

Aus dem
CharitéCentrum 3 für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Abteilung für Kieferorthopädie, Orthodontie und Kinderzahnmedizin
Direktor: Prof. Dr. Paul-Georg Jost-Brinkmann

Habilitationsschrift

Über die Bedeutung bildgebender Verfahren für die kieferorthopädische Diagnostik und Therapiekontrolle

zur Erlangung der Lehrbefähigung
für das Fach Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
mit Schwerpunkt Kieferorthopädie

vorgelegt dem Fakultätsrat der Medizinischen Fakultät
Charité - Universitätsmedizin Berlin

von

**Dr. med. dent. Till Edward Bechtold
aus Mainz**

Eingereicht: Oktober 2020

Dekan: Prof. Dr. med. Axel R. Pries

1. Gutachter: Prof. Dr. Bernd Lapatki, Ulm

2. Gutachterin: Prof. Dr. Andrea Wichelhaus, München

There is but one best way.

Edward H. Angle

Vorwort

Die vorliegende Schrift enthält sechs ordentlich publizierte Originalarbeiten aus dem Fachgebiet Kieferorthopädie, in denen bildgebende Verfahren zu unterschiedlichen Zwecken verwendet, überprüft beziehungsweise weiterentwickelt wurden.

Eine aus heutiger Sicht präzise Planung oder Erfolgskontrolle kieferorthopädischer Behandlung ist ohne Bildgebung undenkbar. Die Standarddiagnostik stammt aus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts und mag aufgrund ihres Alters kritisiert werden, besteht aber weiterhin und kann, wie in den beiden in *The Angle Orthodontist* veröffentlichten Publikationen „Distalization pattern of the maxillary arch depending on the number of orthodontic miniscrews“ und „Long-term stability of miniscrew anchored maxillary molar distalization in Class II treatment“ zu lesen ist, erfolgreich auf moderne, komplexe Behandlungsmodi angewendet werden.

In „Effect of cephalograms on decisions for early orthodontic treatment“ (in *The Angle Orthodontist*) wurde die Notwendigkeit routinemäßiger Fernröntgenbilder von besonders jungen Patienten in Frage gestellt. In „Condylar head remodeling compensating for condylar head displacement by orthognathic surgery“ (in *Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery*) wurde dagegen die Unabdingbarkeit dreidimensionaler radiologischer Bildgebung am Beispiel von Kiefergelenkveränderungen dargestellt.

Die Artikel „Integration of a maxillary model into facial surface stereophotogrammetry“ (in *Journal of Orofacial Orthopedics*) und „Correlation between occlusal abnormalities and parameters investigated by three-dimensional facial photography“ (in *The Angle Orthodontist*) hatten eine Weiterentwicklung nicht-radiologischer Bildgebung zum Ziel, die Defizite gegenüber vergleichbaren radiologischen Methoden überwinden sollte.

Alles in allem beabsichtigt der Verfasser mit der vorliegenden Schrift, einen verständlichen Einblick in die aktuelle kieferorthopädische Diagnostik zu geben.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	6
1.1 Kieferorthopädische Standarddiagnostik	6
1.1.1. Photostatanalyse.....	7
1.1.2. Modellanalyse	8
1.1.3. Röntgenanalyse	9
1.2 Weiterentwicklung der Diagnostik	12
1.3 Zielsetzungen der Arbeit.....	13
2 Eigene Arbeiten	15
2.1 Distalization pattern of the maxillary arch depending on the number of orthodontic miniscrews	15
2.2 Long-term stability of miniscrew anchored maxillary molar distalization in Class II treatment.....	24
2.3 Effect of cephalograms on decisions for early orthodontic treatment	32
2.4 Condylar head remodeling compensating for condylar head displacement by orthognathic surgery.....	40
2.5 Integration of a maxillary model into facial surface stereophotogrammetry	49
2.6 Correlation between occlusal abnormalities and parameters investigated by three-dimensional facial photography.....	62
3 Diskussion	71
3.1 Fernröntgenseitenbild(FRS)-Analyse zur Therapiekontrolle	72
3.2 Die Bedeutung röntgenologischer Bildgebung für die Kieferorthopädie	77
3.3 Entwicklung dreidimensionaler nicht-radiologischer Methoden.....	80
4 Zusammenfassung.....	84

Inhaltsverzeichnis

5 Literaturverzeichnis	86
Danksagung.....	105
Erklärung.....	107

1 Einleitung

Die einwandfreie Funktion der Strukturen des mittleren und unteren Drittels des Viscerocraniums kann durch Zahn- und Kieferfehlstellungen, je nach Ausprägung, bis hin zu einem kompletten Funktionsverlust beeinträchtigt sein. Die meisten derartigen Fehlstellungen beginnen unauffällig und nehmen, unter anderem wachstumsbedingt, mit dem Alter zu.

Daher hat die rechtzeitige Identifizierung solcher Entwicklungen zuweilen große gesundheitliche Bedeutung.

Zur Kieferorthopädie gehören sowohl die Diagnostik von Zahn- und Kieferfehlstellungen als auch deren Korrekturen und/oder die Prävention schwerwiegender Fehlstellungen und Funktionsstörungen. Diese betreffen insbesondere die Kau- und Atemfunktion, deren Einschränkung gerade in den frühen Lebensabschnitten zu massiven körperlichen und geistigen Entwicklungsstörungen führen kann.

Möglichst frühzeitiges Herstellen physiologischer Verhältnisse durch kieferorthopädische Therapie beeinflusst die weitere Entwicklung positiv.

In der kieferorthopädischen Diagnostik werden durch präzise Abformung oder optische Wiedergabe Messungen ermöglicht, die entweder bei der Behandlungsplanung eine Orientierung an Standardwerten zulassen oder im Sinne einer Überprüfung des Therapieerfolges (Vergleich der Situationen vor versus nach Behandlungsmaßnahmen) verglichen werden können.

1.1 Kieferorthopädische Diagnostik

Die kieferorthopädische Standard-Diagnostik umfasst neben Anamnese und klinischem Befund Photostatanalyse, Modellanalyse und Röntgendiagnostik [Duterloo und Planché, 2013], wobei die Röntgenanalyse mindestens aus einem Fernröntgenseitenbild (FRS) und einem Orthopantomogramm (OPT) besteht,

nötigenfalls auch aus zusätzlichen Spezialaufnahmen [Beckmann-van der Ven et al., 1993].

1.1.1. Photostatanalyse

Zur diagnostischen Untersuchung des Gesichtes existiert eine Vielzahl von Fotoanalysen. Die klassische Photostatanalyse nach A. M. Schwarz ist die im deutschsprachigen Raum am weitesten verbreitete und wird daher im Folgenden beschrieben. Hierbei handelt es sich um eine metrische Analyse, die an zwei Fotografien des Patienten – einer Profilaufnahme und einer Enface-Aufnahme des Kopfes – bei ungezwungener Lippenhaltung durchgeführt wird [Schwarz, 1961a]:

Bei der Profilaufnahme des aufrecht positionierten, geradeaus blickenden Patienten ist der Kopf nach der Frankfurter Horizontalen (PO, *siehe unten*) ausgerichtet – als schaue der Patient sich in einem vor ihm hängenden Spiegel selbst in die Augen – [Cooke und Wei, 1988; Lundström et al., 1995], und alle benötigten Messpunkte (Porion (P), Orbitale (O), Hautnasion (N), Subnasale (Sn), Hautpogonion (Pog)) müssen deutlich erkennbar sein [Schopf, 1990].

Senkrecht zur Frankfurter Horizontalen (PO) werden die Nasion-Senkrechte (durch den Punkt N) und die Orbita-Senkrechte (ausgehend von Orbitale) als anteriore bzw. posteriore Begrenzung des Kieferprofilfeldes (KPF) eingezeichnet [Schwarz, 1961a].

Liegt nun Sn auf der Nasion-Senkrechten, so hat der Patient ein Durchschnittsgesicht, liegt Sn weiter anterior, hat er ein Vorgesicht, und liegt Sn weiter posterior, so hat er ein Rückgesicht [Schwarz, 1961a]; diese Diagnose bezeichnet den Einfluss der sagittalen Position der Oberkieferschneidezähne auf das Oberlippenprofil.

Liegt Pog eine halbe KPF-Breite posterior von Sn, so ist das Profil gerade, liegt Pog im Verhältnis zu Sn weiter anterior, so ist das Profil nach vorne schief, und liegt Pog im Verhältnis zu Sn weiter posterior, so ist das Profil nach hinten schief [Schwarz, 1961a]; diese Diagnose bezeichnet den Einfluss der sagittalen Position des Weichteilkinns.

Einleitung

Die beiden Diagnosen werden kombiniert, beispielsweise zu einem nach vorne schiefen Rückgesicht oder einem nach hinten schiefen Vorgesicht. Hat ein Patient ein gerades Durchschnittsgesicht, also einen regelrechten Profilverlauf, so spricht man von einem Biometgesicht [Dausch-Neumann, 1971; Schopf, 1990].

Auf der Enface-Aufnahme wird das Gesicht nach den Kollmannschen Proportionen vertikal in Obergesicht, Mittelgesicht und Untergesicht gedrittelt. Hierbei ist das Obergesicht durch Trichion (am Haaransatz) und Hautnasion (Beginn der Nasenwurzel) begrenzt, das Mittelgesicht durch Hautnasion und Subnasale (Ansatzpunkt von Nasensteg und Oberlippe) und das Untergesicht durch Subnasale und Gnathion (unterer Kinnrand). Als ideal gilt eine möglichst gleichmäßige Gesichtsdrittung [Schopf, 1990].

Zusätzliche reproduzierbare Aufnahmen – beispielsweise lächelnd und/oder aus anderen Perspektiven (z. B. andere Gesichtsseite im Profil oder Halbprofilaufnahmen) – können die Foto-Dokumentation ergänzen.

Dreidimensionale Laser- oder Stereophotogrammtrie-basierte Gesichtsscans gelten momentan noch nicht als Standard, bieten aber zusätzliche Analysemöglichkeiten, wie die Durchführung transversaler und volumetrischer Messungen [Seo et al., 2020; Yi et al., 2020; Demir und Baysal, 2020]; speziell halbseitige Gesichtsasymmetrien können nur dreidimensional adäquat beurteilt und vermessen werden [Kuijpers et al., 2020]. Selbstverständlich werden solche dreidimensionalen Gesichtsaufnahmen auch für Therapiekontrollen eingesetzt [Krneta Đokic et al., 2020].

1.1.2. Modellanalyse

Bei der Modellanalyse werden klassischerweise dreidimensional orientierte Kiefermodellpaare des Patienten aus Superhartgips vermessen; alternativ können die entsprechenden Messungen auch an digitalen Kiefermodellen durchgeführt werden [Carvalho et al., 2019; Hou et al., 2020]. Technische Fehlerquellen beim Generieren von digitalen Modellen sind mittlerweile in einem

solchen Maße überwunden [Passos et al., 2019; Schmidt et al., 2020], dass die Vermessung digitaler gegenüber analogen Modellen als gleichwertig angesehen wird [Murugesan und Sivakumar, 2020].

Um in einem dysgnathen Gebiss Fehlstellungen zu identifizieren, wird es mit einem eugnathen Gebiss gleicher Zahngröße verglichen [Schulze, 1980]. Merkmale eines eugnathen Gebisses sind die sechs Schlüssel zur Normalokklusion nach L. F. Andrews: Kontakt zwischen oberen ersten Molaren und unteren zweiten Molaren beidseits, korrekte Angulation der Zähne, korrekte Inklination der Zähne, keine Zahnrotationen, keine Zahnlücken, flache Speekurven [Andrews, 1972].

Okklusale Abweichungen von einer Angle-Klasse I mit physiologischem Overjet und Overbite [Angle, 1899] werden ebenso erfasst wie sagittale, transversale und vertikale Abweichungen in den Einzelkiefern [Korkhaus, 1939]. Die zugehörigen Richtwerte können, sofern keine Zahnfehlbildungen vorliegen, bei Kenntnis der Breitensumme der oberen oder unteren permanenten Incisivi mit der entsprechenden Index-Formel berechnet werden [Tonn, 1937; Jäckel, 1937; Bechtold et al., 2011]. Das Ermitteln harmonischer Zahngrößen ist ebenfalls ein Teil der Modellanalyse [Bolton, 1958] und kann bei einer Zahngrößendiskrepanz zwischen Ober- und Unterkieferbezahnung eine entscheidende Rolle für das Erreichen einer optimalen Okklusion spielen [Bolton, 1962].

Die ermittelten Richtwerte bieten Anhaltspunkte für Richtung und Ausmaß von Veränderungen, an denen man sich auf der Suche nach der bestmöglichen Therapie für den jeweiligen Patienten orientieren kann.

1.1.3. Röntgenanalyse

Die kieferorthopädische Röntgendiagnostik (zu Beginn der Behandlung) besteht wenigstens aus der Befundung eines Orthopantomogramms (OPTs) und einer Fernröntgenanalyse (FRS-Analyse) [Schulz und Bührmann, 1987], gegebenenfalls auch aus zusätzlichen Aufnahmen [Schopf, 1990].

Orthopantomogramm (OPT)

Das OPT liefert eine Übersicht über die Strukturen von Ober- und Unterkiefer, inklusive der Kieferhöhlen (KH) und der Kiefergelenke (KG) [Düker, 2000]. Eine solche Übersicht kann ersatzweise durch digitale Volumentomographie (DVT) erreicht werden; ein OPT ist jedoch mit mindestens 15-fach geringerer ionisierender Strahlung verbunden als eine DVT-Aufnahme [Kadesjö et al., 2018], weshalb das OPT für Übersichtszwecke nach wie vor als Goldstandard gilt [Korbmacher et al., 2007]. Allerdings existieren inzwischen Daten, die belegen, dass auch DVT-Aufnahmen mit stark reduzierter Strahlendosis hinreichend gute Bildqualität für kieferorthopädische Diagnostik liefern können [Voigt, 2018].

Zu den aus dem OPT erkennbaren Informationen gehören Zahnzahl, Zahnformanomalien, dentales Alter des Patienten, Entwicklungsstand und Position von Zahnkeimen, Hinweise auf Platzverhältnisse (vor allem in den Stützzonen), Angulation der Zahnwurzeln, apikale Veränderungen (am Alveolarknochen oder im Wurzelbereich), Veränderungen am marginalen Parodont (Abbau des Alveolarkammes), Veränderungen im Kieferknochen, Verschattungen der Kieferhöhlen, Veränderungen an den Kiefergelenken, Asymmetrien [Schopf, 1990; Düker, 2000].

Eine geringe Detailerkennbarkeit bis hin zu einer Verwischung von Strukturen außerhalb der dargestellten Schicht ist ein Nachteil des OPTs und macht bei Entdeckung pathologischer Prozesse in vielen Fällen zusätzliche Spezialaufnahmen nötig [Schopf, 1990].

