problemstellung: Invisalign® ist eine neuartige Behandlungstechnologie zur kieferorthopädischen Korrektur von Zahnfehlstellungen mit transparenten Schienenapparaturen. Hinsichtlich des Behandlungsspektrums besteht eine kontroverse Diskussion. **Zielsetzung:** Ziel dieser Literaturarbeit war es, die therapeutischen Möglichkeiten des Invisalign®-Systems anhand von klinischen Falldokumentationen zu evaluieren. **Material und Methoden:** Die elektronischen Datenbanken MEDLINE und PubMed wurden nach Publikationen aus den vergangenen fünf Jahren durchsucht (Suchbegriffe: "Invisalign", "case report"; Datum der Literaturrecherche: 20.10.2009). Berücksichtigt wurden Falldokumentationen von Patienten mit vollständiger Dentition. Die Behandlung sollte ausschließlich mit dem Invisalign®-System erfolgt sein. **Ergebnisse:** Seit dem 21.10.2004 wurden 13 Publikationen veröffentlicht, 9 davon entsprachen den zuvor festgelegten Auswahlkriterien und dokumentierten die Behandlung von insgesamt 15 Patienten. Die Behandlungsmotivation aller Patienten war die Verbesserung der dentalen Ästhetik. Bei der Mehrzahl der Patienten lag darüber hinaus eine medizinische Behandlungsindikation vor. Die häufigste Behandlungsaufgabe war das Leitsymptom "moderater bis starker Engstand" (n = 14). Die Publikationen befassten sich sowohl mit der Behandlung bei Extraktionstherapie (n = 5), der Distalisierung und Aufrichtung von Molaren (n = 4; n = 2), als auch mit der Pro- und/oder Intrusion der Incisivi (n = 9; n = 10) und der Behandlung eines seitlichen bzw. frontalen Kreuzbisses (n = 3; n = 3) oder offenem Biss (n = 1). Bei einem Patienten wurde eine kieferorthopädisch-kieferchirurgische Behandlung durchgeführt.

Schlussfolgerungen: Das Behandlungsspektrum des Invisalign®-Systems wurde in den letzten Jahren deutlich erweitert. Das Verständnis und die klinische Erfahrung im Umgang mit dem System sowie eine sorgfältige Behandlungsplanung sind Voraussetzung für die erfolgreiche Therapie komplexer Dysgnathien. Die Behandlungsergebnisse sind mit denen von Multibracket-Apparaturen vergleichbar. Invisalign® ist in Kombination mit einer Multibracket-Teilapparatur bei nahezu jeder Behandlung einsetzbar.

Schlagwörter: Invisalign®, transparente Schienenapparatur, therapeutische Möglichkeiten, klinische Erfahrung, Falldokumentation

Klinische Bedeutung: Transparente Schienenapparaturen konnten das bisherige kieferorthopädische Behandlungsspektrum um eine ästhetische Therapieoption erweitern. Die therapeutischen Möglichkeiten mit diesem System sind umfassend. Allein oder in Kombination mit einer Multibracket-Apparatur verfügt es über ein hohes Potential, herausragende Behandlungsergebnisse zu erzielen.

9 LITERATURVERZEICHNIS

Align Technology. Clinical Information: Neue Standard-Attachments. Amsterdam, Niederlande, 2007.

Align Technology. Invisalign® Evaluation Guide. Amsterdam, Niederlande, 2005b.

Align Technology. Invisalign® Referenz-Handbuch. Amsterdam, Niederlande, 2005a.

Align Technology. Invisalign Teen™. Amsterdam, Niederlande, 2009.

Arat M, Iseri H. Orthodontic and orthopaedic approach in the treatment of skeletal open bite. Eur J Orthod 1992; 14(3):207-215.

Baumrind S, Korn EL, Boyd RL. Apical root resorption in orthodontically treated adults. Am J Orthod 1996; 110(3):311-320.

Bishop A, Womack WR, Derakhshan M. An esthetic and removable orthodontic treatment option for patients: Invisalign. Dent Assist 2002; 71(5):14-17.

Böhme A, Jost-Brinkmann PG, Miethke RR. Möglichkeiten der adhäsiven Befestigung von Attachments bei Invisalign-Patienten. Kieferorthopädie 2003; 17(2):101-104.

Bollen AM, Huang G, King G, Hujoel P, Ma T. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part I: Ability to complete treatment. Am J Dentofacial Orthop 2003; 124(5):496-501.

Boyd RL, Baumrind S. Periodontal considerations in the use of bonds or bands on molars in adolescents and adults. Angle Orthod 1992; 62(2):117-125.

Boyd RL, Miller RJ, Vlaskalic V. The Invisalign system in adult orthodontics: Mild crowding and space closure cases. J Clin Orthod 2000; 34(4):203-212.

Boyd RL, Oh HS, Fallah M, Vlaskalic V. An update on present and future considerations of aligners. J Calif Dent Assoc 2006; 34(10):793-805.

Boyd RL, Vlaskalic V. Three-dimensional diagnosis and orthodontic treatment of complex malocclusions with the Invisalign appliance. Semin Orthod 2001; 7(4):274-293.

Boyd RL. Complex orthodontic treatment using a new protocol for the Invisalign appliance. J Clin Orthod 2007; 41(9):525-547.

Boyd RL. Esthetic orthodontic treatment using the Invisalign appliance for moderate to complex malocclusions. J Dent Educ 2008; 72(8):948-967.

Boyd RL. Surgical-orthodontic treatment of two skeletal Class III patients with Invisalign and fixed appliances. J Clin Orthod 2005; 39(4):245-258.

Breznik N, Wasserstein A. Root resorption following treatment with aligners. Angle Orthod 2008; 78(6):1119-1124.

Breznik N. The clear plastic appliance: a biomechanical point of view. Angle Orthod 2008; 78(2):381-382.

Burstone C. Orthodontics as a science: the role of biomechanics. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2000; 117(5):598-600.

- Casko JS, Vaden JL, Kokich VG, Damone J, James RD, Cangialosi TJ, Riolo ML, Owens SE Jr, Bills ED. Objective grading system for dental casts and panoramic radiographs. American Board of Orthodontics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1998; 114(5):589-599.
- Clements KM, Bollen AM, Huang G, King G, Hujoel P, Ma T. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part II: Dental improvements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003; 124(5):502-508.
- Dellinger EL. A clinical assessment of the Active Vertical Corrector - a nonsurgical alternative for skeletal open bite treatment. *Am J Orthod* 1986; 89(5):428-436.
- Diedrich P, Wehrbein H. Orthodontic retraction into recent and healed extraction sites. A histologic study. *J Orofac Orthop* 1997; 58(2):90-99.
- 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(3):292-298.
- Dougherty HL. The effect of mechanical forces upon the mandibular buccal segments during orthodontic treatment. *Am J Orthod* 1968; 54(2):83-103.
- Duong T, Kuo E. Finishing with Invisalign. *Prog Orthod* 2006; 7(1):44-55.
- Ellis CP. Invisalign and changing relationships. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2004; 126(1):20A-21A.
- Fritz U, Diedrich P, Wiechmann D. Lingual technique - patients' characteristics, motivation and acceptance. Interpretation of a retrospective survey. *J Orofac Orthop* 2002; 63(3):227-233.
- Giancotti A, Greco M, Mampieri G. Extraction treatment using Invisalign Technique. *Prog Orthod* 2006; 7(1):32-43.
- Giancotti A, Mampieri G, Greco M. Correction of deep bite in adults using the Invisalign system. *J Clin Orthod* 2008; 42(12):719-726.
- Giancotti A, Romanini G, Docimo R. Early treatment of anterior crossbite with an Essix-based appliance. *J Clin Orthod* 2004, 38(3):161-164.
- Giancotti A, Ronchin M. Pre-restorative treatment with the Invisalign system. *J Clin Orthod* 2006; 40(11):679-682.
- Götz G, Diedrich P, Bouraul C, Miethke RR. Stellungnahme zur Invisalign-Methode, Stand Januar 2004. *Zahnärztliche Mitt* 2004; 94:2632-2633.
- Gummelt A, Miethke RR. Invisalign oder die unsichtbare Behandlung von Zahnfehlstellungen. *Quintessenz Team-Journal* 2008; 38(10):519-528.
- Hall AM. Upper Incisor root resorption during stage II of the Begg technique: two case reports. *Br J Orthod* 1978; 5(1):47-50.
- Hohoff A, Fillon D, Stamm T, Goder G, Sauerland C, Ehmer U. Oral comfort, function and hygiene in patients with lingual brackets. *J Orofac Orthop* 2003a; 64(5):359-371.
- Hohoff A, Seifert E, Fillion D, Stamm T, Heinecke A, Ehmer U. Speech performance in lingual orthodontic patients measured by sonography and auditive analysis. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003b; 123(2):146-152.
- Hönn M, Göz G. A premolar extraction case using the Invisalign system. *J Orofac Orthop* 2006; 67(5):385-394.