Fernröntgenseitenbild (FRS)

Seitliche Fernröntgenaufnahmen bieten „eine wertvolle Möglichkeit [...], die strukturelle Eigenart des Individuums zu berücksichtigen und die innewohnenden Wachstumstendenzen abzuwägen, um so die für den individuellen Fall prognostisch günstigste Behandlungsmöglichkeit auszuwählen“ [Bleifuß-Rilat, 1953]. Mit Hilfe der FRS-Analyse kann also der Gesichtsschädelaufbau vermessen und eine Wachstumsprognose abgegeben werden.

Einleitung

Die Messung der sagittalen Position von Ober- und Unterkiefer im Gesichtsschädel sowie zueinander offenbart, ob eine „Malokklusion“ in sagittaler Richtung auch skelettale Ursachen hat und ob diese maxillär oder mandibulär zu lokalisieren sind [Riedel, 1952; Steiner, 1953; Riedel, 1957; Jacobson, 1975; Panagiotidis und Witt, 1977]. Entsprechend können solche skelettalen Ursachen gezielt angegangen werden.

Vertikale Messungen bezüglich Y-Achse [Broadbent, 1937], Kiefer- und Summenwinkel [Björk, 1947; Björk, 1950], basaler Relation [Schwarz, 1961b] oder Unterkieferrotation [Schudy, 1965] liefern Informationen über den vertikalen Schädelaufbau. Dies ist bei noch wachsenden Patienten besonders bedeutsam.

Dentale Werte betreffen vornehmlich Achsenneigung und sagittale Position der maxillären und mandibulären ersten Molaren und mittleren Incisivi [Steiner, 1959]. Insbesondere die Incisivi beeinflussen direkt das davor liegende Weichteilprofil der Lippen. Ausgeprägte Proklination der unteren Incisivi steht im Verdacht, parodontale Schäden zu begünstigen [Allais und Melsen, 2003; Kim SH et al., 2018].

Weichteilbezogene Werte aus der FRS-Analyse gleichen denen aus der Photostatanalyse und sind im Bereich des Untergesichtes stark von den dahinter liegenden skelettalen Strukturen beeinflusst [Schwarz, 1961b; Ricketts, 1968].

Im Vorfeld einer dysnathiechirurgischen Operation kann man zusätzlich auf die skelettale Metrik zurückgreifen, die durch prozentuale Längenvergleiche zur vorderen Schädelbasis Richtwerte für Normallängen bestimmter Strukturen im kieferchirurgisch beeinflussbaren Gesichtsschädelbereich bereitstellt [Schwarz, 1958].

Spezialaufnahmen

Mundfilm-Aufnahmen einzelner Zähne oder Bissflügel-Aufnahmen können bei Kariesverdacht benötigt werden [Schopf, 1990].

Fernröntgenfrontalbilder (FRF) können bei starken hemifazialen Asymmetrien oder bei seitlicher Kippung der Okklusionsebene indiziert sein [Broadbent, 1931; Vig und Hewitt, 1975]; diese Funktion kann auch eine DVT-Aufnahme erfüllen [Tyan et al., 2015].

Zur Ortsbestimmung verlagertes Zähne existierte in der Vergangenheit eine Vielzahl von Aufnahmetechniken (exzentrische Mundfilm-Aufnahmen, Aufbissaufnahmen, Scanora-Aufnahmen etc.) die inzwischen durch die digitale Volumetomographie (DVT) abgelöst worden sind [Shi et al., 2014; Algerban et al., 2015; Eslami et al., 2017]. DVT-Aufnahmen eignen sich außerdem zur genaueren Diagnostik aller Hartgewebsstrukturen im Kopfbereich, mit Bezug auf die kieferorthopädische Behandlung insbesondere zur Diagnostik anatomischer Grenzen der Zahnbewegung [Kim et al., 2014], pathologischer Prozesse im Alveolarfortsatz [Ramanauskaitė et al., 2020], fazialer Asymmetrien [You et al., 2018] oder arthritischer Veränderungen an den Kiefergelenken [Shi et al., 2017]. Zur speziellen Kiefergelenkdiagnostik kommen hauptsächlich unterschiedliche Aufnahmetechniken der Magnetresonanztomographie (MRT) zum Einsatz [Schmid-Schwap et al., 2009; Peroz et al., 2011]. MRT eignet sich auch zur Untersuchung anderer Weichgewebe im Kopf-Hals-Bereich [Mehnert et al., 2009]. Weitere weichteilfokussierte Diagnostik kann beispielsweise mittels Sonographie durchgeführt werden [Peng et al., 2003; Peng et al., 2004; Galén und Jost-Brinkmann, 2010].

Computertomographie (CT) ist in bestimmten Fällen indiziert [Holberg et al., 2005], wird aber wegen der verhältnismäßig hohen Strahlenbelastung mit Zurückhaltung in Betracht gezogen [Nardi et al., 2017].

1.2 Weiterentwicklung der Diagnostik

Die Digitalisierung der kieferorthopädischen Standard-Diagnostik hat bereits stattgefunden: Die Digitalisierung der Photoanalyse [Bishara et al., 1995; Cummins et al., 1995], der FRS-Analyse [Hagemann et al., 2000] und der Modellanalyse [Leifert et al., 2009] sind längst etabliert, wenn auch nicht flächendeckend verbreitet. Messungen der digitalen Modellanalyse sind gleichwertig mit Messungen am Gipsmodell [El-Zanaty et al., 2010; Kim et al., 2014; Amuk et al., 2019; Verma et al., 2019] und digitale FRS-Analysen mindestens gleichwertig mit analogen [Hagemann et al., 2000; Park et al. 2019; Moon et al., 2020a].

Der nächste Schritt in der Modernisierung ist die Umstellung zweidimensionaler diagnostischer Unterlagen auf dreidimensionale [Harrel, 2009]. Das Vertrautsein mit zweidimensionaler Diagnostik, die Investitionskosten für 3-D-Scanner und die Unflexibilität der Krankenkassen in puncto Leistungsvergütung neuer Technologien verlangsamten diesen Prozess im klinischen Alltag. In der Forschung aber wird stetig an der Weiterentwicklung moderner Technologien gearbeitet. So sind mittlerweile dreidimensionale Überlagerungen von DVT-Aufnahmen zur Therapiekontrolle [Yatabe et al., 2019] oder das Extrahieren von Informationen aus einem DVT zur Darstellung der Zahnwurzeln in seriellen intraoralen Scan-Bildern [Lee et al., 2014] möglich.

Die nächste technische Herausforderung ist eine Automatisierung der Diagnostik, die ebenfalls schon recht weit fortgeschritten ist. Automatische Zahnbreitenmessung entspricht bereits jetzt qualitativ der manuellen Messung [Stöckel et al., 2018]. Künstliche Intelligenz (KI) wird zur Zeit intensiv in der Röntgendiagnostik implementiert [Schwendicke et al., 2019; Moon et al., 2020b] und erreicht bereits vergleichbare Werte mit menschlichen Untersuchern [Hwang et al., 2020].

1.3 Zielsetzungen der Arbeit

Ziel der Studie 1 war, unter Anwendung der FRS-Analyse das sagittale Bewegungsmuster zweier neuartiger, komplexer Distalisierungsmechaniken zu vergleichen, die jeweils synchron den gesamten Oberkieferzahnbogen bewegten.

In Studie 2 sollte mittels FRS-Analyse die Stabilität von Behandlungsergebnissen nach synchroner Distalisierung des gesamten Oberkieferzahnbogens überprüft werden.

Ziel der Studie 3 war, den Nutzen von FRS für Therapieentscheidungen in der kieferorthopädischen Frühbehandlung mit dem Ziel zu überprüfen, die Belastung besonders junger Patienten durch ionisierende Strahlung zu reduzieren.

Einleitung

In Studie 4 sollte der Zusammenhang zwischen der Art der dysgnathiechirurgisch bedingten kondylären Verlagerung und den darauf folgenden knöchernen Remodellierungsprozessen an den Kondylenköpfen mittels digitaler Volumentomographie (DVT) überprüft werden.

Ziel der Studie 5 war die Entwicklung einer präzisen Methode zur Integration des digitalen Kiefermodells eines Patienten in seinen stereophotogrammetrischen Gesichtsscan.

In Studie 6 sollte überprüft werden, ob an dreidimensionalen Gesichtsscans von Patienten im Kindergartenalter intraorale sagittale oder vertikale Diskrepanzen abzulesen sind.

2 Eigene Arbeiten

2.1 Distalization pattern of the maxillary arch depending on the number of orthodontic miniscrews

Bechtold TE, Kim JW, Choi TH, Park YC, Lee KJ.

Distalization pattern of the maxillary arch depending on the number of orthodontic miniscrews. Angle Orthod 2013; 83:266-273.

<https://doi.org/10.2319/032212-123.1>

In dieser klinischen Studie wurden 25 erwachsene Patienten mit einer milden bis moderaten Distalverzahnung mit höchstens geringfügigen Engständen in der Front – gut lösbar mittels Distalisierung des oberen Zahnbogens – untersucht. Bei allen Patienten wurde der gesamte Oberkieferzahnbogen distalisiert (Total-Arch-Distalization). Anhand seitlicher Fernröntgenbilder (von vor und nach der Behandlung) wurden 12 Patienten mit einer Minischraube pro Seite interradi­kulär zwischen 2. Prämol­lar und 1. Molar (Gruppe A) mit 13 Patienten mit je zwei Minischrauben pro Seite interradi­kulär zwischen 1. und 2. Prämol­lar sowie zwischen 2. Prämol­lar und 1. Molar (Gruppe B) verglichen. Der Kraftansatz am Zahnbogen lag jeweils im Eckzahn­bereich.

Beide Behandlungs­modi führten zu einer signifikanten Distalisierung der Oberkieferzahnbögen, die in der Molaren- und Frontzahnregion nachgewiesen werden konnte. Behandlungs­modus B führte, verglichen mit Behandlungs­modus A, zu signifikant größerer Distalisierung und Intrusion der ersten Molaren, zu signifikant größerer Intrusion der mittleren Incisivi sowie zu signifikant größerer Autorotation des Unterkiefers gegen den Uhrzeigersinn.

Eine simultane Distalisierung aller Oberkieferzähne zur Behandlung einer Angle-Klasse-II-Verzahnung im Erwachsenen­gebiss ist mittels interradi­kulärer Minischrauben möglich. Durch Einsatz von zwei statt einer Minischraube pro Seite kann die einwirkende Kraft vergrößert und die Krafrichtung weiter nach kranial gelenkt werden, woraus sich ein anderes Bewegungsmuster des Oberkieferzahnbogens ergibt.

Eigene Arbeiten

2.2 Long-term stability of miniscrew anchored maxillary molar distalization in Class II treatment

Bechtold TE, Park YC, Kim KH, Jung HK, Kang JY, Choi YJ.

Long-term stability of miniscrew anchored maxillary molar distalization in Class II treatment. Angle Orthod 2020; 90:362-368.

<https://doi.org/10.2319/051619-335.1>

Rezidive therapeutischer Zahnbewegungen können vielfältige Ursachen haben. Ihr Ausmaß hängt unter anderem von der gewählten Therapie ab. Die Stabilität mittels skelettaler Verankerung durch Minischrauben distalisierter Seitenzahnguppen war bis dahin nicht wissenschaftlich belegt und publiziert.

In dieser klinischen Untersuchung an 19 Patienten mit deutlich ausgeprägter Distalverzahnung (Studiengruppe) wurde die Stabilität der Behandlungsergebnisse durchschnittlich 3,5 Jahre nach Abschluss einer Distalisierung des gesamten Oberkieferzahnbogens (Total-Arch-Distalization) untersucht. 19 Patienten mit annähernder Neutralverzahnung dienten als Kontrollgruppe.

Horizontale und vertikale Bewegungen der Molaren und Incisivi des Oberkiefers, sowie die Veränderung skelettaler Parameter des Gesichtsschädels, sowohl über den Behandlungszeitraum als auch während der Retentionsphase, wurden an Fernröntgenseitenbildern gemessen.

In der Studiengruppe wurden die oberen Molaren im Durchschnitt nahezu achsengerecht um mehr als 4 mm distalisiert und die Okklusionsebenen wurden um 3,3° steiler. In den darauffolgenden durchschnittlich 42 Monaten unterschieden sich dentale und skelettale Veränderungen der Studien- und der Kontrollgruppe nicht.

Daraus konnte gefolgert werden, dass eine synchrone Distalisierung des gesamten oberen Zahnbogens (Total-Arch-Distalization) zu einem stabilen Behandlungsergebnis führt, das nicht stärker rezidivgefährdet ist als das der Klasse-I-Patienten der Kontrollgruppe.

Eigene Arbeiten

2.3 Effect of cephalograms on decisions for early orthodontic treatment

Ritschel R, Bechtold TE*, Berneburg M.

Effect of cephalograms on decisions for early orthodontic treatment.

Angle Orthod 2013; 83:1059-1065.

(* Korrespondenzautor)

<https://doi.org/10.2319/021113-124.1>

Ziel dieser Untersuchung war, festzustellen, inwiefern Fernröntgenseitenbilder (FRS) Therapieentscheidungen bei kieferorthopädischer Frühbehandlung (Behandlung vor der späten Wechselgebissperiode) beeinflussen.

Sechs Patienten im frühen Wechselgebiss mit Indikation für eine Frühbehandlung zu Lasten der deutschen gesetzlichen Krankenkassen wurden in diese Studie eingeschlossen. Folgende Hauptdiagnosen lagen vor: Skelettale und dentale Klasse II (2x), skelettale und dentale Klasse III (2x), Platzmangel von mehr als 4 mm in mindestens einer Zahnbogenhälfte (1x), ein >4 mm offener Biss (1x). Diagnostische Modelle, Orthopantomogramme (OPT), Fernröntgenseitenbilder (FRS), sowie extra- und intraorale Fotos aller sechs Patienten sowie zugehörige Fragebögen wurden digitalisiert und an 106 Kieferorthopäden verschickt, die ihre Teilnahme an der Studie zugesagt hatten. 47 (Gruppe A: n = 15, Gruppe B: n = 16, Gruppe C: n = 16) der ursprünglich 106 Kieferorthopäden sendeten die zu zwei verschiedenen Zeitpunkten (T1 und T2) versandten diagnostischen Unterlagen vollständig bearbeitet zurück. Alle Kieferorthopäden erhielten die Unterlagen aller sechs Patienten, waren aber per Zufall Gruppen mit FRS, inklusive FRS-Analysewerten, oder ohne FRS zugeteilt (T1: Gruppen A und B → ohne FRS, Gruppe C → mit FRS; T2: Gruppe A → ohne FRS, Gruppen B und C → mit FRS).

In allen Gruppen, einschließlich B, die zu T1 keine FRS-Analysen, zu T2 aber auch die FRS-Analysen erhalten hatte, zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen T1 und T2 nur bezüglich der transversalen Erweiterung, was einen Einfluss der FRS auf die Therapieentscheidungen gänzlich ausschloss.

Daraus wurde gefolgert, dass FRS-Aufnahmen bei besonders jungen Patienten nicht routinemäßig Teil der kieferorthopädischen Diagnostik sein, sondern nur mit besonderen Begründungen angefertigt werden sollten.

Eigene Arbeiten

2.4 Condylar head remodeling compensating for condylar head displacement by orthognathic surgery

Hwang HS, Jiang T, Sun L, Lee KM, Oh MH, Biao Y, Oh HK, Bechtold TE*.

Condylar head remodeling compensating for condylar head displacement by orthognathic surgery.

J Craniomaxillofac Surg 2019; 47:406-413.

(* Korrespondenzautor)

<https://doi.org/10.1016/j.jcms.2018.11.029>

Zweck dieser Untersuchung war, den Zusammenhang zwischen der Richtung dysgnathiechirurgisch bedingter kondylärer Verlagerung und darauffolgenden kondylären Remodellierungsprozessen zu untersuchen.

Von 30 erwachsenen Patienten, die aufgrund einer Klasse-III-Anomalie durch Rückverlagerung des Unterkiefers mit beidseitiger sagittaler Spaltung behandelt worden waren, lagen jeweils drei DVT-Aufnahmen vor: (1) unmittelbar vor chirurgischer Verlagerung und (2) unmittelbar danach, sowie (3) sechs Monate später. DVT (1) und (2) wurden überlagert, um die Richtung der kondylären Verlagerung festzustellen; DVT (2) und (3) wurden überlagert, um die postoperative Remodellierung der Kondylenköpfe nachzuvollziehen.

Lateral verlagerte Kondylenköpfe zeigten laterale Resorption und mediale Apposition, bei medialer Verlagerung war es umgekehrt. Anteriore Verlagerung der Kondylenköpfe zog anteriore Resorption und posteriore Apposition nach sich, umgekehrt war es bei posteriorer Verlagerung. Unabhängig von der Verlagerungsrichtung zeigten sich an jedem Kiefergelenk an der Oberseite der Kondylen Resorptionen.

Die Ergebnisse erlauben den Schluss, dass die Remodellierungsprozesse an den Kondylen durch deren Verlagerungsrichtung vorgegeben werden und kompensatorisch wirken. Davon ausgenommen sind kaudal gerichtete Bewegungskomponenten.

Eigene Arbeiten

2.5 Integration of a maxillary model into facial surface stereophotogrammetry

Bechtold TE*, Göz TG, Schaupp E, Koos B, Godt AS, Reinert S, Berneburg M. Integration of a maxillary model into facial surface stereophotogrammetry.

J Orofac Orthop 2012; 73:126-137.

(* Korrespondenzautor)

<https://doi.org/10.1007/s00056-011-0060-1>

Die topographische Relation zwischen Gesichtswerteilen und dem Gebiss eines Menschen spielt für Funktion und Ästhetik eine bedeutende Rolle. Bis zur Durchführung dieser Studie war das präzise Festlegen der Relation von Gebiss zu Gesicht nur radiologisch oder durch plastische Abdrucknahme von Anteilen beider Regionen in Kombination mit Gesichtsbogenübertragung möglich. Ziel dieser Arbeit war, eine digitale Methode zu entwickeln, Gesichts- und Gebissscan in einer dreidimensionalen digitalen Darstellung (integriertes Oberflächenmodell) zusammenzufügen.

Von 19 jugendlichen Patienten, die aus medizinischen Gründen eine DVT-Aufnahme benötigten, wurden zusätzlich Photostataufnahmen sowie Kiefermodelle angefertigt und digitale Scans von Gebiss und Gesicht mittels einer eigens angefertigten Übertragungsapparatur zusammengeführt. Anhand von zehn Messstrecken zwischen fazialen und maxillären Messpunkten wurden die integrierten Oberflächenmodelle mit den jeweils zugehörigen DVT-Aufnahmen verglichen.

Die vertikalen Messstrecken zeigten annähernd perfekte Übereinstimmung zwischen integriertem Oberflächenmodell und DVT, während die sagittalen Messungen bei unbekannter Fehlerquelle größere aber klinisch akzeptable Unterschiede zeigten.

Die hier vorgestellte Methode zur Erstellung eines integrierten Oberflächenmodells aus stereophotogrammetrischer Gesichtsaufnahme und intraoralem Scan empfiehlt sich besonders für Wachstums- und Therapiekontrollen im Gesichtsschädelbereich jugendlicher Patienten, da sie nicht mit ionisierender Strahlung verbunden ist.

Eigene Arbeiten

2.6 Correlation between occlusal abnormalities and parameters investigated by three-dimensional facial photography

Godt A, Bechtold TE*, Schaupp E, Zeyher C, Koos B, Baas E, Berneburg M. Correlation between occlusal abnormalities and parameters investigated by three-dimensional facial photography.

Angle Orthod 2013; 83:782-789.

(* Korrespondenzautor)

<https://doi.org/10.2319/111412-874.1>

In dieser Untersuchung an Kindergartenkindern sollte die Einsetzbarkeit von Stereophotogrammetrie-Aufnahmen für die kieferorthopädische Diagnostik als Ersatz für radiologische Methoden vorgebracht werden.

Insgesamt 2062 Stereophotogrammetrie-Aufnahmen von Patienten im Alter von 4 bis 6 Jahren wurden aufgrund kieferorthopädischer Diagnosen in vier Gruppen unterteilt: (1) Distalverzahnung und/oder vergrößerter Overjet (Klasse II, n = 188), (2) Mesialverzahnung und/oder negativer Overjet (Klasse III, n = 37), (3) Overbite von ≤ -1 mm (frontal offener Biss, n = 65), (4) Neutralokklusion mit annähernd physiologischem Overjet und Overbite (Kontrollgruppe, n = 1772). Auf jeder Stereophotogrammetrie-Aufnahme wurden 20 Messpunkte gesetzt, aus denen sich 13 Messstrecken und 7 Messwinkel ergaben, anhand derer auf statistisch signifikante Unterschiede der fazialen Morphologie zwischen den Gruppen geprüft werden sollte.

Bei den Klasse-II-Patienten (Gruppe 1) waren Kopfbreite, Obergesichtsbreite und Mittelgesichtslänge gegenüber der Kontrollgruppe statistisch signifikant reduziert. Darüber hinaus waren Mundbreite und Lippendicke tendenziell erhöht, und die Oberlippenposition war im Vergleich zur Kontrollgruppe weiter ventral. Die Klasse-III-Patienten zeigten insgesamt eher retropositionierte Oberlippen; ein statistisch signifikant konkaveres Gesichtsprofil wurde allerdings nur bei den weiblichen Fünfjährigen gefunden. Probanden aus Gruppe 3 (offener Biss) zeigten tendenziell eine verkürzte Oberlippe; statistische Signifikanz hierfür konnte nur an den männlichen Vierjährigen nachgewiesen werden.

Insgesamt scheint die Nutzbarkeit von Gesichtsscans zu diagnostischen Zwecken im Kindergartenalter fraglich.

Eigene Arbeiten

3 Diskussion

Die sechs hier zusammengestellten Publikationen befassen sich mit unterschiedlichen Aspekten kieferorthopädischer Therapie und Diagnostik. Gemeinsam ist ihnen der Einsatz bildgebender Verfahren. Diese sind im Einzelnen:

- Die Fernröntgenseitenbild(FRS)-Analyse zur Therapiekontrolle (1-2)
 - (1) In „Distalization pattern of the maxillary arch depending on the number of orthodontic miniscrews“ wurde röntgenologische Kephalmetrie genutzt, um die Bewegungsmuster des gesamten Oberkieferzahnbogens infolge einer besonders komplexen Behandlungsmechanik mit skelettaler Verankerung nachzuvollziehen.
 - (2) In „Long-term stability of miniscrew anchored maxillary molar distalization in Class II treatment“ wurde röntgenologische Kephalmetrie angewendet, um die Stabilität des Behandlungsergebnisses nach Behandlung mittels einer besonders komplexen Behandlungsmechanik mit skelettaler Verankerung zu überprüfen.
- Die Bedeutung röntgenologischer Methoden für die Kieferorthopädie (3-4)
 - (3) In „Effect of cephalograms on decisions for early orthodontic treatment“ wurde die Notwendigkeit der routinemäßigen Anwendung ionisierender Strahlen im Sinne von Fernröntgenseitenbildern bei besonders jungen kieferorthopädischen Patienten in Frage gestellt.
 - (4) In „Condylar head remodeling compensating for condylar head displacement by orthognathic surgery“ wurden mittels digitaler Volumetomographie (DVT) Art und Ausmaß der funktionellen Anpassung der Kiefergelenkköpfe infolge beidseits sagittaler Spaltung und Dorsalverlagerung der Mandibula an Patienten mit skelettaler Klasse-III-Anomalie nachgewiesen.

- Die Entwicklung dreidimensionaler nicht-radiologischer Methoden (5-6)
 - (5) In „Integration of a maxillary model into facial surface stereophotogrammetry“ wurde ein wichtiger Schritt in der präzisen Zusammenführung intraoraler und extraoraler 3-D-Aufnahmen (ohne ionisierende Strahlung) vollzogen, wodurch dreidimensionale Röntgenbilder bezüglich bestimmter Informationen ersetzbar geworden sind.
 - (6) In „Correlation between occlusal abnormalities and parameters investigated by three-dimensional facial photography“ wurde die Nutzbarkeit fazialer 3-D-Aufnahmen (ohne ionisierende Strahlung) für die kieferorthopädische Diagnostik und Therapiekontrolle überprüft.

3.1 Fernröntgenseitenbild(FRS)-Analyse zur Therapiekontrolle

Hofrath hatte bereits in seiner Erstbeschreibung der FRS-Analyse darauf hingewiesen, dass dieses „orthoprojektorische Röntgenbild ein vorurteilsfreieres und wissenschaftlicheres Beweismittel eines Behandlungserfolges“ sei „als das Modell oder die Profilphotographie, da es im Gegensatz zu diesen jede Täuschung a priori ausschließt“ [Hofrath, 1931].

Eine Überlagerung aufeinander folgender Fernröntgenseitenbilder ist die am weitesten verbreitete Methode zur Überprüfung von kieferorthopädisch induzierten Zahnbewegungen [Cha et al., 2007]. Der FRS-Analyse kommt also, obwohl sie nur die sagittale und die vertikale Dimension erfasst, eine wichtige Rolle beim Nachweis der Wirksamkeit kieferorthopädischer Behandlungsmethoden zu; sie findet bis in die heutige Zeit Anwendung [Moorrees und Yen, 1955; Meach, 1966; Barton, 1972; Pancherz, 1982; Fränkel und Fränkel, 1983; Sakamoto et al., 1984; Miethke und Behm-Menthel, 1988; Sugawara et al., 1990; Yamaguchi und Nanda, 1991; Erverdi und Özkan, 1995; Sugawara und Mitani, 1997; Stephens et al., 2005; Lee et al., 2011; Bechtold et al., 2013; Bechtold et al., 2020; Martina et al., 2020].

Minischraubenverankerung in der Kieferorthopädie

Der Begriff Verankerung bezeichnet in der Kieferorthopädie das Widerlager gegen eine beabsichtigte Zahnbewegung. Hierbei ist der Betrag der für die Zahnbewegung aufgebrauchten Kraft immer gleich dem der entgegengesetzt wirkenden Kraft auf die Verankerung [Newton, 1739], wobei mehrere in einem Block agierende Zähne – gleich, ob als zu bewegendes oder als verankerndes Segment – prinzipiell mehr Kraft benötigen, um bewegt zu werden, als einzelne Zähne. Selbst wenn man dies berücksichtigt und die Kraft möglichst so appliziert, dass erwünschte Effekte auftreten, ergeben sich doch in vielen Fällen dentaler Verankerung unerwünschte Effekte [Wright, 1939; Cha, 2020; Ince-Bingol et al., 2020]. Daher wick man zur Verankerung, wo es ging, auf eine oberflächliche Abstützung an Strukturen außerhalb des dentoalveolären Komplexes aus [Kloehn, 1947; Bergersen, 1972; Graber, 1977; Delaire, 1988], wodurch sich für bestimmte Fehlstellungen einwandfreie Lösungen der Verankerungsproblematik ergaben, die aber extraoral sichtbar waren und deren optimale Einsatzzeit im Kindes- und Jugendalter von Patienten liegt.

Skelettale Verankerung – eine invasive Verankerung im Knochen – wurde erstmals 1945 von Gainsforth und Higley beschrieben [Gainsforth und Higley, 1945]; diese verwendeten Metallschrauben aus einer Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierung und verwiesen auf aufgetretene sowie potentielle Probleme, wie Infektionsgefahr oder zu geringe Stabilität der Verankerungsschrauben. Wieder aufgegriffen wurde diese Idee erst Ende der 1970er Jahre durch Sherman, der die Belastbarkeit dentaler Implantate mit orthodontischen Kräften nachwies [Sherman, 1978]. In der Folge wurden unterschiedliche Arten skelettaler Verankerung entwickelt beziehungsweise weiterentwickelt: dentale Implantate [Creekmore und Eklund, 1983; Gray et al., 1983; Roberts et al., 1984; Roberts et al., 1989; Roberts et al., 1990], Onplants [Block und Hoffman, 1995; Hong et al., 2005], palatinale Kurzimplantate [Wehrbein et al., 1996a; Wehrbein et al., 1996b; Wehrbein et al., 1999], Minischrauben [Kanomi, 1997; Park et al., 2001; Kyung et al., 2003; Park et al., 2003], Miniplatten [Umemori et al., 1999; Sugawara et al., 2002; Sugawara und Nishimura, 2005].

Die Einführung der skelettalen Verankerung in die Kieferorthopädie leitete einen Paradigmenwechsel ein, da zuvor unmögliche Behandlungsschritte möglich wurden. Mit der Einführung von Minischraubenverankerung – temporär in den Kieferknochen eingebrachte, offen inserierte Implantate geringen Durchmessers (1,3 - 2,0 mm) und geringer Länge (6 - 11 mm) – durch Kanomi [Kanomi, 1997] war skelettale Verankerung für jeden Kieferorthopäden ohne großen chirurgischen Aufwand zugänglich.

Analytische Mechanik

Die analytische Mechanik veranschaulicht die Bewegungen von Zähnen, indem deren Widerstandszentrum zu einem bestimmten Kraftvektor mit Kraftansatzpunkt am zu bewegenden Objekt in Relation gesetzt wird, woraus sich ein Bewegungsmuster um ein Rotationszentrum herum ergibt [Christiansen und Burstone, 1969; Hurd und Nikolai, 1976; Hocevar, 1981; Hocevar, 1982; Nikolai, 1982].