- Hugo A, Reyneke JP, Weber ZJ. Lingual orthodontics and orthognathic surgery. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 2000; 15(2):153-162.
- Incognito (home page). Available at: www.lingualtechnik.de. Accessed Oct. 20, 2009.
- Inglehart MR, Bagramian RA (eds). *Oral health-related quality of life*. Quintessence, Chicago 2002.
- Invisalign (home page). Available at: www.invisalign.de. Accessed Oct. 20, 2009.
- Iscan HN, Sarisoy L. Comparison of the effects of passive posterior bite-blocks with different construction bites on the craniofacial and dentoalveolar structures. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1997; 112(2):171-178.
- Iwasaki LR, Haack JE, Nickel JC, Morton J. Human tooth movement in response to continuous stress of low magnitude. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2000; 117(2):175-183.
- Joffe L. Invisalign: early experiences. *J Orthod* 2003; 30(4):348-352.
- Kaul A, Miethke RR. Unsichtbare Zahnkorrektur. *Quintessenz Team-Journal* 2003; 33(11):571-575.
- Kesling HD. The philosophy of the tooth positioning appliance. *Am J Orthod* 1945; 31(6):297-304.
- Klages U, Bruckner A, Zentner A. Dental aesthetics, self-awareness, and oral health-related quality of life in young adults. *Eur J Orthod* 2004; 26(5):507-514.
- 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(4):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(1):27-35.
- 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(5):864-869.
- Kuo E, Miller RJ. Automated custom-manufacturing technology in orthodontics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003; 123(5):578-581.
- Kusy RP. The future of orthodontic materials: the long-term view. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1998; 113(1):91-95.
- Lagravère MO, Flores-Mir C. The treatment effects of Invisalign orthodontic aligners: a systematic review. *J Am Dent Assoc* 2005; 136(12):1724-1729.
- Levander E, Malmgren O. Evaluation of the risk of root resorption during orthodontic treatment: a study of upper incisors. *Eur J Orthod* 1988; 10(1):30-38.
- Lindauer SJ, Shoff RC. Comparison of Essix and Hawley retainers. *J Clin Orthod* 1998; 32(2):95-97.
- Lingenbrink JC, King G, Bollen AM. Quality of life comparison between clear removable and conventional orthodontics. *J Dent Res* 2002; 81:463.
- McNamara JA, Kramer KL, Juenker JP. Invisible retainers. *J Clin Orthod* 1985; 19(8):570-578.
- Meier B, Wiemer KB, Miethke RR. Invisalign: patient profiling-analysis of a prospective survey. *J Orofac Orthop* 2003; 64(5):352-358.

- Melkos AB. Advances in digital technology and orthodontics: a reference to the Invisalign method. *Med Sci Monit* 2005; 11(5):PI39-42.
- Melson B, Agerback N, Eriksen J, Terp S. New attachment through periodical treatment and orthodontic intrusion. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1988; 94:104-116.
- Miethke RR (ed). *Sonderheft Kieferorthopädie: Invisalign®*. Quintessenz Online Select 2001.
- Miethke RR, Brauner K. A comparison of the periodontal health of patients during treatment with the Invisalign-System and with fixed lingual appliances. *J Orofac Orthop* 2007; 68(3):223-231.
- Miller KB, McGorray SP, Womack R, Quintero JC, Perelmuter M, Gibson J, Dolan TA, Wheeler TT. A comparison of treatment impacts between Invisalign aligner and fixed appliance therapy during the first week of treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2007; 131(3):302.e1-302.e9.
- Miller RJ, Kuo E, Choi W. Validation of Align Technology's Treat III digital model superimposition tool and 1st case application. *Orthod Craniofac Res* 2003; 6 (Suppl 1):143-149.
- Miyawaki S, Yasuhara M, Koh Y. Discomfort caused by bonded lingual orthodontic appliances in adult patients as examined by retrospective questionnaire. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1999; 115(1):83-88.
- Moorrees CF, Gron AM, Lebret LM, Yen PK, Fröhlich FJ. Growth studies of the dentition: a review. *Am J Orthod* 1969; 55(6):600-616.
- Nattrass C, Sandy JR. Adult orthodontics - a review. *Br J Orthod* 1995; 22(4):331-337.
- Nedwed V, Miethke RR. Motivation, acceptance and problems of Invisalign patients. *J Orthofac Orthop* 2005; 66(2):162-173.
- Neumann I, Schupp W, Heine G. Distalbewegung oberer 1. Molaren mit dem Invisalign-System - Ein Patientenbericht. *Kieferorthopädie* 2004; 18(2):133-137.
- Ng J, Major PW, Heo G, Flores-Mir C. True incisor intrusion attained during orthodontic treatment: a systematic review and meta-analysis. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2005; 128(2):212-219.
- Owman-Moll P, Kurol J, Lundgren D. Effects of doubled orthodontic force magnitude on tooth movement and root resorptions. An inter-individual study in adolescents. *Eur J Orthod* 1996a; 18(2):141-150.
- Owman-Moll P, Kurol J, Lundgren D. The effects of four-fold increased orthodontic force magnitude on tooth movement and root resorptions. An inter-individual study in adolescents. *Eur J Orthod*. 1996b; 18(3):287-294.
- Paik CH, Woo YJ, Kim J, Park JU. Use of miniscrews for intermaxillary fixation of lingual-orthodontic surgical patients. *J Clin Orthod* 2002; 36(3):132-136.
- Pearson LE. Vertical control in fully-banded orthodontic treatment. *Angle Orthod* 1986; 56(3):205-224.
- Phan X, Ling PH. Clinical limitations of Invisalign. *J Can Dent Assoc* 2007; 73(3):263-266.
- Polzar G, Spyropoulos N. Therapie vertikaler Dysgnathien mit Invisalign. *Kieferorthopädie* 2006; 20(2):119-133.
- Proffit WR, Fields HW Jr (eds). *Contemporary Orthodontics*. Mosby, St. Louis 2000.
- Reitan K. Effects of force magnitude and direction of tooth movement on different alveolar bone types. *Angle Orthod* 1964; 34(4):244-255.