Je mehr Zähne gleichzeitig gezielt in eine Richtung gezogen oder gedrückt werden, desto komplexer ist die damit zusammenhängende Biomechanik [Burstone, 1966; Burstone, 1982; Choy et al., 2000; Choy et al., 2002; Choy et al., 2006; Choi et al., 2010; Oh et al., 2019]. Folglich gehören Bewegungen eines gesamten Zahnbogens (Total-Arch-Distalization) zu den komplexesten biomechanischen Aktionen in der Kieferorthopädie [Lee und Kim, 2018; Park et al., 2020].

Distalization pattern of the maxillary arch depending on the number of orthodontic miniscrews

In der Publikation „Distalization pattern of the maxillary arch depending on the number of orthodontic miniscrews“ wurden die resultierenden Bewegungsmuster zweier distal gerichteter, prinzipiell reproduzierbarer Kraftvektoren auf den verblockten Oberkieferzahnbogen mittels FRS-Analyse verglichen. Bei der Variante mit jeweils einer Minischraube pro Seite führte der distokraniel gerichtete Kraftvektor kaudal am Widerstandszentrum des verblockten Oberkieferzahnbogens vorbei, was außer der Distalisierung des Zahnbogens

auch eine Intrusion der posterioren Seitenzähne sowie eine Extrusion der Frontzähne mit sich brachte. Der ebenfalls distokranial gerichtete Kraftvektor der Variante mit zwei Minischrauben pro Seite verlief kranial des Widerstandszentrums des Oberkieferzahnbogens, was zusätzlich zur Distalbewegung des Zahnbogens auch zu einer Intrusion, sowohl der Seiten-, als auch der Frontzähne, führte.

Durch Vergleiche der FRS-Analysen vor und nach den überprüften Behandlungsmethoden konnten wir unter verhältnismäßig geringfügiger Strahlenbelastung zum einen die Wirksamkeit einer einfach anzuwendenden, direkt verankerten Minischrauben-Distalisierungsmechanik zur Total-Arch-Distalization zeigen, die im Vergleich zu Konstruktionen mit an Minischrauben befestigten Aufbauten [Kircelli et al., 2006; Kinzinger et al., 2008; Wilmes et al., 2009; Shah und Shah, 2016] Vorteile in puncto Mundhygiene hat; zum anderen konnten wir zeigen, dass mit der verwendeten Mechanik auch die vertikale Position der Front- und Seitenzähne planbar ist, was eine wichtige Rolle für Funktion und Ästhetik spielt [Park und Burstone, 1986; Peck et al., 1992; Andrews WA, 2008].

Kieferorthopädisches Rezidiv

Der Begriff Rezidiv bezeichnet in der Kieferorthopädie die bei manchen Patienten fehlende Stabilität des Behandlungsergebnisses mit der Tendenz, zur ursprünglichen Situation zurückzukehren [Hellman, 1944; Bechtold und Göz, 2010]. Ursachen und Vermeidung von Rezidiven beschäftigen die Kieferorthopädie seit Beginn des Faches [Huckaba, 1952]. Eine bis zum heutigen Tag plausibel erscheinende Erklärung für Rezidive ist die Äquilibrium-Theorie. Demnach hat der Druck umliegender Weichgewebe die ursprüngliche Zahnstellung verursacht und gerade bei großen Veränderungen der Zahnstellung oder der Kieferposition findet ein Rückfall in Richtung der ursprünglichen Situation statt [Weinstein et al., 1963; Proffit, 1978]. Ähnliches ist in der Totalprothetik-Literatur beschrieben, die bei Aufstellung der Zähne einen Balanceausgleich zwischen Zunge und labial/bukkal liegenden Weichteilen fordert [Körper, 1994] und diesen äquilibrierten Bereich als „Kauschlauch“

bezeichnet [Hupfaut, 1987]. Folgt man diesem Gedanken aus kieferorthopädischer Sicht, so sind Zahnbewegungen innerhalb des „Kauschlauches“, und damit auch die reine Distalisation von Seitenzähnen, wenig rezidivgefährdet. Hierbei ist zu beachten, dass bezüglich der Incisivi zwei Vorgehensweisen bestehen: Entweder wird der Zahnbogen im Vorfeld ausgeformt, was ein Auflösen frontaler Engstände und damit eine Bewegung der Incisivi nach labial aus dem „Kauschlauch“ hinaus beinhalten kann, um den Zahnbogen dann insgesamt in den „Kauschlauch“ hineinzubewegen (z. B. bei einer Total-Arch-Distalization), oder die Incisivi werden bis Abschluss der Seitenzahndistalisation nicht aktiv bewegt, um im Anschluss den gewonnenen Platz zu nutzen, um die Front- und Eckzähne möglichst direkt innerhalb des „Kauschlauches“ in einen ausgeformten Zahnbogen einzustellen.

Die Ortsstabilität von Molaren nach Distalisierung in Form einer Translation war bis zur nachfolgend beschriebenen Publikation nicht nachgewiesen [Bechtold et al., 2020].

Long-term stability of miniscrew anchored maxillary molar distalization in Class II treatment

In der Publikation „Long-term stability of miniscrew anchored maxillary molar distalization in Class II treatment“ wurde die Stabilität des Behandlungsergebnisses nach synchroner Distalisierung des gesamten Oberkieferzahnbogens (Total-Arch-Distalization) mittels FRS-Analyse nachgewiesen.

Sowohl 6-Jahr-Molaren als auch zentrale Incisivi waren im Rahmen der Behandlung, verglichen mit einer Kontrollgruppe geringfügiger Zahnbewegung, signifikant um $\geq 3,3$ mm nach dorsal bewegt worden; eine signifikante Veränderung der Zahnachse hatte nur im Rahmen der Fehlstellungskorrektur an den anfangs prokliniert stehenden zentralen Incisivi der experimentellen Gruppe im Sinne einer Reklination um ≥ 3 mm stattgefunden. In der durchschnittlich 42-monatigen Retentionsphase blieb die Distalisation zweifelsfrei stabil.

3.2 Die Bedeutung röntgenologischer Bildgebung für die Kieferorthopädie

Im Rahmen kieferorthopädischer Standarduntersuchungen werden zweidimensionale Röntgenbilder verwendet. Insbesondere radiologische Methoden stehen wegen damit verbundener karzinogener Wirkung durch ionisierende Strahlung in der Kritik, liefern jedoch auch wesentlich mehr Informationen als reine Weichteilabbildungen. Da unter den Regelungen des deutschen Gesundheitssystems die kieferorthopädische Patientenklientel größtenteils aus Kindern und Jugendlichen besteht und da sich der kieferorthopädische Wirkungsbereich in unmittelbarer Nähe zu Gehirn, Schilddrüse, Augen und Knochenmark befindet, ist eine bestmögliche Reduktion ionisierender Strahlung geboten [Pearce et al., 2012; Tomà et al., 2019], auch wenn unter in Deutschland geltenden Bestimmungen vermutlich kein erhöhtes Tumorrisiko im Kindesalter besteht [Michaelis et al., 1998].

Das Fernröntgenseitenbild (FRS) ist die für die Kieferorthopädie spezifische Röntgenaufnahme, und seine Analyse hat sich seit ihrer zeitgleichen Erstpublikationen im April 1931 durch Broadbent in Nordamerika und durch Hofrath in Europa [Broadbent, 1931; Hofrath, 1931] zu einem Teil der kieferorthopädischen Standarddiagnostik entwickelt [Tweed, 1946; Björk, 1947; Downs, 1948; Moorrees, 1953; Steiner, 1953; Meach, 1966; Barton, 1972; Sakamoto et al., 1984; Erverdi und Özkan, 1995; Stephens et al., 2005; Lee et al., 2011; Martina et al., 2020]. Die FRS-Analyse wurde in frühen Jahren für Wachstumsstudien [Brodie, 1941; Riolo et al., 1974; Bishara, 1981] eingesetzt, die bis in die heutige Zeit Bedeutung haben, entweder beim Vergleich mit anderen Wachstumsstudien [Baccetti et al., 2005; Jacob und Buschang, 2014; Hardin et al., 2020; Jiménez et al., 2020] oder als Referenz bei der Behandlung von Kindern und Jugendlichen [Buschang et al., 2011; Roberts et al., 2016; Lione et al., 2020]. Die Erkenntnisse der Wachstumsstudien sind zum einen besonders wertvoll, da die wachstumsbedingten Veränderungen mit in die kieferorthopädische Therapieplanung bei Heranwachsenden einbezogen werden müssen, zum anderen sind solche röntgenologischen Langzeituntersuchungen wegen der inzwischen gewachsenen Erkenntnisse über die Schädlichkeit

ionisierender Strahlung, besonders im Kindesalter, nicht mehr durchführbar [Tomà et al., 2019].

Effect of cephalograms on decisions for early orthodontic treatment

In „Effect of cephalograms on decisions for early orthodontic treatment“ wurde der Einfluss von Fernröntgenseitenbildern auf die Therapieplanung bei besonders jungen kieferorthopädischen Patienten überprüft. Diese Untersuchung ergab, dass ein FRS bei keinem der sechs 5- bis 8-jährigen Patienten mit typischen Frühbehandlungssymptomen zu einer anderen Therapieentscheidung führte. Demnach könnte man bei Frühbehandlungspatienten auf routinemäßige FRS-Analyse verzichten, was zu einer Senkung der Strahlenbelastung in dieser Altersgruppe beitrüge.

Dreidimensionale radiologische Aufnahmen

Da eine dreidimensionale Darstellung von Strukturen des Gesichtsschädels originalgetreuer ist als eine zweidimensionale, beschrieben Grayson et al. die Idee einer Zusammenführung von Fernröntgenseitenbild (FRS) und Fernröntgenfrontalbild (FRF) zu einem dreidimensionalen Bild [Grayson et al., 1988].

Mit Einführung der digitalen Volumentomographie (DVT) in die Zahnheilkunde wurde der regelmäßige Einsatz dreidimensionaler radiologischer Bildgebung möglich, wobei die DVT im Vergleich zur Computertomographie (CT) nicht nur eine geringere Strahlenbelastung mit sich brachte, sondern auch eine wesentlich höhere Sensitivität [Manglos et al., 1991]. Zur Erfassung feiner Strukturen im Zahnwurzelbereich allerdings sahen Holberg et al. eine bessere Detailtreue bei der CT [Holberg et al., 2005].

So muss die Indikation hinsichtlich der radiologischen Aufnahmen für jeden Patienten individuell bewertet werden [Schulze et al., 2004], wobei routinemäßige DVT-Aufnahmen für die kieferorthopädische Diagnostik wegen der höheren Strahlenbelastung im Vergleich zu konventionellen Röntgenaufnahmen nach wie vor als obsolet gelten [Hirschfelder, 2008; Signorelli et al., 2016; Kassenzahnärztliche Bundesvereinigung, 2018], auch wenn inzwischen DVT-

Aufnahmen mit stark reduzierter Strahlendosis hinreichend gute Bildqualität für kieferorthopädische Diagnostik zu zeigen scheinen [Voigt, 2018]. Als ideale Übersichtsaufnahme gilt das Orthopantomogramm (OPT), während bei speziellen Fragestellungen, die für die Therapie von Nutzen sein könnten, DVT-Aufnahmen sinnvoll sind [Korbmacher et al., 2007].

DVT-Aufnahmen finden in der klinischen Kieferorthopädie Einsatz bei chirurgischen [Cevitanes et al., 2005] und orthopädischen [De Clerck et al., 2012] Veränderungen des Gesichtsschädels, insbesondere auch im Kiefergelenkbereich [Hilgers et al., 2005], sowie bei besonderen therapeutischen Fragestellungen, wie beispielsweise nach knöchernen Veränderungen infolge forcierter Gaumennahterweiterung [Park et al., 2017], nach der exakten Position verlagertes Zähne zu benachbarten Zahnwurzeln [Björksved et al., 2019] oder nach den Knochverhältnissen im Spaltbereich von Patienten mit Lippen-Kiefer-Gaumen-Spalten [de Almeida et al., 2017].

Wissenschaftlich wurden DVT-Aufnahmen unter anderem für anatomische Studien, wie zum Auffinden geeigneter knöcherner Strukturen für skelettale Verankerungsmethoden [Lee et al., 2009; Präger et al., 2013; Präger et al., 2014; Holm et al., 2016], und für klinische Untersuchungen mit dreidimensionaler Vermessung der Atemwege [da Costa et al., 2017; Kim et al., 2018; Park et al., 2018] oder mit Überlagerung von seriellen DVT-Aufnahmen zur Kontrolle der dreidimensionalen Veränderung von Hart- und Weichgewebsstrukturen [Nguyen et al., 2011; Hellak et al., 2015; Zhang et al., 2019] verwendet.

Condylar head remodeling compensating for condylar head displacement by orthognathic surgery

In „Condylar head remodeling compensating for condylar head displacement by orthognathic surgery“ wurde anhand serieller DVT-Aufnahmen das Remodelling der Kiefergelenkköpfe infolge Klasse-III-Dysgnathie-Operation des Unterkiefers überprüft und auf diese Weise eine postoperative funktionelle Anpassung [Roux, 1920] der Kondylenköpfe nachgewiesen.

Knöchernen Veränderungen sind ein Beispiel für diagnostische oder therapiebezogene Untersuchungen, bei denen nicht auf ionisierende Strahlung verzichtet werden kann.

3.3 Entwicklung dreidimensionaler nicht-radiologischer Methoden

Optische dreidimensionale Gesichtsscans

Die optische dreidimensionale Gesichtserfassung geht auf Albrecht Dürers Quadratnetz zur perspektivischen Erfassung dreidimensionaler Gebilde zurück [Moorrees und Lebet, 1962]. Heute gebräuchliche optische Gesichtsscans erfolgen hauptsächlich durch fotografie- oder laserbasierte Triangulation [Sforza et al., 2013], die qualitativ für anthropometrische Zwecke in etwa gleichwertig sind [Kau et al., 2010; Codari et al., 2015].

Anatomische Messpunkte in dreidimensionalen Gesichtsscans junger Erwachsener eignen sich aufgrund guter Auffindbarkeit und Reproduzierbarkeit zur exakten Vermessung von Gesichtsstrukturen; dies gilt sowohl für Punkte auf der Gesichtsmitte als auch für bilateral vorhandene Messpunkte [Fink et al., 2014].

Volumetrische Veränderungen durch Wachstum [Ritschl et al., 2018] oder Behandlung [Baik und Kim, 2010; Lee et al., 2015] sind durch Überlagerung serieller Scans möglich.

Optische Erfassung von Ober- und Unterkieferstrukturen

Die Präzision intraoraler Scans ist inzwischen gleichwertig mit der einer konventionellen Abformung [Fleming et al., 2010; Akyalcin et al., 2013].

Die digitale Modell- und Platzanalyse ist im Vergleich zur konventionellen Analyse an Gipsmodellen klinisch akzeptabel [Leifert et al., 2009; Radeke et al., 2014]. Bei ausgeprägten Engständen ergibt die Modellanalyse an digitalen Modellen geringere Engstände als bei der Messung an Gipsmodellen [Yoon et al., 2018].

Zur dreidimensionalen Überprüfung von dentoalveolären Behandlungseffekten können serielle Digitalmodelle überlagert werden. Im Oberkiefer dienen Areale

des mittleren und hinteren Gaumens als unveränderte Überlagerungsreferenz [Cha et al., 2007; Choi DS et al., 2010]. Im Unterkiefer finden sich stabile Referenzareale zur Überlagerung prä- und posttherapeutischer 3-D-Digitalmodelle an den Lingualflächen der Alveolarfortsätze im Prämolarenbereich [An K et al., 2015]. Auch eine volumetrische Bewertung der Abnutzung von Zahnmaterial ist durch Überlagerung einzelner Zähne im 3-D-Scan möglich [Park et al., 2014].

Intraorale 3-D-Scans können auch für digitale Behandlungsplanung verwendet werden, die beispielsweise mit durchsichtigen Aligner-Schienen [Nedwed und Miethke, 2005; Boyd, 2007; Haubrich und Schupp, 2020] oder mit CAD/CAM-gefertigten individualisierten Bögen für eine Multibracket-Behandlung [Müller-Hartwich et al., 2007; Müller-Hartwich et al., 2016; Arino, 2020] umgesetzt werden kann.

Integration of a maxillary model into facial surface stereophotogrammetry

In „Integration of a maxillary model into facial surface stereophotogrammetry“ gelang mit Hilfe einer Übertragungseinheit mit drei optisch gut erfassbaren Kugeln eine präzise Zusammenführung von Gesichtsscan und intraoralen Scans in zehn Schritten. Die Präzision dieses fusionierten 3-D-Bildes entsprach in allen durchgeführten Messungen den entsprechenden Messungen in den DVT-Aufnahmen derselben Patienten. Durch diese Fusion wurden dreidimensionale Röntgenbilder bezüglich von intra- und extraoralen Oberflächen ausgehender Messungen ersetzbar.

Ritschl et al. übertrugen diesen Workflow auf einen mobilen extraoralen LED-Scanner, verkürzten das Protokoll auf sechs Einzelschritte und bestätigten die Überlegenheit kugelförmiger gegenüber flachen extraoralen Geometrien an der Übertragungseinheit [Ritschl et al., 2019]. Eine direkte Überlagerung, ohne Übertragungseinheit, anhand im Face-Scan sichtbar gemachter Zähne spart zwar weitere Einzelschritte, geht aber nach wie vor mit deutlichen Qualitätseinbußen einher [Xiao et al., 2020].

Messungen an Gesichtsscans

Messpunkte auf den Gesichtsscans erwachsener Patienten sind laut Fink et al. ausreichend gut reproduzierbar [Fink et al., 2014], auf den Gesichtsscans von 4- bis 6-Jährigen waren jedoch nur 15 von 22 Messpunkten ausreichend gut reproduzierbar, und das unter der Voraussetzung, dass die Auswertung von einer im Umgang mit der Software geschulten und routinierten Person durchgeführt worden war [Bernebeurg et al., 2010]. Dies lässt die Vermutung zu, dass bestimmte Messpunkte an weniger markanten kindlicheren Gesichtern schwieriger aufzufinden sind.

Eine Korrelation zwischen der Form der Gesichtsweichteile in zweidimensionalen Foto-Analysen und skelettalen Fehlstellungen konnten Fields et al. an 8- bis 12-Jährigen nicht zweifelsfrei feststellen [Fields et al., 1982]. Vergrößerter bzw. verkleinerter Overjet und Overbite zeigten auch in einer Untersuchung an 1630 Erwachsenen im Alter von 46 Jahren nur mäßige Korrelation mit dem Weichteilprofil in Photostatanalysen [Kanavakis et al., 2019].

Auch erfolgreiche kieferorthopädische Behandlungen von Symptomatikern, die an den Gesichtsweichteilen erkennbar sind, zeigen nur mäßige Veränderungen des Weichteilprofils, deren Messwerte sich in Studien von Lisson et al. und Hourfar et al. zwar teils signifikant unterschieden, die aber die Gesichtsästhetik kaum merklich veränderten [Lisson et al., 2013; Hourfar et al., 2018].

Correlation between occlusal abnormalities and parameters investigated by three-dimensional facial photography

In „Correlation between occlusal abnormalities and parameters investigated by three-dimensional facial photography“ wurde an 4- bis 6-Jährigen die Korrelation zwischen Merkmalen aus fazialen Stereophotogrammetrie-Aufnahmen und Zahnfehlstellungen überprüft. Eine Korrelation war lediglich für Malokklusionen mit vergrößertem bzw. negativem Overjet festzustellen.

Wasserstein et al. fanden an 12- bis 16-jährigen Jugendlichen eine klinisch verwendbare Korrelation zwischen unterschiedlichen Angle-Klassen und zugehörigen Weichteilprofilen [Wasserstein et al., 2015]. Möglicherweise werden

Diskussion

derartige Gesichtsweichteil-Merkmale im dreidimensionalen Gesichtscan mit zunehmendem Alter deutlicher.

4 Zusammenfassung

Bildgebende Verfahren sind ein unerlässlicher Teil der kieferorthopädischen Therapie und kommen maßgeblich in Diagnostik und Therapiekontrolle zum Einsatz.

Seit langer Zeit eingesetzte zweidimensionale fotografische wie radiologische Verfahren sind zur Zeit noch Standard, wobei eine Umstellung auf dreidimensionale fotografische und auch radiologische Bildgebung intensiv vorangetrieben wird. Im Zusammenhang mit radiologischer 3-D-Bildgebung spielt insbesondere die höhere Belastung durch ionisierende Strahlung eine entscheidende Rolle.

In den hier vorgelegten kieferorthopädischen Studien kamen unterschiedliche bildgebende Verfahren zum Einsatz:

Mittels FRS-Analyse wurden die Funktionsweisen zweier neuartiger, Minischrauben-verankerter Total-Arch-Distalization-Mechaniken nachvollzogen; die Effektivität konnte für beide Mechaniken nachgewiesen und das jeweilige biomechanische Bewegungsmuster nachvollzogen werden. In einer weiteren Untersuchung wurde ebenfalls mittels FRS-Analyse für eine andere maxilläre Total-Arch-Distalization-Mechanik exzellente Stabilität des Behandlungsergebnisses nachgewiesen. Hieraus ist ersichtlich, dass auch modernste kieferorthopädische Behandlungsmethoden erfolgreich mittels konventioneller zweidimensionaler Röntgendiagnostik überprüft werden können.

Die dritte hier vorgelegte Studie konnte zweifelsfrei nachweisen, dass FRS in typischen Frühbehandlungssituationen bei 5- bis 8-jährigen Patienten keine Auswirkungen auf die Therapieentscheidungen von Kieferorthopäden hatten. Daraus konnte gefolgert werden, dass routinemäßige FRS-Aufnahmen zur Kurzbehandlung besonders junger Patienten unnötig sind, was zu einer künftigen Reduktion der Strahlenbelastung in dieser Altersgruppe beiträgt.

Die vierte hier vorgelegte Studie konnte anhand von DVT-Aufnahmen nachweisen, dass nach beidseitiger sagittaler Spaltung und Verlagerung des Unterkiefers bei Klasse-III-Patienten die Kondylenköpfe der Kiefergelenke in

Zusammenfassung

anteroposteriorer sowie in mediolateraler Richtung adaptive Remodellierungsprozesse durchlaufen, die die Kondylenverlagerung teilweise kompensieren. Lediglich bei Abwärtsverlagerung der Kondylen, also Distraction der Kiefergelenke, wurden dennoch Resorptionen an den Oberseiten der Kondylen gefunden. Diese Studie belegt den Wissenszugewinn, den dreidimensionale radiologische Bildgebung für kieferorthopädische Therapien bedeutet.

In der fünften vorgelegten Studie wurden in einem 10-Schritte-Verfahren digitale Kiefermodelle äußerst präzise in stereophotogrammetrische Gesichtsscans integriert; die dann vorgenommenen Messungen wurden mit Messungen in den zugehörigen DVT-Aufnahmen verglichen und zeigten nur minimale Abweichungen. Hierdurch wurde die Weiterentwicklung der Verarbeitung dreidimensionaler intra- und extraoraler Oberflächenscans zu einem möglichen Teilersatz dreidimensionaler radiologischer Bilder vorangebracht, wie auf dieser Untersuchung aufbauende neuere Studien zeigen.

In der sechsten Studie wurde die extraorale Erkennbarkeit intraoraler Diskrepanzen an Gesichtsscans überprüft; nur sagittale Diskrepanzen waren erkennbar. Das hieraus resultierende Infragestellen der Ersetzbarkeit radiologischer durch 3-D-fotografische Methoden in der Kieferorthopädie ist ein wichtiger Teilschritt in der Weiterentwicklung kieferorthopädischer Bildgebung, da begrenzte Möglichkeiten klar festgestellt werden müssen, bevor eine Entscheidung fallen kann, ob ältere durch modernere Methoden ersetzt werden sollten.

Alles in allem haben die hier vorgelegten Studien die ungeminderte Bedeutung bisher gebräuchlicher bildgebender Methoden untermauert, einen Beitrag zur Senkung der bildgebungsbedingten Strahlenbelastung von Patienten im Kindesalter geleistet, zusätzliche Vorteile dreidimensionaler radiologischer Bildgebung bewiesen und das Nutzenspektrum dreidimensionaler Oberflächenscans erweitert, aber auch deren Indikationen begrenzt. Folglich haben diese Studien bedeutend zur Weiterentwicklung der Bildgebung in der Kieferorthopädie beigetragen.

5 Literaturverzeichnis

- Akyalcin S, Cozad BE, English JD, Colville CD, Laman S. (2013) Diagnostic accuracy of impression-free digital models. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 144(6): 916-22.
- Allais D, Melsen B. (2003) Does labial movement of lower incisors influence the level of the gingival margin? A case-control study of adult orthodontic patients. *Eur J Orthod.* 25(4): 343-52.
- Alqerban A, Jacobs R, Fieuws S, Willems G. (2015) Radiographic predictors for maxillary canine impaction. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 147(3): 345-54.
- Amuk NG, Karsli E, Kurt G. (2019) Comparison of dental measurements between conventional plaster models, digital models obtained by impression scanning and plaster model scanning. *Int Orthod.* 17(1): 151-8.
- An K, Jang I, Choi DS, Jost-Brinkmann PG, Cha BK. (2015) Identification of a stable reference area for superimposing mandibular digital models. *J Orofac Orthop.* 76(6): 508-19.
- Andrews LF. (1972) The six keys to normal occlusion. *Am J Orthod.* 62(3): 296-309.
- Andrews WA. (2008) AP relationship of the maxillary central incisors to the forehead in adult white females. *Angle Orthod.* 78(4): 662-9.
- Angle EH. (1899) Classification of malocclusion. *Dental Cosmos.* 41.
- Arino FA. (2020) Robotics in orthodontics: Efficacy of CAD/CAM-manufactured archwires in predicting and implementing clinical outcomes. Master Thesis, Temple University, Philadelphia.
- Baccetti T, Franchi L, McNamara JA. (2005) The cervical vertebral maturation (CVM) method for the assessment of optimal treatment timing in dentofacial orthopedics. *Semin Orthod.* 11(3): 119-29.
- Baik HS, Kim SY. (2010) Facial soft-tissue changes in skeletal Class III orthognathic surgery patients analyzed with 3-dimensional laser scanning. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 138(2): 167-78.
- Barton JJ. (1972) High-pull headgear versus cervical traction: A cephalometric comparison. *Am J Orthod.* 62(5): 517-29.
- Bechtold TE, Göz GR. (2010) Einfluss standardisierter Bogenformen auf die transversale Zahnbogendimension. *Kieferorthopädie.* 24(1): 27-35.

Literaturverzeichnis

- Bechtold TE, Müllauer W, Göz GR, Berneburg M. (2011) Metrische Verfahren zur Analyse von Platz- und Größenverhältnissen im Zahnbogen. *Kieferorthopädie*. 25(4): 277-86.
- Bechtold TE, Göz TG, Schaupp E, Koos B, Godt AS, Reinert S, Berneburg M. (2012) The integration of the maxillary model into facial surface-stereo-photogrammetry. *J Orofac Orthop*. 73(2): 126-37.
- Bechtold TE, Kim JW, Choi TH, Park YC, Lee KJ. (2013) Distalization pattern of the maxillary arch depending on the number of orthodontic miniscrews. *Angle Orthod*. 83(2): 266-73.
- Bechtold TE, Park YC, Kim KH, Jung HK, Kang JY, Choi YJ. (2020) Long-term stability of miniscrew anchored maxillary molar distalization in Class II treatment. *Angle Orthod*. 90(3): 362-8.
- Beckmann-van der Ven G, Hinz R, Schumann A, Uerdingen R, Zöller K. (1993) *Weißbuch Kieferorthopädie: Stand und Perspektiven der Qualitätssicherung in der Kieferorthopädie für die vertragszahnärztliche Versorgung*. Pröll Druck, Augsburg.
- Bergersen EO. (1972) A cephalometric study of the clinical use of the mandibular labial bumper. *Am J Orthod*. 61(6): 578-602.
- Berneburg M, Schubert C, von Einem C, Schaupp E, Möller M, Göz G. (2010) The reproducibility of landmarks on three-dimensional images of 4- to 6-year-old children. *J Orofac Orthop*. 71(4): 256-64.
- Bishara SE. (1981) Longitudinal cephalometric standards from 5 years of age to adulthood. *Am J Orthod*. 79(1): 35-44.
- Bishara SE, Cummins DM, Jorgensen GJ, Jakobsen JR. (1995) A computer assisted photogrammetric analysis of soft tissue changes after orthodontic treatment. Part I: Methodology and reliability. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 107(6): 633-9.
- Björk A. (1947) The face in profile. *Svensk Tandlakare-Tidskrift*. 40(5B).
- Björk A. (1950) Some biological aspects of prognathism and occlusion of the teeth. *Acta Odontol Scand*. 9(1): 1-40.
- Björksved M, Magnuson A, Bazargani SM, Lindsten R, Bazargani F. (2019) Are panoramic radiographs good enough to render angle and sector position in palatally displaced canines? *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 155(3): 380-7.