- Rinchuse DJ, Rinchuse DJ. Active tooth movement with Essix-based appliances. *J Clin Orthod* 1997; 31(2):109-112.
- Sergl HG, Klages U, Zentner A. Functional and social discomfort during orthodontic treatment - effects on compliance and prediction of patients' adaptation by personality variables. *Eur J Orthod* 2000; 22(3):307-315.
- Sheridan JJ, LeDoux W, McMinn R. Essix retainers: fabrication and supervision for permanent retention. *J Clin Orthod* 1993; 27(1):37-45.
- Sheridan JJ, McMinn R, LeDoux W. Essix thermosealed appliances: various orthodontic uses. *J Clin Orthod* 1995; 29(2):108-113.
- Shum LMY, Wong RWK, Hägg U. Lingual orthodontics - a review. *Hong Kong Dental Journal* 2004; 1(1):13-20.
- Stenvik A, Espeland L, Mathisen A. A longitudinal study on subjective and objective orthodontic treatment need. *Eur J Ortho* 1997; 19:85-92.
- Taylor MG, McGorray SP, Durrett S, Pavlow S, Downey N, Lenk M. Effect of Invisalign aligners on periodontal tissues. *J Dent Res* 2003; 82(a):abstract 1483.
- Thalheim A, Wiechmann D. Lingual orthodontics as the first choice. *J Ling Orthod* 2002; 4:92-99.
- Tuncay OC (ed). *The Invisalign System*. Quintessence Publishing Co, Ltd, New Malden 2006.
- Turatti G, Womack R, Bracco P. Incisor intrusion with Invisalign treatment of an adult periodontal patient. *J Clin Orthod* 2006; 40(3):171-143.
- Vincent S. Evaluation of Invisalign treatment utilizing the American Board of Orthodontics objective grading system for dental casts. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2005; 127(2):268-269.
- Vlaskalic V, Boyd RL, Baumrind S. Etiology and sequelae of root resorption. *Semin Orthod* 1998; 4(2):124-131.
- Windsheimer U, Holzmeier M. Invisalign-Behandlung eines frontalen Kreuzbisses. *Kieferorthopädie* 2009; 23(2):109-114.
- Womack WR, Day RH. Surgical-orthodontic treatment using the Invisalign system. *J Clin Orthod* 2008; 42(4):237-245.
- Womack WR. Four premolar extraction treatment with Invisalign. *J Clin Orthod* 2006; 40(8):493-500.
- Zachrisson BU. Clinical experience with direct-bonded orthodontic retainers. *Am J Orthod* 1977; 71(4):440-448.

10 ANHANG

10.1. Danksagung

Herrn Professor Dr. Dr. Dieter Müßig danke ich sehr herzlich für die Überlassung dieses außerordentlich interessanten Themas sowie für sein Engagement im Rahmen des postgradualen Universitätslehrgangs der Kieferorthopädie.

Meiner Familie gilt ein ganz besonderer Dank.

10.2. Curriculum vitae

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

10.3. Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass die vorgelegte Masterthese mit dem Thema "Kieferorthopädische Behandlungen mit transparenten Schienenapparaturen. Therapeutische Möglichkeiten am Beispiel des Invisalign®-Systems" von mir selbst und ohne die Hilfe Dritter verfasst wurde, auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten darstellt und die benutzten Hilfsmittel sowie die Literatur vollständig angegeben sind.

Berlin, den 14. Dezember 2009