Literaturverzeichnis

- Bleifuß-Rilat U. (1953) Kieferorthopädische Prognose und Fernröntgendiagnostik in USA. *Fortschr Kieferorthop.* 14(3): 205-16.
- Block MS, Hoffman DR. (1995) A new device for absolute anchorage for orthodontics. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 107(3): 251-8.
- Bolton WA. (1958) Disharmony in tooth size and its relation to the analysis and treatment of malocclusion. *Angle Orthod.* 28(3): 113-30.
- Bolton WA. (1962) The clinical application of a tooth-size analysis. *Am J Orthod.* 48(7): 504-29.
- Boyd RL. (2007) Complex orthodontic treatment using a new protocol for the Invisalign appliance. *J Clin Orthod.* 41(9): 525-47.
- Broadbent BH. (1931) A new x-ray technique and its application to orthodontia. *Angle Orthod.* 1(2): 45-66.
- Broadbent BH. (1937) Bolton standards and technique in orthodontic practice. *Angle Orthod.* 7(4): 209-33.
- Brodie AG. (1941) On the growth pattern of the human head. From the third month to the eighth year of life. *Am J Anat.* 68(2): 209-62.
- Burstone CJ. (1966) The mechanics of the segmented arch techniques. *Angle Orthod.* 36(2): 99-120.
- Burstone CJ. (1982) The segmented arch approach to space closure. *Am J Orthod.* 82(5): 361-78.
- Buschang PH, Carrillo R, Rossouw PE. (2011) Orthopedic correction of growing hyperdivergent, retrognathic patients with miniscrew implants. *J Oral Maxillofac Surg.* 69(3): 754-62.
- Carvalho PEG, Ortega AdO, Maeda FA, da Silva LH, Carvalho VGG, Torres FC. (2019) Digital scanning in modern orthodontics. *Curr Oral Health Rep.* 6(4): 269-76.
- Cevitanes LHS, Bailey LJ, Tucker Jr GR, Styner MA, Mol A, Phillips CL, Proffit WR, Turvey T. (2005) Superimposition of 3D cone-beam CT models of orthognathic surgery patients. *Dentomaxillofac Radiol.* 34(6): 369-75.
- Cha BK, Lee JY, Jost-Brinkmann PG, Yoshida N. (2007) Analysis of tooth movement in extraction cases using three-dimensional reverse engineering technology. *Eur J Orthod.* 29(4): 325-31.

Literaturverzeichnis

- Cha JY. (2020) Biomechanical considerations for controlling target tooth movement with mini-implants. In: Temporary anchorage devices in clinical orthodontics (Hrsg. Park JH). 1. Auflage. John Wiley & Sons, Hoboken: 17-36.
- Choi DS, Jeong YM, Jang I, Jost-Brinkmann PG, Cha BK. (2010) Accuracy and reliability of palatal superimposition of three-dimensional digital models. *Angle Orthod.* 80(4): 685-91.
- Choi YJ, Chung CJ, Choy K, Kim KH. (2010) Absolute anchorage with universal T-loop mechanics and maxillary anterior protrusion and its 10-year stability. *Angle Orthod.* 80(4): 771-82.
- Choy K, Pae EK, Park Y, Kim KH, Burstone CJ. (2000) Effect of root and bone morphology on the stress distribution in the periodontal ligament. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 117(1): 98-105.
- Choy K, Pae EK, Kim KH, Park YC, Burstone CJ. (2002) Controlled space closure with a statically determinate retraction system. *Angle Orthod.* 72(3): 191-8.
- Choy K, Kim KH, Burstone CJ. (2006) Initial changes of centres of rotation of the anterior segment in response to horizontal forces. *Eur J Orthod.* 28(5): 471-4.
- Christiansen RL, Burstone CJ. (1969) Centers of rotation within the periodontal space. *Am J Orthod.* 55(4): 353-369.
- Codari M, Pucciarelli V, Pisoni L, Sforza C. (2015) Laser scanner compared with stereophotogrammetry for measurements of area on nasal plaster casts. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 53(8): 769-70.
- Cooke MS, Wei SHY. (1988) The reproducibility of natural head posture: A methodological study. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 93(4): 280-8.
- Creekmore TD, Eklund MK (1983) The possibility of skeletal anchorage. *J Clin Orthod.* 17(4): 266-9.
- Cummins DM, Bishara SE, Jakobsen JR. (1995) A computer assisted photogrammetric analysis of soft tissue changes after orthodontic treatment. Part II: Results. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 108(1): 38-47.
- da Costa ED, Roque-Torres GD, Brasil DM, Bóscolo FN, de Almeida SM, Ambrosano GMB. (2017) Correlation between the position of hyoid bone and subregions of the pharyngeal airway space in lateral cephalometry and cone beam computed tomography. *Angle Orthod.* 87(5): 688-95.
- Dausch-Neumann D. (1971) Biometgesicht und Kieferanomalie. *Fortschr Kieferorthop.* 32(3): 353-65.

Literaturverzeichnis

- de Almeida AM, Okada Ozawa T, de Medeiros Alves AC, Janson G, Pereira Lauris JR, Yatabe Ioshida MS, Gamba Garib D. (2017) Slow versus rapid maxillary expansion in bilateral cleft lip and palate: A CBCT randomized clinical trial. *Clin Oral Investig.* 21(5): 1789-99.
- de Clerck H, Nguyen T, Koerich de Paula L, Cevidanes L. (2012) Three-dimensional assessment of mandibular and glenoid fossa changes after bone-anchored Class III intermaxillary traction. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 142(1): 25-31.
- Delaire J. (1988) L'emploi physiologique des tractions extra-orales postéro-antérieures sur masque orthopédique dans le traitement des classes III. *Orthodontie Française.* 59: 577-89.
- Demir R, Baysal A. (2020) Three-dimensional evaluation of smile characteristics in subjects with increased vertical facial dimensions. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 157(6): 773-82.
- Downs WB. (1948) Variations in facial relationships: Their significance in treatment and prognosis. *Am J Orthod.* 34(10): 812-40.
- Düker J (2000) Röntgendiagnostik mit der Panoramaschichtaufnahme. Hüthig, Heidelberg.
- Duterloo HS, Planché PG. (2013) European board of orthodontists – An illustrated guide to prepare for the examination, 4th edition, pp. 8-65.
- El-Zanaty HM, El-Beialy AR, El-Ezz AMA, Attia KH, El-Bialy AR, Mostafa YA. (2010) Three-dimensional dental measurements: An alternative to plaster models. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 137(2): 259-65.
- Erverdi N, Özkan G. (1995) A cephalometric investigation of the effects of the elastic bite-block in the treatment of Class II division 1 malocclusion. *Eur J Orthod.* 17(5): 375-84.
- Eslami E, Barkhordar H, Abramovitch K, Kim J, Masoud MI. (2017) Cone-beam computed tomography vs conventional radiography in visualization of maxillary impacted-canine localization: A systematic review of comparative studies. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 151(2): 148-58.
- Fields HW, Vann WF, Vig KWL. (1982) Reliability of soft tissue profile analysis in children. *Angle Orthod.* 52(2): 159-65.
- Fink M, Medelnik J, Strobel K, Hirschfelder U, Hofmann E. (2014) Metric precision via soft-tissue landmarks in three-dimensional structured-light scans of human faces. *J Orofac Orthop.* 75(2): 133-43.

Literaturverzeichnis

- Fleming PS, Marinho V, Johal A. (2011) Orthodontic measurements on digital study models compared with plaster models: a systematic review. *Orthod Craniofac Res.* 14(1): 1-16.
- Fränkel R, Fränkel C. (1983) A functional approach to treatment of skeletal open bite. *Am J Orthod.* 84(1): 54-68.
- Gainsforth BL, Higley LB. (1945) A study of orthodontic anchorage possibilities in basal bone. *Am J Orthod Oral Surg.* 31(8): 406-16.
- Galén S, Jost-Brinkmann PG. (2010) B-mode and M-mode ultrasonography of tongue movements during swallowing. *J Orofac Orthop.* 71(2): 125-35.
- Godt A, Bechtold TE, Schaupp E, Zeyher C, Koos B, Baas E, Berneburg M. (2013) Correlation between occlusal abnormalities and parameters investigated by three-dimensional facial photography. *Angle Orthod.* 83(5): 782-9.
- Graber LW. (1977) Chin cup therapy for mandibular prognathism. *Am J Orthod.* 72(1): 23-41.
- Gray JB, Steen ME, King GJ, Clark AE. (1983) Studies on the efficacy of implants as orthodontic anchorage. *Am J Orthod.* 83(4): 311-7.
- Grayson B, Cutting C, Bookstein FL, Kim H, McCarthy JG. (1988) The three-dimensional cephalogram: Theory, technique, and clinical application. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 94(4): 327-37.
- Hagemann K, Vollmer D, Niegel T, Ehmer U, Reuter I. (2000) Prospective study on the reproducibility of cephalometric landmarks on conventional and digital lateral headfilms. *J Orofac Orthop.* 61(2): 91-9.
- Haubrich J, Schupp W. (2020) Orofacial orthopaedics: background and possibility of combination with aligners. *J Aligner Orthod.* 4(2): 111-42.
- Hardin AM, Valiathan M, Oh H, Knigge RP, McNulty KP, Leary EV, Duren DL, Sherwood RJ. (2020) Clinical implications of age-related change of the mandibular plane angle. *Orthod Craniofac Res.* 23(1): 50-58.
- Harrell WE. (2009) 3D diagnosis and treatment planning in orthodontics. *Semin Orthod.* 15(1): 35-41.
- Hellak AF, Kirsten B, Schauseil M, Davids R, Kater WM, Korbmacher-Steiner HM. (2015) Influence of maxillary advancement surgery on skeletal and soft-tissue changes in the nose – A retrospective cone-beam computed tomography study. *Head Face Med.* 11: 23.

Literaturverzeichnis

- Hellman M. (1944) Fundamental principles and expedient compromises in orthodontic procedures. *Am J Orthod Oral Surg.* 30(8): 429-36.
- Hilgers ML, Scarfe WC, Scheetz JP, Farman AG. (2005) Accuracy of linear temporomandibular joint measurements with cone beam computed tomography and digital cephalometric radiography. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 128(6): 803-11.
- Hirschfelder U. (2008) Radiologische 3D-Diagnostik in der Kieferorthopädie (CT/DVT). Stellungnahme der Deutschen Gesellschaft für Kieferorthopädie (DGKFO).
- Hocevar RA. (1981) Understanding, planning, and managing tooth movement: Orthodontic force system theory. *Am J Orthod.* 80(5): 457-77.
- Hocevar RA. (1982) Orthodontic force systems: Technical refinements for increased efficiency. *Am J Orthod.* 81(1): 1-11.
- Hofrath H. (1931) Die Bedeutung der Röntgenfern- und Abstandsaufnahme für die Diagnostik der Kieferanomalien. *Fortschr Orthodontik.* 1(2): 232-58.
- Holberg C, Steinhäuser S, Geis P, Rudzki-Janson I. (2005) Cone-beam computed tomography in orthodontics: Benefits and limitations. *J Orofac Orthop.* 66(6): 434-44.
- Holm M, Jost-Brinkmann PG, Mah J, Bumann A. (2016) Bone thickness of the anterior palate for orthodontic miniscrews. *Angle Orthod.* 86(5): 826-31.
- Hong H, Ngan P, Li HG, Qi LG, Wei SHY. (2005) Use of onplants as stable anchorage for facemask treatment: A case report. *Angle Orthod.* 75(3): 453-60.
- Hou D, Capote R, Bayirli B, Chan DCN, Huang G. (2020) The effect of digital diagnostic setups on orthodontic treatment planning. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 157(4): 152-9.
- Hourfar J, Lisson JA, Gross U, Frye L, Kinzinger GSM. (2018) Soft tissue profile changes after functional mandibular advancer or Herbst appliance treatment in class II patients. *Clin Oral Investig.* 22(2): 971-80.
- Huckaba GW. (1952) The physiologic basis of relapse: A review of the literature. *Am J Orthod.* 38(5): 335-50.
- Hupfauf L. (1987) Auswahl und Aufstellung der Seitenzähne. In: *Praxis der Zahnheilkunde* (Hrsg. Hupfauf L). Band 7: Totalprothesen. 2. Auflage. Urban und Schwarzenberg, München, Wien, Baltimore: 190f.

Literaturverzeichnis

- Hurd JJ, Nikolai RJ. (1976) Centers of rotation for combined vertical and transverse tooth movements. *Am J Orthod.* 70(5): 551-8.
- Hwang HS, Jiang T, Sun L, Lee KM, Oh MH, Biao Y, Oh HK, Bechtold TE. (2019) Condylar Head Remodeling compensating for Condylar Head Displacement by Orthognathic Surgery. *J Craniomaxillofac Surg.* 47(3): 406-13.
- Hwang HW, Park JH, Moon JH, Yu Y, Kim H, Her SB, Srinivasan G, Aljanabi MNA, Donatelli RE, Lee SJ. (2020) Automated identification of cephalometric landmarks: Part 2 – Might it be better than human? *Angle Orthod.* 90(1): 69-76.
- Ince-Bingol S, Kaya B, Bayram B, Arman-Ozcirpici A. (2020) Treatment efficiency of activator and skeletal anchored forsus fatigue resistant device appliances. *Clin Oral Investig.* [online ahead of print: published on 15 July 2020]
- Jacob HB, Buschang PH. (2014) Mandibular growth comparisons of Class I and Class II, division 1 skeletofacial patterns. *Angle Orthod.* 84(5): 755-61.
- Jacobson A. (1975) The “Wits” appraisal of jaw disharmony. *Am J Orthod.* 67(2): 125-38.
- Jäckel E. (1937) Kleiner Beitrag zur Orthodontie. *Dtsch Zahnärztl Wochenschr.* 40:855-856.
- Jiménez I, Villegas L, Salazar-Uribe JC, Álvarez LG. (2020) Facial growth changes in a Colombian Mestizo population: An 18-year follow-up longitudinal study using linear mixed models. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 157(3): 365-76.
- Kadesjö N, Lynds R, Nilsson M, Shi XQ. (2018) Radiation dose from x-ray examinations of impacted canines: cone beam CT vs two-dimensional imaging. *Dentomaxillofac Radiol.* 47(3): 20170305.
- Kanavakis G, Krooks L, Lähdesmäki R, Pirttiniemi P. (2019) Influence of overjet and overbite on soft tissue profile in mature adults: A cross-sectional population study. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 155(1): 57-63.
- Kanomi R. (1997) Mini-implant for orthodontic anchorage. *J Clin Orthod.* 31: 763-7.
- Kassenzahnärztliche Bundesvereinigung (KZBV). (2018) Leitfaden für KFO-Gutachter, 3.Auflage. KZBV, Köln.
- Kau CH, Richmond S, Zhurov A, Ovsenik M, Tawfik W, Borbely P, English JD. (2010) Use of 3-dimensional surface acquisition to study facial morphology in 5 populations. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 137(4 Suppl): S56.e1-9.

Literaturverzeichnis

- Kim J, Heo G, Lagravère MO. (2014) Accuracy of laser-scanned models compared to plaster models and cone-beam computed tomography. *Angle Orthod.* 84(3): 443-50.
- Kim SH, Lee JB, Kim MJ, Pang EK. (2018) Combining virtual model and cone beam computed tomography to assess periodontal changes after anterior tooth movement. *BMC Oral Health.* 18(1): 180.
- Kim SJ, Choi TH, Baik HS, Park YC, Lee KJ. (2014) Mandibular posterior anatomic limit for molar distalization. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 146(2): 190-7.
- Kim SY, Park YC, Lee KJ, Lintermann A, Han SS, Yu HS, Choi YJ. (2018) Assessment of changes in the nasal airway after nonsurgical miniscrew-assisted rapid maxillary expansion in young adults. *Angle Orthod.* 88(4): 435-41.
- Kinzinger G, Glden N, Yildizhan F, Hermanns-Sachweh B, Diedrich P. (2008) Anchorage efficacy of palatally-inserted miniscrews in molar distalization with a periodontally/miniscrew-anchored distal jet. *J Orofac Orthop* 69(2): 110-20.
- Kircelli BH, Pektas Z, Kircelli C. (2006) Maxillary molar distalization with a bone-anchored pendulum appliance. *Angle Orthod.* 76(4): 650-9.
- Kloehn SJ. (1947) Guiding alveolar growth and eruption of teeth to reduce treatment time and produce a more balanced denture and face. *Angle Orthod.* 17(1): 10-33.
- Krber E. (1994) Totalprothesen. In: Zahn-Mund-Kieferheilkunde, Lehrbuch zur Aus- und Fortbildung in 5 Bnden (Hrsg. Schwenzler N). Band 3: Prothetik und Werkstoffkunde. 2. berarbeitete und erweiterte Auflage. Georg Thieme Verlag, Stuttgart: 385.
- Korbmacher H, Kahl-Nieke B, Schllchen M, Heiland M. (2007) Value of two conebeam computed tomography systems from an orthodontic point of view. *J Orofac Orthop.* 68(4): 278-89.
- Korkhaus G. (1939) Gebi-, Kiefer- und Gesichtorthopdie. In: Bruhn C (Hrsg.), Handbuch der Zahnheilkunde, Band 4. Bergmann, München.
- Krneta Ðokic B, Zhurov A, Richmond S, Verdenik I, Ovsenik M. (2020) 3D soft-tissue evaluation of a Class III treatment with rapid maxillary expander and face mask in pre-pubertal phase – A retrospective cohort study. *Orthod Craniofac Res.* 23(3): 323-31.
- Kuijpers MAR, Maal TJJ, Meulstee JW, Carels CEL, Bronkhorst EM, Berg SJ, Fudalej PS. (2020) Nasolabial shape and aesthetics in unilateral cleft lip and palate: an analysis of nasolabial shape using a mean 3D facial template. *Int J Oral Maxillofac Surg.* [online ahead of print: published on 27 June 2020]

Literaturverzeichnis

- Kyung SH, Hong SG, Park YC. (2003) Distalization of maxillary molars with a midpalatal miniscrew. *J Clin Orthod.* 37(1): 22-6.
- Lee HH, Kim ST, Lee KJ, Baik HS. (2015) Effect of a second injection of botulinum toxin on lower facial contouring, as evaluated using 3-dimensional laser scanning. *Dermatol Surg.* 41(4): 439-44.
- Lee KJ, Joo E, Kim KD, Lee JS, Park YC, Yu HS. (2009) Computed tomography analysis of tooth-bearing alveolar bone for orthodontic miniscrew placement. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 135(4): 486-94.
- Lee KJ, Park YC, Hwang CJ, Kim YJ, Choi TH, Yoo HM, Kyung SH. (2011) Displacement pattern of the maxillary arch depending on miniscrew position in sliding mechanics. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 140(2): 224-32.
- Lee KJ, Kim SJ. (2018) Advanced biomechanics for total arch movement and non-surgical treatment for hyperdivergent faces. *Semin Orthod.* 24(1): 83-94.
- Lee RJ, Pham J, Choy M, Weissheimer A, Dougherty HL Jr, Sameshima GT, Tong H. (2014) Monitoring of tyodont root movement via crown superimposition of single cone-beam computed tomography and consecutive intraoral scans. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 145(3): 399-409.
- Leifert MF, Leifert MM, Efstratiadis SS, Cangialosi TJ. (2009) Comparison of space analysis evaluations with digital models and plaster dental casts. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 136(1): 16.e1-4.
- Lione R, Fusaroli D, Mucedero M, Paoloni V, Pavoni C, Cozza P. (2020) Changes in mandibular shape after early treatment in subjects with open bite: A geometric morphometric study. *Eur J Orthod.* Published online ahead of print: 2020 Jan 15.
- Lisson JA, Mokrys K, Kinzinger GSM, Glasl B, Ludwig B. (2013) Changes in soft-tissue profiles after treatment of class II/1 patients with bite-jumping appliances. *J Orofac Orthop.* 74(2): 113-23.
- Lundström A, Lundström F, Le Bret LML, Moorrees CFA. (1995) Natural head position and natural head orientation: basic considerations in cephalometric analysis and research. *Eur J Orthod.* 17(2): 111-120.
- Manglos SH, Bassano DA, Thomas FD. (1991) Cone-beam transmission computed tomography for nonuniform attenuation compensation of SPECT images. *J Nucl Med.* 32(9): 1813-20.

Literaturverzeichnis

- Martina R, D'Antò V, De Simone V, Galeotti A, Rongo R, Franchi L. (2020) Cephalometric outcomes of a new orthopaedic appliance for Class III malocclusion treatment. *Eur J Orthod.* 42(2): 187-92.
- Meach CL. (1966) A cephalometric comparison of bony profile changes in Class II, division 1 patients treated with extraoral force and functional jaw orthopedics. *Am J Orthod.* 52(5): 353-70.
- Mehnert J, Landau H, Mußler A, Reinicke J, Müller-Hartwich R, Orawa H, Jost-Brinkmann PG. (2009) Comparison between logopedic and MRI findings in evaluating tongue function. *J Orofac Orthop.* 70(6): 455-67.
- Michaelis J. (1998) Recent epidemiological studies on ionizing radiation and childhood cancer in Germany. *Int J Radiat Biol.* 73(4): 377-81.
- Miethke RR, Behm-Menthel A. (1988) Correlations between lower incisor crowding and lower incisor position and lateral craniofacial morphology. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 94(3): 231-9.
- Moon JH, Hwang HW, Lee SJ. (2020a) Evaluation of an automated superimposition method for computer-aided cephalometrics. *Angle Orthod.* 90(3): 390-6.
- Moon JH, Hwang HW, Yu Y, Kim MG, Donatelli RE, Lee SJ. (2020b) How much deep learning is enough for automatic identification to be reliable? A cephalometric example. *Angle Orthod.* Published online before print on 16th July 2020.
- Moorrees CFA. (1953) Normal variation and its bearing on the use of cephalometric radiographs in orthodontic diagnosis. *Am J Orthod.* 39(12): 942-50.
- Moorrees CFA, Yen PKJ. (1955) An analysis of changes in the dentofacial skeleton following orthodontic treatment. *Am J Orthod.* 41(7): 526-38.
- Moorrees CFA, Le Bret L. (1962) The mesh diagram and cephalometrics. *Angle Orthod.* 32(4): 214-31.
- Müller-Hartwich R, Präger TM, Jost-Brinkmann PG. (2007) SureSmile--CAD/CAM system for orthodontic treatment planning, simulation and fabrication of customized archwires. *Int J Comput Dent.* 10(1):53-62.
- Müller-Hartwich R, Jost-Brinkmann PG, Schubert K. (2016) Precision of implementing virtual setups for orthodontic treatment using CAD/CAM-fabricated custom archwires. *J Orofac Orthop.* 77(1): 1-8.
- Murugesan A, Sivakumar A. (2020) Comparison of accuracy of mesiodistal tooth measurements made in conventional study models and digital models obtained from intraoral scan and desktop scan of study models. *J Orthod.* 47(2): 149-55.

Literaturverzeichnis

- Nardi C, Talamonti C, Pallotta S, Saletti P, Calistri L, Cordopatri C, Colagrande S. (2017) Head and neck effective dose and quantitative assessment of image quality: a study to compare cone beam CT and multislice spiral CT. *Dentomaxillofac Radiol.* 46(7): 20170030.
- Nedwed V, Miethke RR. (2005) Motivation, acceptance and problems of Invisalign patients. *J Orofac Orthop.* 66(2): 162-73.
- Newton I. (1739) *Philosophiae naturalis principia mathematica: Tomus primus.* Geneva: p. 23.
- Nguyen T, Cevidanes L, Cornelis MA, Heymann G, de Paula LK, de Clerck H. (2011) Three-dimensional assessment of maxillary changes associated with bone anchored maxillary protraction. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 140(6): 790-8.
- Nikolai RJ. (1982) Analytical mechanics and analysis of orthodontic tooth movements. *Am J Orthod.* 82(2): 164-6.
- Oh MB, Mo SS, Hwang CJ, Chung C, Kang JM, Lee KJ. (2019) The 3-dimensional zone of the center of resistance of the mandibular posterior teeth segment. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 156(3): 365-74.
- Panagiotidis G, Witt E. (1977) Der individualisierte ANB-Winkel. *Fortschr Kieferorthop.* 38(4): 408-16.
- Pancherz H. (1982) The mechanism of Class II correction in Herbst appliance treatment. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 82(2): 104-13.
- Park HS, Bae SM, Kyung HM, Sung JH. (2001) Micro-implant anchorage for treatment of skeletal Class I bialveolar protrusion. *J Clin Orthod.* 35(7): 417-22.
- Park J, Choi DS, Jang I, Yook HT, Jost-Brinkmann PG, Cha BK. (2014) A novel method for volumetric assessment of tooth wear using three-dimensional reverse-engineering technology – A preliminary report. *Angle Orthod.* 84(4): 687-92.
- Park JH, Kim S, Lee YJ, Bayome M, Kook YA, Hong M, Kim Y. (2018) Three-dimensional evaluation of maxillary dentoalveolar changes and airway space after distalization in adults. *Angle Orthod.* 88(2): 187-194.
- Park JH, Hwang HW, Moon JH, Yu Y, Kim H, Her SB, Srinivasan G, Aljanabi MNA, Donatelli RE, Lee SJ. (2019) Automated identification of cephalometric landmarks: Part 1 – Comparisons between the latest deep-learning methods YOLOV3 and SSD. *Angle Orthod.* 89(6): 903-9.

Literaturverzeichnis

- Park JH, Kook YA, Kim YJ, Lee NK. (2020) Biomechanical considerations for total distalization of the maxillary dentition using TSADs. *Semin Orthod*. In Press. Published online 2020 Jul 1.
- Park JJ, Park YC, Lee KJ, Cha JY, Tahk JH, Choi YJ. (2017) Skeletal and dentoalveolar changes after miniscrew-assisted rapid palatal expansion in young adults: A cone-beam computed tomography study. *Korean J Orthod*. 47(2): 77-86.
- Park YC, Burstone CJ. (1986) Soft-tissue profile – Fallacies of hard-tissue standards in treatment planning. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 90(1): 52-62.
- Park YC, Lee SY, Kim DH, Jee SH. (2003) Intrusion of posterior teeth using mini-screw implants. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 123(6): 690-4.
- Passos L, Meiga S, Brigagao V, Street A. (2019) Impact of different scanning strategies on the accuracy of two current intraoral scanning systems in complete-arch impressions: an in vitro study. *Int J Comput Dent*. 22(4): 307-19.
- Pearce MS, Salotti JA, Little MP, McHugh K, Lee C, Kim KP, Howe NL, Ronckers CM, Rajaraman P, Craft AW, Parker L, Berrington de González A. (2012) Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet*. 380(9840): 499-505.
- Peck S, Peck L, Kataja M. (1992) Some vertical lineaments of lip position. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 101(6): 519-24.
- Peng CL, Jost-Brinkmann PG, Yoshida N, Miethke RR, Lin CT. (2003) Differential diagnosis between infantile and mature swallowing with ultrasonography. *Eur J Orthod*. 25(5): 451-6.
- Peng CL, Jost-Brinkmann PG, Yoshida N, Chou HH, Lin CT. (2004) Comparison of tongue functions between mature and tongue-thrust swallowing – An ultrasound investigation. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 125(5): 562-70.
- Peroz I, Seidel A, Griethe M, Lemke AJ. (2011) MRI of the TMJ: Morphometric comparison of asymptomatic volunteers and symptomatic patients. *Quintessence Int*. 42(8): 659-67.
- Präger TM, Brochhagen HG, Mußler A, Mischkowski R, Jost-Brinkmann PG, Müller-Hartwich R. (2013) Investigation of bone conditions for orthodontic anchorage plates in the anterior mandible. *J Orofac Orthop*. 74(5): 409-19.
- Präger TM, Brochhagen HG, Mischkowski R, Jost-Brinkmann PG, Müller-Hartwich R. (2014) Bone condition of the maxillary zygomatic process prior to orthodontic anchorage plate fixation. *J Orofac Orthop*. 76(1): 3-13.

Literaturverzeichnis

- Proffit WR. (1978) Equilibrium theory revisited: Factors influencing position of the teeth. *Angle Orthod.* 48(3): 175-86.
- Radeke J, von der Wense C, Lapatki BG. (2014) Comparison of orthodontic measurements on dental plaster casts and 3D scans. *J Orofac Orthop.* 75(4): 264-74.
- Ramanauskaitė A, Becker K, Kassira HC, Becker J, Sader R, Schwarz F. (2020) The dimensions of the facial alveolar bone at tooth sites with local pathologies: A retrospective cone-beam CT analysis. *Clin Oral Investig.* 24(4): 1551-60.
- Ricketts RM. (1968) Esthetics, environment, and the law of lip relation. *Am J Orthod.* 54(4): 272-89.
- Riedel RA. (1952) The relation of maxillary structures to cranium in malocclusion and in normal occlusion. *Angle Orthod.* 22(3): 142-5.
- Riedel RA. (1957) An analysis of dentofacial relationships. *Am J Orthod.* 43(2): 103-19.
- Riolo ML, Moyers RE, McNamara JA, Hunter WS. (1974) *An atlas of craniofacial growth.* University of Michigan, Ann Arbor.
- Ritschel R, Bechtold TE, Berneburg M. (2013) Effect of cephalograms on decisions for early orthodontic treatment. *Angle Orthod.* 83(6): 1059-1065.
- Ritschl LM, Roth M, Fichter AM, Mittermeier F, Kuschel B, Wolff KD, Grill FD, Loeffelbein DJ. (2018) The possibilities of a portable low-budget three-dimensional stereophotogrammetry system in neonates: A prospective growth analysis and analysis of accuracy. *Head Face Med.* 14(1): 11.
- Ritschl LM, Wolff KD, Erben P, Grill FD. (2019) Simultaneous, radiation-free registration of the dentoalveolar position and the face by combining 3D photography with a portable scanner and impression-taking. *Head Face Med.* 15: 28.
- Roberts SD, Kapadia H, Greenlee G, Chen ML. (2016) Midfacial and dental changes associated with nasal positive airway pressure in children with obstructive sleep apnea and craniofacial conditions. *J Clin Sleep Med.* 12(4): 469-75.
- Roberts WE, Smith RK, Zilberman Y, Mozsary PG, Smith RS. (1984) Osseous adaptation to continuous loading of rigid endosseous implants. *Am J Orthod.* 86(2): 95-111.
- Roberts WE, Helm FR, Marshall KJ, Gongloff RK. (1989) Rigid endosseous implants for orthodontic and orthopedic anchorage. *Angle Orthod.* 59(4): 247-56.

Literaturverzeichnis

- Roberts WE, Marshall KJ, Mozsary PG. (1990) Rigid endosseous implant utilized as anchorage to protract molars and close an atrophic extraction site. *Angle Orthod.* 60(2): 135-52.
- Roux W. (1920) Bemerkungen zur Analyse des Reizgeschehens und der funktionellen Anpassung sowie zum Anteil dieser Anpassung an der Entwicklung des Reiches der Lebewesen. *Arch Entw Mech.* 46: 487ff.
- Sakamoto T, Iwase I, Uka A, Nakamura S. (1984) A roentgenocephalometric study of skeletal changes during and after chin cup treatment. *Am J Orthod.* 85(4): 341-50.
- Schmid-Schwap M, Drahanowsky W, Bristela M, Kundi M, Piehslinger E, Robinson S. (2009) Diagnosis of temporomandibular dysfunction syndrome – image quality at 1.5 and 3.0 Tesla magnetic resonance imaging. *Eur Radiol.* 19(5): 1239-45.
- Schmidt A, Klusmann L, Wöstmann B, Schlenz MA. (2020) Accuracy of digital and conventional full-arch impressions in patients: An update. *J Clin Med.* 9(3): 688.
- Schopf P. (1990) *Curriculum Kieferorthopädie*. Quintessenz, Berlin, Chicago, London, São Paulo, Tokio.
- Schudy FF. (1965) The rotation of the mandible resulting from growth: Its implications in orthodontic treatment. *Angle Orthod.* 35(1): 36-50.
- Schulz D, Bührmann K. (1987) Pathologische Veränderungen der Kieferhöhle – wichtige Nebenfunde bei der kieferorthopädischen Röntgendiagnostik. *Fortschr Kieferorthop.* 48(4): 298–312.
- Schulze Ch. (1980) *Lehrbuch der Kieferorthopädie, Band 1*. Quintessenz Verlag, Berlin.
- Schulze D, Heiland M, Thurmann H, Adam G. (2004) Radiation exposure during midfacial imaging using 4- and 16-slice computed tomography, cone beam computed tomography systems and conventional radiography. *Dentomaxillofac Radiol.* 33(2): 83-6.
- Schwarz AM. (1958) *Die Röntgenostatik*. Urban und Schwarzenberg, Wien, Innsbruck.
- Schwarz AM. (1961a) *Lehrgang der Gebißregelung*. Urban und Schwarzenberg, Wien.
- Schwarz AM. (1961b) Roentgenostatics. A practical evaluation of the x-ray headplate. *Am J Orthod.* 47(8): 561-85.
- Schwendicke F, Golla T, Dreher M, Krois J. (2019) Convolutional neural networks for dental image diagnostics: A scoping review. *J Dent.* 91.

Literaturverzeichnis

- Seo HJ, Denadai R, Vamvanij N, Chinpaisarn C, Lo LJ. (2020) Primary rhinoplasty does not interfere with nasal growth: A long-term three-dimensional morphometric outcome study in patients with unilateral cleft. *Plast Reconstr Surg.* 145(5): 1223-36.
- Sforza C, de Menezes M, Ferrario VF. (2013) Soft- and hard-tissue facial anthropometry in three dimensions: what's new. *J Anthropol Sci.* 91: 159-84.
- Shah AH, Shah DH. (2016) Miniscrew implant-supported Frog® appliance for maxillary molar distalization. *J World Fed Orthod.* 5(1): 35-43.
- Sherman AJ. (1978) Bone reaction to orthodontic forces on vitreous carbon dental implants. *Am J Orthod.* 74(1): 79-87.
- Shi KK, Kim JY, Choi TH, Lee KJ. (2014) Timely relocation of subapically impacted maxillary canines and replacement of an ankylosed mandibular molar are the keys to eruption disturbances in a prepubertal patient. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 145(2): 228-37.
- Shi J, Lee S, Pan HC, Mohammad A, Lin A, Guo W, Chen E, Ahn A, Li J, Ting K, Kwak JH. (2017) Association of condylar bone quality with TMJ osteoarthritis. *J Dent Res.* 96(8): 888-94.
- Signorelli L, Patcas R, Peltomäki T, Schätzle M. (2016) Radiation dose of cone-beam computed tomography compared to conventional radiographs in orthodontics. *J Orofac Orthop.* 77(1): 9-15.
- Steiner CC. (1953) Cephalometrics for you and me. *Am J Orthod.* 39(10): 729-55.
- Steiner CC. (1959) Cephalometrics in clinical practice. *Angle Orthod.* 29(1): 8-29.
- Stephens CK, Boley JC, Behrents RG, Alexander RG, Buschang PH. (2005) Long-term profile changes in extraction and nonextraction patients. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 128(4): 450-7.
- Stöckel K, Lapatki BG, Elkholy F. (2018) Genauigkeit und Zeitersparnis der automatischen Zahnbreitenmessung am digitalen 3D-Kiefermodell. *J Orofac Orthop.* 79(5): 361-2.
- Sugawara J, Asano T, Endo N, Mitani H. (1990) Long-term effects of chin-cap therapy on skeletal profile in mandibular prognathism. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 98(2): 127-33.
- Sugawara J, Mitani H. (1997) Facial growth of skeletal Class III malocclusion and the effects, limitations, and long-term dentofacial adaptations to chin-cap therapy. *Semin Orthod.* 3(4): 244-54.

Literaturverzeichnis

- Sugawara J, Baik UB, Umemori M, Takahashi I, Nagasaka H, Kawamura H, Mitani H. (2002) Treatment and posttreatment dentoalveolar changes following intrusion of mandibular molars with application of a skeletal anchorage system (SAS) for open bite correction. *Int J Adult Orthod Orthognath Surg.* 17(4): 243-53.
- Sugawara J, Nishimura M. (2005) Minibone plates: The skeletal anchorage system. *Semin Orthod.* 11(1): 47-56.
- Tomà P, Bartoloni A, Salerno S, Granata C, Cannatà V, Magistrelli A, Arthurs OJ. (2019) Protecting sensitive patient groups from imaging using ionizing radiation: effects during pregnancy, in fetal life and childhood. *Radiol Med.* 124(8): 736-44.
- Tonn P. (1937) Über die mesiodistalen Zahnbreitenrelationen der Zähne des Oberkiefers zu den entsprechenden des Unterkiefers bei normaler und anormaler Okklusion. *Med. Dissertation, Berlin.*
- Tweed CS. (1946) The Frankfort-mandibular plane angle in orthodontic diagnosis, classification, treatment planning, and prognosis. *Am J Orthod.* 32(4): 175-230.
- Tyan S, Park HS, Janchivdorj M, Han SH, Kim SJ. (2015) Three-dimensional analysis of molar compensation in patients with facial asymmetry and mandibular prognathism. *Angle Orthod.* 86(3): 421-30.
- Umemori M, Sugawara J, Mitani H, Nagasaka H, Kawamura H. (1999) Skeletal anchorage system for open-bite correction. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 115(2): 166-74.
- Verma RK, Singh SP, Verma S, Kumar V, Bhupali NR, Arora S. (2019) Comparison of reliability, validity, and accuracy of linear measurements made on pre- and posttreatment digital study models with conventional plaster study models. *J Orthod Sci.* 8: 18.
- Voigt S. (2018) Vergleichende Untersuchungen zur kephalometrischen Auswertbarkeit von konventionellen Fernröntgenseitenbildern und aus IADR-DVT-Datensätzen rekonstruierten Fernröntgenansichten (IADR-DVT = indikationsabhängige dosisreduzierte Digitale Volumentomographie). *Med. Dissertation, Berlin.*
- Vig PS, Hewitt AB. (1975) Asymmetry of the human facial skeleton. *Angle Orthod.* 45(2): 125-9.
- Wasserstein A, Shpack N, Yoseph YB, Geron S, Davidovitch M, Vardimon A. (2015) Comparison of lateral photographic and radiographic sagittal analysis in relation to Angle's classification. *J Orofac Orthop.* 76(4): 294-304.

Literaturverzeichnis

- Wehrbein H, Glatzmaier J, Mundwiller U, Diedrich P. (1996a) The Orthosystem – A new implant system for orthodontic anchorage in the palate. *J Orofac Orthop.* 57(3): 142-53.
- Wehrbein H, Merz BR, Diedrich P, Glatzmaier J. (1996b) The use of palatal implants for orthodontic anchorage. Design and clinical application of the orthosystem. *Clin Oral Implants Res.* 7(4): 410-6.
- Wehrbein H, Merz BR, Diedrich P. (1999) Palatal bone support for orthodontic implant anchorage – A clinical and radiological study. *Eur J Orthod.* 21(1): 65-70.
- Weinstein S, Haack DC, Morris LY, Snyder BB, Attaway HE. (1963) On an equilibrium theory of tooth position. *Angle Orthod.* 33(1): 1-26.
- Wilmes B, Drescher D, Nienkemper M. (2009) A miniplate system for improved stability of skeletal anchorage. *J Clin Orthod.* 43(8): 494-501.
- Wright CF. (1939) A consideration of the anchorage problem. *Angle Orthod.* 9(4): 152-9.
- Xiao Z, Liu Z, Gu Y. (2020) Integration of digital maxillary dental casts with 3D facial images in orthodontic patients: A three-dimensional validation study. *Angle Orthod.* 90(3): 397-404.
- Yamaguchi K, Nanda RS. (1991) The effects of extraction and nonextraction treatment on the mandibular position. *Am J Orthop Dentofac Orthop.* 100(5): 443-52.
- Yatabe M, Prieto JC, Styner M, Zhu H, Ruellas AC, Paniagua B, Budin F, Benavides E, Shoukri B, Michoud L, Ribera N, Cevidanes L. (2019) 3D superimposition of craniofacial imaging – The utility of multicentre collaborations. *Orthod Craniofac Res.* 22(Suppl. 1): 213-20.
- Yi CR, Kim MJ, Kim SC, Gaxiola-García M, Jeong WS, Koh KS, Huh CH, Kim HJ, Lee WS, Choi JW. (2020) Comparison of facial proportions between eastern and western attractive young women. *J Craniofac Surg.* 31(3): e303-6.
- Yoon JH, Yu HS, Choi YJ, Choi TH, Choi SH, Cha JY. (2018) Model analysis of digital models in moderate to severe crowding: In vivo validation and clinical application. *Biomed Res Int.* 2018: 8414605. Published online 2018 Jan 14.
- You KH, Kim KH, Lee KJ, Baik HS. (2018) Three-dimensional computed tomography analysis of mandibular morphology in patients with facial asymmetry and mandibular retrognathism. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 153(5): 685-91.

Literaturverzeichnis

Zhang F, Lee SC, Lee JB, Lee KM. (2019) Geometric analysis of alveolar bone around the incisors after anterior retraction following premolar extraction. *Angle Orthod.* 90(2): 173-80.

Danksagung

Zu allererst gehört mein Dank Herrn Prof. Dr. Paul-Georg Jost-Brinkmann, Direktor der Abteilung für Kieferorthopädie, Orthodontie und Kinderzahnmedizin des CharitéCentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, der mir sein Vertrauen schenkte und mich stets in meinem akademischen Streben bestärkte. Mit seiner Unterstützung konnte ich mein klinisches und wissenschaftliches Können weiter ausbauen.

Selbstverständlich gehört mein herzlicher Dank auch meinem kieferorthopädischen Lehrer Herrn Prof. Dr. Dr. Gernot R. Göz, vormals Ärztlicher Direktor der Poliklinik für Kieferorthopädie des ZZMK Tübingen. Nicht nur verdanke ich ihm mein fachliches Wissen, sondern er hat mich auch in die Welt der akademischen Zahnheilkunde eingeführt und mich stets in meinem klinischen und wissenschaftlichen Streben unterstützt. Durch seine Ideen gab er meiner wissenschaftlichen Entwicklung die entscheidende Richtung.

In ähnlicher Weise gilt mein herzlicher Dank meinen koreanischen Lehrern Herrn Prof. Dr. Young-Chel Park, Professor emeritus des Department of Orthodontics der Yonsei University in Seoul / Korea, sowie Herrn Prof. Dr. Kee-Joon Lee, Lehrstuhlinhaber des Department of Orthodontics der Yonsei University in Seoul / Korea, die mich warmherzig in ihre akademische Familie aufnahmen, woraus sich persönlich und wissenschaftlich dauerhafte Freundschaften entwickelten.

Mein ganz herzlicher Dank gilt ebenso meinen amerikanischen Lehrern Herrn Prof. Dr. Eiki Koyama, Associate Professor in Orthopaedic Surgery, und Frau Prof. Dr. Hyun-Duck Nah, Ärztliche Direktorin in Craniofacial Orthodontics, vom Children's Hospital of Philadelphia (CHOP) in Philadelphia, PA / USA, die mich in die Welt der grundlagenwissenschaftlichen Forschung einführten und mich ebenfalls sehr warmherzig in allen Belangen unterstützten. Auch diese Freundschaften haben mein Leben enorm bereichert.

Danksagung

Nicht zuletzt danke ich insbesondere den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Tübinger Poliklinik für Kieferorthopädie und der Berliner Abteilung für Kieferorthopädie, Orthodontie und Kinderzahnmedizin, sowie zahlreichen weiteren Weggefährten, deren kollegiale Zusammenarbeit mir im Laufe der Jahre viel Freude bereitet hat.

Meine Eltern und mein privates Umfeld verdienen meinen außerordentlichen Dank, unter anderem dafür, dass sie mir bei aller zeitlichen Einschränkung unter Verfolgung meiner Interessen stets den Rücken frei gehalten und mich unterstützt haben.

Erklärung

gem. § 4 Abs. 3 (k) der HabOMed der Charité

Hiermit erkläre ich, dass

- weder früher noch gleichzeitig ein Habilitationsverfahren durchgeführt oder angemeldet wurde,
- die vorgelegte Habilitationsschrift ohne fremde Hilfe verfasst, die beschriebenen Ergebnisse selbst gewonnen sowie die verwendeten Hilfsmittel, die Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern/Wissenschaftlerinnen und mit technischen Hilfskräften sowie die verwendete Literatur vollständig in der Habilitationsschrift angegeben wurden,
- mir die geltende Habilitationsordnung bekannt ist.

Ich erkläre ferner, dass mir die Satzung der Charité - Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis bekannt ist und ich mich zur Einhaltung dieser Satzung verpflichte.

Ort, Datum